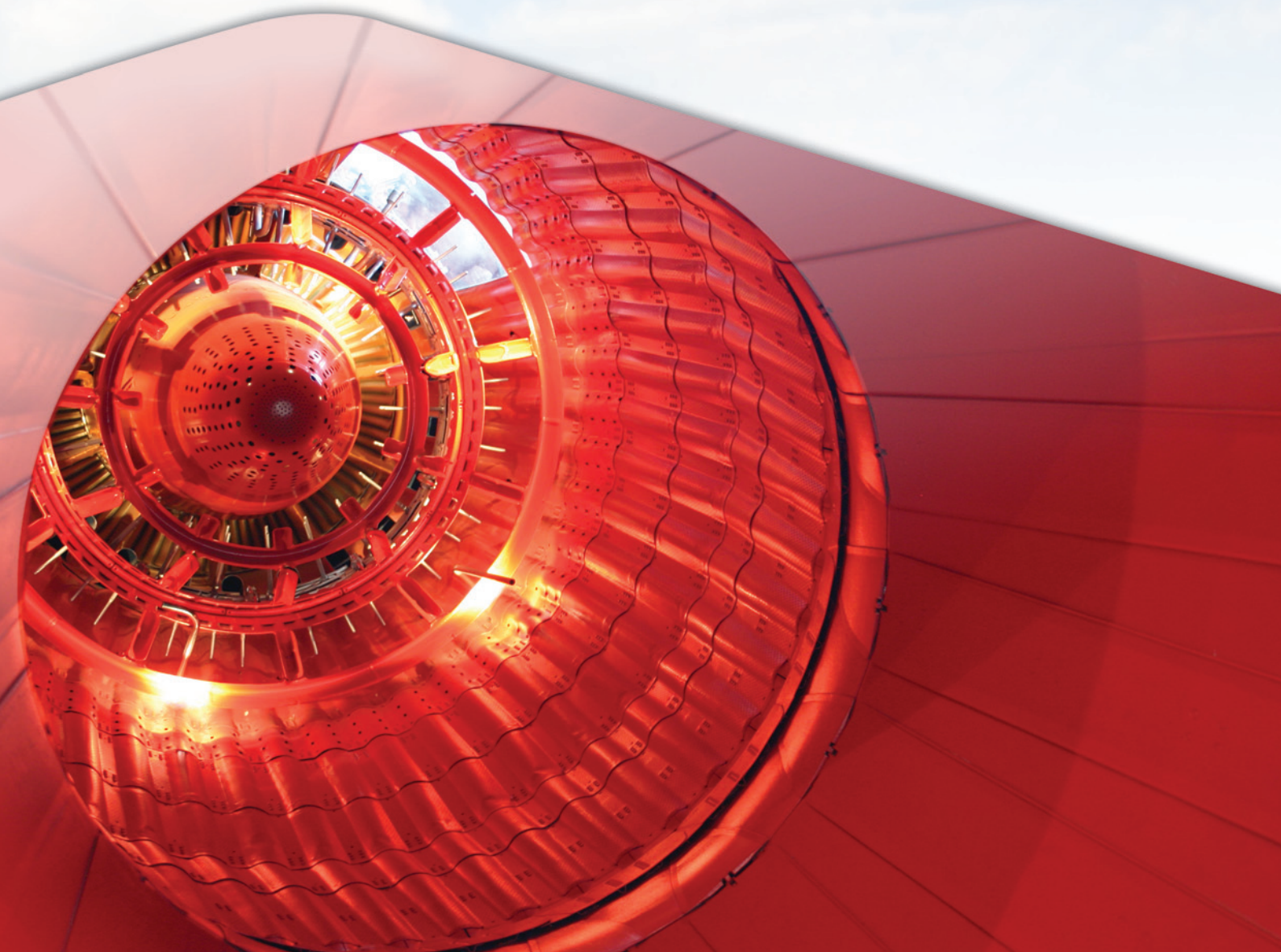


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

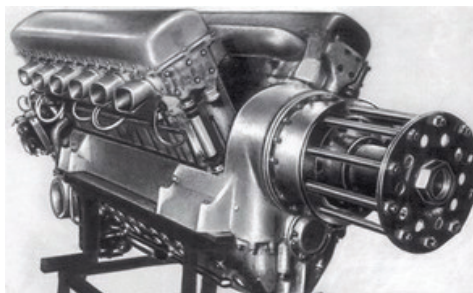


ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ И СТАЛИ



Конструкционные стали

История разработки сталей во Всесоюзном (ныне Всероссийском) научно-исследовательском институте авиационных материалов (ВИАМ) начинается с момента его образования в 1932 году. К 1940 году в структуре ВИАМ работали лаборатории «Моторные стали» и «Самолетные стали». В 1951 году они объединились в лабораторию «Самолетные и моторные стали».



Первый советский водоохлаждаемый
двигатель АМ-34



Многоцелевой самолет АНТ-20
«Максим Горький»

В предвоенные годы встала задача разработки сталей, характеристики прочности и надежности которых превосходили бы соответствующие характеристики применяемых углеродистых и слаболегированных сталей. Дополнительная сложность задачи заключалась в том, чтобы разрабатываемые стали не содержали дефицитных легирующих элементов. Специалистами ВИАМ создана сталь 30ХГСА, отвечавшая указанным требованиям. Было установлено оптимальное сочетание содержания легирующих элементов, проведены работы по оптимизации металлургического производства, термической обработки.

В военные годы для авиационных двигателей разработан ряд марок экономнолегированных сталей (ЭИ273, ЭИ274, ЭИ275) и освоено их производство.

В середине 50-х годов XX в. ВИАМ разработал новые стали различного назначения. Так, высокопрочная сталь 30ХГСН2А до настоящего времени успешно применяется практически во всех отечественных самолетах. Для крупногабаритных деталей разработана сталь ВЛ-1, способная к закалке на воздухе.

В 60-х годах начались глубокие исследования по созданию жаропрочных сталей мартенситного класса для основных деталей ГТД.

С развитием самолето- и вертолетостроения расширялся спектр требований к стальным деталям. В 70–90-е годы разработаны стали с высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью, хорошей свариваемостью и технологичностью. Они с успехом нашли применение



Самолет Су-30МКМ, в конструкции которого применены стали, разработанные в ВИАМ

в лучших образцах авиационной техники: самолетах МиГ-23, МиГ-25, МиГ-29, МиГ-31, Су-24, Су-27, Су-30, двигателях и ряде изделий ракетной техники.

Применение новых сталей позволило решить важнейшую задачу современного авиастроения — снижение массы конструкций.

Литейные жаропрочные сплавы

История жаропрочных сплавов началась с создания в середине 40-х годов в Англии первого дисперсионно-твердеющего никелевого сплава Нимоник 80, из которого методом штамповки изготавливали рабочие лопатки газовых турбин.

В 50-е годы специалистами ВИАМ было показано, что наибольшую перспективу повышения уровня жаропрочности лопаток открывают не деформируемые, а литейные сплавы. Технология литья по выплавляемым моделям является практически единственным способом получения охлаждаемых лопаток, имеющих сложную геометрию внутренней полости. Это новое направление в развитии жаропрочных сплавов для изготовления рабочих лопаток газовых турбин с запозданием на пять лет было принято и в странах Запада.

В 60-х годах разработаны первые серийные отечественные литейные жаропрочные сплавы ЖС6, ЖС6К, ЖС6У, ВЖЛ12У, позволившие создать литые охлаждаемые турбинные лопатки с равноосной структурой и повысить их рабочую температуру на 200°C по сравнению с рабочей температурой лопаток из лучшего на тот период деформируемого сплава ЭИ437Б.



Участок индукционных печей сталелитейного цеха ВИАМ (1950 г.)

В 70–80-х годах совершенствование литейных жаропрочных никелевых сплавов происходило путем улучшения методов выплавки, применения шихтовых материалов повышенной чистоты, использования новых легирующих добавок и создания специальных жаропрочных сплавов для литья турбинных лопаток с направленной и естественно-композиционной монокристаллической структурой. Первыми отечественными сплавами данного класса стали сплавы ЖС26, ЖС30, ЖС32, ЖС36, ЖС40, ВКЛС-20, ВКЛС-20Р.



Зал печей высокоградиентной направленной кристаллизации (2012 г.)



Самолет Ту-95 с двигателями НК-12, в которых впервые были использованы литые лопатки из жаропрочных сплавов с направленной структурой

В 90-х годах созданы коррозионностойкие жаропрочные сплавы длительного ресурса ЖСКС1 и ЖСКС2 для лопаток, включая крупногабаритные, с направленной и монокристаллической структурой.

С начала 2000 года по настоящее время развитие жаропрочных никелевых сплавов связано с созданием монокристаллических высокорениевых жаропрочных сплавов третьего поколения ВЖМ1 (9,3%Re), ВЖМ2 (12%Re), ЖС55 (9%Re) и ВЖМ5 (4%Re). Для стабилизации фазового состава высокорениевые жаропрочные никелевые сплавы предложено легировать рутением. В связи с этим за истекшие 10 лет в ВИАМ были выполнены важные теоретические работы и получены многочисленные экспериментальные результаты, касающиеся разработки и исследования новых более жаропрочных монокристаллических никелевых рений-рутениеосодержащих сплавов четвертого (ВЖМ4) и пятого (ВЖМ6) поколений.

Интерметаллидные литейные сплавы

Работа по созданию новых интерметаллидных сплавов начата в конце 70-х годов сотрудниками ВИАМ, которые решили важнейшую задачу повышения пластичности интерметаллида Ni_3Al . Оптимизация химического состава и технологии отливки заготовок из интерметаллида никеля позволила разработать сплавы серии ВКНА (ВИАМ, Конструкционный Никель-Алюминиевый): ВКНА-2М, ВКНА-1ЛК, ВКНА-4, ВКНА-1В, ВКНА-4У, обладающие низкой плотностью ($d = 7900 \text{ кг/м}^3$) по сравнению с жаропрочными сплавами ($d = 8800 \text{ кг/м}^3$).

Сплав ВКНА-2М применяется в качестве наплавки контактных поверхностей бандажных полок рабочих лопаток из сплавов типа ЖС6У; сплав ВКНА-4 — для неохлаждаемых сопловых лопаток наземных энергетических установок (взамен сплава ВХ-4Л), что позволило повысить рабочую температуру и срок службы лопаток; ВКНА-4У (взамен ЖС6У) — для неохлаждаемых рабочих лопаток вспомогательных стационарных установок (ВСУ). С развитием технологий выплавки и литья по выплавляемым моделям конструкционных сплавов происходило совершенствование интерметаллидных сплавов серии ВКНА.

С начала 2000 года по настоящее время проводятся работы по модификации и технологическому опробованию интерметаллидных никелевых сплавов. Появились такие сплавы, как ВКНА-4УР, ВКНА-1ВР, ВКНА-1ВУ. Разработан сплав ВКНА-25 (ВИН1) с монокристаллической структурой — наиболее жаропрочный из серии ВКНА (2005 г.). Сплав ВКНА-1В был опробован в качестве сегментов камеры сгорания, сопловых лопаток ГТД, ВКНА-1ВР — створок реактивного сопла, ВКНА-4УР — соплового аппарата, створок и проставок сопла малогабаритного двигателя, сопловых лопаток ГТД, ВКНА-25 — рабочих неохлаждаемых лопаток малогабаритного ГТД.

В 2011–2012 годах разработаны интерметаллидные сплавы ВИН2, ВИН3 и ВИН4, превосходящие сплавы аналогичного применения ВКНА-1В и ВКНА-25 по жаропрочности и удельной жаропрочности на 20%, зарубежный сплав IC-438 — на 30%.

Деформируемые жаропрочные сплавы

С развитием газотурбинных реактивных двигателей в конце 40-х годов в ВИАМ приступили к исследованию и разработке деформируемых жаропрочных сплавов на основе никеля, способных работать при высоких температурах. Эти материалы применяются для наиболее ответственных деталей горячего тракта газотурбинного двигателя (ГТД): диски турбин и компрессоров высокого давления, валы, корпуса, опоры, жаровые трубы и др. На первом этапе (1945–1965 гг.) сотрудниками лаборатории для обеспечения работы ГТД первых поколений были разработаны сплавы: ЭИ388, ЭИ437Б, ЭИ481 (диски), ЭИ437А, ЭИ617, ЭИ867, ЭП220 (лопатки турбины), ЭИ703, ЭИ435, ЭИ602 (жаростойкие свариваемые сплавы для деталей камер сгорания). Повышение тактико-технических параметров ГТД потребовало дальнейшего роста рабочей температуры сплавов для горячей зоны.

В конце 60-х начале 70-х годов разработаны дисковые сплавы ЭИ698-ВД и ЭП742-ИД, которые успешно работают практически во всех серийных двигателях 3-го и 4-го поколений и до настоящего времени остаются востребованными материалами.

В 1979–2012 годах созданы сплавы ЭК79-ИД, ЭК151-ИД, ЭП975-ИД, ВЖ175-ИД, которые предназначены для современных и перспективных ГТД и по своим характеристикам не уступают зарубежным аналогам, а по жаропрочности превосходят их. Сплав ВЖ175-ИД (2007 г.) по комплексу эксплуатационных свойств превосходит известные отечественные и зарубежные материалы.

При создании сплавов для жаровых труб, корпусов и опор горячей зоны ГТД была решена задача повышения жаростойкости и длительной прочности при сохранении хорошей свариваемости и технологичности материала. Сотрудниками ВИАМ созданы сплавы ЭИ868, ВЖ145, ЭП708, ВЖ159, ВЖ172 и др., которые нашли широкое применение в современных и перспективных ГТД. Для применения в наиболее высокотемпературных сварных узлах камеры сгорания был разработан сплав на основе системы Ni–Co–Cr с принципиально новым способом упрочнения матрицы сплава – нитридами титана, обеспечивающим рабочие температуры жаровой трубы до 1200–1250°C.

Уплотнительные материалы для проточной части ГТД

В 50-х годах созданы первые низкотемпературные уплотнительные материалы (пасты) на основе клеев и лаков. Первым уплотнительным материалом, с которого начало развитие направление «Уплотнительные материалы», является материал 20Б на основе никеля и меди, содержащий нитрид бора (19–21%) и графит (9–11%), разработанный в 60-х годах. Несмотря на низкую истираемость, материал нашел широкое применение на многих авиадвигателях.

В 70-х годах появился материал на основе алюминия и нитрида бора (до 25%) – АНБ, с рабочей температурой до 450°C, высокой истираемостью и стабильными свойствами. Он нашел широкое применение и используется сейчас практически на всех современных авиадвигателях.

В 70 – 80-х годах разработано свыше десяти марок уплотнительных материалов для компрессоров и турбин низкого и высокого давления на рабочие температуры от 500°C: НПГ-75 (основа – никель, 15–18% графита); ЛУМ 80 (основа – никель, 10–13% графита); АЛК (55-60% алюминия,

40–45% нитрида бора) до 1000°C: УВС-2П (основа — никель, 10–12% оксида меди, 3–5% оксида кадмия, 16–18% нитрида бора, 2–6% алюминия, 2–4% графита); УП-34 (на основе порошков ПХ15Н77 (90%) и ПНБН (10%)) и др.

Металлургия авиационных сталей и сплавов

Бурное развитие реактивной авиации потребовало создания не только принципиально новых классов сталей и сплавов, но и металлургических технологий, обеспечивающих возможность получения и необходимое качество этих материалов. Металлургическая лаборатория ВИАМ, созданная в 1936 году, внесла решающий вклад в разработку технологий, ставших основой современного производства авиационных сталей и сплавов: вакуумной индукционной плавки (ВИ), вакуумного дугового переплава (ВДП), электрошлакового переплава (ЭШП) и др.

Первая вакуумная индукционная печь ВИАМ 100 для плавки 100 кг металла была установлена и пущена в эксплуатацию в ВИАМ в середине 50-х годов. Это стало возможным благодаря организации в ВИАМ конструкторского бюро по проектированию и изготовлению вакуумного плавильного оборудования. В дальнейшем были введены в эксплуатацию установки ОКБ-736 и ИСВ 0,16, что позволило расширить объем работ по разработке технологий выплавки в вакууме различных классов сталей и сплавов.



Индукционные печи открытого типа для выплавки
первых жаропрочных никелевых сплавов



Печь ОКБ-736 (разработка ВИАМ-ВНИИЭТО, 1967 г.)

Разработаны и переданы в серийное производство на металлургические заводы («Электросталь», ЧМК, ЗМЗ и др.) технологии: ВДП жаропрочных дисковых сплавов (ЭИ437БУ, ЭИ698), ВИ+ВДП высокопрочных мартенситостареющих сталей (ВКС-180, ВКС-210), высокожаропрочных дисковых (ЭП742, ЭК79, ЭП975) и свариваемых (ЭП648, ВЖ145, ЭП718) сплавов; ЭШП высокопрочных коррозионностойких сталей (ЭП310, ЭП817, ВНС-65 и др.).

Разработаны технологии вакуумной индукционной плавки и переданы на Ступинский металлургический комбинат, где организовано производство литейных жаропрочных сплавов (ЖС6У, ВЖЛ12У, ЖС6К и др.) для лопаток ГТД с равноосной структурой и первого отечественного ренийсодержащего сплава ЖС32 для монокристаллических лопаток.

В 2000-х годах в ВИАМ разработаны технологии выплавки литейных супержаропрочных сплавов нового поколения для монокристаллических лопаток авиационных ГТД: рений- и рутенийсодержащих никелевых сплавов (ЖС36, ВЖМ4, ВЖМ5), ренийсодержащего интерметаллидного сплава ВКНА-25, создано их серийное производство, обеспечивающее гарантированное качество прутковой (шихтовой) заготовки на уровне лучших зарубежных суперсплавов. Разработана ресурсосберегающая технология производства серийных жаропрочных сплавов (ЖС6У, ЖС32 и др.) путем рафинирующего переплава 100% литейных отходов моторных заводов, обеспечивающая качество прутковой заготовки на уровне серийно из-



До реконструкции (1998 год)



После реконструкции (2001 год)

Реконструкция участка выплавки жаропрочных никелевых сплавов

готовляемой из «свежих» шихтовых материалов, при стоимости на 40–50% ниже. Во ФГУП «ВИАМ» создан специализированный участок производства этой продукции.

Разработаны и успешно осваиваются совместно с ОАО МЗ «Электро-сталь» технологии производства супержаропрочных деформируемых сплавов для дисков (ВЖ175) и деталей горячего тракта (ВЖ159, ВЖ172) ГТД, собственное производство элинварных сплавов (ВУС-22, ВУС-12 и др.), высокопрочной бериллийсодержащей стали ВНС-32, деформируемого износо- и коррозионностойкого медноникелевого сплава ВКМ1.

С 2010 года активно ведутся работы по созданию производства мелкодисперсных металлических порошков распылением расплава инертным газом на установке HERMIGA10/100VI. Разработаны и освоены технологии получения порошков 10 марок никелевых (ВПр24, ВПр50, ВПр36, ВПр42, ВПр44 и др.) и титановых (ВПр16 и ВПр28) припоев (10–200 мкм). Начаты поставки припоев моторным заводам. Ведутся работы по получению мелкодисперсных порошков для селективного лазерного спекания (менее 40 мкм) и лазерной наплавки (40–80 мкм).

Технология деформации

В предвоенные годы осваивалось производство штамповок коленчатых валов, шатунов и других деталей, поставляемых по импорту для авиадвигателей.



Реконструкция цеха изотермической штамповки: *а* — до реконструкции (2003 год);
б — После реконструкции (2006 год)

В годы войны (1941–1945 гг.) отработывались технологические процессы производства деформированных полуфабрикатов из сталей и сплавов в тяжелых условиях эвакуации при отсутствии электросталей.

В 40–70-е годы разработана технология деформации сложнолегированных сплавов с ограниченной технологической пластичностью, высоким сопротивлением деформации, сложной гетерогенной структурой, большим содержанием упрочняющих фаз интерметаллидного типа, с обеспечением высоких производительности и КИМ.

В 60–70-е годы разработаны и освоены технологические процессы изготовления точных заготовок лопаток ГТД, листов и сортамента из жаропрочных никелевых сплавов.

В 80–90-е годы разработаны оригинальные технологические процессы изготовления полуфабрикатов из труднодеформируемых гетерофазных сплавов с использованием изотермической и сверхпластической деформации, освоено производство на промышленных предприятиях лопаток, дисков, кольцевых деталей, листов, фольги из новых высокожаропрочных сплавов.

С 90-х годов по настоящее время разработано новое направление по обработке давлением труднодеформируемых сплавов с формоизменением заготовки в гетерофазном состоянии с предварительным формированием регламентированной структуры и последующей изотер-

мической деформацией при оптимальных температурно-скоростных параметрах, что позволило освоить эффективные ресурсосберегающие процессы изготовления высококачественных экономичных деформированных полуфабрикатов из высокожаропрочных и высокопрочных материалов нового класса. Полуфабрикаты из таких сплавов не могут быть изготовлены с использованием традиционной промышленной технологии.

Для практической реализации разработанных технологий во ФГУП «ВИАМ» создано производство по изготовлению штамповок дисков газотурбинных двигателей и энергетических установок, проведена модернизация технологического оборудования, позволяющая осуществлять в автоматическом режиме процессы нагрева и формоизменения заготовки по разработанной компьютерной программе с точным исполнением термомеханических параметров.

Технология сварки и пайки

26 сентября 1932 года подписан приказ о создании в институте лаборатории сварки. В 1933 году разработан и внедрен способ дуговой сварки сталей взамен низкопроизводительной газовой сварки.

Во время Великой Отечественной войны сотрудники лаборатории оказывали техническую помощь фронту по восстановлению и ремонту боевых самолетов сваркой. Создана и внедрена механизированная сварка для поточного производства сварных фюзеляжей истребителей из стальных труб.

В 1950–1970-е годы разработаны технологии получения клеесварных соединений деталей внутреннего набора (обшивки–стрингер, обшивка–шпангоут и др.) в изделиях РСК «МиГ», ОАО АК им. С.В. Ильюшина, КБ им. О.К. Антонова; технологии сварки и пайки узлов и деталей первых отечественных газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов ЭИ437Б, ЭИ435, ЭИ868, ЖС6У.

В 80-е годы проведен обширный комплекс изысканий и внедрение сварки в силовых конструкциях планера самолета из высокопрочных сталей типа ВНС-2, ВНС-5, ВНЛ-3 и титановых сплавов BT20 и OT4 для изделий ММЗ им. П.О. Сухого, ММЗ им. А.И. Микояна, ММЗ им. С.В. Ильюшина. Впервые в мировой практике применена сварка высокопрочных сталей для изготовления сварных посадочных устройств самолета.

Разработана технология сварки в среде гелия кабины межконтинентального комплекса «Буря» из алюминиевого сплава 1201.

В 90-е годы применены в конструкциях авиакосмической техники свариваемые алюминийлитиевые сплавы. Впервые в мировой практике изготовлены герметичные цельносварные отсеки фюзеляжа и кабины пилота из сплава 1420 для самолета МиГ-29М, криогенные топливные баки из сплава 1460 для РКК «Энергия». Благодаря применению этих сплавов снижение массы конструкций составило 15–25%.

С 2000 года определены оптимальные технологические параметры, выбраны или разработаны присадочные материалы для сварки плавлением высокопрочных сталей ВКС-12, УКС, ВНС-72; жаропрочных листовых никелевых сплавов ВЖ155, ВЖ171, ВЖ172; алюминидовых сплавов различных систем легирования В-1963, В-1461, В-1469, 1424 и др.

В настоящее время разрабатываются технологии сварки в твердой фазе современных сложнелегированных конструкционных материалов. Большой объем исследований по сварке трением с перемешиванием сплава В-1469 проведен по заказу ОАО «РКК Энергия». Разработаны технологии ротационной сварки трением жаропрочных деформируемых никелевых сплавов в одноименном (ЭП975) и разноименных сочетаниях (ВЖ172 с ЭК79, ЭП975 с ВКНА-25) для изготовления деталей типа диск–вал, вал–вал сварного ротора.

Разработаны технологии высокотемпературной диффузионной пайки жаропрочных сплавов (ЖС6У, ЖС32, ЖС36, ВКНА-4У, ВЖМ4, ВЖМ5, пористо-волоконистых уплотнительных материалов). Освоены в производстве новые полуфабрикаты высокотемпературных припоев на основе никеля и титана в виде порошка и ленты на органической связке.

Ионно-плазменные защитные и упрочняющие покрытия

В 1975 году начались работы в области нового процесса (вакуумная плазменная технология высоких энергий – ВПТВЭ) получения многокомпонентных покрытий на лопатки турбин. В 1978 году ВИАМ разработал конструкцию ионно-плазменной установки МАП-1 и выпустил чертежи на установку. В 1981 году на ММЗ «Красный Октябрь» совместно с ВИАМ изготовлены первые три опытно-промышленные ионно-плазменные установки МАП-1, разработанные в ВИАМ. Процесс ВПТВЭ впервые внедрен на заводе «Красный Октябрь» – для нанесения износостойкого покрытия из сплава ВЖЛ2 на ниппели топливного коллектора форсажной камеры двигателей Р29-300 и Р21Ф-300. Вибрационный износ ниппелей приводил к прорыву горячих газов из двигателя в крыло самолета. Применение покрытия из сплава ВЖЛ2 с карбидным упрочнением позволило решить эту проблему.



Установка МАП-1 для ионно-плазменного нанесения покрытий из многокомпонентных сплавов (1981 г.)

В 1983 году ионно-плазменное покрытие СДП-2 на основе сплава системы Ni–Cr–Al–Y впервые внедрено в серийное производство для защиты рабочих лопаток ТВД РД-33. Это позволило повысить в 4 раза ресурс рабочих лопаток ТВД по сравнению лопатками с серийным алитированием. В 1984 году ионно-плазменное легированное диффузионное покрытие ВСДП-11 внедрено на рабочих лопатках ТВД Р79В-300 (МНПО «Союз»), а также на рабочих лопатках ТВД Р27-300 (ТМЗ, г. Тюмень).

В 1985 году покрытие из сплава ВСДП-11 внедрено на рабочих лопатках ТВД двигателя АЛ-31 (МПП «Салют») для самолета Су-27. После этого процесс начал широко внедряться на заводах авиационной промышленности.

В 1987 году создан новый тип высокотемпературного жаростойкого конденсационно-диффузионного покрытия СДП-2+ВСДП-16, имеющего градиентное строение. Для рабочих лопаток ТВД ГТД РД-33 такое покрытие позволило повысить в 2,5 раза ресурс лопаток по сравнению с покрытием СДП-2.

В 1992 году модернизируется ионно-плазменная установка МАП-1 для нанесения упрочняющих эрозионностойких покрытий. Установка МАП-1М, разработанная в 2004 году установка МАП-2 (вариант установки МАП-1М с компьютерным управлением) позволили получать покрытия на основе твердых соединений металлов (нитридов, карбидов и др.).

В 1995 году упрочняющее покрытие из нитрида циркония внедрено на ММПО им. В.В. Чернышева — для защиты титановых лопаток компрессора ТВ-7-117 от эрозионного износа.

В 2002 году коррозионностойкое покрытие СДП-1+ВСДП-20 внедрено на ОАО «Климов» — для защиты рабочих и статорных лопаток компрес-

сора двигателя РД-33МК от солевой коррозии. В 2006 году коррозионно-стойкие покрытия типа СДП-1+СФ, СДП-1+ВСДП-20, ВПМСА и ВПАКС — для лопаток и других деталей компрессора двигателя, а также жаростойкое покрытие ВСДП-9+ВСДП-18.

В 2008 году создана автоматизированная ионно-плазменная установка МАП-3 для ассистированного нанесения защитных и упрочняющих покрытий.

В 2010 году разработано первое нанослойное упрочняющее покрытие TiN/CrN для защиты лопаток компрессора от пылевой эрозии.

Для разработки энергоэффективных технологий нанесения теплозащитных покрытий (ТЗП) на рабочие лопатки ГТД в 2008 году во ФГУП «ВИАМ» спроектирована и изготовлена опытная ионно-плазменная установка УОКС-2 для магнетронного осаждения керамических слоев ТЗП, на которой проводятся работы по отработке технологий нанесения керамических слоев ТЗП нового поколения с низкой теплопроводностью ($\leq 1,0$ Вт/м). Для нанесения керамического слоя ТЗП используется новая уникальная высокопроизводительная, энергосберегающая технология — реактивное импульсное магнетронное осаждение при повышенной частоте.



Опытная установка УОКС-2 для магнетронного осаждения керамических слоев ТЗП

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ И СТАЛИ, ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Конструкционные стали

Высокопрочные конструкционные стали с высокой вязкостью разрушения

20ХГН2МФА — кратковременный предел прочности 1350 МПа. Сталь обладает высокой прокаливаемостью и технологичностью. Хорошо сваривается всеми видами сварки с последующей термообработкой. Применяется для изготовления баллонов высокого давления.

ВКС-6 — кратковременный предел прочности 1600 МПа. Обладает высоким сопротивлением хрупкому разрушению в интервале рабочих температур от -70 до +500°C.

ВКС-9, ВКС-12 — кратковременный предел прочности 1950–2300 МПа. Обладают высокой степенью надежности, хорошо свариваются электронно-лучевой сваркой с обеспечением прочности сварного соединения после упрочняющей термообработки, равной 0,9 от прочности основного металла. Применяется для изготовления высоконагруженных деталей, в том числе деталей шасси.



Стойки шасси самолета из стали ВКС-9

Коррозионностойкие стали

ЭП817 — кратковременный предел прочности 1350 МПа. Сталь предназначена для изготовления сварных и несварных силовых узлов, длительно работающих при температурах до 300°C во всеклиматических услови-

ях. Сталь не склонна к коррозии под напряжением. Сварные соединения не склонны к межкристаллитной коррозии и коррозии под напряжением. Сталь хорошо сваривается аргоно-дуговой сваркой с присадкой и без присадки, электронно-лучевой сваркой, а также электроконтактными видами сварки. После сварки не требуется последующая термическая обработка.

ВНС-16-1 — кратковременный предел прочности 1200 МПа. Применяется для изготовления сложных паяно-сварных конструкций.

СН-2А, ВНС-5, ВНС-43 — кратковременный предел прочности 1200–1650 МПа. Обладают высокими вязкостью разрушения, трещиностойкостью, хорошо свариваются всеми видами сварки с обеспечением высокой прочности сварных соединений после термической обработки. Применяются для изготовления крепежа и силовых деталей планера.

ВНС-65 — кратковременный предел прочности 1760 МПа. Сталь переходного аустенито-мартенситного класса предназначена для высоконагруженных силовых, в том числе сварных деталей планера, работающих при температурах от -70 до +200°C во всеклиматических условиях.

Сталь не склонна к межкристаллитной коррозии, хорошо сваривается аргоно-дуговой сваркой с присадкой, а также электронно-лучевой сваркой.

СН-3, СН-ЗПН — кратковременный предел прочности ≥ 1200 МПа. Применяются для обшивки и деталей внутреннего набора планера.

ВНС-73 — кратковременный предел прочности 1375 МПа. Сталь мартенситного класса предназначена для изготовления сварных и несварных силовых деталей самолетов, длительно работающих при температурах от -70 до +200°C во всеклиматических условиях. Сталь хорошо сваривается автоматической аргоно-дуговой сваркой без присадки (неплавящимся электродом) и ручной аргоно-дуговой сваркой с присадкой. После сварки не требуется обязательная термическая обработка. Сталь не склонна к коррозии под напряжением: $\sigma = 980$ МПа в условиях камеры солевого тумана (КСТ-35).

ВНС-74 — кратковременный предел прочности 1400–1495 МПа. Сталь мартенситного класса предназначена для изготовления крепежа, получаемого холодной деформацией, эксплуатирующегося во всеклиматических условиях с температурой эксплуатации от -70 до +350°C. Сталь не склонна к коррозии под напряжением в



Детали крепежа из стали
ВНС-74

Физико-механические свойства коррозионностойких сталей (средние значения)

Сталь	Предел прочности σ_B	Предел текучести $\sigma_{0,2}$	Относительное удлинение δ_5	Относительное сужение ψ
	МПа		%	
ЭП817	1325	1050	15	55
ВНС-16-1	1180	980	12	50
СН-2А	1300	1050	15	55
ВНС-5	1550	1200	18	60
ВНС-43	1670	1270	15	50
ВНС-65	1760	1350	15	55
СН-3ПН	1300	1100	—	—
ВНС-73	1430	1110	15	55
ВНС-74	1400	1200	16	60
ВНС-72	1750	1300	15	45
ВНС-53	980	780	20	—

Характеристики вязкости разрушения и малоциклового усталости коррозионностойких сталей

Сталь	Ударная вязкость KCV ($r_n=0,25$ мм), Дж/см ²	Вязкость разрушения K_{Ic} , МПа $\sqrt{м}$	МЦУ ($N=2 \times 10^5$ цикл; $f=5$ Гц; $R=-1$): σ_{max} , МПа, при K_t	
			1,035	2,2
ЭП817	70*	180	—	450
СН-2А	120*	170	—	630
ВНС-5	90	175	—	450
ВНС-43	98	124	—	440
ВНС-65	90	145	970; 765**	600
ВНС-73	66	145	1039	608

* КС Т.

** При $K_t=1,7$.

Характеристики коррозии под напряжением при испытании в камере солевого тумана КСТ-35 коррозионностойких сталей

Сплав	Напряжение, МПа	Время до разрушения
ЭП817	980	>2 лет
ВНС-5	980	>1 года
ВНС-43	980	>1 года
ВНС-65	980	>1 года
ВНС-73	980	>0,5 года
ВНС-74	980	>0,5 года
ВНС-72	980	>0,5 года
ВНС-53	Не склонна к коррозии	

условиях камеры солевого тумана (КСТ-35) и морском климате при приложенном напряжении $\sigma=980$ МПа. Обладает хорошей способностью к холодной высадке.

ВНС-72 — кратковременный предел прочности 1750 МПа.



Корпусная деталь
планера самолета из
стали ВНС-72



Детали крепежа из
стали ВНС-72

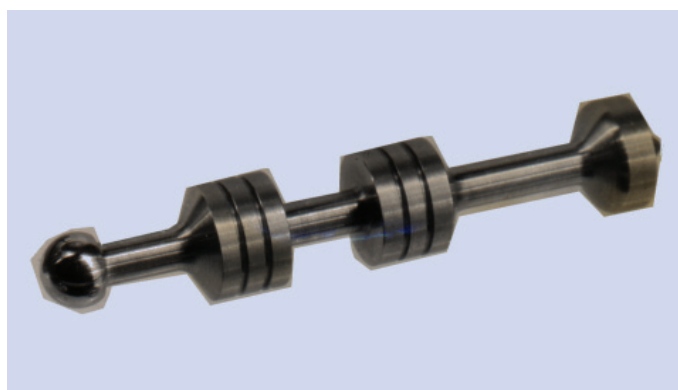
Обладает повышенной пластичностью, хорошо сваривается аргоно-дуговой и электронно-лучевой сваркой. Сталь предназначена для изготовления крепежных деталей, силовых деталей планера, в том числе сварных деталей авиационной техники.

ВНС-53 — коррозионностойкая сталь с температурой эксплуатации от -70 до $+300^{\circ}\text{C}$, обеспечивает высокую технологичность при изготовлении деталей трубопроводных систем (гибка, раскатка, развальцовка). Трубы из стали ВНС-53 с толщиной стенки от 0,5 мм по характеристикам прочности и выносливости в 2 раза превосходят серийные трубы из стали 12X18H10T (используется для серийных деталей).



Детали трубопроводных систем из стали ВНС-53

ВНС-32 — кратковременный предел прочности 2250–2450 МПа. Твердость $\text{HRC} > 58$. Сталь, содержащая бериллий, обладает высокой теплоустойчивостью и износостойкостью. Может применяться для деталей, работающих во всеклиматических условиях при температуре от -196 до $+450^{\circ}\text{C}$. Сталь предназначена для деталей трения топливной аппаратуры.



Плунжер из стали ВНС-32



Корпусная деталь плунжерного насоса из стали ВНС-32

Механические свойства коррозионностойких сталей

Сталь	Предел прочности σ_b	Предел текучести $\sigma_{0.2}$	Предел выносливости σ_{-1} на базе $N=2 \cdot 10^7$ цикл
ВНС-53	980	780	400
12X18H10T	600	280	220

Высокопрочные мартенситостареющие стали

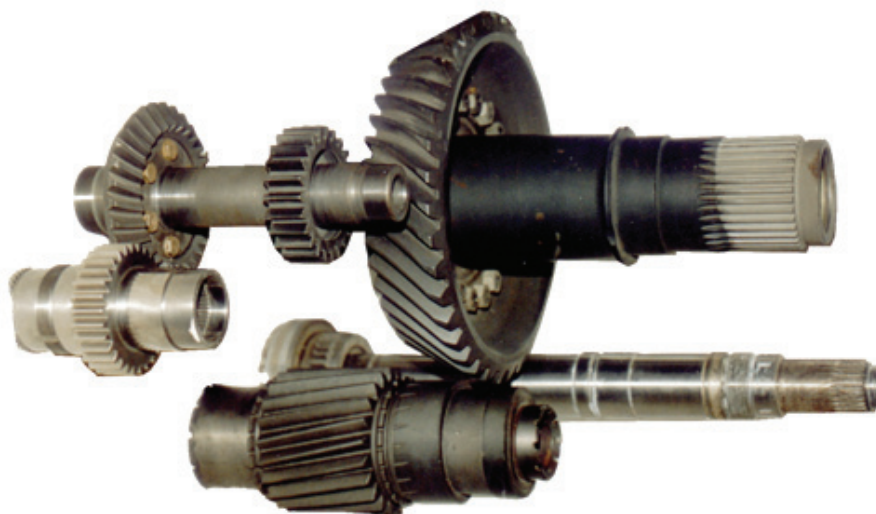
ВКС-170, ВКС-180, ВКС-210, ВКС-240, ВКС-260 — стали высокой надежности и технологичности, упрочняемые низкотемпературным старением, предназначены для изготовления высоконагруженных силовых деталей, крепежа, упругих элементов, инструмента, пресс-форм для литья под давлением для изготовления отливок из алюминиевых и магниевых сплавов. Стали ВКС-170 и ВКС-180 с прочностью не менее 1570 и 1720 МПа соответственно, работоспособны в интервале температур от -196 до +450°С и могут быть использованы для валов ГТД.

Прочностные свойства высокопрочных сталей

Сталь	Предел прочности $\sigma_B^{20^\circ}$	Предел текучести $\sigma_{0,2}^{20^\circ}$	Предел прочности $\sigma_B^{400^\circ}$	Предел текучести $\sigma_{0,2}^{400^\circ}$	Предел длительной прочности $\sigma_{100}^{400^\circ}$	Предел ползучести $\sigma_{0,2/100}^{400^\circ}$
	МПа					
ВКС-170	1570	1520	1300	1200	1000	800
ВКС-180	1720	1600	1400	1350	1000	825
ВКС-210	1950	1850	—	—	—	—
ВКС-240	2200	2100	—	—	—	—
ВКС-260	2500	2400	—	—	—	—
ЭП517 (серийный)	1100	950	850	800	880	490

Цементуемые и износостойкие стали

ВКС-7 — кратковременный предел прочности 1400 МПа. Сталь обладает высокой прокаливаемостью, позволяет получать цементованные слои глубиной 2–2,5 мм с твердостью 60 HRC и обладает высокой контактной долговечностью при температурах до 200°С. Может подвергаться азотированию и использоваться в улучшенном состоянии. Сталь применяется для изготовления зубчатых колес.



Зубчатые колеса редукторов авиационных двигателей из стали ВКС-7

ВКС-10 — кратковременный предел прочности 1300 МПа. Теплопрочная сталь после цементации имеет твердость ≥ 60 HRC и обеспечивает работоспособность длительно — при 450°C и кратковременно — до 550°C с высокой надежностью. Область применения — зубчатые колеса.

ВКС-14 — объемно-упрочняемая износостойкая высокоуглеродистая сталь с твердостью ≥ 60 HRC, применяемая без химико-термической обработки, для изготовления средне- и мелко модульных зубчатых колес, пар трения, инструмента.

Литейные жаропрочные сплавы

ЖС26УМ, ЖС32У, ЖС36 — экономнолегированные рением жаропрочные никелевые сплавы для сопловых и рабочих лопаток ГТД с направленной и монокристаллической структурой с рабочими температурами до 1050°C. Сплавы ЖС26УМ и ЖС36 используются в двигателе ПС-90.

ВЖМ1, ВЖМ5 — высоколегированный рением жаропрочный сплав для рабочих лопаток ГТД с монокристаллической структурой с рабочими температурами до 1100°C.

Сплав	Плотность d , кг/м ³	Предел прочности $\sigma_{\text{в}}^{20^\circ}$, МПа	Относитель- ное удлине- ние δ , %	Длительная прочность		
				$\sigma_{100}^{900^\circ} / \sigma_{1000}^{900^\circ}$	$\sigma_{100}^{1000^\circ} / \sigma_{1000}^{1000^\circ}$	$\sigma_{100}^{1100^\circ} / \sigma_{1000}^{1100^\circ}$
				МПа		
ЖС26УМ	8630	969	24	410/245	195/105	90/60
ЖС32У	8870	1175	15	460/350	265/160	120(79)*/90
ЖС36	8724	1085	19	480/350	255/160	140/85

*При температуре 1150°C

Сплав	Плотность d , кг/м ³	предел прочности $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Относи- тельное удлинение δ , %	Длительная прочность		
				$\sigma_{100}^{900^\circ} / \sigma_{1000}^{900^\circ}$	$\sigma_{100}^{1000^\circ} / \sigma_{1000}^{1000^\circ}$	$\sigma_{100}^{1100^\circ} / \sigma_{1000}^{1100^\circ}$
				МПа		
ВЖМ1	9089	1190	21	585/450	330/215	165/95
ВЖМ5	8790	1090	14	525/—	275/—	150/—

ВЖМ4, ВЖМ6, ВЖМ8 — рений-рутенийсодержащие жаропрочные никелевые сплавы для рабочих лопаток ГТД с монокристаллической

Сплав	Плот- ность d , кг/м ³	Предел прочно- сти $\sigma_{\text{в}}^{20^\circ}$, МПа	Относи- тельное удлинение δ , %	Длительная прочность			
				$\sigma_{100}^{900^\circ} / \sigma_{1000}^{900^\circ}$	$\sigma_{100}^{1000^\circ} / \sigma_{1000}^{1000^\circ}$	$\sigma_{100}^{1100^\circ} / \sigma_{1000}^{1100^\circ}$	$\sigma_{100}^{1150^\circ} / \sigma_{1000}^{1150^\circ}$
				МПа			
ВЖМ4	8870	1220	20	575/405	305/200	170/125	125/74
ВЖМ6	8900	1200	16	595/435	315/220	180/130	140/90
ВЖМ8	9060	1405	14,5	620/410	320/205	190/140	150/—

структурой с рабочими температурами до 1170°C. Сплав ВЖМ4 внесен в спецификацию перспективного двигателя ПД-14 для самолета МС-21.

ВЖЛ21, ВЖМ7 — сплавы нового поколения с низкой плотностью для литья рабочих и сопловых лопаток с поликристаллической (равноосной) структурой (ВЖЛ-21) и монокристаллической структурой (ВЖМ7) с рабочими температурами до 1050°C.

Сплав	Плотность d , кг/м ³	Предел прочности $\sigma_{\text{в}}^{20^\circ}$, МПа	Относи- тельное удлине- ние δ , %	$\sigma_{100}^{900^\circ} / \sigma_{1000}^{900^\circ}$	$\sigma_{100}^{1000^\circ} / \sigma_{1000}^{1000^\circ}$	$\sigma_{100}^{1100^\circ} / \sigma_{1000}^{1100^\circ}$
				МПа		
ВЖЛ-21	8190	1040	9	345/250	180/110	75/—
ВЖМ7	8400	1030	20	430/300	220/140	115/90

ЖСКС1, ЖСКС2 — коррозионностойкие жаропрочные никелевые сплавы для рабочих лопаток с равноосной, направленной и монокристаллической структурами для стационарных ГТУ длительного ресурса.

Сплав	Плотность d , кг/м ³	Предел прочности $\sigma_{\text{в}}^{20^\circ}$, МПа	Относи- тельное удлинение δ , %	$\sigma_{100}^{900^\circ} / \sigma_{1000}^{900^\circ}$	$\sigma_{100}^{1000^\circ} / \sigma_{1000}^{1000^\circ}$
				МПа	
ЖСКС1	8200	1135	9	359/238	305/200
ЖСКС2	8315	1240	13	395/285	200/135

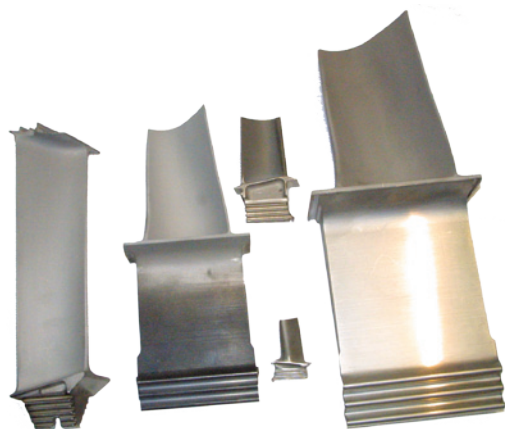
Интерметаллидные литейные сплавы

Интерметаллидные материалы на основе Ni_3Al представляют интерес для применения в деталях камер сгорания с рабочей температурой до 1300°C, турбин — в качестве сопловых охлаждаемых лопаток, створок регулируемого сопла, проставок с рабочей температурой до 1200°C.

ВКНА-1В — сплав предназначен для роторных и сопловых проставок, прошел технологическое и эксплуатационное опробование (с положительным эффектом) в качестве сегментов жаровой трубы с рабочей температурой до 1800°C в течение 2000 ч на двигателях ПС-90А (ОАО «Авиадвигатель») и 117А (ОАО «НПО Сатурн»).

ВКНА-4У МОНО — сплав прошел технологическое опробование в качестве рабочих лопаток турбины двигателя ТВД-20 для самолетов Ан-3Т и Ан-38-200; эксплуатационное опробование рабочих лопаток с положительным эффектом в течение 5000 ч и 10000 циклов на ОАО «ОМКБ» (г. Омск); рекомендован для серийного применения в самолете Ил-96.

ВКНА-4УР — сплав прошел технологическое опробование при изготовлении створок регулируемого сопла и блоков сопловых лопаток с положи-



Рабочие лопатки из жаропрочных сплавов



Блок сопловых лопаток из сплава ВКНА-4У



Самолет Ил-96



Сопловой аппарат из сплава ВКНА-4УР

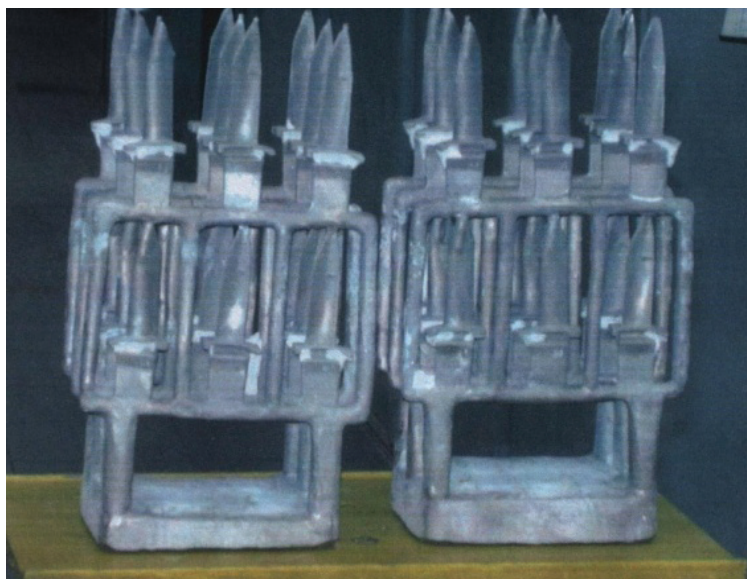


Сопловая лопатка из сплава ВКНА-4УР

тельным эффектом и эксплуатационное опробование в составе двигателя АЛ-31Ф и малогабаритного двигателя МД-120 на предприятии ФГУП "НПЦ Газотурбостроения «Салют»". Сплав внесен в спецификацию двигателя вертолета ВК-800 ОАО «Климов».

ВКНА-25 — сплав прошел эксплуатационное опробование с положительным эффектом в составе малогабаритного двигателя МД-120 на предприятии ФГУП "НПЦ Газотурбостроения «Салют»".

ВКНА-1В и ВКНА-25 — сплавы внесены в спецификацию перспективного двигателя ПД-14 для самолета МС-21.



Внешний вид двухъярусного блока рабочих лопаток малогабаритного двигателя из сплава ВКНА-25

Прочностные свойства интерметаллидных сплавов

Сплав (КГО)	Сумма легирующих элементов (Mo, W, Re, Ta), % (по массе)	d , кг/м ³	Рабочая температура, °C	Предел прочности	Жаропрочность на базе 100 ч, при температурах		Жаростойкость, г/м ² (привес при окислении за 100 ч), при температуре, °C	
				$\sigma_{\text{в}}^{20^{\circ}}$	$\sigma_{100}^{1100^{\circ}}$	$\sigma_{100}^{1200^{\circ}}$		
				МПа			1100	1200
ВКНА-1В МОНО [111]	6,5	7938	1250	1350	100	45	10	20
ВКНА-4У МОНО [111]	7,2	7910	1200	1340	110	50	6	16
ВКНА-25 (ВИН1) МОНО [111]	9,5	8105	1200	1120	125	48	12,5	20
ВИН2 МОНО [111]	10,2	8120	1200	1400	100*	—	15	20
ВИН3 МОНО [001]	13,5	8247	1200	855	82	45	15	—
ВИН4 МОНО [001]	10	8161	1200	900	90	40	15	20

* На базе 1000 ч.

Жаропрочные деформируемые сплавы

Материалы для дисков турбин и компрессора высокого давления, разработанные во ФГУП «ВИАМ»:

ЭИ698-ВД, ЭП742-ИД, ЭК79-ИД, ЭК151-ИД — жаропрочные сплавы с рабочей температурой до 750°C с кратковременными забросами — до 800°C.

ЭП975-ИД — высокожаропрочный сплав, не имеющий мировых аналогов, с рабочей температурой до 950°C.

ВЖ175-ИД — высокожаропрочный деформируемый сплав, по комплексу свойств превосходит известные аналоги: по кратковременной и длительной прочности — на 15% (зарубежные сплавы Rene 88DT, N18, LSHR); по малоцикловой усталости — на 30% (отечественные порошковые сплавы). Сплав прошел промышленное опробование и внедрен в производство на заводах ОАО «МЗ “Электросталь”» и ОАО «СМК». Разработаны технологические параметры изготовления крупногабаритных штамповок дисков диаметром до 600 мм, массой до 180 кг. Проведены квалификационные испытания с определением расчетных значений прочностных характеристик на уровне -3σ .

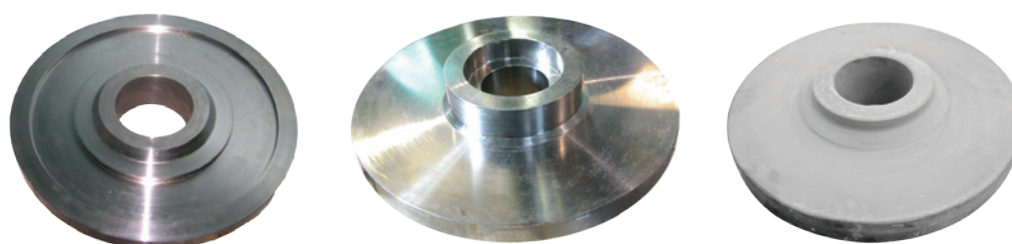
Дисковые сплавы нашли широкое применение во всех серийных авиационных гражданских и военных ГТД, двигателях ракет, наземных ГТУ и будут использованы в перспективных ГТД.

Механические свойства жаропрочных сплавов

Сплав	Рабочая температура, °C	Содержание γ' -фазы, % (по массе)	σ_n , МПа	δ , %	σ_{100} , МПа		МЦУ: (при $N=10^4$ цикл; $f=1$ Гц; $R=0$)	
					σ_{max} , МПа			
					при температуре, °C			
					650	750	650	750
ЭИ698-ВД	750	20–23	1158	17	706	412	834	716
ЭП742-ИД		30–35	1295	17	834	530	726	736
ЭК79-ИД		40–45	1354	18	893	600	853	726
ЭК151-ИД	800	45–50	1471	15	1010	638	1176	1080
ВЖ175-ИД		50–54	1595	15	1050	640	1275	1130
ЭП975-ИД	950	53–56	1315	19	–	736	–	950



Роторы турбин конструкции «блиск» (диск с валом и лопатками) из сплава ЭП975-ИД для изделий кратковременного действия и вспомогательных стационарных установок (ВСУ)



Штамповки дисков ТВД (диаметром 500–600 мм) из сплава ВЖ175-ИД

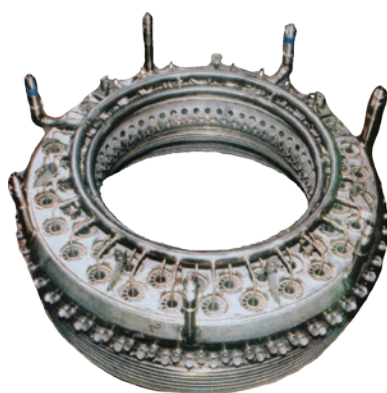
В последние годы разработаны новые свариваемые сплавы для деталей КС и корпусов:

ВЖ159 — высокотехнологичный свариваемый ремонтпригодный слабостареющий сплав с рабочими температурами до 1000°C для высокотемпературных статорных деталей ГТД (жаровых труб, створок, экранов, сопла и т. д.).

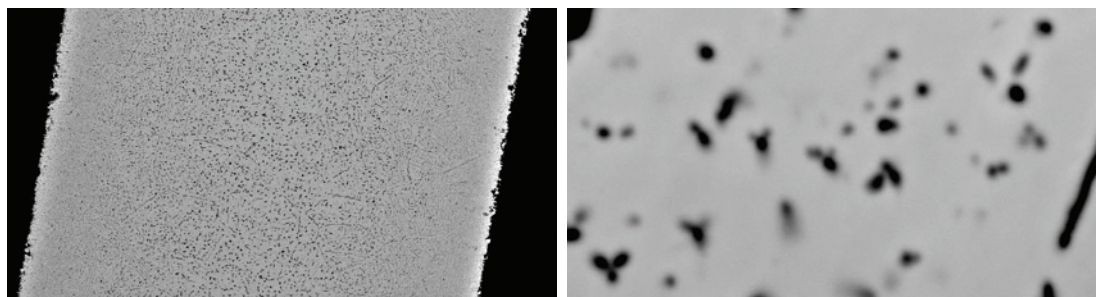
ВЖ171 — свариваемый высокотемпературный упрочняемый химико-термической обработкой сплав с рабочими температурами до 1250°C для высокотемпературных статорных деталей ГТД (жаровых труб, створок, экранов, сопла и т. д.).

ВЖ172 — высокопрочный свариваемый дисперсионно-твердеющий сплав для роторов КВД, корпусов и высоконагруженных деталей статора ГТД.

Разработанные в ВИАМ жаропрочные свариваемые сплавы по комплексу механических свойств не уступают зарубежным сплавам аналогичного назначения, а по жаропрочности превосходят существующие серийные отечественные и зарубежные материалы. Разработаны и освоены в промышленном производстве технологии получения полуфабрикатов из жаропрочных сплавов ВЖ159 и ВЖ172.



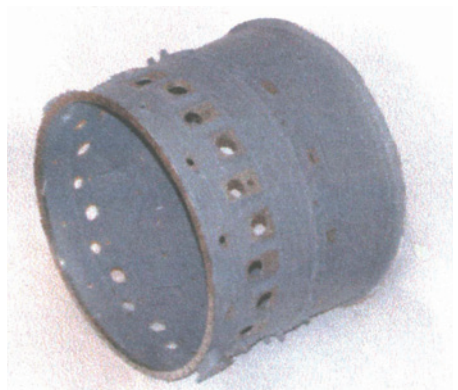
Камера сгорания ГТД после химико-термической обработки



×100

×10000

Микроструктура сплава ВЖ171



Корпус камеры сгорания ГТД

Цельнокатанные кольца диаметром 840 мм из сплава ВЖ172

Механические свойства жаропрочных сплавов

Сплав	Рабочая температура, °С	σ_b , МПа	δ , %	σ_{100} , МПа, при температуре испытаний, °С				
				700	900	1000	1100	1200
ВЖ172	900	1400	25	620	80	—	—	—
ВЖ159	1000	1150	30	—	70	25	—	—
ВЖ171	1250	850	10	—	—	68	45	23

Ресурсные жаростойкие покрытия

Применяются для защиты теплонагруженных деталей из коррозионностойких сталей и жаропрочных никелевых, высокохромистых и железоникелевых сплавов от высокотемпературной газовой коррозии в процессе длительной эксплуатации.

Отличаются:

- широким интервалом рабочих температур 600 – 1100°С;
- высокой термостойкостью (не менее 250 термоциклов 100±20°С, 1 цикл: 5 мин) и жаростойкостью при рабочей температуре;
- прочностью сцепления с подложкой – до 98%;
- коррозионной стойкостью;
- выдерживают действие низких температур и циклических нагрузок;
- устойчивы к продуктам сгорания топлива.

Обеспечивают: снижение окисляемости сталей и сплавов в 6–10 раз, коксоотложения в 10–15 раз, науглероживания в 6–8 раз, повышение ресурса и надежности работы изделий в 1,5–2 раза.

ЭВК-103, ЭВК-103М – защита деталей ГТД (камеры сгорания, форсажные камеры, жаровые трубы и др.) из жаропрочных никелевых, высокохромистых сплавов типа ЭП648, ВЖ98, ЭИ602 и др. от высокотемпературной газовой корро-



зии при длительной эксплуатации при температурах до 1000°C ; защита силовых деталей (ротор, статор и др.) из жаропрочных никелевых сплавов ЭП202, ЖСЗДК энергетических установок (ЭУ) в среде окислительно-го генераторного газа от возгорания при $600\text{--}800^{\circ}\text{C}$; изготовление керамических форм для деталей, получаемых по выплавляемым моделям.

ЭВ-300-60М — защита деталей из жаропрочных железоникелевых сплавов и коррозионностойких сталей от высокотемпературной газовой коррозии при длительной эксплуатации при температурах до 900°C ; от науглероживания поверхностей труб печей пиролиза этиленовых производств и коксоотложения элементов топливных систем летательных аппаратов; от водородопроницаемости с целью удержания водорода в замкнутом объеме конструкций; в качестве высокотемпературного электроизоляционного слоя.

ЭВ-86, ЭВ-86-1 — защита деталей из коррозионностойких сталей типа 12Х18Н10Т от высокотемпературной газовой коррозии при длительной эксплуатации при температурах до 600°C ; в качестве высокотемпературного электроизоляционного слоя.

Уплотнительные материалы для проточной части ГТД

ВИПВМ-900 — истираемый уплотнительный материал из волокон сплава на основе системы Fe-Cr-Al-Y предназначен для работы в турбине ГТД с минимальными зазорами, обеспечивающими высокую эффективность работы узлов уплотнений при минимальных износах лопаток по торцам при температуре до 900°C .

ВИПВМ-1100 — истираемый уплотнительный материал из волокон сплава на основе системы Fe-Cr-Al-Y предназначен для работы в турбине ГТД при температуре до 1100°C .



Элементы сектора разрезного кольца с нанесенным уплотнительным материалом из дискретных волокон системы Fe-Cr-Al-Y



Полосы истираемого уплотнительного материала из дискретных волокон системы Fe-Cr-Al-Y

Материалы обладают удовлетворительной коррозионной стойкостью в условиях солевого тумана, тропического климата, промышленной атмосферы по методике ускоренных циклических испытаний при рабочих температурах.

Свойства материалов системы Fe–Cr–Al–Y

Свойства	Значения свойств материалов	
	ВИПВМ-900	ВИПВМ-1100
Рабочая температура, °C	До 900	До 1100
Плотность, кг/м ³	1400–1800	1800–2200
Пористость, %	70–80	60–70
Твердость по Бринеллю НВ, МПа	50–70	60–90
Жаростойкость, %, в воздушной среде, после выдержки в течение 100 ч	≤0,7(900°C)	≤2,0 (1100°C)
Истираемость (соотношение износов уплотнительного материала и образца – имитатора лопатки)	≥10:1	(5÷6):1

Металлургия авиационных сталей и сплавов – производство литых прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов во ФГУП «ВИАМ»

Участок по выплавке и изготовлению мерной шихтовой заготовки ориентирован на производство жаропрочных суперсплавов нового поколения (рений- и рутенийсодержащих, интерметаллидных, коррозионностойких и др.), а также переработку отходов серийных литейных жаропрочных сплавов, образующихся на моторостроительных и ремонтных заводах (детали после окончания эксплуатации). Участок оснащен современным производственным, аналитическим и испытательным оборудованием, что позволяет обеспечить качество жаропрочных суперсплавов на уровне требований мировых стандартов: содержание вредных примесей [O], [N], [S] ≤0,001% каждого, [C] ≤0,005% и узкие пределы легирования: ±0,2–0,3% от расчетного состава.

Помимо выплавки жаропрочных суперсплавов нового поколения, на созданном участке применяется ресурсосберегающая технология рафинирующего переплава в вакууме отходов серийных литейных жаропрочных сплавов, которая позволяет из 100% отходов получать сплавы, полностью отвечающие по чистоте и свойствам требованиям действующих ТУ.

Технологическое оборудование

Выплавка сплавов осуществляется на модернизированной в ВИАМ вакуумной индукционной установке ИСВ 016 и вакуумной индукционной установке VIM 50 последнего поколения (фирма «ALD Vacuum Technologies AG», Германия) с компьютерным управлением, с емкостью тигля 350 кг, оборудованной пробоотборником и дозатором для присад-



Вакуумная индукционная установка
VIM 50



Вакуумная индукционная
установка ИСВ 035

ки легирующих добавок, системой фильтрации при разливке в полуавтоматическом режиме, высокопроизводительными вакуумными насосами.

Выпускаемая продукция и услуги

Прутковые (шихтовые) заготовки литейных суперсплавов нового поколения ВЖМ4, ВЖМ5, ЖС32У, ЖС36, ВКНА-1В, ВКНА-25, ЖСКС2 и др.

Прутковые (шихтовые) заготовки серийных литейных жаропрочных сплавов ЖС32, ЖС6У, ЖС26, ЖС6К, ВЖЛ12У, ВХ4Л, ЖСЗДК и др., изго-

Качество заготовок литейных жаропрочных суперсплавов производства ФГУП «ВИАМ» и фирмы «Cannon Muskegon» (США)

Показатель			Содержание элементов в сплавах, выплавленных по технологии	
			ФГУП «ВИАМ»	фирмы «Cannon Muskegon» (США)
Интервал легирования по основным элементам, % (по массе)			$\pm 0,2-0,3$	$\pm 0,2-0,35$
Содержание примесей в сплавах, ppm	[O]	по ТУ	≤ 10	≤ 10
		фактическое	2-6	2-6
	[N]	по ТУ	≤ 10	≤ 10
		фактическое	1-3	1-2
	[S]	по ТУ	≤ 10	≤ 12
		фактическое	2-4	1-5



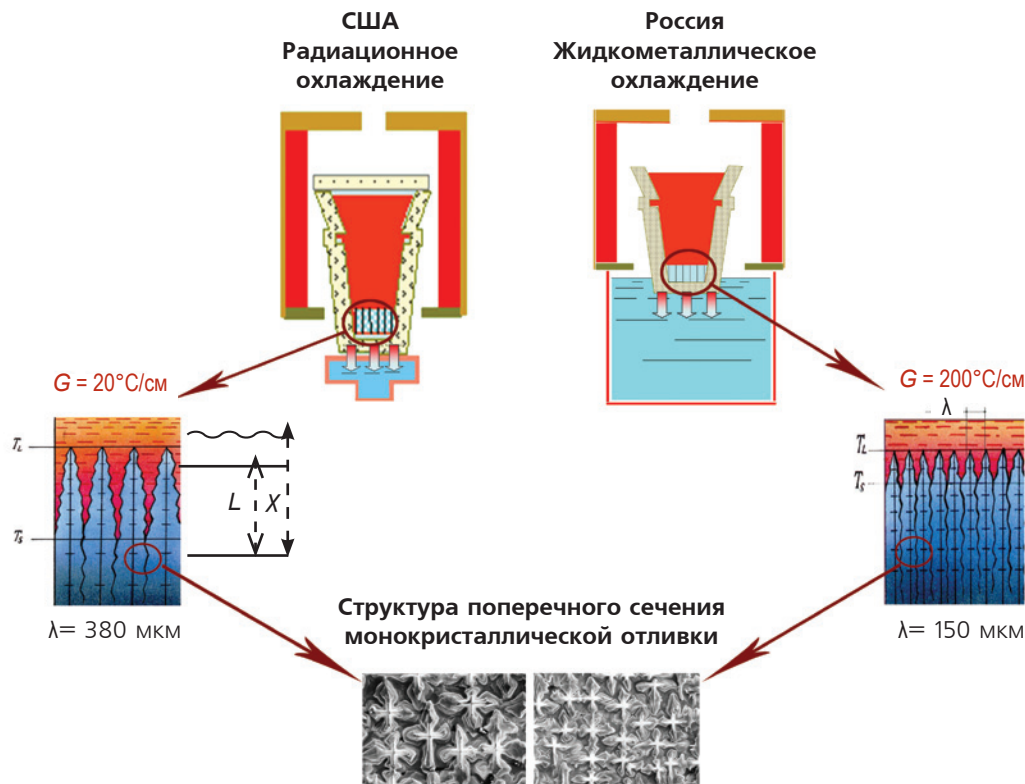
Внешний вид заготовок, получаемых в установке VIM 50 (внизу — после разливки в трубы; в середине после отрезки усадочной раковины;верху — после шлифовки поверхности)

товленные с использованием 100% отходов, которые поступают с моторостроительных и ремонтных заводов.

Высокоградиентная технология (температурный градиент на фронте кристаллизации G – от 60–70 до 200–220°C/см) литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой с применением жидкометаллического охладителя вместо традиционно используемого (особенно за рубежом) с радиационным охлаждением ($G=20\text{--}30^\circ\text{C}/\text{см}$).

Высокий уровень служебных характеристик лопаток, изготовленных по данной технологии, обеспечивается отсутствием поверхностных карбидов и дефектов типа *freckles*, пониженной микропористостью, высокой дисперсностью структурных составляющих, кристаллографической ориентацией в наиболее выгодном направлении, малой степенью ликвации и др.

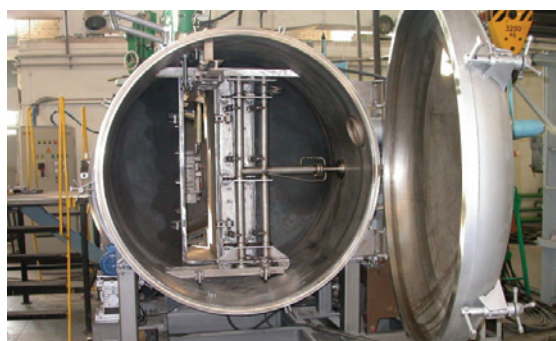
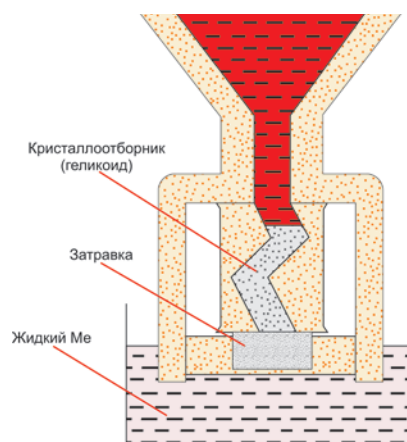
Повышение температурного градиента на фронте кристаллизации до 200–220°C/см позволяет получать отливки с тонкодисперсной структурой высокой степени однородности (междендритное расстояние $\lambda=100\text{--}150$ мкм) и с существенно меньшей микропористостью (до 0,1%). Для реализации процесса разработаны новые составы и технология изготовления



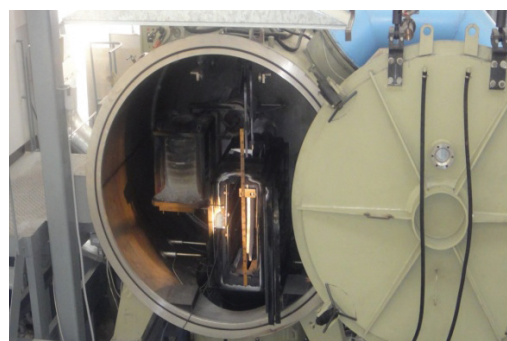
Сравнение технологии литья (схема) лопаток в РФ (ВИАМ) и за рубежом

керамических стержней и оболочковых форм, обеспечивающие литье лопаток при температурах заливки расплава до 1700°C.

Комбинированная технология зарождения монокристалла (затравка-геликоид) для получения отливок лопаток с высокой степенью структурного совершенства обеспечивает 100%-ную передачу структуры данной ориентации от затравки к изделию, уменьшает блочность и разориентацию субзерен. Технология широко применяется в серийном производстве с высоким (90–95%) выходом годного по макроструктуре.



Установка УВНК-9



Установка УВНК-10



Установка УВНС-6



Установка УВНК-14

ФГУП «ВИАМ» предлагает установки для серийного производства лопаток с направленной и монокристаллической структурами в условиях температурного градиента $G \leq 100^\circ\text{C}/\text{см}$:

- **УВНК-9** – для литья лопаток размером до 300 мм;
- **УВНК-10** – для литья крупногабаритных (до 800 мм) лопаток, створок и проставок реактивного сопла с управляемым вектором тяги, сложнопрофильных заготовок для изотермической штамповки дисков малогабаритных двигателей;
- **УВНК-14** – для литья крупногабаритных (до 650 мм) лопаток энергетических и газоперекачивающих установок.

ФГУП «ВИАМ» предлагает установку для серийного производства лопаток с монокристаллической структурой в условиях температурного градиента $G > 100^\circ\text{C}/\text{см}$:

- **УВНС-6** – промышленная высокоградиентная установка с шлюзовой камерой для литья деталей горячего тракта ГТД с направленной и монокристаллической структурой (длиной до 200 мм). Установка оснащена подвижными тепловыми экранами, отделяющими зону нагрева от зоны охлаждения (жидкометаллический охладитель – олово). Установка оснащена системой управления основными параметрами технологического процесса с помощью компьютера.

Технология деформации

Разработанные технологии позволяют:

- увеличить коэффициент использования металла (КИМ) – в 2–3 раза;
- снизить трудоемкость операций штамповки и окончательной механической обработки – в 3–5 раз.

Экономия за счет снижения расхода дорогостоящего металла на каждой заготовке составляет в среднем более 100000 рублей, а стоимость детали снижается в 1,5–2 раза.

Изотермическая штамповка на воздухе обеспечивает формирование регламентированной структуры и достижение высоких и стабильных механических свойств. Участок изотермической штамповки оснащен специализированными прессами и изотермическими установками, которые позволяют изготавливать опытно-промышленные и серийные партии штамповок дисков и других деталей, в том числе из высокожаропрочных никелевых сплавов (ВЖ175, ЭП975А-ИД, ЭИ698, ЭП742, ЭК79, ЭК151, ЭП975 и др.) диаметром до 300 мм и труднодеформируемых титановых сплавов (ВТ6, ВТ8, ВТ8М-1, ВТ8-1, ВТ22, ВТ25У, ВТ41) диаметром до 450 мм.

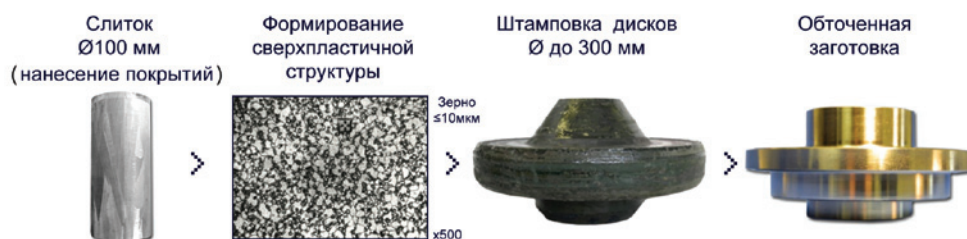


Специализированные прессы усилием 1600 и 630 тс, с программным управлением процессами нагрева заготовок и штамповок

Оригинальная технология изготовления штамповок из мерных слитков, выплавленных методом высокоградиентной направленной кристаллизации (ВГНК), обеспечивает увеличение выхода годного до 60–80%, снижение энерго- и трудоемкости производства, экономичность и оперативность изготовления опытно-промышленных партий штамповок с регламентированными структурой и свойствами.

Изотермическая штамповка на воздухе:

- из мерных слитков, полученных по высокоградиентной технологии



- выход годного из слитка 60–80%
- повышение КИМ – в 2 раза;

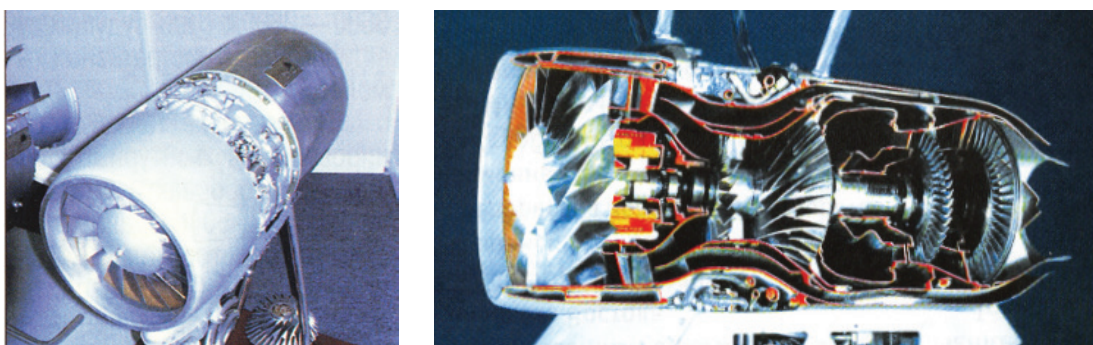
- из прутковой заготовки серийной поставки



- снижение массы исходных заготовок на 30–40%



Штамповки дисков из сплавов ЭИ698-ВД, ЭП742-ИД, ЭК151-ИД, ЭП975-ИД, ВТ8



Двигатель ТРДД50



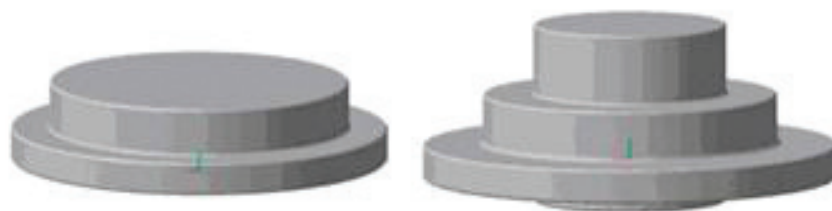
Газотурбинное автономное средство
электропитания СЭС-75



Диск из сплава ЭП742



Вертолет
Ка-226
Двигатель
АИ-450



Заготовки диска из сплава ЭК151-ИД

Технология штамповки лопаток ГТД из железоникелевых сплавов

Новая технология обеспечивает для сплавов ЭП718-ИД, ЭИ787-ВД, ВЖ169, ВЖ172 формирование однородной мелкозернистой структуры во всех элементах сечения точных заготовок лопаток, повышение на 15–20% предела выносливости, увеличение КИМ, снижение трудоемкости механической обработки.

Защитные технологические покрытия

Защитные технологические покрытия обеспечивают защиту от окисления, обезуглероживания, выгорания легирующих элементов, газонасыщения поверхности деталей и заготовок различной конфигурации и габарита из высоко- и среднелегированных сталей, коррозионностойких, штамповых сталей, жаропрочных никелевых, титановых, интерметаллидных, бериллиевых, ниобиевых, циркониевых, тугоплавких сплавов при термической обработке и нагревах под горячую деформацию.

Защитные технологические покрытия позволяют:

- обеспечить защиту от окисления, обезуглероживания, выгорания легирующих элементов поверхности деталей различной конфигурации;
- получить экономию металла до 8% за счет исключения окалины;
- производить нагрев в печах с воздушной атмосферой вместо печей с контролируемой атмосферой;
- повысить качество поверхности деталей и полуфабрикатов.

Снизить:

- трудоемкость технологических процессов — в 1,5–3 раза;
- расход электроэнергии — до 30–40%;
- расход абразивных и режущих материалов — до 10%.

ЭВТ-24, ЭВТ-88 применяются для защиты титановых сплавов от окисления и газонасыщения, а также в качестве высокоэффективной смазки при горячей деформации — объемной штамповке, изотерми-



Лопатки с покрытием ЭВТ-24

ческой штамповке, изотермической штамповке в условиях сверхпластичности при температурах 850–1050°C.

Применение покрытия позволяет реализовать процесс изотермического деформирования в условиях сверхпластичности; получить точные штамповки с необрабатываемыми поверхностями.

ЭВТ-52 применяется для защиты поверхности заготовок из жаропрочных сплавов при нагреве под деформацию (с припуском 3–5 мм) и в качестве высокотемпературной смазки.

ЭВТ-7 применяется для защиты поверхности заготовок из титановых сплавов от окисления и газонасыщения в процессе термической обработки.

ЭВТ-100 применяется для защиты заготовок из коррозионностойких и среднелегированных сталей типа ВНС-2, ВНС-5, ВНЛ-3, 2Х13, Х18Н10Т и др. от окисления, выгорания легирующих элементов при термической обработке; шарикоподшипниковых сталей типа ШХ15 и для штамповых сталей типа Х12М с целью уменьшения обезуглероживания поверхностного слоя при нагревах под деформацию.

ЭВТ-77 применяется для защиты заготовок из высокопрочных сталей типа ВКС от окисления и обезуглероживания при высокотемпературной (до 1200°C) термической обработке полного цикла.

ЭВТ-108М — защитное стеклопокрытие применяется при изотермической штамповке жаропрочных сплавов, для защиты поверхности дисков из высоколегированных жаропрочных никелевых сплавов типа ВЖ175 при термообработке и горячей изотермической штамповке с целью защиты их от окисления и выгорания легирующих элементов, а также



Штамповка диска из жаропрочного сплава ВЖ175 со сверхпластичным защитно-смазочным стеклопокрытием ЭВТ-108М

в качестве эффективной высокотемпературной технологической смазки при температурах до 1180°C в условиях сверхпластичности.

Применение покрытия позволяет обеспечить получение качественной поверхности и стабильных механических свойств деформируемых заготовок.

Научно-производственный комплекс по разработке композиционных материалов и покрытий

Во ФГУП «ВИАМ» создано производство фритт, шликеров, керамических материалов и покрытий, включающее «Участок по изготовлению фритт, шликеров, защитных технологических покрытий и пигментов», «Участок по изготовлению фритт, шликеров, композиционных материалов и антиокислительных покрытий».



Участок по изготовлению фритт, шликеров, защитных технологических покрытий и пигментов

Производительность — до 40 тонн в год

Участок выпускает более 32 марок покрытий: защитно-технологические покрытия — высокотемпературные смазки: ЭВТ-100, ЭВТ-108М, ЭВТ-24, ЭВТ-88, ЭВТ-35 и др.



Участок по изготовлению фритт, шликеров, композиционных материалов и антиокислительных покрытий

Опытно-производственный комплекс оснащен современным технологическим и исследовательским оборудованием: термическим, вакуумным, прессовым, размольным, приборами для структурно-фазовых исследований, механических и теплофизических испытаний, анализатором исходных компонентов, технологических проб и качества готовой продукции.

- Планетарная мельница — предназначена для тонкого сухого и мокрого механического измельчения материалов средней жесткости, твердых и мягких волокнистых материалов.
- Лазерный анализатор размера частиц «Analizzette 22» (Fritsch, Германия) — предназначен для определения среднемассового размера частиц и удельной поверхности материалов (область измерения: 0,1 — 600 мкм).
- Высокотемпературный dilatометр DIL 402 PC (Netzsch, Германия) — предназначен для проведения dilatометрического анализа материалов в широком диапазоне температур (от 20 до 1600°C) в воздушной атмосфере и в атмосфере технологических газов.
- Прибор синхронного термического анализа STA 449 C Jupiter (Netzsch, Германия) — позволяет сочетать методы дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрического анализа при одном измерении; в совокупности с квадрупольным масс-спектрометром позволяет проводить анализ газов, выделяющихся в процессе эксперимента.
- Высокотемпературный вакуумный пресс, высокотемпературные вакуумные и электропечи с рабочими температурами до 2000°C — предназначены для получения изделий из керамического и стеклокерамического композиционных материалов, керамического композиционного материала с защитным покрытием.
- Универсальная испытательная машина для определения прочности образцов при четырехточечном изгибе в интервале температур 800–1600°C. Оснащение участка обеспечивает осуществление замкнутого технологического цикла разработки, изготовления и контроля качества керамических КМ и покрытий с реализацией процессов карбонизации, высокотемпературного химического синтеза, силицирования, CVI и CVD технологий.

Предлагаем:

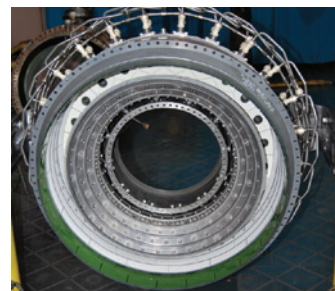
- разработку высокотемпературных конструкционных керамических и стеклокерамических материалов по ТЗ Заказчика;
- изготовление и поставку заготовок и деталей;
- нанесение жаростойких и антиокислительных покрытий на детали Заказчика;
- поставку фритт, шликеров, пигментов семи цветов, защитных технологических и жаростойких покрытий с паспортом на продукцию.

ПОТРЕБИТЕЛИ ПРОДУКЦИИ:

ФГУП НПЦ «Газотурбостроения "Салют"», ОАО «НПО "Сатурн"», ОАО «Авиадвигатель», ОАО «НПО Энергомаш», ОАО «Казанькомпрессормаш», ОАО МКБ «Факел» им. Грушина, ОАО «ГосМКБ "Радуга"», ОАО «ВПК "НПО Машиностроения"», ФГУП КБ «Машиностроение», ОАО «ГМКБ "Вымпел"» им. Торопова, ОАО «РСК "МиГ"», ОАО «КНАПО», ОАО «Корпорация "Иркут"», ОАО «НАПО им. В.П. Чкалова», ОАО «КАДВИ», ОАО «КАПО им. С.П. Горбунова», ОАО «Борисфен-Авиа», ОАО «Таганрогская авиация», ОАО «Пикар 2000».

Технология сварки и пайки металлических авиационных материалов

Современные конструкционные материалы имеют сложные системы легирования и зачастую не позволяют использовать для изготовления сварных конструкций традиционные методы сварки плавлением. К таким материалам относятся высокопрочные сплавы на основе алюминия, интерметаллидов и др. Целесообразным способом сварки таких материалов является сварка в твердой фазе.



Преимущества технологий сварки в твердой фазе по сравнению со сваркой плавлением:

- возможность сварки деталей из материалов, не свариваемых сваркой плавлением;
- минимальное термическое воздействие на свариваемый материал;
- отсутствие дефектов, присущих сварке плавлением;
- повышение КИМ в 3–4 раза за счет минимальных допусков заготовок;
- отсутствие коробления и термических деформаций;
- получение сварных соединений с прочностью, близкой к прочности основного материала.

При изготовлении сварных конструкций из алюминиевых сплавов находит применение процесс сварки трением с перемешиванием, обеспечивающий получение соединений со свойствами, значительно превосходящими свойства соединений, полученных дугowymi способами сварки.

Механические свойства сварных соединений алюминиевых сплавов, выполненных аргоно-дуговой сваркой и сваркой трением с перемешиванием (СТП)

Сплав	Вид сварки	Предел прочности σ_b , МПа	$K=\sigma_{в.св}/\sigma_b$	Статический угол изгиба, град	KCU , кДж/м ²
1424	ААрДЭС	340	0,77	60	250
	СТП	400	0,91	40	110
В-1461	ААрДЭС	350	0,66	60	340
	СТП	440	0,83	50	160

Применение — изготовление элементов фюзеляжа, крыльев, баков для топлива и криогенных жидкостей, корпусов ракет и других конструкций из алюминиевых, титановых, магниевых сплавов.

Разработаны технологии ротационной сварки трением жаропрочных деформируемых никелевых сплавов в одноименных и разноименных сочетаниях.

Применение — изготовление деталей типа диск-вал, вал-вал сварного ротора (детали в виде тел вращения) из деформируемых титановых и никелевых сплавов, сталей.



Деталь типа
«диск-вал»

Механические свойства сварных соединений жаропрочных никелевых сплавов, выполненных ротационной сваркой трением

Свариваемые материалы	σ_B , МПа				σ_{100} , МПа			KCU^{+20° кДж/м ²	Коэффициент ослабления сваркой $K=\sigma_{св.с}/\sigma_B$
	при температуре испытаний, °С								
	20	650	700	750	650	700	750		
ЭП975+ЭП975	1160	—	—	1080	—	—	—	350	≥0,8
ЭК79+ВЖ172	1390	—	1000	850	—	450	400	410	
ВЖ175+ВЖ175	1500	1480	—	—	960	—	—	230	

Высокотемпературная диффузионная пайка является наиболее эффективным методом соединения никелевых жаропрочных сплавов нового поколения (ЖС6У, ЖС32, ЖС36, ВКНА-4У, ВЖМ4, ВЖМ5, пористо-волоконистые уплотнительные материалы).

Припои ВПр11–40Н, ВПр24, ВПр27, ВПр36, ВПр37, ВПр44, ВПр48, ВПр50 на никелевой основе и технологии пайки обеспечивают:

- жаростойкость паяных соединений на уровне жаростойкости основного материала;
- жаропрочность стыковых соединений на уровне 0,7–0,9 от жаропрочности основного материала;
- совмещение пайки с термообработкой основного материала;
- пайку тонкостенных конструкций с минимальной эрозией основного материала;
- возможность ремонта литых деталей из жаропрочных никелевых сплавов, включая монокристаллические сплавы.

Припои для пайки жаропрочных никелевых сплавов и сталей

Припой	Рабочая температура соединений, °С	Основной материал (сплав)	Вид полуфабриката
ВПр11–40Н	800	ЖС6, ЭИ435	Порошок
ВПр24	1100	ЖС6У, ВЖЛ12, ЖС32	Порошок
ВПр27	1050	ЖС6У, ВЖЛ12	Порошок и аморфная лента
ВПр36	1150	ЖС32, ВЖМ4	Порошок
ВПр37	1200	ВКНА-4, ВЖМ4, ВЖМ5	Порошок
ВПр44	1150	ЖС36, ВЖМ4, ВЖМ5	Порошок
ВПр48	1100	ЖСКС1, ЖСКС2	Порошок
ВПр50	1050	ЖС6, ЭИ435, 12Х18Н10Т	Порошок и аморфная лента

Механические свойства паяных соединений

Соединяемые материалы (припой)	Жаропрочность	$K = \sigma_{в.св} / \sigma_{в.}^*$
ЭП975+ВКНА-4У (ВПр36)	$\sigma_{100}^{975} = 230$ МПа	1
ВЖ172+ЭК79 (опытный)	$\sigma_{100}^{800} = 260$ МПа	0,9

* От прочности менее прочного сплава.



Лопатки турбины с запаянными знаковыми отверстиями



Паяный блок силовых лопаток

ВПр16 и ВПр28 — припои на титановой основе при пайке титановых сплавов обеспечивают:

- прочность паяных соединений на уровне основных материалов;

- совмещение режима пайки с режимом термообработки основного материала;
- пайку тонкостенных конструкций с минимальной эрозией основного материала;
- коррозионную стойкость соединений во всеклиматических условиях;
- получение композиционных наплавов с повышением износостойкости титановых сплавов в десятки раз;
- возможность пайки соединений металлов с керамикой.

Припои для титановых сплавов

Припой	Температура пайки, °С	Рабочая температура соединений, °С	Вид полуфабриката
ВПр16	900–950	600	Порошок и аморфная лента
ВПр28	850–880	600	

ВПр35 и ВПр40 — припои на основе олова и свинца обеспечивают:

- замену серебросодержащих припоев на припои на основе олова и свинца;
- хорошую коррозионную стойкость соединений — рекомендуются для работы во всеклиматических условиях без лакокрасочной защиты;
- более высокую (на 20–40%) прочность при срезе паяных соединений, чем прочность соединений, выполненных серебросодержащими припоями.

Припои для низкотемпературной пайки

Припой	Температура пайки, °С	Вид полуфабриката
ВПр35	200	Проволока
ВПр40	250	Слиток, проволока



Паяные штепсельные разъемы

Паяная сотовая панель

Участок изготовления порошковых припоев и сплавов для аддитивных технологий

Технологическое оборудование

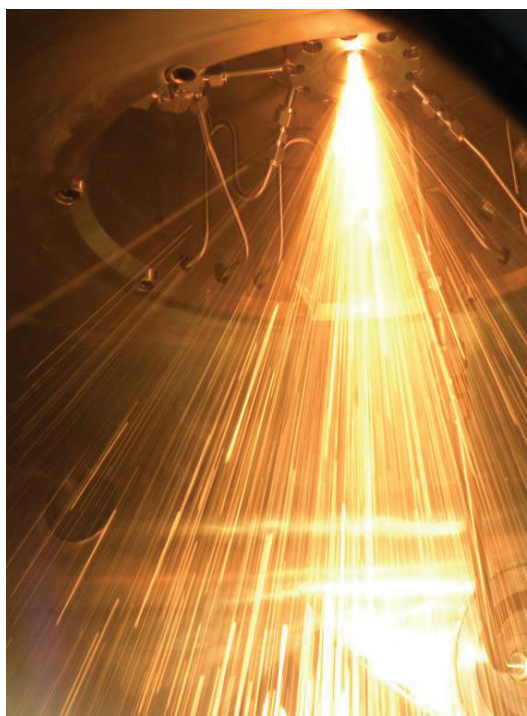
Участок создан на базе самого современного оборудования:

- атомайзер HERMIGA10/100VI — установка для получения мелко-дисперсных порошков;

- система классификации и упаковки порошка в инертной атмосфере с контролем влажности и содержания кислорода в процессе упаковки, позволяющая разделять порошки по фракциям в интервале от 5 до 75 мкм методом газодинамической сепарации с точностью ± 4 мкм и высокой производительностью (до 50 кг/ч);
- вибропрохот Analizzette 3 Spartan (Fritsch, Германия) – для фракционного анализа полученных порошков;
- вакуумная плавильная установка УППФ-3М – для выплавки шихтовой заготовки.



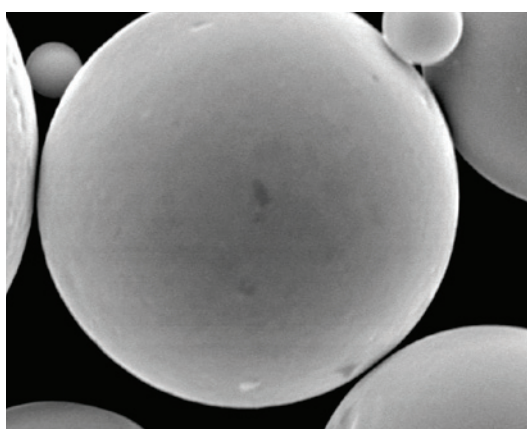
Атомайзер HERMIGA10/100VI



Процесс атомизации



Система классификации и упаковки порошков
в аргоне



Микроструктура ($\times 6000$) гранул порошка
припоя ВПр50

Выпускаемая продукция и услуги:

- припои на никелевой основе марок ВПр24, ВПр27, ВПр32, ВПр36, ВПр37, ВПр42, ВПр44, ВПр50 и др.;
- порошки для селективного лазерного спекания (менее 40 мкм) и лазерной наплавки (40–80 мкм), а также порошки специального назначения на никелевой и железной основе (ЭП648, ВКНА-1В, ВКНА-4У, ЖС6У, коррозионностойкие стали, чугуны и т. п.).

Получение порошков возможно как из шихтовой заготовки производства ФГУП «ВИАМ», так и из материала Заказчика.

Вакуумная плазменная технология высоких энергий (метод ВПТВЭ) для нанесения покрытий и ионной обработки поверхности

ФГУП «ВИАМ» является разработчиком технологии, промышленного оборудования и материалов, которые широко используются в серийном производстве ионно-плазменных защитных и упрочняющих покрытий на лопатки и другие детали авиационных ГТД. В настоящее время во ФГУП «ВИАМ» производятся установки МАП-2 и МАП-3, выпускаются трубные катоды из сплавов на основе Ni, Co, Al и наносятся различные функциональные покрытия на партии деталей Заказчика.

Оборудование для нанесения ионно-плазменных защитных и упрочняющих покрытий

Технические характеристики установок МАП-1М, МАП-2 и МАП-3*

Установочная мощность, кВт	80
Расход воды, м ³ /ч	1,8
Предельное разрежение, Па (мм рт. ст.)	$6,8 \cdot 10^{-3}$ ($5 \cdot 10^{-5}$)
Количество каналов для подачи реактивного газа, шт.	3
Газоразрядный источник ионов аргона:	
– рабочее напряжение, кВ	1–2,5
– ток разряда, мА	70–100
Вакуумный дуговой генератор плазмы:	
– напряжение дуги, В	34±3
– ток дуги, А	200–750
Скорость нанесения при токе дуги 700 А, мкм/ч	20±1
Напряжение смещения, В	10–600 (900);
Ионный ток на покрываемых деталях, А	до 45
Количество вращающихся позиций для установки покрываемых деталей, шт.	24
Максимальный диаметр покрываемых деталей вращения, мм	130
Высота зоны покрытия вдоль оси вращения, мм	до 200
Габарит установки, мм	2000×4600×2750
Масса установки, кг	3700

*Автоматизированная установка МАП-3 дополнительно снабжена имплантором на базе ускорителя газовых ионов «ПИОН» с параметрами: ускоряющее напряжение 10–40 кВ, ток – до 40 мА.

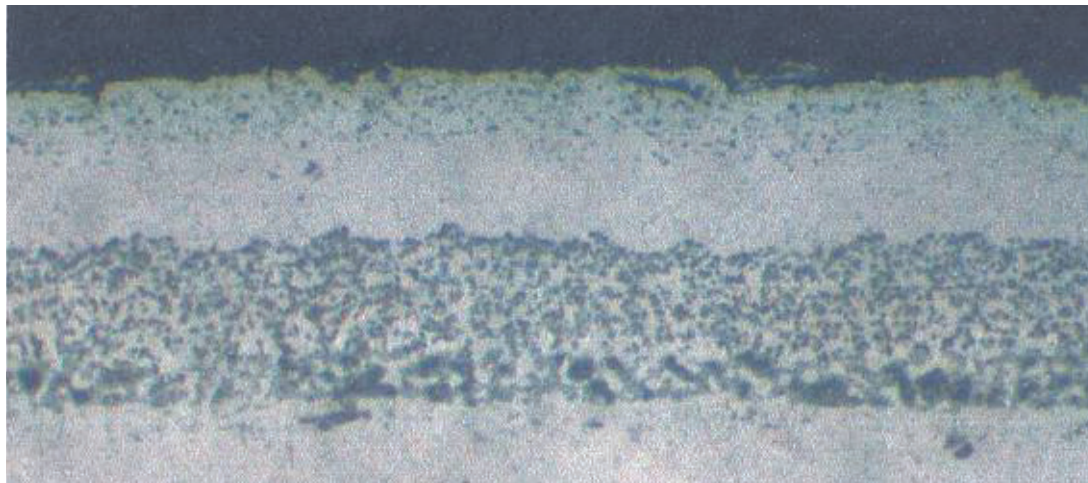


Установка ВИАМ-МЭШ-50 для нанесения ионно-плазменных покрытий на длинномерные лопатки ГТУ и другие детали ГТУ и ГТД

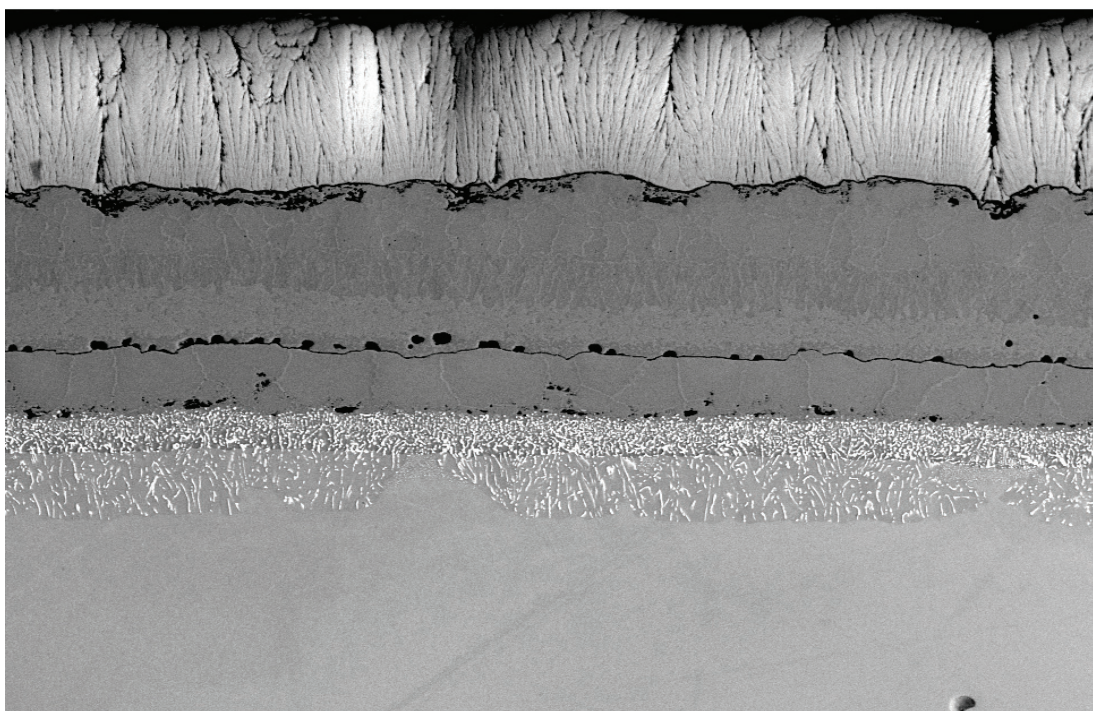


Установка МАП-3 для ассистированного осаждения защитных и упрочняющих покрытий

**Комплексные жаростойкое и теплозащитное покрытия для
защиты жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) от высокотемпе-
ратурной газовой коррозии**



Микроструктура (×500) комплексного газоциркуляционного (хромоалитирование, ГЦП) и конденсационно-диффузионного покрытия из сплавов СДП-2+ВСДП-16 для защиты деталей из ЖНС при температурах до 1150°C

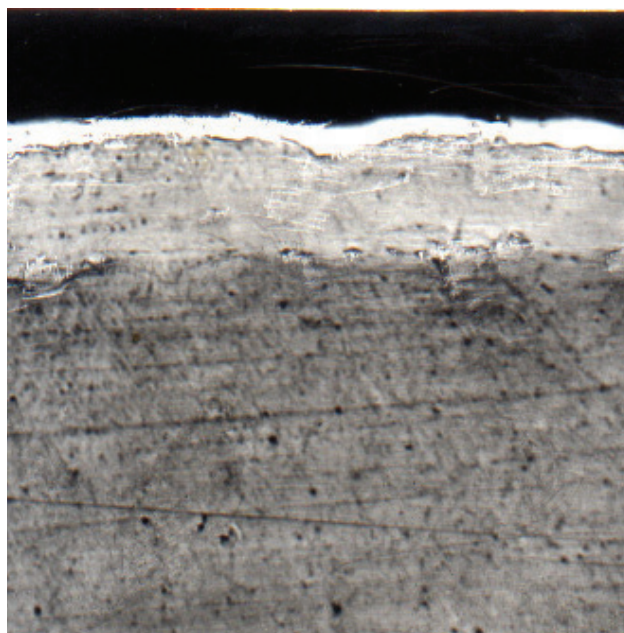


Микроструктура (×300) комплексного теплозащитного покрытия (цементация + ГЦА+ ВСДП-3+ВСДП-16+ $ZrO_2+Y_2O_3$), полученного термодиффузионным насыщением углерода, газовым циркуляционным алитированием, ионно-плазменным и электронно-лучевым напылениями

Типы ионно-плазменных упрочняющих покрытий для защиты лопаток и других деталей из титановых сплавов и сталей



Лопатка компрессора двигателя
РД-33МК с покрытием после
испытаний на коррозию



Микроструктура (Ч500) покрытия
СДП-1+ВСДП-20 для коррозионной защиты
стальных лопаток компрессора ГТД при
температурах до 650°C



Лопатка компрессора двигателя
РД-33МК без покрытия после
испытаний



Ионное модифицирование поверхности
стали (Ч500) в плазме сплава ВСДП-20.
Защита лопаток и деталей компрессора от
солевой коррозии при температурах до 550°C

Ионно-плазменные защитные и упрочняющие покрытия для лопаток и деталей ГТД и ГТУ

Тип покрытия	Назначение	Сплав (конструкция покрытия)	Система покрытия
Легированные алюминидные диффузионные покрытия	Защита от газовой коррозии в области температур 950–1050°C	ВСДП-11(ВП) ВСДП-13(ВП) ВСДП-15(ВП)	Ni–Al–Si–Y Ni–Al–Si–B Ni–Al–Cr–Si–Y
Комплекснолегиро- ванные алюминид- ные диффузионные покрытия	Защита от газовой коррозии в области температур 1000–1100°C. Соединительные слои ТЗП	СДП-1 + ВСДП-11(ВП) СДП- 2 + ВСДП-11(ВП) СДП-2 + ВСДП-16(ВП) ВСДП-8(ВП)+ВСДП-18(ВП) ВСДП-9(ВП)+ВСДП-18(ВП)	Ni–Al–Cr–Co–Si–Y Ni–Al–Cr–Si–Y Ni–Al–Cr–Y Ni–Al–Cr–W–C–Y Ni–Al–Cr–Ta–Y
Конденсированные покрытия	Защита от газовой коррозии в области температур 1050–1100°C	СДП-2 ВСДП-5	Ni–Cr–Al–Y Ni–Cr–Al–B
	Защита от сульфидно-оксидной коррозии в области температур 700–950°C	СДП-1 СДП-6	Ni–Co–Cr–Al–Y Co–Cr–Al–Ni–Y
	Защита от пылевой эрозии ло- паток компрессора Защита от износа при $t \leq 900^\circ\text{C}$	ВЭСС-1 ВЭСТ-1 ВЖЛ-2	Cr ₃ C ₂ ZrN Ni–Cr–Co–W–Mo– –Al–C
	Покрытия – припой для полу- чения паяных соединений тон- костенных конструкций из ЖС	ВПр-24, ВПр-27, ВПр-32, ВПр-36	–
Конденсационно- диффузионные покрытия	Защита ЖС от газовой корро- зии в области температур 1100–1150 (1200)°C. Соединительные слои ТЗП	СДП-2+ВСДП-16(ВП) ВСДП-8(9) + +ВСДП-18(ВП)	(MeC)+(Ni–Cr–Al–Y)+ +(Ni–Al–Cr–Y) (MeC)+(Ni–Cr–Al– (Ta)–W–C–Y)+ +(Ni–Al–Cr–Y)
	Защита ЖС от сульфидно- оксидной коррозии в области температур 700–950°C	СДП-1+ВСДП-22(ВП)	(Ni–Co–Cr–Al–Y)+ +(Ni–Al–Co–Cr–Si–B)
	Защита сталей от солевой кор- розии при температурах $\leq 700^\circ\text{C}$	СДП-1+ВСДП-20(ВП)	(Ni–Co–Cr–Al–Y)+ +(Ni–Al–Co–Cr–Si–Y)
Ионное насыщение поверхности кон- струкционных ста- лей	Защита сталей от солевой кор- розии при температурах $\leq 700^\circ\text{C}$	Алюмо-кобальт-иттрий- силицирование из плазмы катода ВСДП-20	Fe–Co–Al–Si–Y

Комплексные защитные жаростойкие покрытия и соединительные слои ТЗП для лопаток турбин ГТД из безуглеродистых ЖС

Назначение	Конструкция покрытия	Система покрытия
Защита от газовой корро- зии в области температур 1100–1200°C	MeC+СДП-2+ВСДП-16 MeC+ВСДП-8+ВСДП-18 (СДП-2+С ₂ H ₂)+СДП-2+ВСДП-16	(MeC)+(Ni–Al–Cr–Y)+(Ni–Cr–Al–Y) (MeC)+(Ni–Cr–Al–W–C–Y)+(Ni–Al–Cr–W–C–Y) (CrC+NiAlY)+(Ni–Al–Cr–Y)+(Ni–Cr–Al–Y)
Жаростойкие соединитель- ные слои ТЗП	MeC+ВСДП-9+ВСДП-18 С (цементация)+ГЦА (газовая циркуляция)+ВСДП-3+ВСДП-16	(MeC)+(Ni–Al–Cr–Ta–Y)+(Ni–Cr–Al–Ta–Y) (MeC)+NiAl+(Ni–Cr–Al–Re–Hf–Y)+ +(Ni–Al–Cr–Re–Hf–Y)

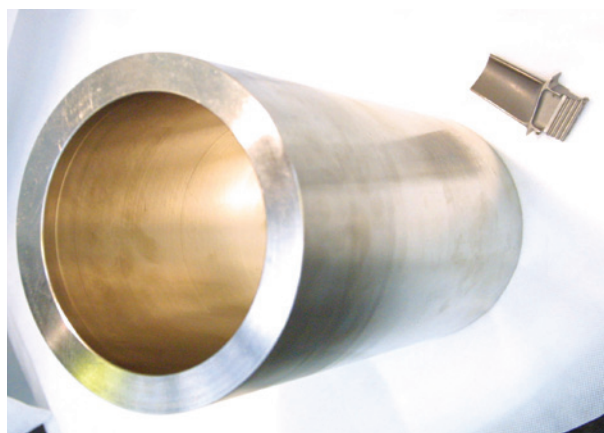
Катоды для ионно-плазменных установок МАП-1М, МАП-2, МАП-3, ВИАМ-МЕШ-50

ФГУП «ВИАМ» производит трубные катоды из материалов для покрытий:

- **Сплавы на основе никеля и кобальта** – СДП-1, СДП-2, ВСДП-5, ВСДП-7, ВСДП-8, ВСДП-9, АЖ8;
- **Сплав на основе кобальта** – СДП-6;
- **Сплавы на основе алюминия** – ВСДП-11, ВСДП-13, ВСДП-15, ВСДП-16.



Катоды из сплавов СДП-2 (слева) и ВСДП-16 (справа)



Катод из сплава ВСДП-5

СТРАТЕГИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

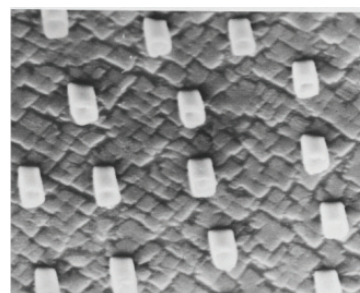
ФГУП «ВИАМ» проводит исследования в соответствии со "Стратегическими направлениями развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года", которые разработаны с учетом приоритетных направлений и критических технологий развития науки, технологий и техники в Российской Федерации; приоритетов государственной политики в промышленной сфере; стратегий развития государственных корпораций, интегрированных структур и систематизированы исходя из анализа тенденций развития материалов в мире по 18 направлениям, 9 из которых направлены на разработку комплекса научно-технологических решений для создания нового поколения жаропрочных литейных и деформируемых сплавов и сталей:

- фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль;
- компьютерные методы моделирования структуры и свойств материалов при их создании и работе в конструкции;
- материалы с эффектом памяти формы;
- интерметаллидные материалы;
- легкие, высокопрочные коррозионностойкие свариваемые сплавы и стали, в том числе с высокой вязкостью разрушения;
- монокристаллические, высокожаропрочные суперсплавы, естественные композиты;
- энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии получения деталей, полуфабрикатов и конструкций;
- магнитные материалы;
- комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие, защитные и теплозащитные покрытия.

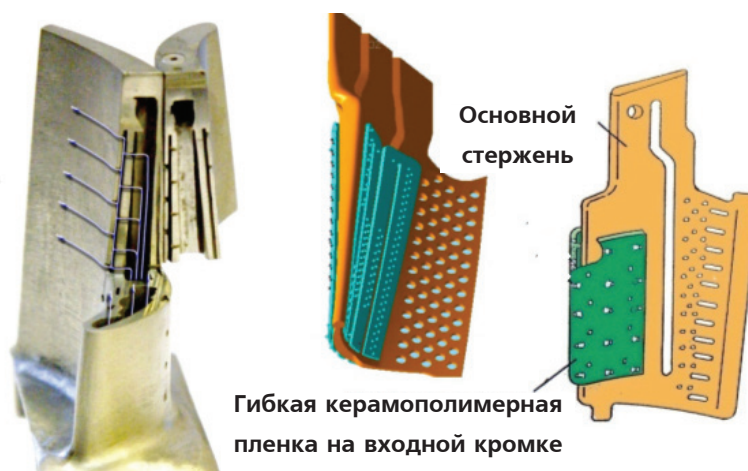
"Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года" одобрены на совещаниях с участием представителей федеральных органов исполнительной власти, государственных корпораций, интегрированных структур, институтов РАН, государственных научных центров и промышленных предприятий, а также на заседании научно-технического совета Военно-промышленной комиссии при Правительстве Российской Федерации (Протокол № ВПК (НТС)-27пр от 02.12.2011 г.). Реализация

основных научно-технологических решений и инновационных идей в соответствии со стратегическими направлениями развития материалов и технологий позволит развернуть исследовательские работы в рамках 25 комплексных проблем, направленных на создание нового поколения жаропрочных сплавов и сталей.

- Разработка новых составов и опытных технологий получения высокопрочных конструкционных дисперсионно-твердеющих и коррозионностойких сталей различных схем легирования и технологий комбинированной химико-термической обработки.
- Создание нового класса жаропрочных никелевых сплавов с дисперсионно-композиционным упрочнением нитевидными волокнами металл-углерод.
- Создание нового класса высокотемпературных композитов Nb/NbSi с плотностью ~7,5 г/см³ и рабочими температурами до 1350°C.
- Создание сплавов на основе упорядоченных интерметаллидов никеля с монокристаллической структурой, кристаллографической ориентацией [001], с плотностью не более 8,3 г/см³ и рабочими температурами до 1300°C, с повышенным сопротивлением термической усталости.
- Создание новых технологий изготовления лопаток ГТД с высокоэффективным охлаждением, включая керамические формы и стержни для лопаток из новых перспективных сплавов.

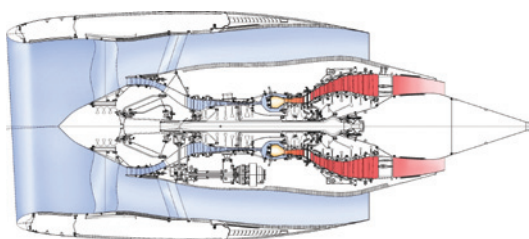


Микроструктура композиционного материала Nb/NbSi

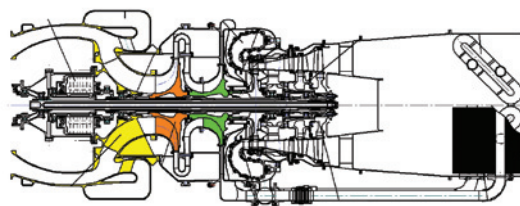


Перспективная конструкция системы охлаждения лопатки

- Разработка композиционных материалов на основе интерметаллидов никеля (на основе Ni_3Al) с плотностью не более $7,5 \text{ г/см}^3$ на рабочие температуры до 1350°C и повышенной в 1,5–2 раза удельной прочностью.
- Создание нового класса композиционных материалов с матрицей из интерметаллида NiAl , упрочненной тугоплавкими оксидами и волокнами, позволяющими увеличить рабочие температуры материала до 1400°C и ресурс деталей – в 2–2,5 раза.
- Создание нового поколения свариваемых упрочняемых наноструктурированными нитридными и интерметаллидными фазами никель-кобальтовых сплавов с длительной работоспособностью до 1250°C и прочностью $\sigma_{\text{в}} \geq 1100 \text{ МПа}$, разработка технологии их производства, в том числе слоисто-проницаемых конструкций.
- Создание высокотемпературных наноструктурированных композиционных металлических материалов нового класса, в том числе на основе высокожаропрочных никелевых дисковых сплавов, упрочненных тугоплавкими волокнами или частицами, и технологий изготовления заготовок дисков из них.
- Создание научных основ, оборудования и технологии конденсационного 3D «синтеза» плазмы компонентов сплавов для получения наноструктурированных деталей сложной формы.
- Разработка технологий производства, термообработки и сварки крупногабаритных полуфабрикатов (пресс-прутков, поковок, раскатных колец, штамповок) из перспективных высокожаропрочных гетерофазных свариваемых сплавов с комбинированным упрочнением, в том числе для применения в сварных роторных конструкциях.
- Создание нового класса высокотемпературных истираемых уплотнительных материалов на основе сплавов и металлов платиновой группы, работоспособных до 1450°C , с истираемостью не ме-



Перспективный двигатель гражданской авиации с тягой 9–18 т



Перспективный двигатель для скоростного вертолета

- нее 10:1, что обеспечит повышение рабочей температуры на 300°C, снижение износа лопаток не менее чем в 3 раза.
- Создание технологий выплавки перспективных литейных супержаропрочных никелевых и интерметаллидных (на основе Ni_3Al) сплавов с использованием направленного нано- и микролегирования и модифицирования, в том числе с использованием до 100% отходов.
 - Разработка технологий выплавки наноструктурированных супержаропрочных естественно-композиционных никелевых рений- и рений-рутенийсодержащих и интерметаллидных на основе системы $\text{Ni}-\text{Al}$ ренийсодержащих сплавов, сплавов системы $\text{Nb}-\text{Si}$.
 - Ввод в эксплуатацию и освоение новой вакуумной индукционной печи VIM 150 полунепрерывного действия емкостью 1 т — для обеспечения моторостроительных заводов сплавами нового поколения.
 - Разработка технологий атомизации для получения мелкодисперсных высококачественных порошков на различной основе (титана, ниобия, никеля, железа и т. д.) для аддитивных технологий и порошков припоев для пайки.
 - Создание технологий получения би- и полиметаллических естественно-армированных металлических материалов методом прямого лазерного синтеза из металлических порошков.
 - Разработка технологии изотермической деформации на воздухе нового поколения гетерофазных труднодеформируемых жаропрочных сплавов.
 - Разработка технологий изготовления биметаллических изделий различного функционального назначения, полученных совместной пластической деформацией разнородных материалов.
 - Разработка ресурсосберегающих технологий сварки в твердой фазе трудносвариваемых конструкционных и функциональных материалов (ротационная и линейная сварка, сварка трением с перемешиванием).
 - Разработка технологии сварки плавлением новых конструкционных материалов (лазерная, электронно-лучевая, дуговая сварка, гибридные методы сварки).
 - Разработка технологии высокотемпературной диффузионной пайки с компьютерным управлением технологическими параметрами — для формирования оптимальной структуры паяных соединений.



Сопловые лопатки с теплозащитным покрытием

- Разработка теплозащитных покрытий с керамическим слоем низкой теплопроводности (≤ 1 Вт/м·К) с рабочей температурой 1150, 1200 и 1350°C, наносимых по новой технологии магнетронного среднечастотного плазмохимического осаждения.
- Разработка технологии получения мишеней из сплавов на основе циркония, легированных редкоземельными металлами, для магнетронного среднечастотного нанесения керамических слоев ТЗП.
- Разработка жаростойких покрытий и соединительных слоев ТЗП для жаропрочных сплавов на основе ниобия с интерметаллидным упрочнением на рабочую температуру 1350°C.
- Разработка антифреттинговых покрытий для замковых соединений вентилятора и рабочих лопаток ТВД.
- Разработка нового ионно-плазменного оборудования роторного типа для покрытий сопловых блоков ТВД и ТНД, «блинков» и «блисков» ГТД.

ВИАМ ПРЕДЛАГАЕТ СОТРУДНИЧЕСТВО:

- разработку сплавов по ТЗ Заказчика;
- разработку технологии производства полуфабрикатов и готовых изделий;
- изготовление уплотнительных истираемых материалов из металлических волокон, их нанесение на детали и испытания применительно к изделиям Заказчика;
- нанесение защитных и упрочняющих покрытий на партии деталей Заказчика;
- проведение совместных работ по разработке защитных технологических покрытий для новых марок сплавов при термической и термомеханической обработке;
- газостатирование деталей и полуфабрикатов из жаропрочных сплавов;
- разработку технической документации (ТР, ПИ, ТУ) на поставку опытных и серийных партий дисков, отливок деталей горячего тракта ГТД, уплотнительных истираемых материалов (заготовок) из металлических волокон;
- предоставление паспортных данных для расчета конструкций;
- продажу лицензий на сплавы и технологии;
- комплекс работ по проектированию, изготовлению, вводу в эксплуатацию установок (типа УВНК и УВНС) для литья лопаток методом высокоградиентной направленной кристаллизации, а также технологическое и сервисное обслуживание.

Осуществляем поставку:

- литых прутковых (шихтовых) заготовок с повышенной чистотой по вредным примесям, газам и неметаллическим включениям и с суженными пределами легирования из сплавов ВЖМ4, ВЖМ5, ЖС32-ВИ, ЖС6У-ВИ, ЖС6К-ВИ, ЖС26-ВИ, ВЖЛ12У-ВИ, ВЖЛ12Э-ВИ, ЖСЗДК-ВИ, ВХ4Л-ВИ, ВКНА-1В, ВКНА-1ВР, ВКНА-25 и др., в том числе из 100% литейных отходов и деталей с двигателей, отработавших ресурс;
- дисков малоразмерных ГТД из сплавов ЭИ698-ВД, ЭП742-ИД, ЭК79, ЭК151, ЭП975, ВЖ175, в том числе опытно-промышленных партий с использованием технологии высокоградиентной направленной кристаллизации;
- заготовок дисков для опытных и серийных ГТД, ГТУ, ВСУ;

- заготовок лопаток, блоков, створок, проставок реактивного сопла ГТД, элементов жаровых труб;
- листового проката из жаропрочных свариваемых серийных и новых сплавов (ВЖ159, ВЖ171, ВЖ172);
- горячекатаных прутков из элинварных сплавов и высокопрочных бериллийсодержащих сталей и сплавов;
- опытных партий заготовок уплотнительных истираемых материалов из металлических волокон;
- трубных катодов из сплавов на основе никеля, кобальта и алюминия;
- высокотемпературных припоев ВПр16, ВПр24, ВПр27, ВПр28, ВПр36, ВПр37, ВПр44, ВПр48, ВПр50 в виде порошков и лент на органическом связующем, а также низкотемпературных припоев ВПр35 и ВПр40 в виде проволоки;
- порошков для селективного лазерного спекания (менее 40 мкм) и лазерной наплавки (40–80 мкм), а также порошков специального назначения на никелевой и железной основе (ЭП648, ВКНА-1В, ВКНА-4У, ЖС6У, коррозионно-стойкие стали, чугуны и т.п.).
- ионно-плазменных установок МАП-1М (полуавтоматическое исполнение), МАП-2 (с компьютерным управлением) и МАП-3 для ассистированного осаждения (с компьютерным управлением).





ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ И СТАЛИ

Под общей редакцией академика РАН Е.Н. Каблова

**Ответственный за выпуск буклета заместитель генерального директора,
к.т.н. О.Г. Оспенникова**

Составители:

д.т.н. Б.С. Ломберг
д.т.н. С.А. Мубояджян
к.т.н. В.А. Калицев
Э.Г. Аргинбаева
А.Б. Ечин
В.Г. Ковальчук
к.т.н. Э.А. Елисеев
М. В. Бубнов
А.П. Кучеровский

Редакционная группа:

Е.А. Аграфенина
М.С. Закржевская
И.С. Туманова
Т.Н. Юдина

Оформление:

А.В. Андросенко
Л.Б. Ковтун
А.К. Кривушин
Э.Х. Намазова
Д.С. Трушин
Е.А. Цилин

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

105005, Москва, ул. Радио, 17
телефон: (499) 263-86-46, факс: (499) 267-86-09,
e-mail: admin@viam.ru