
Научная статья

УДК 621.791

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-41-50

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУФАБРИКАТА ИЗ НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ, ТИТАНОВЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ

М.С. Яшин¹, Д.В. Капитаненко¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Проведен анализ ряда работ, в которых описывается современное состояние изготовления продукции методом сварки давлением из различных конструкционных материалов, используемых в авиационной промышленности. На основании этого анализа сформированы необходимые этапы подготовки свариваемых заготовок для получения сварного шва требуемого качества. Уровень свойств и структура полученного соединения удовлетворительно отвечают требованиям как в случае с титановыми и алюминиевыми сплавами, так и жаропрочными никелевыми сплавами.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, титановые сплавы, алюминиевые сплавы, обработка давлением, горячее изостатическое прессование, газотурбинные двигатели, сварка давлением

Для цитирования: Яшин М.С., Капитаненко Д.В. Особенности производства полуфабриката из никелевых жаропрочных, титановых и алюминиевых сплавов методом сварки давлением // Труды ВИАМ. 2026. № 1 (155). С. 41–50. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-41-50.

Scientific article

FEATURES OF THE PRODUCTION OF SEMI-FINISHED PRODUCTS FROM HEAT-RESISTANT NICKEL, TITANIUM AND ALUMINUM ALLOYS BY PRESSURE WELDING

M.S. Yashin¹, D.V. Kapitanenko¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The article analyzes a number of works describing the current state of manufacturing products by pressure welding from various structural materials used in the aviation industry. Based on this analysis, the necessary preparation stages of welded blanks were formed to obtain the required weld quality. The level of properties and the structure of the resulting joints satisfactorily meet the requirements for both titanium and aluminum alloys, as well as heat-resistant nickel alloys.

Keywords: heat-resistant nickel alloys, titanium alloys, aluminum alloys, pressure processing, hot isostatic pressing, gas turbine engines, pressure welding

For citation: Yashin M.S., Kapitanenko D.V. Features of the production of semi-finished products from heat-resistant nickel, titanium and aluminum alloys by pressure welding. *Trudy VIAM*, 2026, no. 1 (155), pp. 41–50. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-41-50.

Введение

В настоящее время особо актуальной является проблема переработки и использования металлических отходов в машиностроительном производстве. В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ ведутся работы по оптимизации изготовления такой продукции, уменьшению негативного воздействия на окружающую среду и снижению расходов. Очень часто в кузнечно-штамповом производстве используются крупногабаритные полуфабрикаты, которые нарезают в соответствии с требуемыми размерами для производства поковок и штамповок. Однако зачастую после таких операций остаются отходы прутка, размеры или форма которых не удовлетворяют необходимым требованиям для изготовления кондиционной продукции.

Утилизация обрезков полуфабриката экономически нецелесообразна, поэтому в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ ищут способы возможного повторного использования отходов прутков в производстве. Переплавка таких обрезков сопряжена с рядом сложностей. Например, необходимо производить сложную подготовку сырья, которая включает очистку, сепарацию и резку обрезков до необходимых размеров. Кроме того, изготавливаемая продукция требует определенных значений свойств, таких как размер зерна, длительная и кратковременная прочность, сопротивление разрыву и т. д. [1]. Для получения требуемых характеристик необходимо использовать высокотехнологичные и дорогостоящие методы переplava.

В качестве альтернативного метода повторного использования обрезков прутков в кузнечно-штамповом производстве рассматривается сварка давлением, при помощи которой можно получать цельные заготовки требуемого размера из нескольких обрезков полуфабрикатов. Сварка давлением – это процесс, при котором сварное соединение образуется в результате деформации в области контакта двух металлических поверхностей [2]. Основное значение при такой сварке имеет давление, которое прилагается на стыках соединения. Именно оно активизирует силы сцепления в результате пластической деформации [3]. В этом процессе важен нагрев металла, однако существуют технологии применения сварки без нагрева.

Исходя из этого, сварка давлением может быть классифицирована в зависимости от температуры:

- холодная сварка при комнатной температуре;
- сварка при высокой температуре без оплавления, т. е. металл подогревается до температур, достаточных для осуществления сварки, однако не подвергается расплавлению;
- сварка при высокой температуре с оплавлением металла.

Процесс сварки давлением при высоких температурах состоит из двух операций: нагрев области соединения свариваемых заготовок до требуемой температуры (нагрев может осуществляться путем химической реакции, трения, электроэнергии, в печах и т. д.), последующая осадка путем приложения нагрузки к соединяемым частям, что вызывает в нагретом металле пластическую деформацию, которая провоцирует сцепление, приводящее к сращиванию материала [4, 5].

При сварке давлением выдвигаются особые требования к свариваемым поверхностям. Одной из основных проблем при сварке давлением является образование оксидных пленок на поверхностях заготовок. Они приводят к охрупчиванию сварного соединения и ухудшению прочих свойств [2]. Поэтому для образования надежного сварного соединения с требуемыми механическими свойствами необходимо либо избежать образования оксидных пленок, либо прибегнуть к их разрушению.

Кроме того, изготавливаемая продукция, которая находит применение в авиационной, космической и энергетической промышленности, должна соответствовать высокому уровню свойств [6, 7], т. е. обладать функционально-градиентными характеристиками, которые достигаются при определенной структуре [8]. В частности, для соответствия требуемой структуре необходимо получить мелкое зерно при выделении упрочняющей

γ' -фазы определенного размера [9, 10]. Одной из технологий, которая позволяет получить требуемые функционально-градиентные характеристики в изготавливаемых полуфабрикатах, является сварка давлением.

Основная цель данной работы – анализ современных технологических решений при осуществлении операции сварки давлением. Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Обзор технологий получения полуфабриката путем сварки давлением *Сварка давлением алюминиевых и титановых сплавов*

В работе [11] представлены результаты экспериментов, которые проводились на титановых и алюминиевых сплавах, используемых в авиационной и космической технике [12]. Эти сплавы обладают мелкозернистой структурой, что обеспечивает им требуемые характеристики, а также устойчивость к длительной горячей обработке давлением.

Перед сваркой давлением заготовки подвергали предварительной обработке для подготовки поверхностей. Контактные зоны алюминиевых заготовок протравливали в азотной кислоте, а затем промывали и сушили. Далее следовала ионная обработка в среде аргона, после чего на контактные поверхности напыляли медное покрытие толщиной 0,5–0,7 мкм. Поверхности титановых заготовок зачищали при помощи металлических щеток, а после промывали в бензине.

Сварку алюминиевых заготовок производили в вакуумной пресс-камере при давлении $133,3 \cdot 10^{-4}$ Па и температуре 510–530 °С, сварку титановых заготовок – при давлении $133,3 \cdot 10^{-3}$ – $133,3 \cdot 10^{-2}$ Па и температуре 875–930 °С. Окисленные слои на контактных поверхностях растворяли в среде инертных газов или в вакууме.

Результаты экспериментов показали [11], что наиболее благоприятные условия для сварки давлением создаются после ионного травления поверхностей вместе с нанесением тонкого слоя меди. Исследование сварного шва показало образование общих зерен по большей части соединения. После термообработки, включающей закалку при 450 °С и старение при 110 °С в течение 10 ч с охлаждением на воздухе, прочность сварного шва приблизилась к прочности исходного материала. Произошла взаимная диффузия материалов, о чем свидетельствует прерывистая граница раздела сопрягаемых материалов в месте сварки (рис. 1).

Эксперименты по сварке титана показали, что качество сварного шва, полученного в вакууме и в аргоне, практически идентично. Наблюдается сплошная зона соединения, в которой присутствуют общие зерна. Прочность сварного шва сопоставима с прочностью материала заготовки. В работе [11] выявлена зависимость давления от продолжительности выдержки. В случае титановых сплавов с увеличением этой выдержки в процессе сварки давление уменьшается.



Рис. 1. Структура материала в зоне сварного соединения алюминия (а, б) и титана (е) [11]

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проводились работы по сварке давлением титановых жаропрочных сплавов [13]. Высокая трудоемкость и сложность процессов изготовления деталей, применяющихся в авиакосмической промышленности, заставляют искать альтернативные, более технологичные способы изготовления полуфабрикатов. Одно из таких технологических решений – использование сварки давлением, которая уменьшает время и затраты на изготовление продукции.

Эксперименты проводили на составных заготовках типа «диск–диск», которые изготавливали из двух типов титановых сплавов: центральную часть дискового полуфабриката – из сплава типа ВТ8, в то время как для лопаточной периферийной зоны выбрали сплав типа ВТ8М-1. Для того чтобы получить необходимую структуру, исходные заготовки подвергали предварительной обработке в виде всестороннейковки в $(\alpha + \beta)$ -области со значениями степени деформации не менее 50 %, поскольку однородность структуры материалов после обработки давлением напрямую зависит от величины степени деформации. Охлаждение заготовок осуществляли на воздухе [13].

Для недопущения окисления поверхностей соединяемых заготовок необходимо обеспечить надлежащую защиту. В условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ наиболее оптимальным способом защиты области соединения от окисления является предварительная пайка соединяемых поверхностей. Для осуществления этой операции использовали припой ВПр16 [14]. Применение припоя позволило обеспечить должное качество паяного соединения, чтобы не было несплошностей и непропаев [13]. Оценку пайки производили при помощи визуального контроля.

Сварку давлением осуществляли в три этапа. Первый этап включал предварительную деформацию составных заготовок в изотермических условиях. Для создания максимального давления в зоне соединения осадку заготовок проводили в закрытом контейнере. Следующим этапом являлось диффузионное соединение заготовок методом горячего изостатического прессования. Конечную изотермическую деформацию проводили на прессе, оснащенной установкой индукционного нагрева, в закрытом контейнере. Заготовка, полученная в результате сварки давлением, показана на рис. 2 [13].



Рис. 2. Составная заготовка из сплавов ВТ8 и ВТ8М-1 после заключительной изотермической деформации [13]

Из зоны сварного шва вырезали образцы, на которых исследовали микроструктуру. Изучение образцов показало наличие сформировавшейся дифференцированной структуры. В области диска обнаружена структура с полностью рекристаллизованной β -фазой и пластинчатой морфологией выделений низкотемпературной α -фазы (рис. 3). Такая структура обеспечивает увеличение вязкости разрушения, способность сопротивляться малоциклового усталости и ползучести. В лопаточной части заготовки морфология структуры глобулярно-пластинчатая с выделениями α -фазы, которая также приводит к улучшению сопротивляемости многоциклической усталости и ползучести.

Иными словами, полученное при помощи сварки давлением изделие обладает оптимальной структурой в дисковых и лопаточных частях полуфабриката [13].

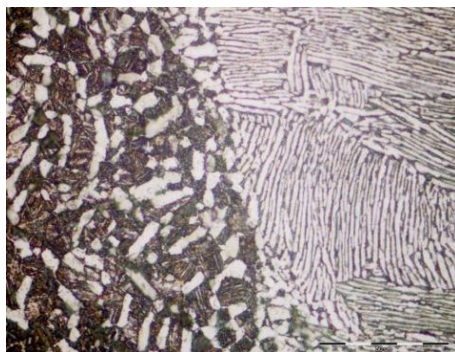


Рис. 3. Микроструктура ($\times 1000$) зоны соединения составной заготовки типа «диск–диск» (левая часть – сплав VT8M-1, правая часть – сплав VT8)

Кроме того, проведены испытания на прочность образцов, вырезанных из области сварного шва. При испытании выявлено, что значения кратковременной прочности сварного соединения соответствуют значениям для сплавов типа VT8 и VT8M-1. Разрушение образцов проходило вне линии сварного шва, на участке сплава VT8M-1 (рис. 4).



Рис. 4. Образцы из титановых сплавов VT8 и VT8M-1 из зоны соединения после испытаний на кратковременный разрыв [13]

Сварка давлением жаропрочных никелевых сплавов

В работе [15] представлены результаты экспериментов по сварке давлением заготовок из высоколегированных никелевых сплавов ЭП975 и ЭК61 с разным типом упрочняющей фазы, изучена микроструктура твердосплавного сварного соединения.

Перед сваркой заготовки предварительно подготовлены – в частности, получена мелкозернистая микроструктура микродулекс на образцах из сплава ЭП975 с упрочняющей γ' -фазой и ультрамелкозернистая структура на образцах из сплава ЭК61, упрочняемая γ'' -фазой на основе интерметаллида Ni_3Nb . Сварку давлением осуществляли в вакууме в специальном герметичном контейнере. Скорость деформации составляла 10^{-4} с^{-1} , поддерживалась температура $\sim 925 \text{ }^\circ\text{C}$. Проведены два эксперимента: сварке давлением подвергли два цилиндрических образца под воздействием нормальных сжимающих напряжений и заготовки типа «диск–вал», где действуют касательные сжимающие напряжения (рис. 5) [15].

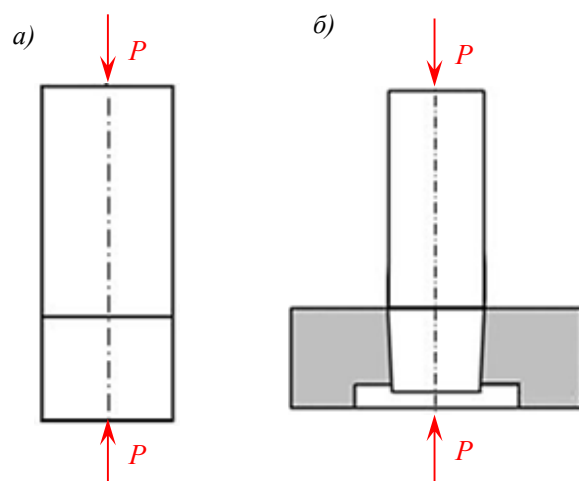


Рис. 5. Схема сварки давлением цилиндрических (а) и модельных образцов по схеме «диск–вал» (б) [15]

Анализ сварного соединения показал, что бóльшая часть деформации приходится на менее прочный сплав ЭК61 с ультрамелкозернистой структурой. Это объясняется возникновением эффекта низкотемпературной сверхпластичности при сварке давлением в интервале температур 750–925 °С для сплава ЭК61, в то время как более жаропрочный сплав ЭП975 практически не деформировался. Его морфология и размер фаз не претерпели значительных изменений относительно исходных структур.

В обоих экспериментах получено твердофазное соединение. На рис. 6 отчетливо видна линия соединения между сплавами. Относительная протяженность пор составляет <15 %.

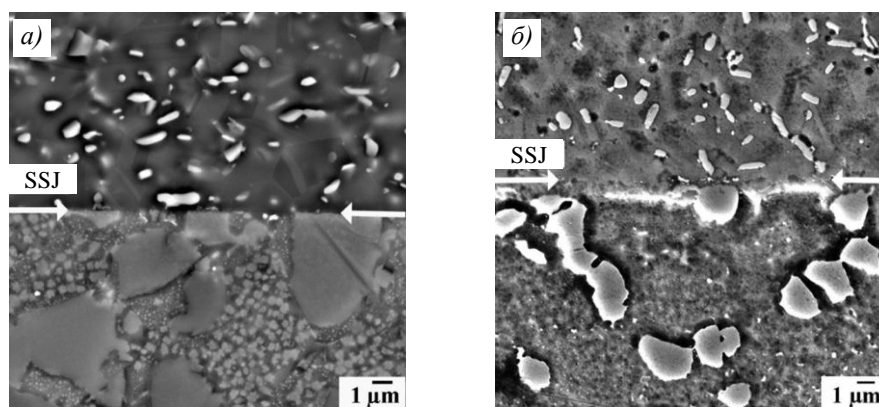


Рис. 6. Микроструктура зоны твердофазного сварного соединения после сварки давлением при различных схемах [15]: а – цилиндрические образцы; б – модельные образцы по схеме «диск–вал»

Фаза δ частично растворилась в процессе сварки давлением при температуре 925 °С, ее доля значительно уменьшилась по сравнению с изначальным состоянием. Химический состав материала в зоне сварного шва – промежуточный по содержанию легирующих элементов между химическими составами сплавов исходных заготовок. При сварке давлением по схеме «диск–вал» образуется более плавная и широкая зона диффузионного взаимодействия по сравнению со сваркой двух цилиндрических образцов.

Эти эксперименты показали, что обе схемы сварки давлением приводят к формированию твердофазного сварного соединения, отвечающего требуемым параметрам.

Между сплавами ЭП975 и ЭК61 создается переходная диффузионная область в зоне сварного шва. Иными словами, сварка давлением как по схеме «диск–вал», так и между двумя цилиндрами, является эффективным способом получения качественного соединения [15].

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ проводилось изучение сварки давлением никелевых жаропрочных сплавов. В частности, в работе [13] представлены результаты изготовления полуфабриката типа «диск–вал» из сплавов типа ЭП975-ИД и ЭП742-ИД. Перед операцией сварки давлением обе исходные заготовки проходили этап подготовки, который заключался во всесторонней ковке при температурах, которые соответствуют температуре ниже полного растворения γ' -фазы, со степенью обжатия не менее 50 %.

Для защиты сопрягаемых поверхностей от окисления проведена пайка в вакуумной печи. В качестве припоя выбран материал ВПр27. Контроль качества пайки на предмет несплошностей и непропаев осуществляли визуально [13].

Обработку давлением составных заготовок проводили на гидравлических прессах в закрытом контейнере, который должен обеспечить степень деформации не менее 50 %. Охлаждение проводили на воздухе. Вторым этапом является горячее изостатическое прессование заготовок типа «диск–вал» из жаропрочных титановых сплавов, которое обеспечит запуск диффузионных процессов и уменьшит рост зерна. Длительность процесса составляла до 3 ч [13]. Полученная штамповка показана на рис. 7.



Рис. 7. Составная заготовка из сплавов типа ЭП975-ИД и ЭП742-ИД после заключительной изотермической деформации [13]

Из полотна штамповки на сварном соединении изготовлены образцы для изучения свойств и структуры. После термической обработки микроструктура в области сварного шва соответствует регламентированной с величиной зерна 3–4 балла с большим количеством γ' -фазы, т. е. полученная структура сварного соединения является типичной структурой жаропрочных сплавов типа ЭП742-ИД и ЭП975-ИД (рис. 8) [13].

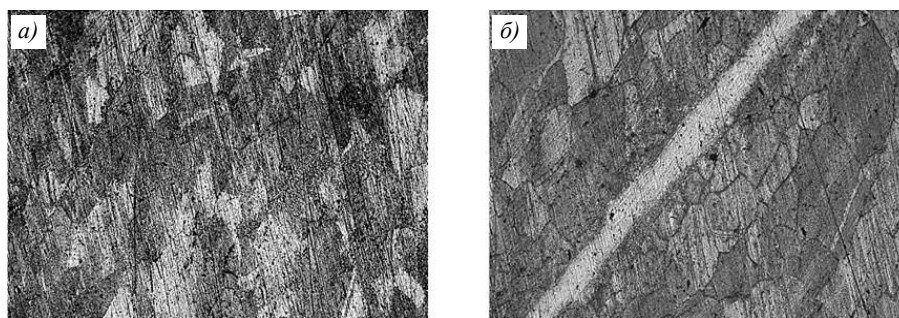


Рис. 8. Микроструктуры ($\times 100$) зоны соединения составных заготовок из сплавов типа ЭП742-ИД (а) и ЭП975-ИД (б) [13]

Проведены исследования механических свойств сварного шва заготовки «диск–вал» из жаропрочных никелевых сплавов. Прочность сварного соединения составила ~80 % от прочности материала типа ЭП975-ИД. Значения пластичности при испытании на растяжение образцов из области сварного шва ниже по сравнению с аналогичными значениями для образцов из цельных сплавов типа ЭП742-ИД и ЭП975-ИД [13].

Заключения

Технология сварки давлением широко применяется в современном машиностроении. С ее помощью можно изготавливать полуфабрикаты разных габаритов и форм. Возможно изготовление как цилиндрических изделий, так и изделий более сложной формы – например, по схемам «диск–вал» или «диск–диск». Применение технологии сварки давлением допускается как для титановых и алюминиевых сплавов, так и для жаропрочных никелевых сплавов. Важной операцией при получении сварного соединения с помощью сварки давлением является подготовка поверхности – недопущение образования оксидов. Этого можно достичь нанесением специальных защитных материалов (например, меди), проведением сварки в вакууме или в среде инертных газов, а также путем предварительной пайки соединений. Полученные сварные швы обладают удовлетворительной микроструктурой и отвечают требованиям по характеристикам.

Список источников

1. Оглодков М.С., Кашапов О.С., Калашников В.С., Кондратьева А.Р. Сравнительный анализ характеристик отечественных сплавов марок ВТ8, ВТ8М, ВТ8М-1, ВТ9 и сплава Ti6242S (США) применительно к лопаткам компрессора высокого давления авиационных газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 3 (76). С. 35–50. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-35-50.
2. Гельман А.С. Основы сварки давлением. М.: Машиностроение, 1970. 311 с.
3. Ахунова А.Х., Галиева Э.В., Поварова К.Б., Базылева О.А., Валитов В.А., Дмитриев С.В., Дроздов А.А., Аргинбаева Э.Г. Моделирование сварки давлением разнородных литых и деформируемых сплавов на основе никеля в условиях объемного пластического течения // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2016. Т. 13. № 1. С. 131–135.
4. 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. С. 64–72.
5. Valitov V.A., Povarova K.B., Bazyleva O.A., Drozdov A.A., Ovsepyan S.V., Galieva E.V. 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*. 2016. Vol. 838–839. P. 523–527. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.838-839.523.
6. Крохина В.А., Путьрский С.В., Грибков М.С. Исследование структуры и механических свойств сварных соединений из титанового сплава ВТ22М // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). С. 52–62. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-52-62.
7. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2001. № 1. С. 3–8.
8. Поварова К.Б., Валитов В.А., Дроздов А.А., Базылева О.А., Галиева Э.В., Аргинбаева Э.Г. Формирование градиентных структур в зоне соединения деформируемого никелевого и монокристаллического интерметаллидного сплава при термодиффузионной сварке давлением и термической обработке // *Металлы*. 2018. № 1. С. 48–57.

9. Gabb T.P., Kantzos P.T., Telesam J. et al. Fatigue resistance of the grain size transition zone in a dual microstructure superalloy // *International journal of fatigue*. 2011. Vol. 33. No. 3. P. 414–426.
10. Smarsly W. Aero Engine Materials – MTU Aero Engines. URL: http://www.mtu.de/en/technologies/engineering_news (дата обращения: 10.12.2024).
11. Перепелкин А.А., Матасов И.И., Платонов В.И. Экспериментальные исследования операции изотермической сварки давлением высокопрочных материалов // *Известия ТулГУ. Сер.: Технические науки*. 2015. Т. 1. № 8. С. 154–158.
12. Дуюнова В.А., Павлова Т.В., Кашапов О.С., Чучман О.В. Долговечность поковок и штамповок из сплава ВТ6 для деталей газотурбинных двигателей и авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). С. 23–35. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.
13. Способ изготовления составных заготовок типа «диск-диск» и «диск-вал» из жаропрочных титановых и никелевых сплавов: пат. RU 2610658 С2 Рос. Федерация; заявл. 05.08.15; опубл. 14.02.17.
14. Наприенко С.А., Ерак А.Д., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Давыденко А.Н. Изменение структуры и свойств паяных припоем ВПр16 соединений при различных температурных воздействиях // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). С. 115–125. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-115-125.
15. Galieva E.V., Klassma E.Y., Valitov V.A. Effect of the pressure welding scheme on the microstructure of solid-state joints from nickel-based superalloys ek61 and ep975 with different phase compositions // *Materials Technologies Design*. 2024. Vol. 6. No. 2 (17). P. 59–66. DOI: 10.54708/26587572_2024_621759.

References

1. Oglodkov M.S., Kashapov O.S., Kalashnikov V.S., Kondratieva A.R. Comparative analysis of the characteristics of domestic alloys VT8, VT8M, VT8M-1, VT9 and Ti6242S alloy (USA) as applied to high-pressure compressor blades of aircraft gas turbine engines. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 3 (76), pp. 35–50. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-35-50.
2. Gelman A.S. *Fundamentals of Pressure Welding*. Moscow: Mashinostroenie, 1970, 311 p.
3. Akhunova A.Kh., Galieva E.V., Povarova K.B., Bazyleva O.A., Valitov V.A., Dmitriev S.V., Drozdov A.A., Arginbaeva E.G. Modeling of Pressure Welding of Dissimilar Cast and Wrought Nickel-Based Alloys under Bulk Plastic Flow Conditions. *Fundamentalnye problemy sovremennogo materialovedeniya*, 2016, vol. 13, no. 1, pp. 131–135.
4. Galieva E.V., Povarova K.B., Drozdov A.A., Valitov V.A. Structure and properties of solid-phase joints of deformable nickel alloy EP975 and single-crystal intermetallic alloy VKNA-25 obtained by pressure welding with a degree of deformation of 24% under conditions of superplasticity of the EP975 alloy. *Metally*, 2018, no. 6, pp. 64–72.
5. Valitov V.A., Povarova K.B., Bazyleva O.A., Drozdov A.A., Ovsepyan S.V., Galieva E.V. 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*, 2016, vol. 838–839, pp. 523–527. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.838-839.523.
6. Krokhnina V.A., Putyrskiy S.V., Gribkov M.S. Analysis of structure and mechanical properties of welded joint from titanium alloy VT22M. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), pp. 52–62. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-52-62.
7. Kablov E.N. Quality control of materials – a guarantee of safe operation of aviation equipment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2001, no. 1, pp. 3–8.
8. Povarova K.B., Valitov V.A., Drozdov A.A., Bazyleva O.A., Galieva E.V., Arginbaeva E.G. Formation of gradient structures in the joint zone of a deformable nickel and single-crystal intermetallic alloy during thermomdiffusion pressure welding and heat treatment. *Metally*, 2018, no. 1, pp. 48–57.

9. Gabb T.P., Kantzos P.T., Telesam J. et al. Fatigue resistance of the grain size transition zone in a dual microstructure superalloy. *International journal of fatigue*, 2011, vol. 33, no. 3, pp. 414–426.
10. Smarsly W. Aero Engine Materials – MTU Aero Engines. Available at: http://www.mtu.de/en/technologies/engineering_news (accessed: December 10, 2024).
11. Perepelkin A.A., Matasov I.I., Platonov V.I. Experimental studies of the operation of isothermal pressure welding of high-strength materials. *Izvestiya TulGU. Ser.: Tekhnicheskiye nauki*, 2015, vol. 1, no. 8, pp. 154–158.
12. Duyunova V.A., Pavlova T.V., Kashapov O.S., Chuchman O.V. Fatigue strength of forgings from VT6 alloy for parts of gas turbine engines and aircrafts. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 23–35. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-23-35.
13. *Method for manufacturing composite blanks of the «disk-disk» and «disk-shaft» types from heat-resistant titanium and nickel alloys*: pat. RU 2610658 C2 Rus. Federation; appl. 05.08.15; publ. 14.02.17.
14. Naprienko S.A., Erak A.D., Afanasev-Khodykin A.N., Davidenko A.N. Structure variation and properties of soldered joints ВПp16 under various temperature exposures. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), pp. 115–125. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 05, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-115-125.
15. Galieva E.V., Klassma E.Y., Valitov V.A. Effect of the pressure welding scheme on the microstructure of solid-state joints from nickel-based superalloys ek61 and ep975 with different phase compositions. *Materials Technologies Design*, 2024, vol. 6, no. 2 (17), pp. 59–66. DOI: 10.54708/26587572_2024_621759.

Информация об авторах

Яшин Максим Сергеевич, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Капитаненко Денис Владимирович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Maxim S. Yashin, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Denis V. Kapitanenko, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 02.06.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 03.07.2025.
The article was submitted 02.06.2025; approved and accepted for publication after reviewing 03.07.2025.