

УДК 669.018.44

Л.И. Рассохина¹, О.Н. Битюцкая¹, М.В. Гамазина¹, А.Б. Ечин¹

**ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК ДЕТАЛЕЙ
ГАЗОТУРБИНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ «ДИФФУЗОР»
ИЗ СПЛАВА ВЖ159 В УСЛОВИЯХ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-20-28

Представлены результаты отработки технологического процесса получения отливок деталей газотурбинных двигателей, таких как «диффузор», в условиях машиностроительного предприятия. Для выявления металлургических дефектов на отливках проведен контроль неразрушающими методами, а для определения механических свойств проведены испытания на растяжение и на длительную прочность.

Сделан вывод о том, что отработанный технологический процесс литья фасонных деталей из сплава ВЖ159 позволяет рекомендовать его к серийному производству для изготовления фасонных отливок деталей авиационных двигателей.

Ключевые слова: сплав ВЖ159, жаропрочные сплавы, литейные свойства, литниково-питающая система, фасонная деталь «диффузор», газотурбинные двигатели.

Л.И. Rassokhina¹, О.Н. Bityutskaya¹, М.В. Gamasina¹, А.В. Echin¹

**TECHNOLOGICAL PROCESS DEVELOPMENT
OF CASTING DETAILS «DIFFUSER» FOR GAS TURBINE ENGINES
FROM VZh159 SUPERALLOY IN THE CONDITIONS
OF THE MACHINE-BUILDING ENTERPRISE**

The results of development the technological process of obtaining casting parts «diffuser» for gas turbine engines in the conditions of machine-building enterprise are presented. Nondestructive testing was carried out to identify metallurgical defects on castings, and tensile and long – term strength tests were carried out to determine mechanical properties.

The conclusion is made that the fulfilled technological process of casting of shaped parts from VZh159 superalloy allows to recommend it to serial production for production of shaped castings of details of aircraft engines.

Keywords: alloy VZh159, superalloys, casting properties, gate-feeding system, shaped part «diffuser», gas turbine engines.

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

Одной из ответственных и важных деталей газогенератора является корпусная деталь диффузора. Конструктивно диффузор служит для снижения скорости воздуха на входе в жаровую трубу камеры сгорания с целью обеспечения устойчивого процесса горения в камере сгорания и преобразования части кинетической энергии потока воздуха в прирост статического давления. Основные нагрузки – статические, возникающие от потока, проходящего через лопаточную решетку. Через каналы в стойках пропускается воздух из полости за лабиринтом компрессора, обеспечивая

заданное усилие на подшипник. Спереди к диффузору приварен кольцевой пояс, образующий неподвижную часть трехступенчатого лабиринтного уплотнения компрессора. На диффузоре закреплена уплотнительная втулка приемника давления антипомпажной защиты и штуцер отбора воздуха на систему регулирования двигателя.

Для деталей и узлов статора горячей зоны газотурбинного двигателя (ГТД) с наиболее высокой температурой работы – жаровой трубы, диффузора, внутреннего корпуса, экранов, кожухов и других элементов камеры сгорания – используются жаростойкие свариваемые сплавы, обладающие работоспособностью до температур от 1000 до 1100°C [1–5]. К такому классу сплавов относится разработанный во ФГУП «ВИАМ» и до настоящего времени широко применяемый никелевый жаропрочный свариваемый сплав ЭП648 (ВХ4А), обеспечивающий благодаря своим прочностным характеристикам применение в высокотемпературных нагруженных статорных узлах, а благодаря высоким характеристикам жаропрочности и жаростойкости – применение для элементов жаровой трубы (в виде раскатных колец для фланцев и листового проката для тонкостенных обечаек). С целью повышения удельной весовой эффективности, а также для унификации материалов, применяемых в конструкциях, разработана литейная модификация сплава ВХ4А – сплав ВХ4Л, который широко применяется для изготовления диффузоров, завихрителей, фронтных устройств и элементов форсажных камер [6–9]. Названный сплав относится к классу слабостареющих жаропрочных никелевых сплавов, так как выдержка в интервале температур распада твердого раствора (600–850°C) не приводит к выделению существенной доли дисперсных фаз, что позволяет сохранить пластичность и свариваемость на относительно высоком уровне [10].

Однако опыт применения сплавов ЭП648 (ВХ4А) и ВХ4Л в изделиях показал, что, несмотря на хорошие показатели прочности, технологической пластичности и свариваемости, сплавы имеют ряд серьезных недостатков, ограничивающих ресурс изделий. Одной из важных проблем для этих сплавов является их структурная нестабильность: сплавы в процессе эксплуатации склонны к дополнительному выделению нежелательных топологически плотноупакованных фаз низкопластичной морфологии, что приводит к снижению механической прочности, пластичности и жаропрочности, результатом чего может стать разрушение детали изделия в процессе эксплуатации [10–14].

Ввиду потребности двигателестроения в структуростабильных сплавах во ФГУП «ВИАМ» разработан высокотехнологичный структуростабильный деформируемый сплав ВЖ159 с рабочей температурой до 1000°C, не имеющий недостатков сплава ЭП648 и превосходящий его по свойствам [10–15]. Фазовые составляющие сплава не склонны к вырождению в частицы с нежелательной морфологией структуры, благодаря чему пластические характеристики в диапазоне температур эксплуатации остаются на высоком уровне [10]. Кроме того, сплав ВЖ159 обладает высокими характеристиками свариваемости (в деформированном состоянии), в том числе в термоупрочненном состоянии, что обеспечивает ремонтпригодность деталей и сварных узлов из этого сплава. Сплав ВЖ159 не имеет зарубежных аналогов, однако его применение в авиационной отрасли долгое время ограничивалось по причине отсутствия литейного варианта, необходимого для получения сложнопрофильных деталей из отливок вследствие нецелесообразности и невозможности их изготовления из деформированной заготовки или листа. Отсутствовали также технологии получения отливок из сплава ВЖ159 методом литья по выплавляемым моделям в серийном производстве [6, 14, 15].

Работы по созданию узлов перспективных вертолетных двигателей предполагают проведение работ по отработке технологического процесса получения отливок ГТД из сплава ВЖ159 в условиях машиностроительного предприятия.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 9.1. «Монокристаллические жаропрочные суперсплавы, включая естественные композиты» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [14].

Материалы и методы

В рамках научно-исследовательской работы «Разработка технологий литья и сварки фасонных деталей камеры сгорания из сплава ВЖ159 применительно к изготовлению литосварных конструкций» разработана технология получения отливок фасонных деталей типа «диффузор», выпущена нормативная документация (технологическая инструкция).

Работы по отработке технологии литья отливок фасонных деталей типа «диффузор» из жаропрочного сплава ВЖ159 проводили в производственных условиях АО «ММП им. В.В. Чернышева».

Для проведения опытно-технологических работ ФГУП «ВИАМ» передал на АО «ММП им. В.В. Чернышева» шихтовую прутковую заготовку жаропрочного никелевого сплава ВЖ159, которая, согласно паспорту на продукцию, изготовлена в соответствии с действующей нормативной документацией на сплав ВЖ159 и по показателям качества соответствует техническим требованиям на отливку типа «диффузор», согласованным с АО «ММП им. В.В. Чернышева».

С учетом особенностей производства, модели опытных деталей типа «диффузор» изготовлены из серийной модельной композиции ЗГВ-103М, внутренние отверстия диффузора сформированы на восковой модели при помощи удаляемых керамических стержней (рис. 1–3).



Рис. 1. Общий вид модели детали



Рис. 2. Оформление отверстий в восковой модели диффузора керамическими стержнями



Рис. 3. Общий вид керамического стержня для оформления внутренней полости

Литниково-питающая система (ЛПС) отливки детали ГТД типа «диффузор» должна обеспечить равномерное питание отливки в процессе кристаллизации металла и отсутствие металлургических дефектов (пор, неспаев, рыхлот, рассеянной пористости, корольков), связанных с заливкой металла в керамическую форму. В связи с этим, а также с учетом сложности геометрической формы детали (наличие тепловых узлов в местах перехода тонких стенок к массивному ободу), предложена оптимальная ЛПС (рис. 4), состоящая из массивных «прибылей» в количестве 24 шт., расположенных в местах тепловых узлов отливки и двух кольцевых коллекторов, объединяющих «прибыли» и охватывающих отливку по наружному и внутреннему диаметру.



Рис. 4. Общий вид модельного блока с литниково-питающей системой

При выборе состава керамической формы учитывались геометрические размеры отливки детали диффузора (максимальный диаметр обода составляет 480 мм), а также большая масса (53 кг) расплава, заливаемого в керамическую форму по причине разветвленной ЛПС, обеспечивающей питание массивных тепловых узлов в местах перехода к тонким стенкам (минимальная толщина стенки – до 1,8 мм). С учетом указанных особенностей изготовлены керамические формы следующего состава.

Суспензия первого и второго слоя – на основе электрокорунда (состав керамической шихты по фракциям, %: 25 – F800, 40 – F320, 3 – F230), обсыпка электрокорундом фракции F60; суспензия третьего и четвертого слоя – на основе дистен-силлиманита пылевидного, обсыпка электрокорундом фракции F60; суспензия с четвертого по девятый слой – на основе электрокорунда (состав керамической шихты по фракциям, %: 25 – F800, 40 – F320, 35 – F230), обсыпка электрокорундом фракции F30; девятый слой – без обсыпки (рис. 5).

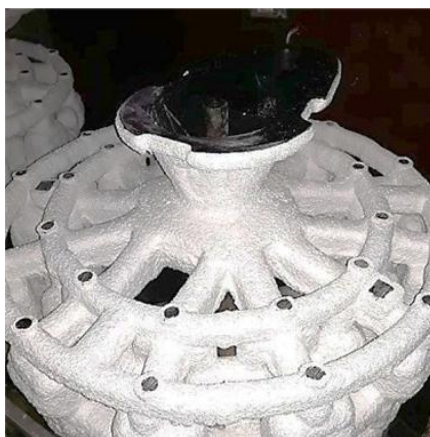


Рис. 5. Общий вид керамической формы детали типа «диффузор» после удаления модельного состава

С использованием рекомендаций ФГУП «ВИАМ» при отработке технологии изготовления опытных отливок фасонных деталей из жаропрочного сплава ВЖ159 применительно к фасонным деталям типа «диффузор» выбраны определенные технологические параметры заливки керамических форм отливки типа «диффузор»: температура нагрева керамических форм, температура перегрева расплава и температура заливки.

Заливку керамических форм проводили на промышленной вакуумной плавильной установке ВИПЭ-3 (рис. 6 и 7).



Рис. 6. Общий вид керамической формы после предварительной прокалки перед загрузкой в вакуумную плавильную установку ВИПЭ-3

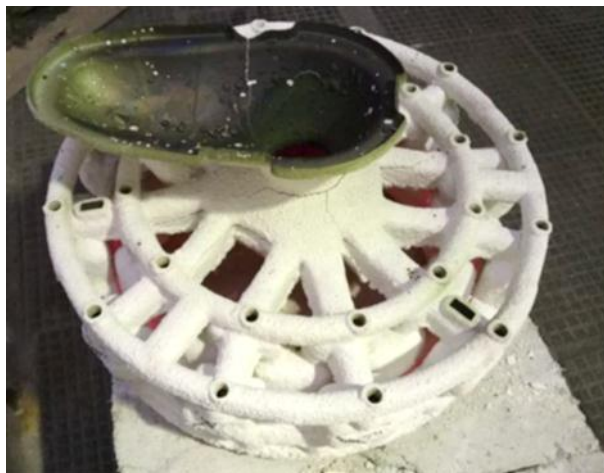


Рис. 7. Общий вид залитой керамической формы

Для отливок детали типа «диффузор» шифров 1-159, 2-159 и 3-159 выбраны несколько режимов заливки керамических форм. Фактические замеры режимов заливки трех керамических форм детали типа «диффузор» подтверждают соблюдение режима для получения фасонных деталей из сплава ВЖ159.

После выполнения операций заливки керамических форм, удаления остатков керамики, отрезки отливок от элементов ЛПС произведена термическая обработка отливок трех деталей типа «диффузор» шифров 1-159, 2-159 и 3-159. Согласно рекомендациям ФГУП «ВИАМ», произведена закалка по выработанному режиму: нагрев с печью со скоростью не более $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ до определенной температуры, выдержка при ней (не менее 30 мин), затем охлаждение в свободном состоянии на воздухе (рис. 8 и 9).



Рис. 8. Общий вид отливки детали типа «диффузор» с элементами литниково-питающей системы



Рис. 9. Общий вид отливки типа «диффузор» после удаления элементов литниково-питающей системы и термической обработки

Для оценки качества отливки и определения наличия металлургических дефектов на отливках фасонной детали типа «диффузор» проведен контроль неразрушающими методами:

- исследование капиллярным методом ЛЮМ17-Пм в соответствии с ГОСТ 1 90282–79 для выявления поверхностных дефектов материала из сплава ВЖ159;
- исследование радиографическим методом на выявление внутренних дефектов материала из сплава ВЖ159.

Для оценки уровня механических свойств на отливках типа «диффузор» проводили испытания: на растяжение – по ГОСТ 1497–2014, на длительную прочность – по ГОСТ 10145–85.

Результаты и обсуждение

После термической обработки проведен контроль качества залитых отливок диффузора на соответствие согласованным техническим требованиям к опытным отливкам фасонной детали типа «диффузор». Проведенный визуальный, рентгенографический и капиллярный контроль показал, что получены плотные отливки, отсутствуют неслитины и плены, трещины, корольки, сквозные рыхлоты. Рентгенографический контроль также выявил на отливках дефекты в виде засоров и раковин, расположенные в основном на верхнем ободе отливок и вызванные неудовлетворительным качеством керамических форм. Выявленные дефекты являются допустимыми, их устранение проводили с помощью слесарной обработки и аргонодуговой сварки с промежуточным контролем радиографическим методом. По результатам повторного рентгенопросвечивания выявлено устранение части дефектов. Оставшиеся дефекты устраняли заваркой. Заварку для устранения дефектов проводили дважды с промежуточной термообработкой – повторной закалкой (рис. 10).



Рис. 10. Общий вид фрагмента отливки типа «диффузор» с удаленным слесарной обработкой дефектом

В соответствии с техническими требованиями на опытные отливки фасонных деталей типа «диффузор» из заготовок образцов-свидетелей, вырезанных из ЛПС залитых отливок, изготовлены и испытаны в производственных условиях АО «ММП им. В.В. Чернышева» образцы для проведения кратковременных и длительных механических испытаний – определение уровня механических свойств и длительной прочности.

Исследования уровня механических свойств проводили при комнатной температуре на двух образцах на растяжение и по одному образцу на длительную

прочность при температурах 650 и 1000°C соответственно. Размер образцов для испытаний на растяжение – по ГОСТ 1497–2014 (№7, тип 3); на длительную прочность – по ГОСТ 10145–85 на гладких образцах. Все испытываемые образцы доведены до разрушения и утилизированы.

Сравнительные свойства сплавов ВЖ159 и ВХ4Л

Свойства	Средние значения свойств для сплава	
	ВЖ159	ВХ4Л
Предел прочности при растяжении $\sigma_B^{20^\circ}$, МПа	900	800
Длительная прочность, МПа:	$\sigma_{100}^{650^\circ}$	540
	$\sigma_{100}^{1000^\circ}$	27
Относительное удлинение при растяжении δ^{20° , %	13	5,5

Полученные значения механических свойств и длительной прочности для образцов из сплава ВЖ159 удовлетворяют комплексу технических требований к опытным отливкам диффузора из жаропрочного никелевого сплава ВЖ159 ($\sigma_B^{20^\circ} \geq 800$ МПа, $\delta^{20^\circ} \geq 10\%$, $\sigma_{100}^{650^\circ} \geq 540$ МПа, $\sigma_{100}^{1000^\circ} \geq 25$ МПа). Сравнительные характеристики свойств сплавов ВЖ159 и ВХ4Л показали, что сплав ВЖ159 превосходит сплав ВХ4Л по кратковременной прочности на 12,5%, по длительной прочности при 650°C – на 12,5%, по длительной прочности при 1000°C – на 32%. По относительному удлинению при растяжении он в 2,4 раза превосходит сплав ВХ4Л (см. таблицу).

По расчетам на долговечность по Мэнсону ($\sigma N^m = \text{const}$) и по параметру Ларсена–Миллера – $LMP(\sigma) = T(20 + \log t_p)$ (результаты испытаний на длительную прочность сплава ВЖ159) можно ожидать, что при переходе к изготовлению диффузора из сплава ВЖ159 увеличение ресурса по сравнению с диффузором, изготавливаемым в настоящее время из сплава ВХ4Л, составит не менее чем на 10%.

Заключения

1. По разработанным во ФГУП «ВИАМ» технологическим рекомендациям, в условиях машиностроительного предприятия АО «ММП им. В.В. Чернышева» проведена отработка технологии изготовления отливок фасонной детали типа «диффузор» из жаропрочного сплава ВЖ159, в том числе:

- разработана оптимальная конструкция ЛПС для получения отливок фасонной детали, с использованием которой изготовлены модельные блоки и керамические формы для литья отливок фасонной детали типа «диффузор» из жаропрочного сплава ВЖ159 в количестве трех штук;

- отработаны технологические параметры литья отливок фасонной детали на промышленной установке ВИПЭ-3 и изготовлены по отработанным технологическим режимам отливки детали типа «диффузор» в количестве трех штук;

- проведена термообработка отливок по режимам, указанным в технологических рекомендациях ФГУП «ВИАМ»;

- проведен контроль качества полученных отливок фасонной детали типа «диффузор» в количестве трех штук визуальным и рентгенографическим методом согласно разработанным техническим требованиям, результаты которого показали, что отливки плотные, на них отсутствуют неслитины и плены, трещины, корольки,

сквозные рыхлоты и раковины, а также выявлены допустимые и устраняемые, согласно техническим требованиям, дефекты;

– устранение, согласно техническим требованиям, выявленных дефектов с помощью слесарной обработки и аргоно-дуговой сварки с промежуточным контролем радиографическим методом.

2. Проведены испытания образцов для подтверждения уровня свойств, заданного техническими требованиями на отливки типа «диффузор». Результаты испытаний показали, что полученные значения механических свойств и длительной прочности образцов из сплава ВЖ159 ($\sigma_B^{20^\circ} = 900$ МПа, $\delta^{20^\circ} = 13\%$, $\sigma_{100}^{650^\circ} = 540$ МПа, $\sigma_{100}^{1000^\circ} = 27$ МПа) удовлетворяют техническим требованиям к опытным отливкам типа «диффузор» из жаропрочного никелевого сплава ВЖ159.

3. По результатам проведенной работы определено, что разработанный во ФГУП «ВИАМ» и отработанный в производственных условиях машиностроительного предприятия технологический процесс получения деталей ГТД типа «диффузор» из сплава ВЖ159 обеспечил получение годных отливок. Уровень механических свойств и длительной прочности при температуре, приближенной к условиям эксплуатации, показывает возможность использования сплава ВЖ159 в качестве перспективного конструкционного материала для деталей статора авиационного двигателя, работающих при температурах до 900°C включительно. Отработанный технологический процесс литья фасонных деталей из сплава ВЖ159 позволяет рекомендовать его к серийному производству для изготовления фасонных отливок деталей авиационных двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях // Сварочное производство. 1997. №4. С. 4–11.
2. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокожаропрочные деформируемые никелевые сплавы для перспективных газотурбинных двигателей и газотурбинных установок // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение, 2011. №SP2. С. 98–103.
3. Моисеев С.А., Латышев В.Б. Жаропрочные свариваемые сплавы для узлов статора современных и перспективных авиационных ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2003. №1. С. 152–157.
4. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. материалов. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015. 720 с.
5. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. №3. С. 47–54.
6. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Литейные жаропрочные никелевые сплавы для перспективных авиационных ГТД // Технология легких сплавов. 2007. №2. С. 6–16.
7. Евгенов А.Г., Рогалев А.М., Неруш С.В., Мазалов И.С. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №2. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 24.10.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2.
8. Евгенов А.Г., Горбовец М.А., Прагер С.М. Структура и механические свойства жаропрочных сплавов ВЖ159 и ЭП648, полученных методом селективного лазерного сплавления // Авиационные материалы и технологии. 2016. №S1 (43). С. 8–15. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-8-15.

9. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Оспенникова О.Г., Семенов Б.И., Семенов А.Б., Королев В.А. Металлопорошковые композиции жаропрочного сплава ЭП648 производства ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ в технологиях селективного лазерного сплавления, лазерной газопорошковой наплавки и высокоточного литья полимеров, наполненных металлическими порошками // Известия высших учебных заведений. Сер: Машиностроение. 2016. №9 (678). С. 62–80.
10. Мазалов И.С., Евгенов А.Г., Прагер С.М. Перспективы применения жаропрочного структурно-стабильного сплава ВЖ159 для аддитивного производства высокотемпературных деталей ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2016. №S1 (43). С. 3–7. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-3-7.
11. Евгенов А.Г., Рогалев А.М., Карачевцев Ф.Н., Мазалов И.С. Влияние горячего изостатического прессования и термической обработки на свойства сплава ЭП648, синтезированного методом селективного лазерного сплавления // Технология машиностроения. 2015. №9. С. 11–16.
12. Ломберг Б.С., Моисеев С.А. Жаропрочные и деформируемые сплавы для современных и перспективных ГТД // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №6. С. 2–5.
13. Ломберг Б.С., Капитаненко Д.В., Мазалов И.С., Бубнов М.В. Технологические параметры получения деталей холодной штамповкой из листовых заготовок жаропрочных сплавов ВЖ159, ВЖ171 и высокопрочного сплава ВЖ172 // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2015. №8. С. 14–19.
14. 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.
15. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л. Современные литые никелевые жаропрочные сплавы // Тр. Междунар. науч.-технич. конф. «Научные идеи С.Т. Кишкина и современное материаловедение». М.: ВИАМ, 2006. С. 39–55.