

УДК 621.791

*Е.Н. Каблов¹, В.В. Антипов¹, А.В. Свиридов¹, М.С. Грибков¹***ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ
ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ
ЭИ698-ВД И ЭП718-ИД СО СТАЛЬЮ 45**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-3-14

Разработаны технологии электронно-лучевой сварки (ЭЛС) жаропрочных сплавов ЭИ698-ВД и ЭП718-ИД со сталью 45. Проведен комплекс металлографических исследований сварных образцов. Испытания по определению механических характеристик сварных соединений показали, что сварные соединения, выполненные ЭЛС, являются равнопрочными основному металлу – стали 45. Специально разработанная конструкция стыка позволила снизить выбросы металла шва и обеспечить отсутствие трещин под верхней расширенной частью шва. Проведенный неразрушающий контроль сварных соединений показал отсутствие недопустимых дефектов сварных швов.

Ключевые слова: *разнородные материалы, электронно-лучевая сварка (ЭЛС), параметры режимов сварки, структура, механические свойства.*

*E.N. Kablov¹, V.V. Antipov¹, A.V. Sviridov¹, M.S. Gribkov¹***FEATURES OF ELECTRON BEAM WELDING
OF HEAT-RESISTANT ALLOYS
EI698-VD AND EP718-ID WITH STEEL 45**

The technology of electron beam welding of heat-resistant alloys EI698 and EP718 with steel 45 was developed. A complex of metallographic studies of welded samples was carried out. Tests to determine the mechanical characteristics of welded joints showed that the welded joints made by electron beam welding are equal to the strength of the base metal – of steel 45. A specially designed joint design allowed to reduce emissions of the weld metal and to ensure the absence of cracks under the upper expanded part of the weld. Conducted non-destructive testing of welds showed the absence of unacceptable defects in welds.

Keywords: *dissimilar materials, electron beam welding, welding parameters, structure, mechanical properties.*

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Согласно «Стратегическим направлениям развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» жаропрочные никелевые сплавы входят в список приоритетных стратегических направлений развития материалов и технологий. Анализ научных исследований за рубежом показывает, что в мире активно развиваются и продолжают свое развитие в будущем литейные и деформируемые жаропрочные никелевые сплавы. Эти материалы с высокими служебными характеристиками требуются для изготовления изделий атомной, ракетной, авиационной, железнодорожной и морской техники нового поколения, а также в машиностроительной отрасли [1–12].

При создании современных конкурентоспособных изделий для отечественного двигателестроения помимо решения главных задач по повышению КПД и ресурса работы современных двигателей не менее важным является решение задачи снижения трудоемкости, повышения коэффициента использования материала при изготовлении сложных сварных конструкций [13].

В соответствии со стратегией развития холдинга ОАО «РЖД» до 2030 г. железнодорожный транспорт уже в ближайшем будущем должен стать лидирующим видом транспорта по экономической эффективности, экологической безопасности при транспортировке массовых грузов [14].

Жесткая конкурентная борьба на мировом рынке дизелестроения, требования заказчиков по дальнейшему снижению расходов топлива и масла, требования природоохранных органов по снижению в выпускных газах вредных выбросов и твердых частиц вывели на первый план в дизелестроении требования по повышению уровня форсирования рабочего процесса, повышения энергетических, экономических и экологических показателей двигателей.

Основная часть турбокомпрессорного производства ОАО «Пензадизельмаш» предназначена для тепловозов ОАО «РЖД». Требования, которые предъявляются к ОАО «РЖД» в области обеспечения возрастающего объема перевозок, подразумевают их бесперебойное обеспечение локомотивной тягой при условии сокращения эксплуатационных расходов и повышения экономичности перевозок. Этим требованиям должен удовлетворять современный тяговый подвижной состав, разработанный на основе последних достижений локомотивостроительной науки и техники.

Сформированная к настоящему времени тенденция развития дизелестроения требует создания новых турбокомпрессоров с повышенными характеристиками на эксплуатационных режимах, увеличенной на 15–20% пропускной способностью, с перспективой увеличения максимальной степени повышения давления в компрессоре до 5 и увеличенными межремонтными пробегами в 1,5 раза, так как современные локомотивы зачастую используются на участках Байкало-Амурской магистрали (БАМ), где отсутствуют депо и, соответственно, возможность ремонта.

В связи с этим создание турбокомпрессоров, соответствующих предъявляемым техническим требованиям, становится невозможным без применения высокотехнологичных решений и современных методов изготовления деталей. Одним из направлений для решения поставленных задач является использование не только новых материалов для дисков турбины, но и надежного способа их соединения с полувалами из стали. Традиционные соединения с применением штифтов уже не обеспечивают необходимую прочность валов и технологичность. Ротор в целом должен обладать достаточной механической жесткостью, имея запас по критической скорости вращения не менее 1,3. Так, создание новой технологии соединения жаропрочных дисков с полувалами из стали необходимо, в том числе и для обеспечения долговечной надежной работы турбокомпрессора.

Для того чтобы обеспечить отечественные тяговые локомотивы надежными и высокоэффективными силовыми установками специалистами ФГУП «ВИАМ» и ОАО «Пензадизельмаш» проведен комплекс сложных научно-технических и опытно-конструкторских работ, в результате чего впервые в отечественной практике разработана технология сборки и электронно-лучевой сварки валов роторов турбокомпрессоров из конструкционной стали с дисками из жаропрочных никелевых сплавов ЭИ698-ВД и ЭП718-ИД.

Однако получение качественного сварного соединения конструкционной стали с жаропрочными высоколегированными сплавами является очень сложной научно-технической задачей, поскольку эти материалы крайне разнородны по своему фазово-

химическому составу и теплофизическим свойствам, а высоколегированные жаропрочные никелевые сплавы, используемые для изготовления высоконагруженных дисков турбокомпрессоров, являются трудносвариваемыми материалами.

Сварка плавлением в настоящее время остается основой сварочного производства и является наиболее эффективным способом создания неразъемных соединений конструкционных материалов для получения ресурсосберегающих заготовок, максимально приближенных по геометрической форме к оптимальной форме готовой детали или конструкции [15].

Использование электронно-лучевой сварки обеспечивает минимальный объем переплавленного материала, минимальную деформацию изделий, а также прочность, сравнимую с прочностью основного материала. Высокое качество сварных соединений может быть достигнуто только в том случае, если используемая технология электронно-лучевой сварки обеспечивает необходимую степень проплавления кромок, ограниченную химическую и структурную неоднородность в металле сварного шва и зоне термического влияния (ЗТВ), пониженный уровень остаточных напряжений и исключение образования дефектов (поры, трещины, несплошности и т. п.). Данные обстоятельства в значительной мере зависят также от конструктивных особенностей свариваемых деталей [16, 17].

Одной из особенностей жаропрочных дисперсионно-твердеющих железохромоникелевых (ЭП718-ИД) и никелевых (ЭИ698-ВД) сплавов является наличие в их составе достаточного количества алюминия и титана, которые, взаимодействуя с никелем, образуют γ' -фазу типа $Ni_3(Al, Ti)$. Микроструктура этих сплавов представляет собой твердый раствор с гранцентрированной кубической (ГЦК) решеткой, содержащий карбиды и когерентную с твердым раствором интерметаллидную γ' -фазу, прочность которой возрастает с ростом температуры. Жаростойкость данных сплавов зависит от содержания, размера и состава γ' -фазы и в значительной мере определяется содержанием титана и алюминия. Тугоплавкие элементы (тантал, ниобий, молибден и вольфрам), упрочняя твердый раствор, могут также входить в состав γ' -фазы, увеличивая ее содержание [18]. Наибольшая жаропрочность этих сплавов достигается после закалки и последующего старения, в результате чего образуются мелкодисперстные выделения γ' -фазы, которые создают торможение пластической деформации в сплаве [19]. Химический состав этих сплавов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сплавов

Сплав	Содержание элементов, % (по массе)											
	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	Nb	Al	Ti	Fe	B
ЭИ698-ВД (ХН73МБТЮ)	0,03–0,07	≤0,5	≤0,4	13–16	Основа	–	2,8–3,2	1,9–2,2	1,45–1,8	2,37–2,75	≤2	≤0,005
ЭП718-ИД (ХН45МВТЮБР)	≤0,1	≤0,3	≤0,6	14–16	43–47	2,5–3,5	4–5,2	0,8–1,5	0,9–1,4	1,9–2,4	Основа	≤0,008

Вследствие неравномерного нагрева и охлаждения металла, а также в результате усадки металла шва при кристаллизации, сварной шов и околошовная зона при ЭЛС никелевых сплавов находятся под действием напряжений. Уровень данных напряжений зависит от состава и свойств свариваемого материала. На величину напряжений, возникающих в процессе сварки, также может оказывать влияние процесс распада упрочняющей γ' -фазы в зоне термического влияния. Локализация напряжений в малых объемах материала может возникать вследствие низкой теплопроводности жаропрочных никелевых сплавов, которая способствует повышению градиента температур при электронно-лучевой сварке. В результате суммарного влияния этих напряжений возникает растрескивание сплава [20].

Сварные соединения разнородных материалов обладают рядом специфических особенностей. При электронно-лучевой сварке разнородных материалов возникают трудности, связанные с наличием различного рода магнитных полей в области распространения электронного пучка. Поскольку электронный пучок представляет собой направленное движение отрицательно заряженных частиц, то под действием магнитного поля траектория пучка искривляется, что при сварке может приводить к образованию дефектов в виде непроваров [21, 22]. Магнитное поле при ЭЛС могут создавать различные источники, наиболее интенсивными из которых являются следующие: остаточная намагниченность деталей перед сваркой; намагниченность, индуцированная в процессе сварки; токи, наведенные термо-ЭДС [23].

Из-за различия теплофизических свойств разнородных материалов при сварке возникают проблемы получения литой зоны со строгим соотношением площадей проплавления каждого из свариваемых металлов. В этом случае может происходить неравномерное плавление свариваемых кромок и возникать несимметричное температурное поле относительно стыка [24–26]. При ЭЛС разнородных материалов, имеющих разную теплопроводность, для получения необходимой формы проплава электронный луч смещают в сторону сплава с большей теплопроводностью [27–29].

Материалы и методы

Электронно-лучевую сварку осуществляли на установке АЭЛТК-11-486. При выборе оптимальных режимов ЭЛС варьировали скорость сварки, рабочее расстояние, силу тока пучка, ток фокусировки для получения бездефектных соединений. Для проведения испытаний были изготовлены сварные образцы.

Исследования проводили на образцах, вырезанных из сварных соединений сталь 45+сплав ЭИ698-ВД и сталь 45+сплав ЭП718-ИД. Методы исследования и геометрические размеры образцов для определения механических характеристик ($\sigma_B^{20^\circ}$, $\sigma_B^{200^\circ}$, КСУ) сварных соединений соответствуют ГОСТ 6996–66.

Определение локального химического состава материала проведено методами качественного и количественного микрорентгеноспектрального анализа на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO MA 10 (фирма Carl Zeiss, Великобритания), оснащенном энергодисперсионным спектрометром X-Max.

Исследование микроструктуры проводили на оптическом микроскопе Olympus GX-51 и сканирующем электронном микроскопе Hitachi SU 8010 в соответствии с методикой ММ 1.595-17-181–2003.

Размер зерна определялся методом измерения длин хорд по ГОСТ 5639–82 в программном комплексе SIAMS 800.

Оценку макроструктуры проводили без применения увеличительных приборов по ГОСТ 5639–82.

Проведение неразрушающего контроля сварных соединений методом цветной дефектоскопии (капиллярный контроль) поверхности сварных соединений вала ротора турбокомпрессора осуществляли набором дефектоскопических материалов SHERWIN (производство Франция) с II классом чувствительности по ГОСТ 18442–80, обеспечивающим выявление дефектов с минимальной шириной раскрытия 1–2 мкм. Контроль проводили в соответствии с технологической инструкцией ТИ 1.595-4-1129–2019.

Ультразвуковой контроль проводили с использованием дефектоскопа A1550 IntroVisor в режиме «Томограф» с использованием многоэлементных преобразователей (ультразвуковых антенных решеток).

Результаты и обсуждение

Каждый кольцевой шов выполняли по программе «ввод–основной режим–закрывание шва», программу задавали в градусах, величину каждого участка подбирали экспериментально. При сварке кольцевого стыка также необходимо учитывать высоту образующегося в начале шва усиления, ведущего при перекрытии к непровару в этой части стыка. Как показал анализ полученных результатов, чрезмерное усиление шва в начале процесса ЭЛС образуется из-за быстрого повышения мощности электронного пучка. Для того чтобы исключить этот дефект, необходимо обеспечивать плавный ввод тока в начале сварки и повышение тока по тому же закону на 5–10% при перекрытии шва. Для предотвращения образования «кратера» при окончании процесса сварки необходимо также плавное уменьшение мощности пучка (рис. 1).

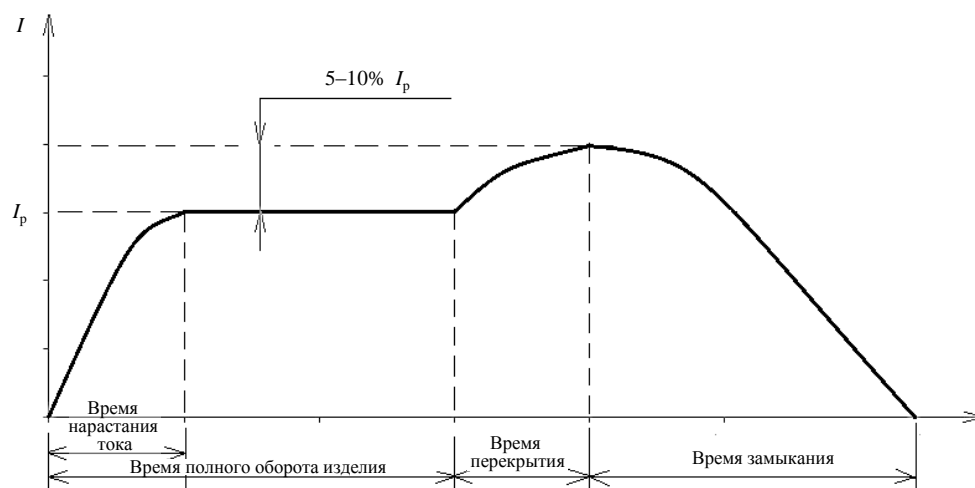


Рис. 1. Характер изменения силы тока (I_p – рабочий ток) пучка при сварке кольцевого стыка

В ходе проведения экспериментов по сварке никелевых сплавов установлено, что в исследованном диапазоне режимов ЭЛС поперечное сечение швов имеет сложную форму, характеризующуюся значительной шириной в верхней части шва и с «кинжальным» проплавлением в корневой и средней частях шва (рис. 2). Такая форма может объясняться возникновением над поверхностью материала источника теплоты, нагревающего достаточно большую площадь поверхности тела, вследствие рассеивания электронного пучка в облаке ионизированных паров металла, испаряющихся из зоны проплавления.

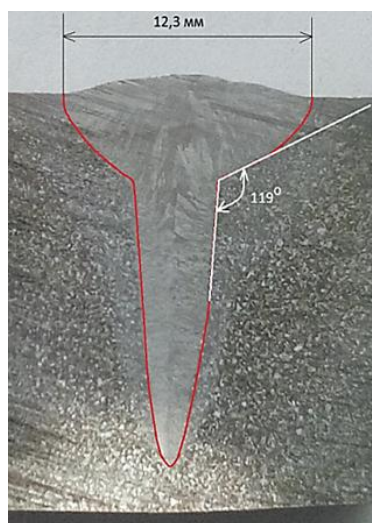


Рис. 2. Поперечное сечение шва из сплава ЭП718-ИД при скорости сварки 15 м/ч

Результаты экспериментов показывают, что чем ниже скорость сварки, тем больше энергии рассеивается над поверхностью тела и, следовательно, ширина и глубина верхней зоны проплавления значительно увеличиваются, в то время как размеры средней и корневой частей шва остаются приблизительно постоянными. Как показывает опыт, при сварке узлов из жаропрочных никелевых сплавов трещины располагаются главным образом в околошовной зоне под верхней расширенной частью шва. Трещины зарождаются, как правило, на линии сплавления, распространяясь затем в околошовную зону и шов. Для увеличения стойкости металла сварных соединений к образованию горячих трещин необходимо стремиться к равномерной ширине шва по глубине, избегая местных расширений шва, а также получения заостренного корня шва, что может послужить причиной смещения шва со стыка, несплавления кромок и зарождения трещин [30].

При увеличении толщины изделия появляется избыток жидкого металла, поверхность сварочной ванны постепенно приближается к электронному пучку, перегревается и происходит выплеск жидкого металла из вершины шва или вытекание его из корня шва. Этот процесс периодически повторяется, в результате могут образовываться дефекты в металле шва.

Если лишний металл не уместается в корне и вершине шва, то стабильность процесса сварки нарушается, и при формировании сварного соединения образуются дефекты. Таким образом, стабильность формирования сварного соединения определяют схема ЭЛС и геометрическая форма шва.

Повышение качества сварного соединения обеспечивается путем полного проплавления на всю глубину стыка без технологического непровара и исключения появления полостей в теле шва. Решается эта задача за счет того, что «лишний металл», образующийся при усадке, размещается в специальной канавке (рис. 3). Данная канавка также снижает вероятность выброса металла сварочной ванны в месте перекрытия шва.

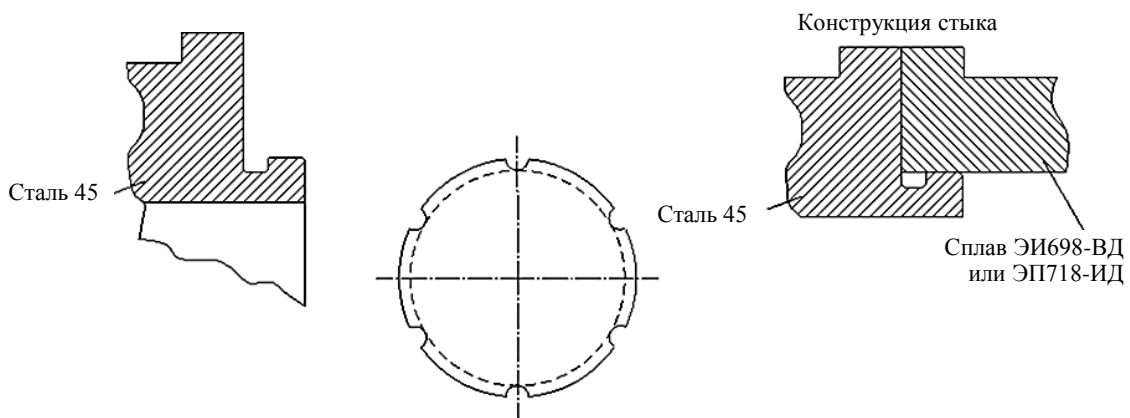


Рис. 3. Конструкция стыка заготовок вала ротора турбокомпрессора под электронно-лучевую сварку

Для исключения появления трещин под верхней расширенной частью шва и уменьшения остаточных напряжений проведена доработка конструкции стыка с выводом грибообразной части шва в удаляемую часть припуска. В результате данной доработки стыка получен сварной шов с параллельными стенками (отклонение ширины шва по глубине составило $<3\%$), а верхняя расширенная часть выведена в удаляемую часть припуска. По научно-техническим литературным данным [31–34], наиболее частым и опасным дефектом на участке замыкания кольцевого шва является колебание глубины проплавления – так называемая «корневая пила». Причиной этого дефекта, по мнению большинства исследователей, являются сложные гидродинамические процессы, происходящие в канале проплавления в процессе формирования шва.

Анализ полученных результатов показал, что при сварке в нижнем положении наилучшие результаты достигнуты при использовании круговой формы развертки электронного луча. Исследование влияния частоты развертки проводили в диапазоне 100–800 Гц и амплитуды колебаний 0,5–3 мм с целью стабильного формирования металла шва на участке замыкания. Наиболее благоприятные результаты получались при частоте 300 Гц и амплитуде 1,5 мм.

Последующий неразрушающий контроль (капиллярный и ультразвуковой), а также металлографические исследования поперечных и продольных макрошлифов не выявили недопустимых дефектов на участке замыкания кольцевого шва. Внешний вид сварного изделия после сварки и механической обработки показан на рис. 4.



Рис. 4. Сварная заготовка вала ротора турбокомпрессора после механической обработки

Исследованы структуры сварных швов, выполненных на оптимальных режимах ЭЛС. На микрошлифах (рис. 5 и 6) отчетливо видна граница между сталью 45 и сварным швом. Сплавы ЭИ698-ВД, ЭП718-ИД и сталь 45 имеют близкие температуры плавления, но из-за более низкой теплопроводности никелевого сплава происходит преимущественно его расплавление, несмотря на смещение луча в сторону стали.

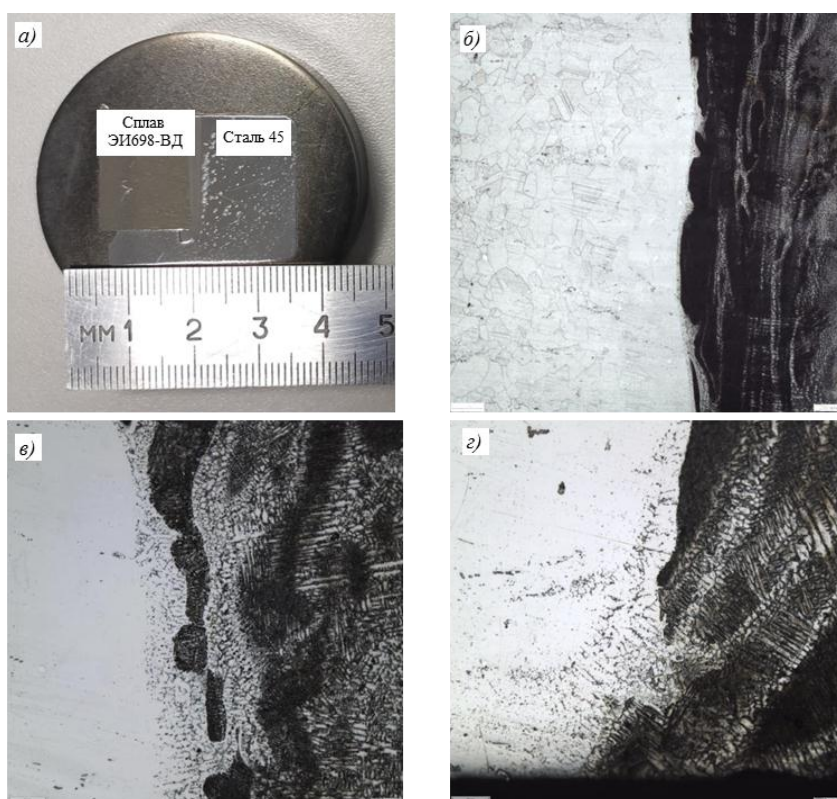


Рис. 5. Структура сварного соединения (а – макрошлиф) на границе шва и основного металла со стороны сплава ЭИ698-ВД (б; $\times 50$) и переходные зоны «сплав ЭИ698-ВД–сварной шов» (в; $\times 200$) и со стороны сплава ЭИ698-ВД в верхней части шва (г; $\times 200$)

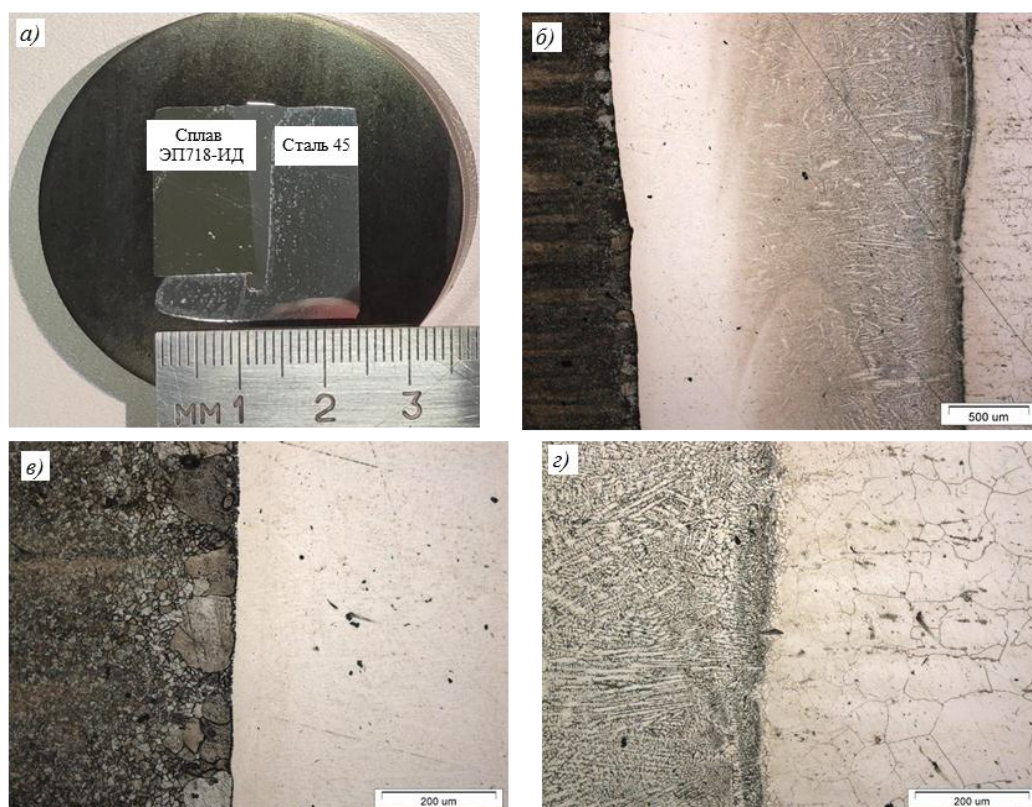


Рис. 6. Структура сварного соединения (*а* – макрошлиф; *б* – микрошлиф; $\times 50$) на границе шва и основного металла со стороны стали 45 (*в*; $\times 200$) и сплава ЭП718-ИД (*г*; $\times 200$)

Измерение микротвердости по зонам сварных соединений ЭИ698-ВД+сталь 45 и ЭП718-ИД+сталь 45 проведено в верхней, средней и нижней частях сварного соединения. Графическое представление распределения твердости по сечениям показано на рис. 7 и 8. Линия 1 соответствует верхней части шва, линия 2 – средней, а линия 3 – корневому слою.

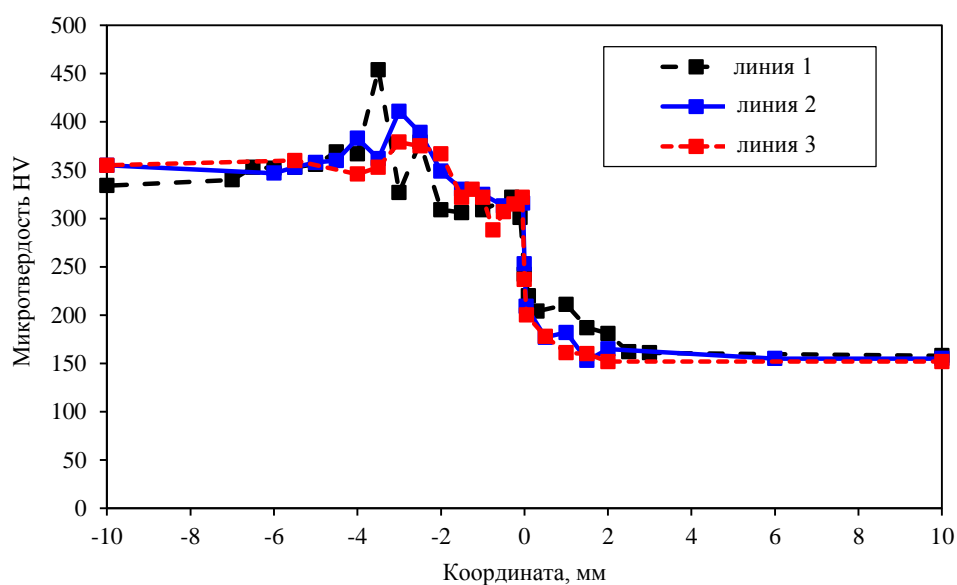


Рис. 7. Результаты измерения микротвердости по зонам сварного соединения сплав ЭИ698-ВД+сталь 45

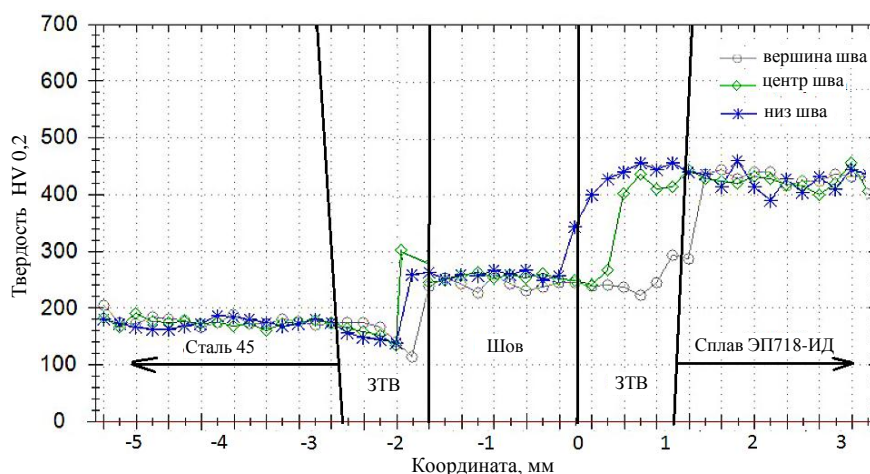


Рис. 8. Результаты измерения микротвердости по зонам сварного соединения сплав ЭП718-ИД+сталь 45

Из результатов измерения следует, что минимальное значение твердости наблюдается в стали 45. При приближении к сварному шву со стороны стали значение твердости увеличивается. В целом изменение твердости по ширине шва равномерное, без явных скачков значений, что косвенно подтверждает отсутствие хрупких фаз.

Химический состав металла сварных швов приведен в табл. 2. В пользу большего расплавления никелевого сплава свидетельствует тот факт, что шов травится трехкислотным раствором. На границе раздела «сталь 45–сварной шов» наблюдаются выделения, содержащие никель, хром и титан с минимальным проникновением в основной металл. Отсюда следует, что сварное соединение образуется по механизму сварки-пайки.

Таблица 2

Химический состав металла сварного шва

Материал сварного шва	Содержание элементов, % (по массе)								
	Al	Si	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	Mo	Σ
ЭИ698-ВД+сталь 45	1,5	0,3	2,3	11,8	23,9	56,0	1,8	2,4	100,0
ЭП718-ИД+сталь 45	1,0	0,3	1,3	13,2	31,1	49,4	1,5	2,2	100,0

Определение комплекса механических свойств выполнено на образцах, вырезанных из сварных соединений в сочетаниях сплав ЭИ698-ВД+сталь 45 и сплав ЭП718-ИД+сталь 45. Результаты испытаний приведены в табл. 3 и 4. При испытаниях на растяжение и ударный изгиб все образцы разрушились по основному металлу со стороны стали 45.

Таблица 3

Результаты механических испытаний сварного соединения стали 45 со сплавом ЭИ698-ВД

Свойства	Температура испытания, °С	Условный номер образца	Значения свойств
Предел прочности при растяжении, МПа	20	1	520
		2	520
		3	530
	200	1	440
		2	440
		3	450
Ударная вязкость при изгибе (КСУ), Дж/см ²	20	1	78,8
		2	69,8
		3	69,9

Результаты механических испытаний сварного соединения
стали 45 со сплавом ЭП718-ИД

Свойства	Температура испытания, °С	Условный номер образца	Значения свойств
Предел прочности при растяжении, МПа	20	1	560
		2	550
		3	520
	200	1	540
		2	500
		3	490
Ударная вязкость при изгибе (КСУ), Дж/см ²	20	1	79,3
		2	85,3
		3	63,9



Рис. 9. Внешний вид образцов после проведения механических испытаний на растяжение

При испытаниях на растяжение все образцы разрушились по основному металлу со стороны стали 45 (рис. 9).

Заключения

В результате комплексного подхода и поэтапного решения сложных материаловедческих и конструкторских задач авторами данной статьи разработана и внедрена в серийное производство технология сборки и электронно-лучевой сварки валов ротора турбокомпрессора серии ТК32 с полувалами из конструкционной стали и дисками из жаропрочных никелевых сплавов.

В сварном соединении заготовок валов ротора сталь 45+сплав ЭП718-ИД и сталь 45+сплав ЭИ698-ВД отсутствуют дефекты сварных соединений по результатам неразрушающего контроля, отношение прочности сварных соединений к прочности основного материала (стали 45) составляет $>1,0$, так как все испытанные образцы были разрушены основным материалу – стали 45.

Успешно проведены стендовые и типовые испытания роторов в составе турбокомпрессора ТК32-11 ДВС тепловоза, осуществляется серийная поставка валов.

Библиографический список

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. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Нефедова Ю.Н., Козлова О.Ю., Пантелеев М.Д., Осипов Н.Н., Клычев А.В. Технологические особенности изготовления деталей из алюминий-

- литиевого сплава 1441 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2018. №10 (70). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.03.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-17-26.
3. Лукин В.И., Кулик В.И., Бецофен С.Я., Лукина Е.А., Шаров А.В., Пантелеев М.Д., Саморуков М.Л. Сварка трением с перемешиванием полуфабрикатов высокопрочного алюминий-литиевого сплава В-1469 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №12 (60). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.03.2020) DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-12-2-2.
 4. Лукин В.И., Иода Е.Н., Скупов А.А., Пантелеев М.Д. Влияние термической обработки на характеристики сварных соединений высокопрочных алюминий-литиевых сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2015. №4. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.03.2020) DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-6-6.
 5. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Литейные конструкционные сплавы на основе алюминида никеля // Двигатель. 2010. №4. С. 24–25.
 6. Каблов Е.Н., Лукин В.И. Интерметаллиды на основе титана и никеля для изделий новой техники // Автоматическая сварка. 2008. №11. С. 4–8.
 7. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Сварка и пайка в авиакосмической промышленности // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. «Сварка и безопасность» (11–12 окт. 2012 г.): в 2 т. Якутск, 2012. Т. 1. С. 21–30.
 8. Лукин В.И., Оспенникова О.Г., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д. Сварка алюминиевых сплавов в авиакосмической промышленности // Сварка и диагностика. 2013. №2. С. 47–52.
 9. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
 10. Аргинбаева Э.Г., Назаркин Р.М., Шестаков А.В., Карачевцев Ф.Н. Исследование влияния термической обработки на структурно-фазовые параметры интерметаллидных сплавов на основе никеля // Авиационные материалы и технологии. 2017. №3 (48). С. 8–13. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-8-13.
 11. Пантелеев М.Д., Бакрадзе М.М., Скупов А.А., Щербаков А.В., Белозор В.Е. Технологические особенности сварки плавлением алюминиевого сплава В-1579 // Авиационные материалы и технологии. 2018. №3 (52). С. 11–17. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-3-11-17.
 12. Каблов Е.Н., Летников М.Н., Оспенникова О.Г., Бакрадзе М.М., Шестакова А.А. Особенности формирования частиц упрочняющей γ' -фазы в процессе старения высоколегированного жаропрочного деформируемого никелевого сплава ВЖ175-ИД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. №9 (81). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.02.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-3-14.
 13. Лукин В.И., Ковальчук В.Г., Голев Е.В., Ходакова Е.А., Россохина Л.И., Грибков М.С., Мосягин А.С., Хованов В.А. Электронно-лучевая сварка высокопрочного литейного никелевого сплава ВЖ172Л // Сварочное производство. 2016. №5. С. 44–49.
 14. Стратегия развития ОАО «Российские железные дороги» до 2030 г. URL: <https://ar2016.rzd.ru/ru/strategy/development-strategy-2030> (дата обращения: 03.02.2020).
 15. Николаев Г.А. Сварка в машиностроении: справочник: в 4 т. М.: Машиностроение, 1978. Т. 2 / под ред. А.И. Акулова. С. 332–338.
 16. Гончаров А.Л., Слива А.П., Портнов М.А., Терентьев Е.В., Грибков М.С. Исследование сварных соединений разнородных сталей деталей магнитопровода, выполненных ЭЛС // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Сер.: Аэрокосмическая техника. 2013. Т. 15. №4. С. 74–87.
 17. Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н. и др. Электронно-лучевая сварка / под ред. Б.Е. Патона. Киев: Наукова думка, 1987. 256 с.
 18. Сорокин Л.И. Напряжения и трещины при сварке и термической обработке жаропрочных никелевых сплавов // Сварочное производство. 1999. №12. С. 11.
 19. Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов в состаренном состоянии // Автоматическая сварка. 1983. №7. С. 12–16.

20. Киреев Р.Ю., Булков А.Б., Петренко В.Р., Чумарный В.П. Исследование температурного поля при электронно-лучевой сварке никелевых сплавов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. №1. С. 4–7.
21. Лесков Г.И., Живага Л.И. Особенности электронно-лучевой сварки ферромагнитных материалов // Автоматическая сварка. 1981. №11. С. 38–40.
22. Драгунов В.К. Формирование швов при электронно-лучевой сварке магнитных и немагнитных сплавов // Сб. науч. трудов Московского энергетического института. М.: МЭИ, 1989. №207. С. 58–64.
23. Драгунов В.К. Электронно-лучевая сварка комбинированных магнитопроводов электрических машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1990. С. 1–7.
24. Рыжков Ф.Н., Башкатов А.В., Кондратов А.Е., Петренко В.Р. Исследование особенностей проплавления электронным лучом двухслойных пластин из разнородных металлов // Материалы V Всесоюзной конференции по электронно-лучевой сварке. Киев: Наукова думка, 1977. С. 75–77.
25. Замрий Г.А. Движение расплава в кратере при ЭЛС разнородных металлов // Известия Инженерно-технологической академии Чувашской Республики. 1996. №2. С. 253–258.
26. Metzger G., Lison R. Electron Beam Welding of Dissimilar Metals // Welding Journal. 1976. Vol. 55. No. 8. P. 230–240.
27. Ибатулин О.М. Сварка меди и кобальта кольцевым электронным пучком // Автоматическая сварка. 1984. №4. С. 68.
28. Башкатов А.В., Плетнев В.М., Самороковский Ф.В., Петренко В.Р. Электронно-лучевая сварка бронзы БрХ08 со сталями ЭП288 и ЭП452 // Материалы V Всесоюзной конференции по электронно-лучевой сварке. Киев: Наукова думка, 1977. С. 180–182.
29. Зарегенский А.В., Агарков В.Я., Колечко А.А. и др. ЭЛС головок фурм для кислородного дутья // Автоматическая сварка. 1980. №10. С. 68–69.
30. Елисеев Ю.С., Масленков С.Б., Гейкин В.А., Поклад В.А. Технология создания неразъемных соединений при производстве газотурбинных двигателей / под общ. ред. С.Б. Масленкова. М.: Наука и технологии, 2001. С. 428–432.
31. Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Акопьянц К.С. О нестабильности глубины проплавления при электронно-лучевой сварке // Сварка электронным лучом. М.: Моск. Дом науч.-техн. пропаганды им. Ф.Э. Дзержинского, 1974. С. 26–30.
32. Кораб Г.Н. Формирование кольцевых швов на толстостенных трубах при электронно-лучевой сварке // Автоматическая сварка. 1975. №7. С. 14–16.
33. Патон Б.Е., Лесков Г.И., Живага Л.И. Специфика образования шва при ЭЛС // Автоматическая сварка. 1976. №3. С. 1–5.
34. Ольшанский Н.А. Технологические разработки МЭИ в области ЭЛС // Материалы VII Всесоюзной конференции по электронно-лучевой сварке. Киев: Наукова думка, 1981. С. 12–14.