



Федеральное государственное унитарное предприятие
«Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных
материалов»

Материалы нового поколения и ресурсосберегающие технологии их переработки для промышленных ГТУ

О.Г. Оспенникова

Начальник НИО ФГУП «ВИАМ», к.т.н.

30 июня 2015 года, г. Москва

ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ

105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17

E-mail: admin@viam.ru

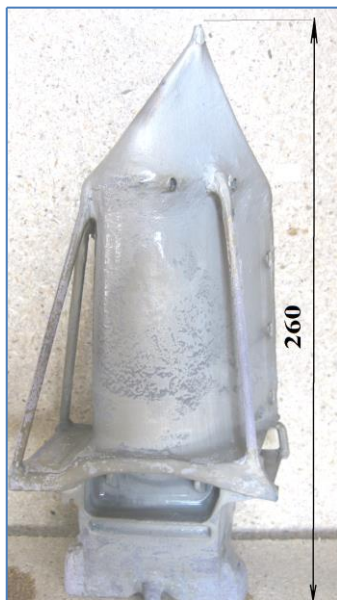
www.viam.ru





Жаропрочные литейные коррозионностойкие никелевые сплавы

Рабочие
лопатки
силовой
турбины ГТУ



Марка сплава	d, кг/м ³	T _{раб} , °C	σ_{B}^{20} , МПа	σ_{100}^{900} , МПа	σ_{100}^{1000} , МПа	σ_{5000}^{900} , МПа
ЖСКС-1	8200	850	830	359	--	165
ЖСКС-2	8300	950	980	395	200	225

Коррозионная стойкость при 800°C (удельная потеря массы в час)

сульфидно-оксидная коррозия, г/м²

ЖСКС-1

-(25,4 ÷ 107,3)

-59,4

ЖСКС-2

-(18,5-65)

-47,5



Жаропрочные литейные интерметаллидные никелевые сплавы



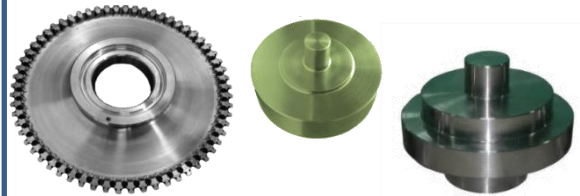
Рабочие и
сопловые
лопатки
турбины



Марка сплава	d, кг/м ³	T _{раб} , °C	$\Sigma (W, Re, Ta, Co)$, %	σ_{B}^{20} , МПа	σ_{B}^{1100} , МПа	σ_{100}^{1100} , МПа
ВКНА-4УР	7910	1200	6,0	615	315	45
ВКНА-4У	7910	1200	6,0	1340	420	90
ВКНА-1В	7938	1250	3,0	1200	410	100
ВКНА-25	8106	1200	9,0	1120	390	130



Жаропрочные деформируемые сплавы для дисков турбин



Диски силовой турбины ГТУ

Марка сплава	$T_{\text{раб}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_B^{20}, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}^{20}, \text{МПа}$	МЦУ (σ_0) на базе 10^4 ц при $750 ^\circ\text{C}$	$\sigma_{100}^{750}, \text{МПа}$
ЭП742	750	1350	870	735	540
ЭК151	750	1500	1100	1020	637
ВЖ175	750	1570	1180	1128	650
ВЖ177 (разрабатываемый)	800	≥ 1500	-	≥ 1100	≥ 765



Жаропрочные деформируемые свариваемые сплавы



Марка сплава	Применение	$T_{\text{раб}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_B^{20}, \text{МПа}$	$\sigma_{100}^{650}, \text{МПа}$	$\sigma_{100}^{1000}, \text{МПа}$
ВЖ172	Сварной ротор КВД, корпуса	800	1360	800	-
ВЖ159	Корпус КС, жаровая труба	1000	1100	650	25
ВЖ171	Жаровая труба, сопло, узлы ФК	1250	870	-	70

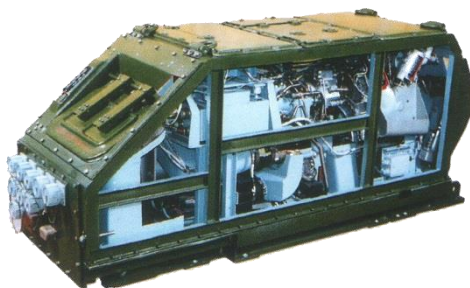


Примеры применения материалов, разработанных ВИАМ, в конструкциях высокотемпературной части ГТУ



Газотурбинный двигатель **АЛ-31СТ** для привода нагнетателя в газоперекачивающих агрегатах мощностью 16 МВт при строительстве новых компрессорных станций, а также для замены двигателей на более экономичные и экологически чистые при проведении реновации, модернизации и реконструкции действующих газоперекачивающих агрегатов.

	ТВД	ТНД
Рабочие лопатки	ЖС26-ВИ	ЖС6У-ВИ
Сопловые лопатки	ЖС6У-ВИ	ЖС6У-ВИ
Диск	ЭП742	ЭП742



Модуль **СЭС-75** для автономного электроснабжения ЗРК и аэродромных средств

Неохлаждаемые лопатки соплового аппарата	ВКНА-4
Диски турбины	ЭИ698ВД
Диски компрессора	ВТ8



Газотурбинный двигатель **ПС-90ГП-2** для привода нагнетателя в газоперекачивающих агрегатах мощностью 16 МВт. Разработчик ОАО «Авиадвигатель».

	ТВД
Рабочие лопатки 1 и 2 ст.	ЖС32-ВИ

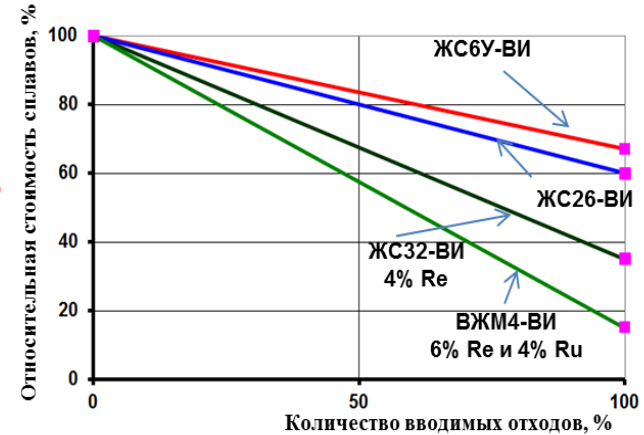


Технология выплавки жаропрочных сплавов нового поколения

Создана уникальная инфраструктура, включая контроль химического состава от Н до U с чувствительностью от 10^{-8} % (входной контроль, экспресс-анализ, окончательный контроль), выплавка в узких интервалах легирования (в 2-3 раза меньше чем на серийных заводах), аттестация механических характеристик и разработана ресурсосберегающая технология выплавки жаропрочных никелевых сплавов нового поколения с микролегированием РЗЭ.



Относительная стоимость сплавов в зависимости от количества используемых отходов



Микролегирование сплавов РЗМ обеспечивает:

- Повышение жаропрочности в 1.5 – 2 раза.
- Повышение долговечности интерметаллидных сплавов в 2 – 3 раза.
- Повышение жаростойкости в 1.5 – 2 раза.

Организовано серийное производство жаропрочных никелевых сплавов с использованием до 100% отходов (сертифицировано АР МАК) мощностью 400 т/год. Поставка под контролем ВП МО РФ: ОАО «НПО «Сатурн», ОАО «УМПО», ОАО «Авиадвигатель», ОАО «ПМЗ», и др.

- ✓ повышение степени рафинирования сплавов от примесей и газов в 4 - 5 раз за счет ведения плавки при контроле кислородного потенциала;
- ✓ химический состав сплава в узких пределах легирования (в 2-3 раза меньше серийных);
- ✓ одновременное определение до 26 элементов, время анализа 1 мин., точность до 1 ppm
- ✓ определение микропримесей в сплавах на различных основах (Bi, Pb, As, Se, Sb, Ag и др.)



Технология высокоградиентной направленной кристаллизации литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой

Contract 95-3 Summary



- Thermal gradient >150K/cm has been observed
- The steady state gradient is about 50K/cm
- This gradient (and the resulting cooling rate) is about 2.5-5 times of the laboratory units in the US
- It is about 30 times that of the advanced PG technology available in the US

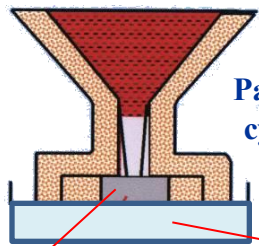
Технология ВГНК обеспечивает:

- Отливку лопаток ГТД с направленной и монокристаллической структурой из жаропрочных сплавов нового поколения.
- Повышение выхода годного по структуре до 95 % (при стоимости лопатки 10 -50 тысяч USD).

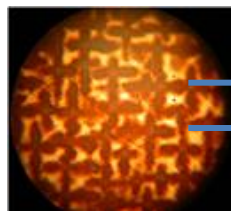
Направленная кристаллизация $G=40^\circ\text{C}/\text{cm}$ (GE, PW)

Выход годного по структуре – 60 %

Получение отливок с КГО [001] без учета азимутальной ориентации



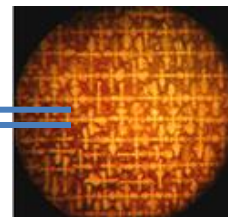
Разориентация субзерен до 5°



$\lambda=400$ мкм

λ – размер дендритной ячейки

Получение отливок с любой КГО [001] [011] [111] с учетом азимутальной ориентации

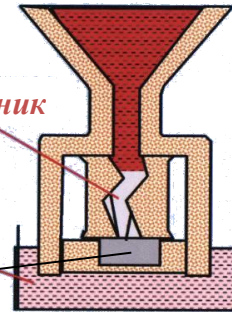


$\lambda=150$ мкм

Выход годного по структуре – 95 %

Разориентация субзерен до $1,5^\circ$

Кристаллоотборник



Жидкий металл
затравка

Монокристаллическая лопатка с транспирационным охлаждением

Технология ВИАМ, конструкция ЦИАМ и НПП Газотурбостроения «Салют»

По данным испытаний ЦИАМ: эффективность охлаждения θ :

С транспирационным $\theta=0.8-0.85$

С традиционным конвективно-пленочным $\theta=0.6-0.65$

$$\theta = \frac{T_{\text{газа}} - T_{\text{металла}}}{T_{\text{газа}} - T_{\text{воздуха}}}$$

ВИАМ обеспечивает:

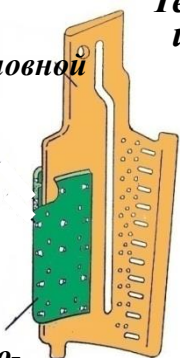
производство и поставку автоматизированных комплексов литья монокристаллических лопаток (УВНК-9А)



УВНК-9А

Всего с 1998 г. изготовлено 29 установок для литья лопаток и 9 установок для выплавки сплавов

Основной

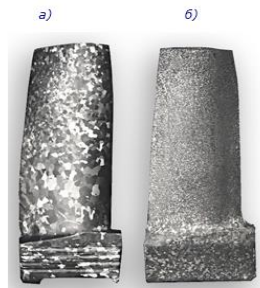


Гибкая керамо-полимерная пленка



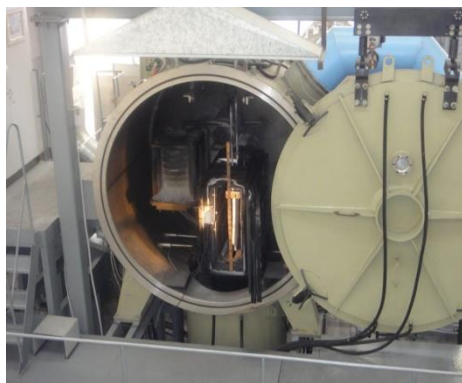
Технология литья лопаток с направленной, монокристаллической и поликристаллической структурой

- Поверхностное модифицирование сплавов при поликристаллическом литье лопаток, путем введения в керамическую форму алюмината кобальта.



Лопатка, полученная без модификатора (а) и с модификатором (б)

- Вакуумные плавильные установки для получения крупногабаритных и длинномерных деталей методом направленной кристаллизации.

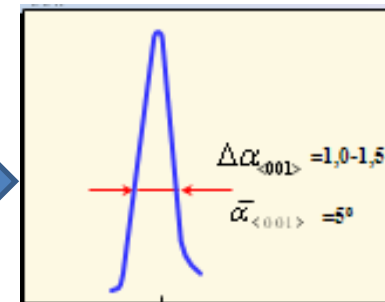
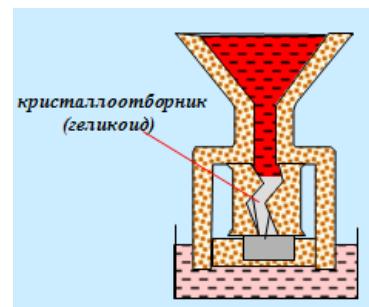


УВНК-10



УВНК-15

- Комбинированная технология зарождения монокристалла (затравка-геликоид) для получения монокристаллических отливок лопаток с высокой степенью структурного совершенства обеспечивает 100%-ную передачу структуры данной ориентации от затравки к изделию, уменьшает блочность и разориентацию субзерен..



Применяются в изделиях: ГТД-110, ГТУ на базе ПС-90А, на базе Д-30, на базе ПС-90ГП, на базе АЛ-31СТ, СЭС-75, ГТД-20/12ДЦ, ГТН-16, ГТН-25;

В Турбинах MS 3002 (ГТК-10И) и MS 5002 (ГТК-25И) «ДЖЕНЕРАЛ ЭЛЕКРИК» в ходе исполнения программы импортозамещения (ОАО «Газпром»)



Ионно-плазменные защитные покрытия для деталей промышленных и энергетических ГТУ

Конденсационно-диффузионные покрытия

Для защиты лопаток турбин из жаропрочных сплавов от сульфидно-оксидной коррозии.

Покрытия системы $\text{NiCoCrAlY} + \text{NiAlSiB}$

Рабочие температуры **-750-1050°C**

Толщина покрытия 80 мкм

Марки покрытий:

СДП-1, СДП-4, СДП-6, ВСДП-13

Для защиты лопаток и других деталей турбин из сталей и сплавов от солевой коррозии. при

Система покрытия

$\text{NiCoCrAlY} + \text{NiAlCoSiY}$

Рабочие температуры до **700°C**

Толщина покрытия – 8-20 мкм

Марки покрытий:

СДП-1, ВСДП-20, ВСДП-22



ФГУП ВИАМ поставил заводу ОАО «Турбодеталь» (филиал ОАО «Газэнергосервис») установку МАП-1М для нанесения защитных покрытий на рабочие лопатки турбин привода газоперекачивающих агрегатов типа ГТК-10И, ГТК-25И и др.

С 2000г. производится поставка катодов для нанесения на установке МАП-1М покрытия СДП-6. Объем поставки до 22 штук в год (2014г.)

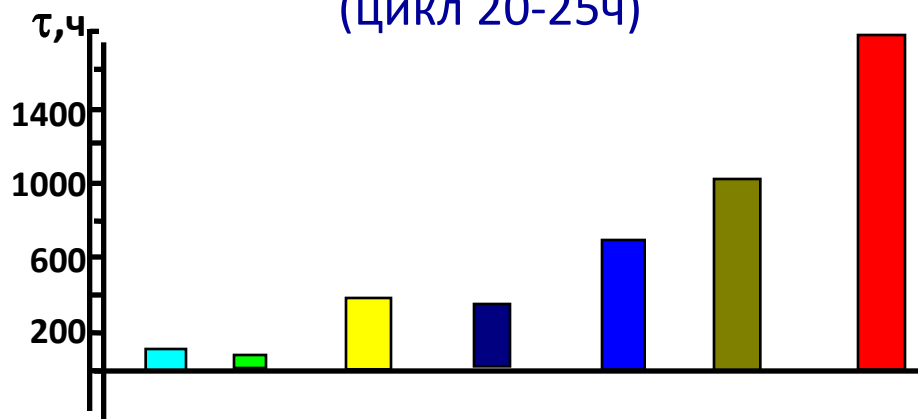




Ионно-плазменные защитные покрытия для деталей промышленных и энергетических ГТУ

Конденсационно-диффузионные покрытия

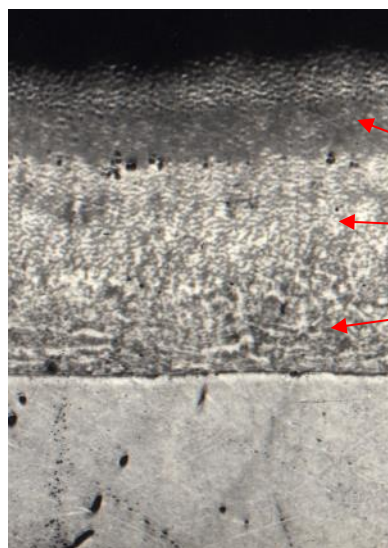
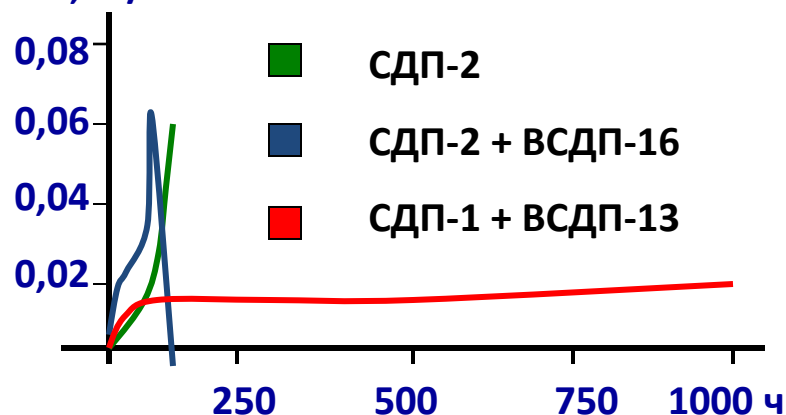
Циклическая долговечность сплава ЖС6У с покрытиями в расплаве Na_2SO_4 при температуре 900°C (цикл 20-25ч)



- Рас cementation (80 - 120 ч)
- NiCrAlY (50 - 80 ч) (СДП-2)
- NiCoCrAlY (285-460 ч) (СДП-1)
- CoCrAlY (160-380 ч) (СДП-3)
- CoCrAlY + NiAlSiY (460-540 ч)
- NiCoCrAlY + NiAlCrSiY (580-1020 ч)
- NiCoCrAlY+NiAlSiB (1580 -1790 ч)
СДП-1(80мкм) + ВСДП-13 (40г/м2)

Стойкость к сульфидной коррозии сплава ЖС6У с покрытиями

Привес, $\text{кг}/\text{м}^2$



Содержание элементов в покрытии СДП-1 + NiAlSiB
Ni -22Al -20Cr -13Co -3Si

Ni -32Cr -18Co -10Al

Ni -24Cr -19Co - 8Al



Ионно-плазменная технология высоких энергий и технология магнетронного среднечастотного плазмохимического осаждения для нанесения защитных и теплозащитных покрытий

ВИАМ обеспечивает:

- Разработку, производство и поставку автоматизированных комплексов нанесения защитных и теплозащитных покрытий типа МАП. Всего изготовлено 7 установок.
- Отработку технологий нанесения защитных и теплозащитных покрытий с учетом конструирования оптимальной структуры покрытия.

Ускоритель
газовых
ионов
(до 40 кэВ,
40 мА).

Автоматизированная установка
МАП-3 для ассистированного
осаждения покрытий



Уникальная технология нанесения керамических слоев ТЗП методом магнетронного осаждения обеспечивает:

- В 30-50 раз снижение энергозатрат по сравнению с электронно-лучевой технологией
- Возможность регулирования коэффициента теплопроводности за счет введения РЗМ (снижение в 2-3 раза до $\lambda < 1$ Вт/м*К)

Ассистированное осаждение
повышает ресурс работы покрытия
в 5-10 раз

**Создано серийное
производство 15 марок катодов
мощностью до 500 шт/год**



Для ремонта лопаток с ТЗП разработаны
экологически чистые процессы, которые
внедрены в серийное производство на
моторостроительных предприятиях

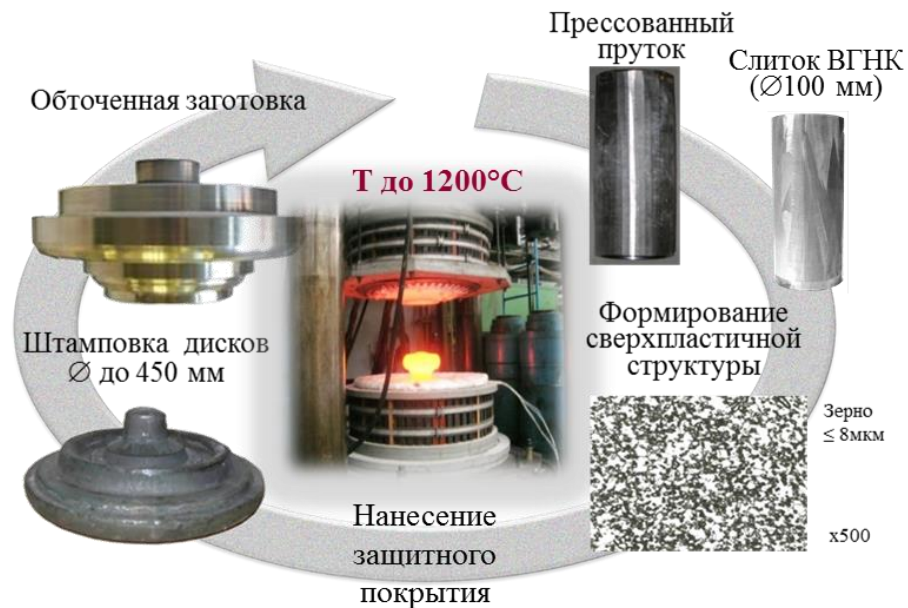
Опытно-промышленная установка УОКС-3
для магнетронного среднечастотного
плазмохимического осаждения





Изотермическая штамповка на воздухе труднодеформируемых жаропрочных сплавов

Параметры	США, Германия, Франция	Россия (ВИАМ)
Температура, °С	1000 - 1100	1000 - 1200
Оборудование	Вакуумные установки	Прессы с индукционным нагревом на воздухе
Материал штампов	Молибденовые сплавы	Интерметаллидные сплавы
Технологический цикл	1.5 – 2 часа	5 - 7 минут
Защита от окисления	Вакуум	Технологическое покрытие



Преимущества:

- увеличение КИМ в 2-3 раза
- снижение трудоемкости и энергоемкости в 3-5 раз
- повышение производительности в 10 - 15 раз

Производство
сертифицировано
АР МАК

Производство защитных технологических покрытий.

Выпуск 32 марок покрытий

Применение:

для термической обработки и изотермической штамповки на воздухе деталей и конструкций из высокопрочных сталей и титановых сплавов

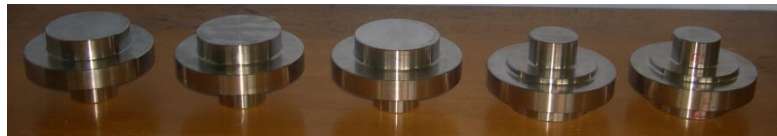
Применение покрытий при штамповке позволяет повысить ресурс работы штамповой оснастки в 3-5 раз





Изотермическая штамповка на воздухе труднодеформируемых жаропрочных сплавов

Штамповки дисков ГТД из сплава ЭП742-ИД



Двигатель ТРДД50

(изделие 37) для легких многоцелевых самолетов, беспилотных ЛА и крылатых ракет



Штамповки дисков ГТД из сплава ЭК151-ИД для двигателя АИ-450



Штамповки дисков ГТД из сплавов ЭИ698-ИД и ВТ8 для СЭС-75



Газотурбинное автономное средство электроснабжения СЭС-75 для ракетных комплексов С300 и С400



Вертолетные двигатели



Двигатель МС-500 для вертолета Ансат



Двигатель АИ-450 для вертолетов Ми-2 и Ка-226

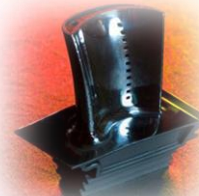
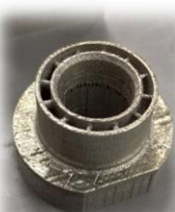


Уровни реализации аддитивных технологий

3 уровень

Принцип единства:
материал–технология–
оборудование–конструкция

Изготовление опытных и серийных партий деталей, удовлетворяющих требованиям НД и КД для применения в действующих образцах техники.



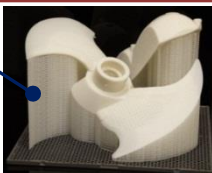
2 уровень

Изготовление демонстраторов.
Прототипы деталей и элементов конструкций
(без обеспечения требований НД и КД).



1 уровень

Вспомогательное производство.
Изготовление оснастки, выжигаемых моделей
для литья деталей и др.

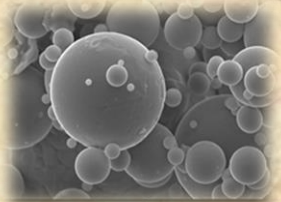


Ресурсные детали
изготавливаются по
традиционным технологиям

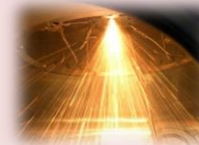


Основные составляющие аддитивного производства

Материалы и технологии
получения порошковых
композиций заданного
гранулометрического состава и
сферической формы



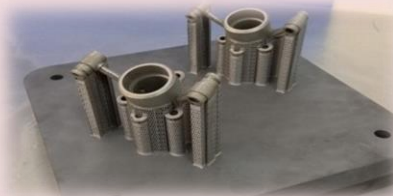
*Серийное производство
высококачественных
порошковых композиций с
ультранизким содержанием
газов и примесей*



Технологии синтеза
деталей



*Разработка математических
моделей, бионический дизайн,
конструирование поддержек,
отработка параметров синтеза
(мощность лазера, стратегия
лазерного сканирования,
скорость и шаг сканирования)*



Технологии
баротермической (ГИП) и
термической обработки,
неразрушающего контроля



*Обеспечение механических характеристик
синтезированного материала на уровне
литого или деформированного, снижение
пористости, повышение структурной
однородности, контроль качества*



Квалификационные
испытания синтезированных
материалов, сертификация
процесса синтеза деталей



*Разработка методик и испытания
механических свойств, усталостные
испытания, общая и специальная
квалификация синтезированных
материалов*



Передача технологий в серийное
производство, с полным комплектом
нормативной документации,
авторский контроль



*Ресурсные испытания,
испытания деталей в
составе изделий*





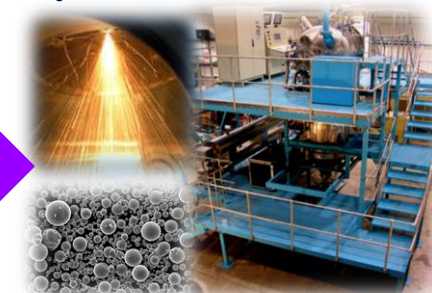
Порошковые композиции и аддитивные технологии

Создано аддитивное производство полного цикла:

Разработка порошковых композиций, 3D-моделей, конструирование поддержек технологий синтеза (мощность лазера, стратегия лазерного сканирования, скорость и шаг сканирования) с последующими ТО и ГИП деталей ответственного назначения с выпуском полного комплекта нормативной документации



Производство шихтовых заготовок (VIM-150) и заготовок под распыление (VIM-12)



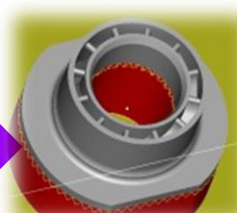
Производство порошковых композиций методом атомизации



Рассев и газодинамическая сепарация порошков



Разработка 3D-моделей деталей



Моделирование поддержек, генерация слоев



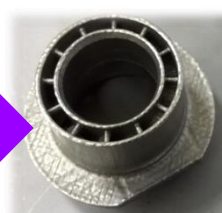
Разработка технологий лазерного синтеза: мощность лазера, стратегия лазерного сканирования, скорость и шаг сканирования



Горячее изостатическое прессование и т/о



Контроль качества и свойств



Деталь

Предлагаем: Создать координационный механизм – Межотраслевой инжиниринговый центр «Порошковые композиции и аддитивные технологии» на базе ФГУП «ВИАМ» с участием ведущих научных, образовательных и производственных организаций.



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПО SLM ТЕХНОЛОГИЯМ

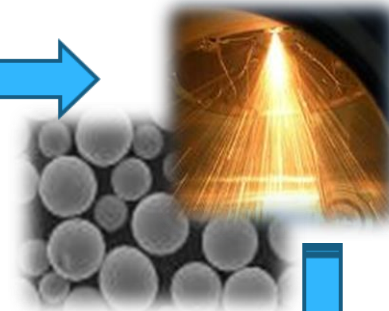
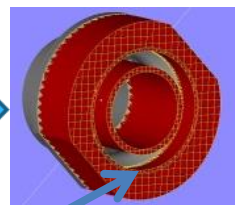
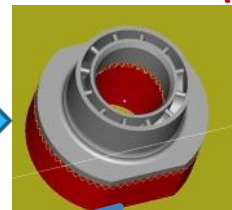
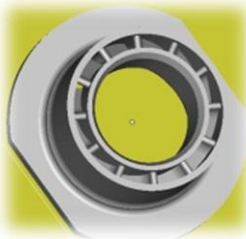
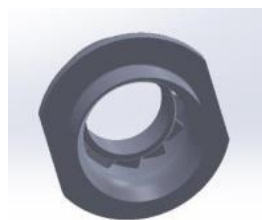


Модель детали
«завихритель»
«Авиадвигатель»

Модель детали
«завихритель» с
учетом особенностей
технологического
процесса **(ВИАМ)**

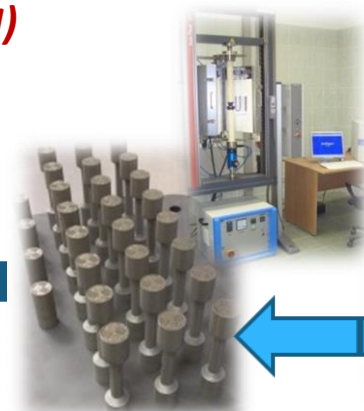
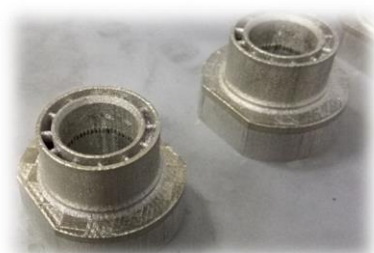
Моделирование поддерживающих
элементов, генерация слоев
(1960 слоев толщиной 40 мкм)
(ВИАМ)

Получение
металлопорошковых
композиций **(ВИАМ)**



Моделирование: оптимизация
модели для аддитивного
производства **(ВИАМ)**

Поддержки



Финишная обработка,
контроль геометрии,
томография и испытания
«Авиадвигатель»

Контроль мех.
свойств
(ВИАМ)

Газостатическая
и термическая
обработка
(ВИАМ)

Разработка технологии и
выращивание детали
заданной геометрии
(ВИАМ)

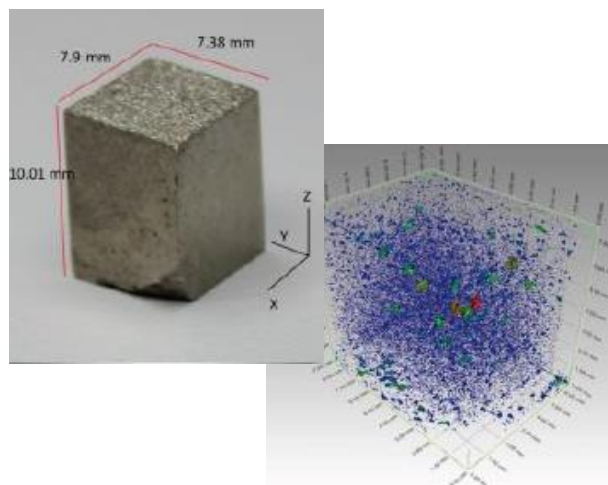
Цикл изготовления деталей методом селективного лазерного сплавления в среднем в 10 раз меньше, чем по технологии литья по выплавляемым моделям



Неразрушающий контроль деталей, полученных с применением аддитивных технологий



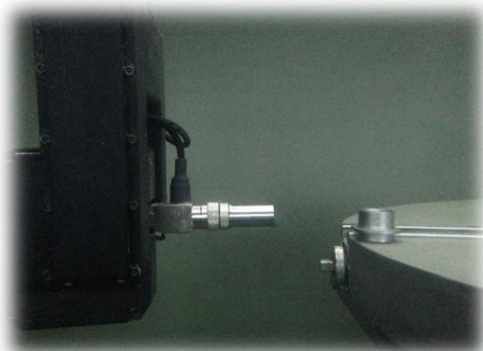
Рентгеновская компьютерная томография



Образец и результат обработки его компьютерной томограммы (синим цветом показаны поры)

Ультразвуковой контроль

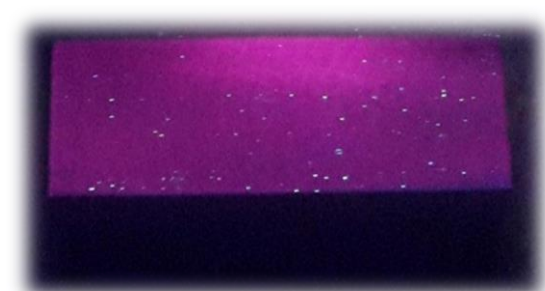
Показана принципиальная возможность выявления дефектов в деталях простой формы



Исследование детали «завихритель» (ЭП648) на иммерсионной автоматизированной установке LS-500LP

Капиллярно-люминесцентный контроль

Возможно выявление пор и микротрещин, выходящих на поверхность



Единичные индикации (голубые точки) на механически обработанной поверхности (ЭП648, лазерное сплавление, ВИАМ)

Необходима разработка методов и технологий неразрушающего контроля деталей, синтезированных с применением аддитивных технологий

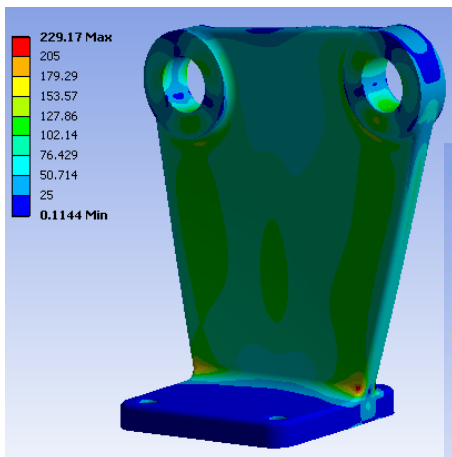
Начальная
конструкция



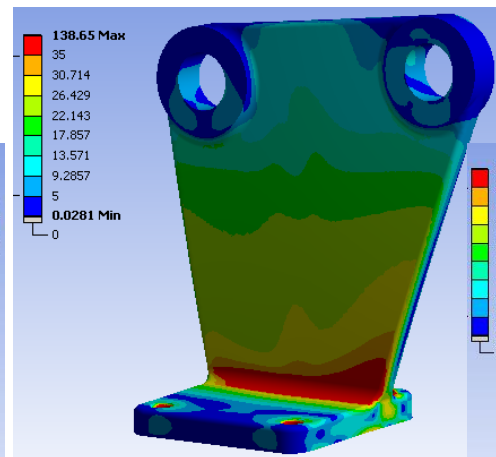
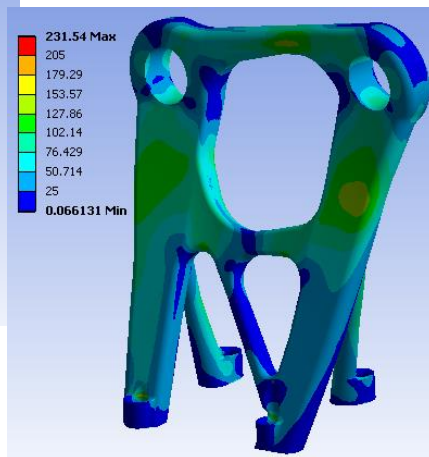
Кронштейн облегчен на 50 % при отсутствии потерь в прочностных характеристиках на предполагаемых нагрузках!

Кронштейн
массой **100г.**

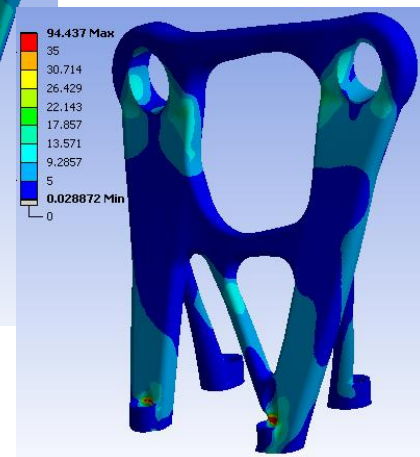
Кронштейн
массой **50г.**



Эффективные
напряжения по
Мизесу, МПа.



Эффективные
напряжения по
Мизесу, МПа.





Испытательный центр ВИАМ

ИЦ ВИАМ обладает уникальной инфраструктурой, научно-техническим и кадровым потенциалом, необходимой нормативно-технической документацией для проведения комплексных исследований и испытаний материалов и конструктивно-подобных элементов

400 единиц исследовательского и **700** единиц испытательного оборудования

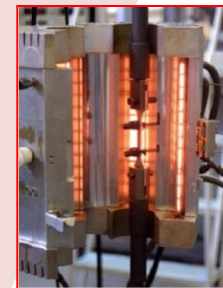
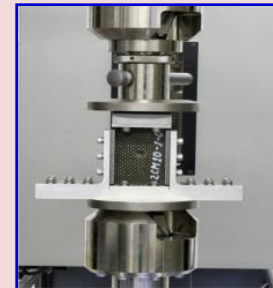
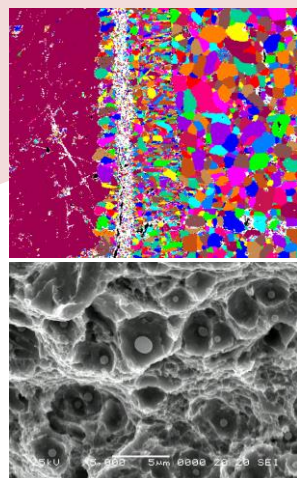
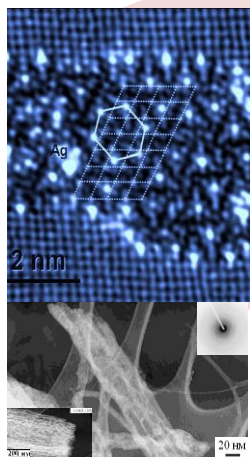
104 вида исследований и **956** видов испытаний

3288 конструкционных металлических, неметаллических и функциональных материалов разработаны и исследованы

- микроструктурный анализ (с разрешением до субнангстремного уровня)
- химический анализ (от H до U, с чувствительностью от 10^{-8} %)
- физико-механические испытания (от -196 до 1400 °C, частотах до 300 Гц, скоростях деформирования до 10 с^{-1});
- определение теплофизических свойств (от -196 до 2400 °C);
- неразрушающий контроль (выявление микротрещин от 0,5 мкм)
- климатические испытания (натурные в 9 зонах и ускоренные)
- испытания на пожаробезопасность (горючесть, тепло- и дымовыделение)
- микологические испытания (грибостойкость)

Атомный и наноуровень:

Микро-, мезо- и макроуровень:



Задачи ИЦ ВИАМ :

- фундаментально-ориентированные исследования тонкой структуры, кинетики фазовых превращений, механизмов деформации и разрушения материалов и покрытий
- разработка математических моделей прогнозирования свойств и структуры материалов, ресурса элементов конструкций



Испытательный центр ВИАМ

ИЦ ВИАМ по оснащенности и компетенциям соответствует ведущим мировым материаловедческим испытательным центрам и проводит исследования и испытания материалов и элементов конструкций по международным (ASTM, ISO), национальным стандартам (ГОСТ Р), стандартам организации (СТО).

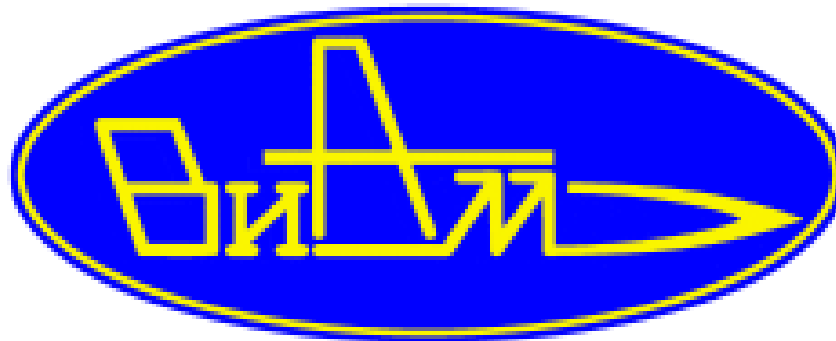
Ведущие мировые материаловедческие испытательные центры

Показатель	ФГУП «ВИАМ»** 	ОАО «Композит»* 	ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»* 	ОАО «ВНИИНМ»* 	DLR Institute of Materials Research* 	Fraunhofer IFAM* 
Количество видов испытаний	> 1000	> 200	> 250	> 300	> 580	> 600
Количество единиц оборудования	> 1100	~ 300	~ 500	~ 550	> 700	~ 850
Кадровый научный и инженерно-технический состав	7 дтн 56 ктн 332 ИТР	4 дтн 41 ктн 391 ИТР	8 дтн 23 ктн ~ 250 ИТР	7 дтн 29 ктн ~ 300 ИТР	17 PhD ~ 100 ИТР	27 PhD ~ 300 ИТР

*- данные получены с официальных сайтов организаций.



****.** ЦКП «Климатические испытания» ВИАМ федерального уровня проводит комплексные работы по изучению воздействия природных факторов, по исследованию процессов коррозии, старения, биоповреждения и разрушения конструкционных материалов и функциональных покрытий. **Московский и Геленджикский центры климатических испытаний им. профессора Г.В. Акимова** включены в Международную сеть станций климатических испытаний Atlas.



Применение материалов нового поколения и технологий их переработки позволит обеспечить создание мощных ПГУ с повышенным КПД до 60 - 65 %, увеличив ресурс их работы до 60 – 100 тыс. часов, снизить затраты на производство в среднем в 5 – 7 раз.

БЛАГОДАРИМ за внимание

ФГУП ВИАМ ГНЦ РФ

105005, Москва, ул. Радио, 17

Тел.: +7(499)261-8677,

Факс: +7(499) 267-8609

E-mail: admin@viam.ru

www.viam.ru

