
Научная статья

УДК 621.791

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-27-36

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИОННОЙ СВАРКИ ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВА ТИПА ЭП718-ИД

М.С. Яшин¹, Д.В. Капитаненко¹, А.Н. Афанасьев-Ходыкин¹

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

Аннотация. Представлены результаты исследования процессов деформационной сварки заготовок из сплава типа ЭП718-ИД. Перед осадкой заготовки подвергались пайке для защиты сопрягаемых поверхностей от окисления и улучшения качества сварного шва. Пайка осуществлена по двум схемам: по всей площади сопрягаемых поверхностей и по контуру. После пластической деформации и термообработки составных заготовок сварной шов на штамповке, предварительно спаянной по контуру сопрягаемых поверхностей, разрушился после охлаждения. Сварное соединение на штамповке с пайкой по всей площади осталось неразъемным.

Ключевые слова: сварка давлением, изотермическая деформация, жаропрочные никелевые сплавы, термообработка, пайка, компьютерное моделирование

Для цитирования: Яшин М.С., Капитаненко Д.В., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование процессов деформационной сварки заготовок из сплава типа ЭП718-ИД // Труды ВИАМ. 2026. № 2 (156). С. 27–36. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-27-36.

Scientific article

INVESTIGATION OF DEFORMATION WELDING PROCESSES OF SEMI-FINISHED PRODUCT MADE OF ALLOY TYPE EP718-ID

M.S. Yashin¹, D.V. Kapitanenko¹, A.N. Afanasyev-Khodykin¹

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 presents the results of a study of deformation welding processes of blanks made of EP718-ID alloy. Before upsetting, the blanks were soldered to protect the mating surfaces from oxidation and to improve the quality of the weld. Soldering was performed according to two methods: over the entire area of the mating surfaces and along the contour. After plastic deformation and heat treatment of the composite blanks, the weld on the stamping, pre-soldered along the contour of the mating surfaces, was destroyed after cooling. The welded joint on the stamping with soldering over the entire area remained inseparable.

Keywords: pressure welding, isothermal deformation, heat-resistant nickel alloys, heat treatment, soldering, computer modeling

For citation: Yashin M.S., Kapitanenko D.V., Afanasyev-Khodykin A.N. Investigation of deformation welding processes of semi-finished product made of alloy type EP718-ID. *Trudy VIAM*, 2026, no. 2 (156), pp. 27–36. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-2-27-36.

Введение

Современное машиностроительное производство придерживается тенденций переработки и использования металлических отходов. Эти направления развиваются в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [1]. Очень часто в кузнечно-штамповом производстве в качестве заготовок выбирают кованные и катаные прутки различного диаметра, изготовленные из различных материалов. Такие прутки нарезают в соответствии с требуемыми размерами и подвергают механической обработке. Однако после нарезания на заготовки, как правило, остаются некратные части прутков, размеры которых не удовлетворяют требуемым для изготовления полуфабрикатов. Поэтому дальнейшее использование некратных обрезков в кузнечно-штамповом производстве является проблематичным.

Утилизация обрезков прутков была бы экономически нецелесообразной, поэтому в НИЦ «Курчатовский Институт» – ВИАМ находят способы повторного использования некратных остатков прутков в производстве. В качестве одного из перспективных методов использования обрезков прутков в кузнечно-штамповом производстве рассматривается сварка давлением. Сварка давлением – это процесс, при котором сварное соединение образуется в результате деформации в области контакта двух металлических поверхностей [2]. Важными факторами при этом процессе является нагрев материала и прилагаемое давление на стыковые соединения [3]. Благодаря пластической деформации при высоких температурах образуются прочные металлические связи, которые позволяют получить сварное соединение [4, 5]. Сварка давлением позволяет получать неразъемные полуфабрикаты, в том числе из никелевых сплавов [6].

В качестве образцов для экспериментов по сварке давлением выбрали некратные обрезки прутков из сплава типа ЭП718-ИД. Химический состав этого сплава следующий, % (по массе) [7]:

Ni	Ti	Al	W	Mo	Nb	Cr	Mn	C	Si	Fe
43–47	1,9–2,4	0,9–1,4	2,5–3,5	4–5,2	0,8–1,5	14–16	<0,6	<0,1	<0,3	Остальное

Сплав обладает удовлетворительными характеристиками (см. таблицу), которые позволяют использовать его для изготовления высокопрочных элементов конструкций, силовых деталей корпуса турбины и деталей летательных аппаратов, работающих длительно при температурах 600–700 °С и кратковременно при температуре 800 °С [7].

Механические свойства сплава типа ЭП718-ИД [7]

Температура испытаний, °С	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
20	1225–1352	784–950	18–25	28–36
600	1127–1274	735–931	14–25	20–36
700	882–931	686–784	20–25	20–30
800	637–705	568–666	11–26	13–28

Сварное соединение должно обладать соответствующими свойствами, которые являются удовлетворительными для использования сварных заготовок в промышленности [8, 9]. Одной из основных проблем при осуществлении сварки давлением является окисление на сопрягаемых поверхностях [2]. Это приводит к снижению качества сварного соединения – например, к охрупчиванию или полному разрушению шва. Для того чтобы избежать образования оксидных пленок на поверхностях и получить надежное соединение, необходимо осуществить защиту поверхностей. Не допустить окисления можно при помощи предварительного нанесения защитных покрытий, предварительной пайки или осуществления сварки давлением в вакууме или среде инертных

газов. Исходя из результатов предыдущих исследований, проводившихся в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, использование припоев для защиты сопрягаемых поверхностей от окисления привело к получению сварного шва надлежащего качества [10]. При исследовании сварного шва материал припоя не обнаружен, что указывает на полное его растворение при протекании процессов диффузии между составными частями заготовок с последующей рекристаллизацией в области сопряженных поверхностей.

Кроме того, существует проблема излишнего газонасыщения металла при высоких температурах, что ведет к снижению качества полуфабриката [11]. Поскольку в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ отсутствует возможность проводить нагрев в специальной среде, при обработке давлением используются защитные силикатные покрытия [12]. Благодаря этим покрытиям в условиях нагрева в камерных печах с обычной средой появляется возможность предохранить заготовки от образования окалины и снизить газонасыщение поверхностей. Кроме того, в процессе штамповки защитные покрытия осуществляют функцию смазки. Следовательно, использование защитных покрытий при нагреве и штамповке необходимо для повышения качества сварного полуфабриката.

Компьютерное моделирование повсеместно используется в науке и промышленности при разработке различных технологических процессов, в том числе включающих операции обработки металлов давлением [13]. Специальные программные комплексы позволяют изучать процессы, происходящие во время пластической деформации [14]. Это упрощает задачу по отработке режимов деформации – обеспечивается повышение расчетов формообразования, снижение материальных затрат и увеличение коэффициента используемого материала. Поэтому использование компьютерного моделирования перед проведением экспериментов с металлическими заготовками будет способствовать получению более точных результатов.

Для получения качественного сварного шва в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ необходимо отработать технологию по защите сопрягаемых поверхностей от окисления. Поэтому цель данной работы – проведение компьютерного моделирования для оценки возможности получения штамповки требуемых габаритов на имеющемся оборудовании, а также получение надежного паяного соединения в двоянных заготовках, которое обеспечивает защиту сопрягаемых поверхностей от окисления и получение сварного шва удовлетворительного качества. Пайку проводили по двум технологическим схемам: по всей сопрягаемой поверхности двух заготовок и по ободу сопрягаемых поверхностей. Основная задача – получение устойчивого сварного соединения, что поможет определить предпочтительную технологическую схему защиты сопрягаемых поверхностей от окисления и послужит основой для будущих исследований.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Материалы и методы

В качестве заготовок использовали некратные обрезки прутков диаметром 150 мм из сплава типа ЭП718-ИД. Для анализа возможности осуществления осадки составных заготовок, подвергающихся сварке давлением, в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ использовали специализированный программный комплекс, в котором производили компьютерное моделирование для расчетов предполагаемой формы полученного сварного полуфабриката и усилий осадки.

Перед пайкой заготовки обрабатывали на токарном станке. Для защиты сопрягаемых поверхностей от окисления и получения удовлетворительного сварного шва

использовали припой ВПр11. Пайку осуществляли в вакууме при длительном нагреве до температуры 1140 °С с краткосрочной выдержкой и с последующей термической обработкой с быстрым нагревом и длительной выдержкой до температуры 1000 °С. Качество паяного соединения обеспечивалось технологическим процессом, контроль производился визуально.

Перед пластической деформацией при высоких температурах на поверхность составных заготовок наносили эмаль ЭВТ-100, которую использовали в качестве защитно-технологического покрытия. Штамповка происходила в изотермических условиях с нагревом бойков до температуры 950 °С на прессе с усилием до 1600 т с нагревом заготовки до температуры 1040 °С и последующим ее охлаждением на воздухе. После обработки давлением осуществляли закалку при температуре до 1040 °С. Для оценки качества полученного соединения и изготовления образцов из шва производили гидроабразивную резку штамповок. Контроль осуществляли визуально.

Результаты и обсуждение

Компьютерное моделирование процессов штамповки

Компьютерное моделирование процессов штамповки составной заготовки из сплава типа ЭП718-ИД проводили для отработки режимов пластической деформации. Расчеты производили при помощи метода конечных элементов в специализированном программном комплексе. Оценке подвергали форму заготовки, температуру и усилия деформации.

На рис. 1 показана форма полуфабриката, полученного после пластической деформации составной заготовки из сплава типа ЭП718-ИД. Геометрическая форма полученной штамповки соответствует требуемой.

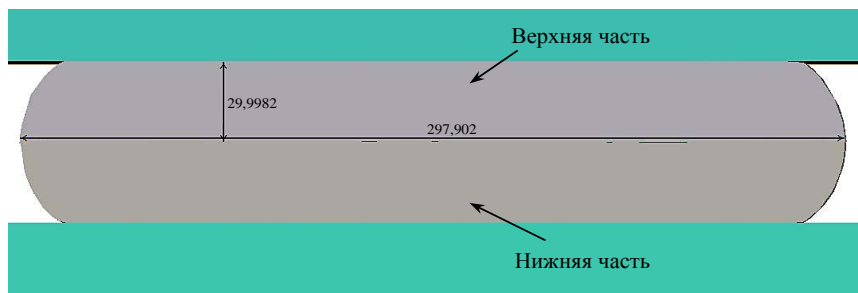


Рис. 1. Штамповка из сплава типа ЭП718-ИД после пластической деформации составной заготовки в изотермических условиях

На рис. 2. демонстрируется график зависимости усилия прессы от перемещения – при пластической деформации максимальное усилие составляет 12,61 МН. Данное значение не превышает максимального усилия прессы и является достаточным для формообразования полуфабриката.

Анализ полей температуры полуфабриката представлен на рис. 3. Области с наиболее низкой температурой, показанные темными цветами, находятся на торцах и бочке заготовки. Пониженную температуру на торцевых участках можно объяснить контактом с инструментом, а на бочке – контактом с окружающей средой. В центральной части заготовки наблюдается наибольший нагрев (рис. 3, б), что должно способствовать образованию надежного сварного соединения. На момент остановки прессы интервал температур – от 965 до 1040 °С. Эти значения находятся в интервале температуры горячей объемной штамповки сплава типа ЭП718-ИД в промышленных условиях, которые обеспечивают получение равномерной структуры материала.

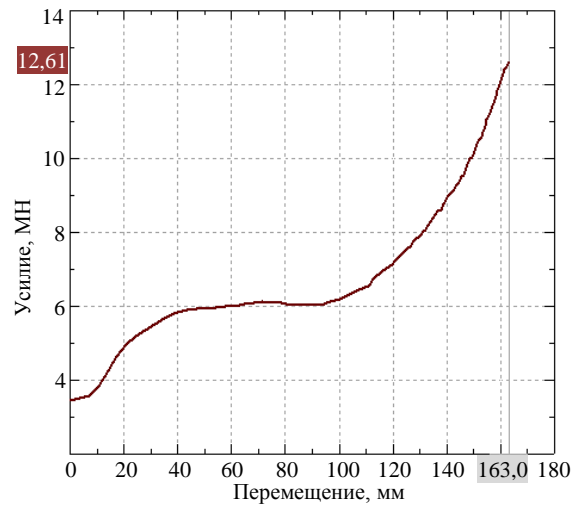


Рис. 2. График усилия при горячей объемной штамповке дисков из сплава типа ЭП718-ИД

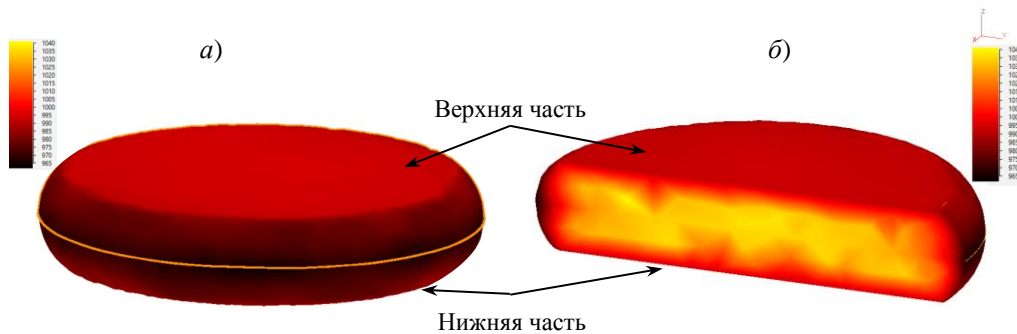


Рис. 3. Поля температур штамповки из сплава ЭП718-ИД целиком (а) и в разрезе (б)

На рис. 4 изображено распределение полей интенсивности пластической деформации на заготовке. Наиболее интенсивное течение металла заметно на ободах торцов заготовки и на стыковых зонах в центре составной заготовки. В центральной зоне также наблюдаются и наиболее высокие значения температуры (рис. 3). Центры торцов и бочка заготовки прорабатываются незначительно. Для наибольшей деформационной проработки всего объема металла рекомендуется в качестве заготовки использовать кованные прутки.

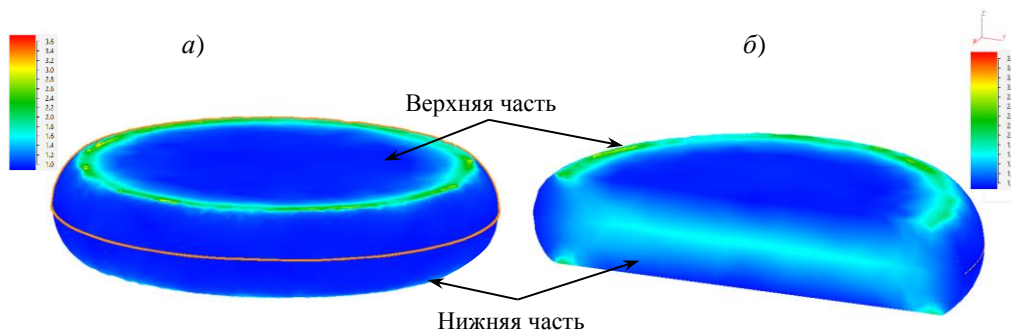


Рис. 4. Поля интенсивности пластической деформации на штамповке из сплава ЭП718-ИД целиком (а) и в разрезе (б)

В результате компьютерного моделирования в специализированном программном комплексе можно сделать вывод о возможности изготовления горячедеформированного

полуфабриката из сплавов типа ЭП718-ИД по данной технологии в условиях НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Составные заготовки не сминаются и не смещаются относительно друг друга, а принимают требуемую форму. Следовательно, можно сделать вывод об удовлетворительных размерах заготовки и возможности производства экспериментов с металлами.

Предварительная подготовка образцов

Перед сваркой давлением необходимо обеспечить предварительную защиту сопрягаемых поверхностей от окисления. В данном исследовании выбран способ защиты при помощи пайки. Перед пайкой необходимо механически обработать образцы для лучшего сцепления [15]. На рис. 5 показаны эскизы образцов после предварительной подготовки к пайке. Запланировано две схемы пайки: по всей площади соединения (схема 1) и по ободу сопрягаемых поверхностей (схема 2). Для получения надежных паяных соединений необходимо обеспечить параллельность поверхностей относительно основания. В случае с пайкой по схеме 2 необходимо выполнить проточку.

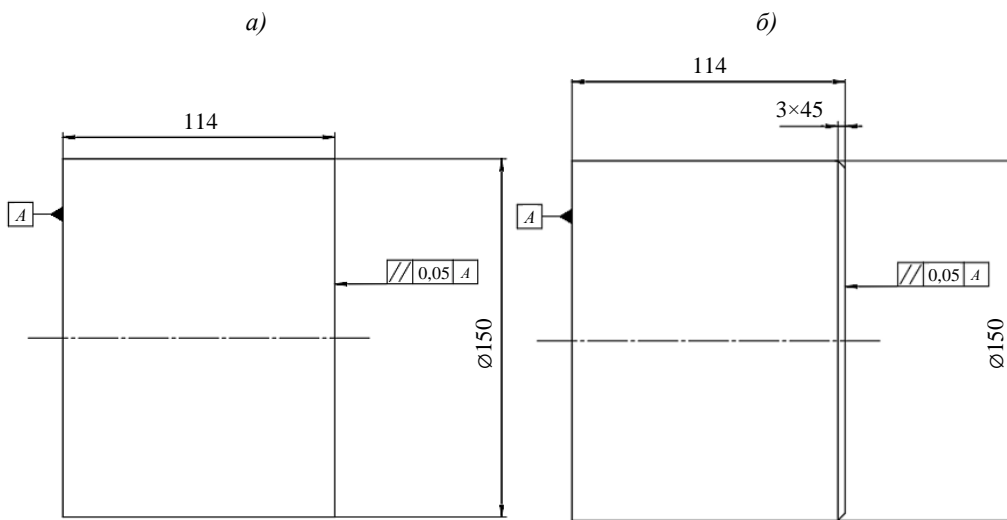


Рис. 5. Эскизы заготовок после предварительной подготовки под пайку по всей площади сопрягаемых поверхностей (а; схема 1) и по ободу сопрягаемых поверхностей (б; схема 2)

После пайки в вакууме при высоких температурах и последующей термообработке получены неразъемные составные заготовки по двум схемам: с пайкой по всей площади сопрягаемой поверхности и с пайкой по краям сопрягаемых поверхностей (рис. 6). При визуальном контроле несплошностей, пористости, непропаянных участков и прочих дефектов не обнаружено. Предполагается, что после нагрева и изотермической деформации материал припоя будет растворен и произойдет диффузия между двумя заготовками из сплава типа ЭП718-ИД.

После пластической деформации в изотермических условиях получены две штамповки из составных заготовок, соединенных пайкой (рис. 7). Форма штамповок соответствует ожидаемой, рассчитанной в результате компьютерного моделирования. В случае полуфабриката, полученного после пайки по схеме 1, наблюдается равномерный сварной шов на бочке заготовки, который находился приблизительно на середине высоты без существенных отклонений. Это может свидетельствовать о равномерном распределении объема металла в процессе штамповки. Однако в случае штамповки, полученной по схеме 2, сварной шов проходит под углом и распределен неравномерно на бочке, что может указывать на смещение объемов металла при сварке давлением.

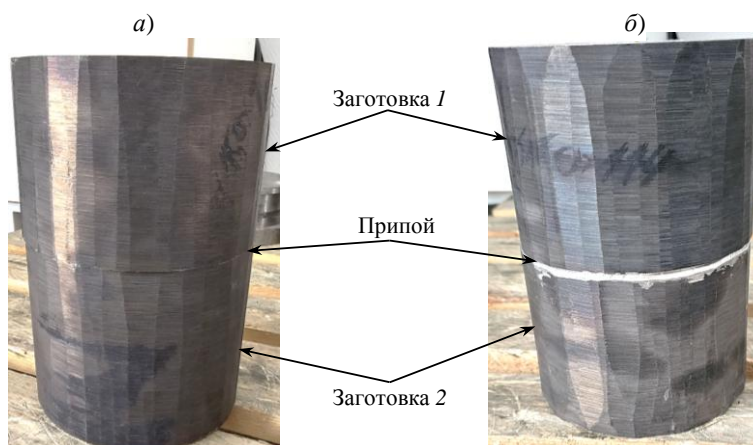


Рис. 6. Составные заготовки из сплава типа ЭП718-ИД после пайки и предварительной термической обработки по схемам 1 (а) и 2 (б)

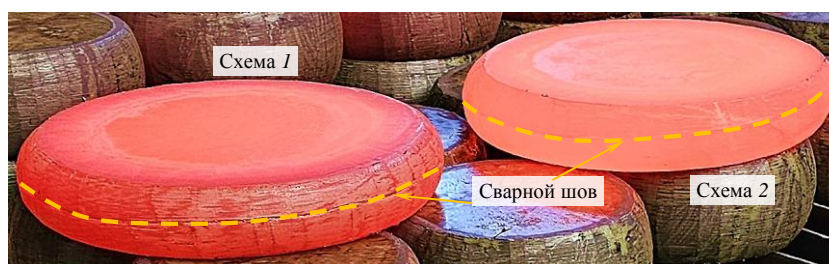


Рис. 7. Штамповки из составных заготовок, полученные в процессе изотермической деформации

После охлаждения на воздухе сварной шов на штамповке, предварительное паяное соединение которого получено по схеме 2, разрушился (рис. 8). Верхняя половина полуфабриката отделилась от нижней. На краях сопрягаемых поверхностей заметен материал припоя. В то время как сварной шов на штамповке, предварительное паяное соединение которого получено по схеме 1, остался целым. Интенсивное механическое воздействие на штамповку подтвердило неразъемность сварного соединения.



Рис. 8. Штамповки из составных заготовок, полученные в процессе изотермической деформации, после охлаждения на воздухе

Разрушение сварного шва на штамповке, полученной после пайки по схеме 2, можно объяснить как неравномерным распределением материала в течение пластической деформации, так и недостаточными условиями для возникновения интенсивных диффузионных процессов между сопрягаемыми поверхностями.

Сварная штамповка, полученная после пайки по схеме 1, которая не разрушилась, подвергнута термической обработке для усиления процессов рекристаллизации в сварном шве и получения мелкозернистой структуры. После закалки изготовлены

высотные образцы для изучения макроструктуры полученного сварного соединения – из центра, середины и с края штамповки (рис. 9).

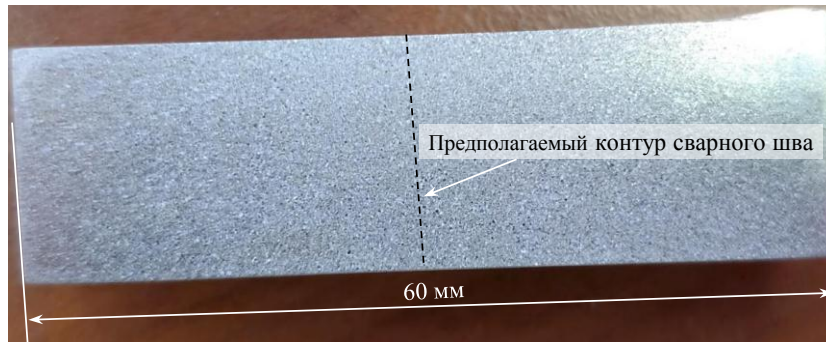


Рис. 9. Высотный образец, изготовленный из штамповки, полученной сваркой давлением

Однако визуально обнаружить контур сварного шва на всех образцах не удалось. Сечения штамповки в центре, середине и с края выглядят однородно без признаков соединения и без инородных включений. Это может свидетельствовать о полном растворении материала припоя в процессе изотермической деформации. Дефекты, такие как несплошности, пористость, раковины и другие, отсутствуют. Таким образом, можно предположить, что соединение двух заготовок из сплава типа ЭП718-ИД получено не благодаря пайке, а вследствие процессов, которые происходили при пластической деформации при высоких температурах. Однако для проверки этой гипотезы необходимо провести дальнейшие исследования заготовки и образцов.

Заключения

В данной работе проведены исследования, направленные на определение предпочтительной технологической схемы защиты сопрягаемых поверхностей от окисления в процессе сварки давлением. Эксперименты проводили на образцах из сплава типа ЭП718-ИД. Перед испытаниями осуществляли компьютерное моделирование, которое показало возможность изготовления требуемых полуфабрикатов. После предварительной механической обработки образцов произведена пайка для получения составных заготовок по двум схемам: по всей площади сопрягаемых поверхностей и по ободу сопрягаемых поверхностей. Изготовленные составные заготовки подвергли пластической деформации в изотермических условиях для получения сварного шва. Сварная штамповка, изготовленная после пайки по схеме 2, после охлаждения разрушилась. В то время как штамповка, полученная после пайки по схеме 1, осталась неразъемной. Исследования макроструктуры сечения штамповки позволяют сделать предположение об отсутствии материала припоя и различных дефектов в области сварного соединения.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
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. Структура 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. 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.
7. *Авиационные материалы: справочник в 9 т. / под ред. Р.Е. Шалина. 7-е изд., перераб. и доп. М.: ОНТИ, 1989. Том 3. Жаропрочные стали и сплавы. Сплавы на основе тугоплавких металлов. Часть 1: Деформируемые жаропрочные стали и сплавы. 567 с.*
8. Дуюнова В.А., Оглодков М.С., Путырский С.В., Кочетков А.С., Зуева О.В. Современные технологии выплавки слитков титановых сплавов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). С. 30–40. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.
9. Крохина В.А., Арисланов А.А., Путырский С.В., Анисимова А.Ю. Исследование закономерностей формирования структуры прутков из титанового сплава ВТ6 в зависимости от различных технологических схем изготовления // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 4 (73). С. 36–44. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-36-44.
10. Способ изготовления составных заготовок типа «диск-диск» и «диск-вал» из жаропрочных титановых и никелевых сплавов: пат. RU 2610658C2 Рос. Федерация; заявл. 05.08.15; опубл. 14.02.17.
11. Доронин О.Н., Горлов Д.С., Азаровский Е.Н., Кочетков А.С. Исследование структуры и свойств жаростойкого покрытия при высокотемпературной деформации образцов из интерметаллидного титанового сплава // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). С. 61–70. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-61-70.
12. Сиротинский А.А. Технология производства и промышленное применение силикатноэмалевых покрытий // *Экспозиция Нефть Газ*. 2007. № 42. С. 36–38.
13. Цепин М.А., Бегнарский В.В., Лисуец Н.Л. и др. Использование специализированных программ при разработке технологических процессов обработки металлов давлением // *Цветные металлы*. 2007. № 5. С. 98–101.
14. Стебунов С.А., Биба Н.В. Qform – программа, созданная для технологов // *Кузнечно-штамповое производство*. 2004. № 9. С. 38–43.
15. 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: 30.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-115-125.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
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 alloy EP975. *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. 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.
7. *Aviation Materials*: in 9 vol. Handbook. Ed. R.E. Shalin. 7th ed., rev. and add. Moscow: ONTI, 1989, Vol. 3: Heat-Resistant Steels and Alloys. Alloys Based on Refractory Metals, part 1: Wrought Heat-Resistant Steels and Alloys, 567 p.
8. Duyunova V.A., Oglodkov M.S., Putyrskiy S.V., Kochetkov A.S., Zueva O.V. Modern technologies for melting titanium alloy ingots (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), pp. 30–40. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 30, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-30-40.
9. Krokhnina V.A., Arislanov A.A., Putyrskiy S.V., Anisimova A.Yu. Investigation of the regularities of the formation of the structure of rods made of titanium alloy VT6 depending on various technological schemes of manufacture. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), pp. 36–44. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 30, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-36-44.
10. *Method for manufacturing composite blanks of the «disk-disk» and «disk-shaft» types from heat-resistant titanium and nickel alloys*: pat. RU 2610658C2 Rus. Federation; appl. 05.08.15; publ. 14.02.17.
11. Doronin O.N., Gorlov D.S., Azarovskiy E.N., Kochetkov A.S. Study of the structure and properties of a heat-resistant coating at high-temperature deformation of samples from titanium intermetallic alloy. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), pp. 61–70. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 30, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-61-70.
12. Sirotinskiy A.A. Production Technology and industrial publication of silicate enamel coatings. *Ekspozitsiya Neft i Gaz*, 2007, no. 42, pp. 36–38.
13. Tsepin M.A., Begnarsky V.V., Lisunets N.L. et al. Using specialized programs in the development of technological processes for metal forming. *Tsvetnye metally*, 2007, no. 5, pp. 98–101.
14. Stebunov S.A., Biba N.V. Qform – a program created for technologists. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo*, 2004, no. 9, pp. 38–43.
15. Naprienko S.A., Erak A.D., Afanasev-Khodykin A.N., Davidenko A.N. Structure variation and properties of soldered joints VPr16 under various temperature exposures. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), pp. 115–125. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 30, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-115-125.

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

Афанасьев-Ходькин Александр Николаевич, начальник сектора, 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

Alexander N. Afanasyev-Khodykin, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 04.07.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 31.07.2025.
The article was submitted 04.07.2025; approved and accepted for publication after reviewing 31.07.2025.