

Конкурсная работа

Авторы: Аксенов А.Г. (АО «ОДК-Авиадвигатель»), Фасхутдинов Р.Н. (АО «ОДК-Авиадвигатель»), Неруш С.В. (ФГУП «ВИАМ»), Рогалев А.М. (ФГУП «ВИАМ»).

Название работы: Создание прорывной аддитивной технологии селективного лазерного сплавления отечественных металлических порошков для изготовления деталей авиационных двигателей на примере завихрителей камеры сгорания двигателя ПД-14.

Цель: Разработка технологии изготовления деталей перспективного газотурбинного двигателя ПД-14 методом селективного лазерного сплавления из отечественной металлопорошковой композиции жаропрочного сплава на никелевой основе.

Описание работы: В настоящее время аддитивные технологии находятся в фазе бурного роста. Оборот мирового рынка аддитивных технологий увеличивается в среднем более чем на 27% в год. Интенсивный рост рынка объясняется преимуществами аддитивных технологий по сравнению с традиционными формообразующими технологиями. Это возможность изготовления деталей практически любой сложности с высокими свойствами синтезированного материала. А также сокращение сроков разработки и изготовления деталей за счет отсутствия фазы подготовки производства, что позволяет при необходимости организовать локальное производство необходимых деталей в мировых масштабах (в любой географической точке), просто передав цифровую модель. Таким образом, внедрение аддитивных технологий внесет значительный вклад в создание «умной» экономики и будет способствовать к переходу в шестой технологический уклад.

Широкое внедрение аддитивных технологий в отечественной промышленности сдерживается не только отсутствием отечественного оборудования, серийного производства металлических и полимерных порошков, но также и отсутствием объединённой базы необходимых материалов, на основании которой можно было бы определить материалы первоочередной необходимости и наиболее широкого применения. Помимо организационных и технологических проблем, не менее значимым аспектом возможности и целесообразности внедрения аддитивных технологий является экономическая эффективность применения аддитивных технологий. Одной из причин высокой себестоимости аддитивных изделий является высокая стоимость материалов для аддитивных технологий. Наиболее дешевым способом изготовления металлических порошков с требуемыми для аддитивных технологий характеристиками является газовая атомизация. Эта

технология характеризуется относительно широким гранулометрическим составом получаемого порошка. В авиационной отрасли, в части непосредственного изготовления деталей, к настоящему моменту наибольшее распространение и наиболее серьезные перспективы дальнейшего внедрения имеют аддитивные установки для работы с металлическими материалами, в частности селективного лазерного сплавления.

В связи с необходимостью снижения веса двигателя ПД-14, высокими требованиями к конструкции двигателя изготавливаемые детали имеют максимально тонкие стенки и сложный профиль геометрии элементов конструкции. Завихритель камеры сгорания двигателя ПД-14 имеет сложный профиль лопаточного канала, который в настоящее время получить «классическим» методом литья практически невозможно. Для реализации изготовления данной детали специалистами АО «ОДК-Авиадвигатель» была выполнена работа по изготовлению нескольких видов прототипов завихрителя на установке аддитивного производства из импортного материала РН1 в целях доведения конструкции в обеспечение требуемого расхода воздуха через лопаточный канал в пятигорелочном отсеке. По результатам выполненных работ установлено, что технология селективного лазерного сплавления обеспечивает изготовление ДСЕ как по точности геометрии, так и по расходу воздуха.

В процессе изготовления в условиях АО «ОДК-Авиадвигатель» специалисты столкнулись с проблемой удаления заготовок завихрителей от плиты.

В технологии разработаны и исследованы 6 вариантов геометрии «поддержки» при выращивании заготовки завихрителя. Были представлены следующие варианты геометрии поддержки.

- a) Не фрагментированная сетчатая поддержка;
- b) Открытая фрагментированная сетчатая поддержка;
- c) Закрытая фрагментированная сетчатая поддержка с отверстиями для удаления порошка.
- d) Открытая фрагментированная сетчатая поддержка, спроектированная с учетом геометрии.
- e) Поддержка с твердотельными элементами, спроектированная с учетом геометрии.
- f) Поддержка с твердотельными элементами, с возможностью быстрого удаления.

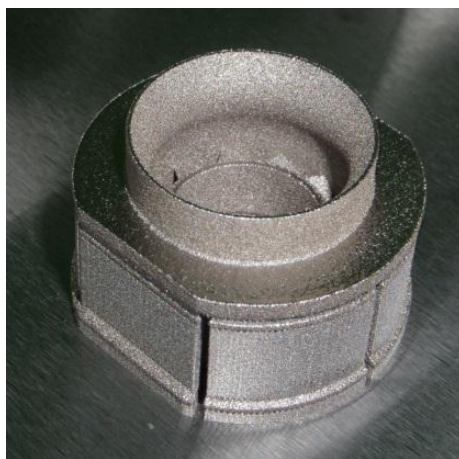


Рис.1 Вариант поддержки е) на плите

Среди изготовленных завихрителей вариант е) является самым оптимальным. Масса заготовки снижена, за счет уменьшения объема занимаемого поддержкой. Вариант е) является самым экономичным по затратам материала еще и потому, что в нем почти не остается не спечённого порошка, оставшийся внутри легко извлечь еще на плите до термообработки.

В условиях пятигорелочного отсека проведены испытания пяти модификаций наружных завихрителей, изготовленных с применением аддитивных технологий и выбрана оптимальная геометрия лопаточного канала удовлетворяющая требованиям по расходу воздуха.



Рис. 2 Завихрители после испытаний

По причине отсутствия технической возможности, изготовления из отечественных материалов на установке АО «ОДК-Авиадвигатель», были выполнены совместные работы со специалистами ФГУП «ВИАМ» по изготовлению завихрителей на двигатели ПД-14 из отечественного материала. В конструкции завихрителя заложен литейный никелевый сплав ВХ4Л, который является аналогом никелевого сплава ЭП648-ВИ.

Разработка самого материала, и в частности металлопорошковой композиции, технологии селективного лазерного синтеза является процессом весьма трудоемким, затратным и требует проведения целого комплекса исследований на всех стадиях: в части технологии получения порошков, исследования их физических и технологических свойств, химического состава и морфологии частиц; в части отработки параметров послойного сплавления – исследования влияния энерго-скоростных параметров,

стратегии штриховки, толщины наносимого слоя и т.п. на структуру и механические свойства получаемого материала, а также исследование влияния последующей термической и, если это необходимо, газостатической обработок.

В качестве материала применялся порошок сферический гранулометрического состава +10..-63 мкм из сплава ЭП648-ВИ. Материал ЭП648-ВИ разработан и произведен ФГУП «ВИАМ». Порошок получен методом газового распыления на атомайзере.

Основными этапами изготовления завихрителя является:

1. Разработка конструкции «блочного» типа технологических поддержек для выращивания (рис. 1) .
2. Собственно процесс выращивания заготовки завихрителя с образцами свидетелями характеристик механических свойств.

В процессе выращивания заготовок применялась технология стохастического экспонирования («шахматная» штриховка). Суть ее в том, что весь слой (текущее сечение) детали разбивается на отдельные фрагменты квадратной формы (рис. 3), называемые «островками». Далее, лазер засвечивает и сплавляет каждый отдельный «островок». Фрагменты сплавляются по заранее определенному алгоритму, составленному таким образом, чтобы локализовать внутренние напряжения металла в небольшом участке (объеме). Кроме того, засветка каждого «островка» идет штриховкой, и соседние «островки» заштриховываются в перпендикулярном направлении, что позволяет локализованные напряжения снижать до минимума. При сплавлении следующего сечения шаг разбивки сдвигается, направление штриховки внутри островков поворачивается, обеспечивая динамически изменяемый рисунок штриховки. Все «островки» сплавляются друг с другом путем полного оплавления краев «островка» - это позволяет добиваться максимально однородной и плотной структуры с минимальной пористостью.

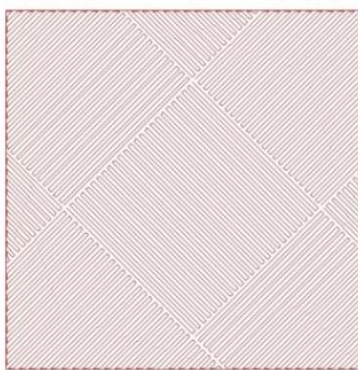


Рис. 3. Схема стохастического экспонирования («шахматная»)

Режимы сплавления порошка гранулометрического состава +10..-63 мкм сплава ЭП648-ВИ (ФГУП «ВИАМ») приведены в табл.1.

Параметры сплавления порошка

Зона сечения	Мощность, Вт	Скорость сканирования, мм/с
Поддержка	130	1000
Основная деталь	180	800
Внутренний контур	180	1600
Наружный контур	180	1600

В качестве инертной среды использовали азот, вырабатываемый штатным генератором. Содержание кислорода в процессе построения (по данным встроенного сенсора) на всех этапах составляло менее 0,1%.

Внешний вид заготовки завихрителя на платформе после выращивания приведен на рис. 4.

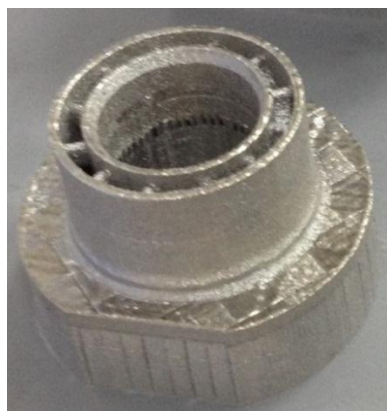


Рис. 4. Внешний вид выращенной заготовки завихрителя ФГУП «ВИАМ»

3. Термическая обработка и газостатическое прессование.

Термическая обработка и газостатическое прессование (ГИП) «выращенных» деталей выполнялись в ФГУП «ВИАМ» по режиму:

- закалка 1190⁰С, 3 часа, охлаждение на воздухе;
- старение 900⁰С, 16 часов, охлаждение на воздухе;
- ГИП при температуре 1180⁰С, 3 часа при давлении 150..153 Мпа в среде аргона.

4. Постобработка поверхности.

Пескоструйная обработка для очистки поверхности после ГИП (время 1-2мин, давление 3 атм., песок марки MS300A, оборудование PeenMatic Micro 620S).

5. Контроль внутренних дефектов методом компьютерной томографии и контроль геометрических размеров.

Контроль внутренних дефектов, в соответствии с ТУ, выполнялся методом компьютерной томографии в АО «ОДК-Авиадвигатель». По результатам контроля установлено, что завихрители соответствуют

требованиям (рис. 5). Результаты контроля геометрических размеров на ATOS приведены на рис. 6.

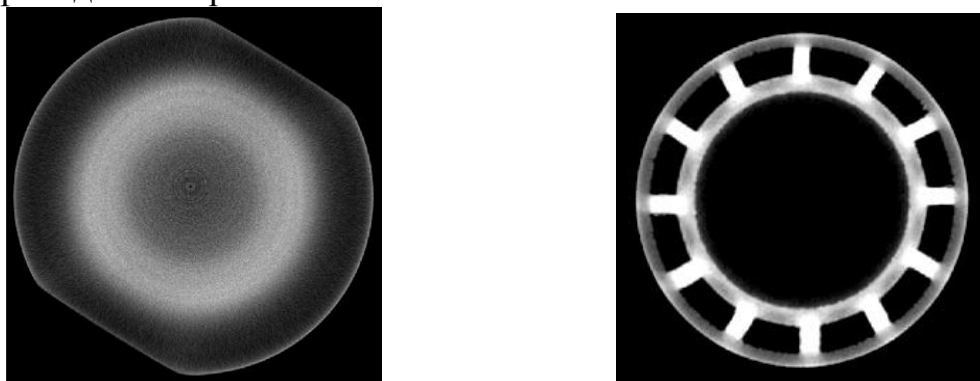


Рис. 5. Снимки томографического контроля заготовок завихрителей

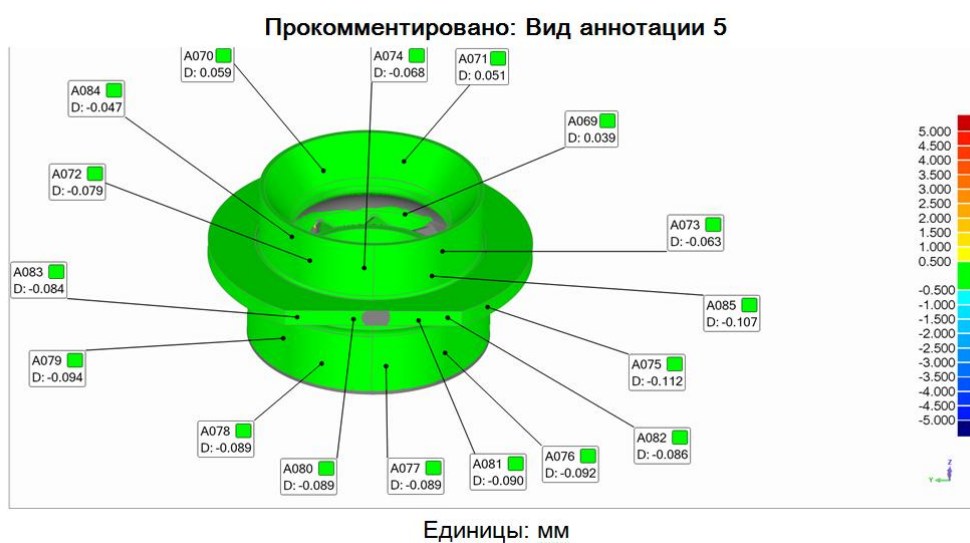


Рис. 6. Карта измерения завихрителя

б. Доработка до требуемых размеров механическим путем.

Доработка до требуемых размеров выполнялась по технологии АО «ОДК-Авиадвигатель» механическим путем, в том числе на данном этапе выполнялось удаление технологических поддержек для операции контроля химического состава заготовок завихрителя. Исследование химического состава на стружке. Определение расхода воздуха.

Результаты работы:

1. В части работ по разработке технологии получения отечественной металлпорошковой композиции жаропрочного сплава на никелевой основе марки ЭП648-ВИ методом атомизации были получены следующие результаты:

- разработана технология получения металлпорошковой композиции жаропрочного сплава на никелевой основе марки ЭП648-ВИ методом атомизации (распыление инертным газом). Разработанная технология позволила значительно повысить выход годного (в 4-5 раз)

металлопорошковой композиции заданного гранулометрического состава – 10-63 мкм (свыше 70%) по сравнению с отечественным аналогом – изготовлением порошков методом центробежного распыления (не более 15%);

- проведена оценка качества полученной металлопорошковой композиции сплава ЭП648-ВИ. Установлено, что в основной массе частицы гранулометрическим составом 10-63 мкм имеют сферическую форму и хорошую текучесть, а также обладают пониженным содержанием вредных газовых примесей: кислорода не более 0,01%, азота не более 0,005%. Пробное нанесение полученной металлопорошковой композиции в рабочем режиме на установке селективного лазерного сплавления показало равномерное формирования слоя.

2. В части работ по разработке технологии изготовления заготовки детали «завихритель» из металлопорошковой композиции сплава ЭП648-ВИ методом селективного лазерного сплавления, технологии газостатической и термической обработки:

- разработана технология селективного лазерного сплавления металлопорошковой композиции сплава ЭП648-ВИ, обеспечивающая получение остаточной объёмной доли пор не более 0,03%;

- разработана технология газостатической и термической обработки синтезированных заготовок, обеспечивающая полное «залечивание» микротрещин, образующихся в процессе лазерного синтеза, формирование оптимального структурного состояния металла с обеспечением высокого комплекса механических свойств вне зависимости от ориентации образцов при синтезе ($\sigma \geq 1100$ Мпа, $\delta \geq 19\%$, $KCU \geq 60$ Дж/см²), превышающие требования ТУ на литой полуфабрикат;

- разработаны технологические параметры поддерживающих структур, обеспечивающие получение заготовок деталей «завихритель» с максимальным отклонением от электронной модели на уровне ± 100 мкм, что в 3 раза выше по точности, чем существующие традиционные технологии литья.

3. По результатам работы разработана и выпущена следующая научно-техническая документация:

- Технологическая инструкция ТИ 1.595-16-369-2011 «Получение ультрадисперсных порошков на никелевой основе из сплава ЭП648».

- Технологическая инструкция ТИ 1.595-16-802-2015 «Получение заготовки детали «завихритель» из порошка сплава ЭП648-ВИ методом селективного лазерного сплавления».

- Технологическая инструкция ТИ 1.595-16-810-2015 «Проведение газостатической и термической обработок заготовок деталей, полученных из порошка сплава ЭП648-ВИ методом селективного лазерного сплавления».

- Получен патент №2492028 «Способ получения металлического порошка».

- Получено положительное решение на заявку № 2015148793. «Способ изготовления деталей послойным лазерным сплавлением металлических порошков жаропрочных сплавов на основе никеля».

- Оформляется дополнение к паспорту на синтезированный материал ЭП648.

4. Экономический эффект

Внедрение разработанных технологий в авиационную промышленность позволяет:

- увеличить коэффициент использования материала при изготовлении деталей ГТД до уровня 0,8, за счет использования аддитивных технологий, не требующих использования механических обрабатывающих станков и дорогостоящей оснастки;

- снизить время проектирования и отработки технологий изготовления сложнопрофильных деталей ГТД в 5-10 раз;

- осуществить трансформацию традиционных технологий изготовления сложнопрофильных деталей ГТД в технологии нового поколения (шестого уклада) – изготовление сложнопрофильных деталей ГТД за один технологический процесс (снижение трудоемкости изготовления до 30 раз).

На основании полученных результатов **впервые в России методом аддитивного производства с использованием отечественной металлопорошковой композиции жаропрочного сплава на никелевой основе были изготовлены и испытаны детали «завихритель» фронтального устройства камеры сгорания перспективного двигателя ПД-14 полностью соответствующие требованиям конструкторской документации.** Первая деталь – завихритель камеры сгорания (комплект на один двигатель – 48шт.), полученная по аддитивным технологиям из отечественной металлопорошковой композиции, совершила первый полет в ноябре 2015 г. в составе двигателя ПД-14 на летающей лаборатории Ил-76 и на сегодняшний день проходит сертификационные испытания в составе двигателей и установок.

Таким образом, в отечественном авиастроении появилась принципиально новая технологическая возможность изготовления сложнопрофильных ДСЕ.