



СТРАТЕГИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО

Е. Н. КАБЛОВ, О. Г. ОСПЕННИКОВА, Б. С. ЛОМБЕРГ

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов».
РФ. 105005, г. Москва, ул. Радио, 17. E-mail: admin@viam.ru

Определены стратегические направления развития материалов и технологий их переработки для основных деталей ГТД нового поколения на период до 2030 г. Изложены современные тенденции развития литейных и деформируемых жаропрочных сплавов, в том числе интерметаллидных на основе никеля и титана. Приведены характеристики усталостного в ФГУП «ВИАМ» нового вакуумного оборудования для выплавки жаропрочных сплавов и деформации высокотемпературных материалов в условиях изотермии на воздухе, а также результаты разработок в области ионно-плазменного нанесения защитных жаростойких, упрочняющих и теплозащитных покрытий на лопатки и другие детали ГТД и создания нового поколения плазмохимического оборудования. Разработана технология получения широкого спектра сверхчистых ультрадисперсных порошков методом атомизации для вакуумной диффузионной пайки и аддитивных технологий. Библиогр. 24, рис. 10.

Ключевые слова: материалы и технологии переработки, детали газотурбинных двигателей, литейные и деформируемые жаропрочные сплавы, интерметаллиды, вакуумное оборудование, лопатки, технологии ионно-плазменного напыления покрытий, получение сверхчистых порошков

Анализ научно-технического развития в области разработки и использования сплавов и сталей со специальными свойствами, сложившиеся мировые тенденции, а также сырьевые и ресурсные возможности показывают актуальность задачи по разработке комплекса технологических решений для создания нового поколения литейных и деформируемых сплавов и сталей со специальными свойствами, включая комплексные системы защиты и теплозащитные покрытия.

Основные принципы создания современных материалов для сложных технических систем должны быть основаны на результатах фундаментальных и фундаментально-ориентированных исследований, полученных ведущими научно-исследовательскими организациями совместно с институтами РАН и базироваться на следующем постулате — неразрывность материалов, технологий и конструкций, включая использование «зеленых» технологий при создании материалов и комплексных систем защиты, а также реализацию полного жизненного цикла (с использованием IT технологий) — от создания материала до его эксплуатации в конструкции, диагностики, ремонте, продлении ресурса и утилизации.

С учетом приоритетных направлений и критических технологий развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, утвержденных Указом Президента Российской Федерации № 899

от 7 июля 2011 г., приоритетов государственной политики в промышленной сфере, стратегий развития государственных корпораций, интегрированных структур анализа тенденций развития материалов в мире ФГУП «ВИАМ» определены следующие стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. [1, 2]:

- «умные» конструкции;
- фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль;
- компьютерные методы моделирования структуры и свойств материалов при их создании и работе в конструкции;
- интеллектуальные, адаптивные материалы и покрытия;
- материалы с эффектом памяти формы;
- слоистые металлополимерные, биметаллические и гибридные материалы;
- 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, полужабириков и конструкций;
- магнитные материалы;

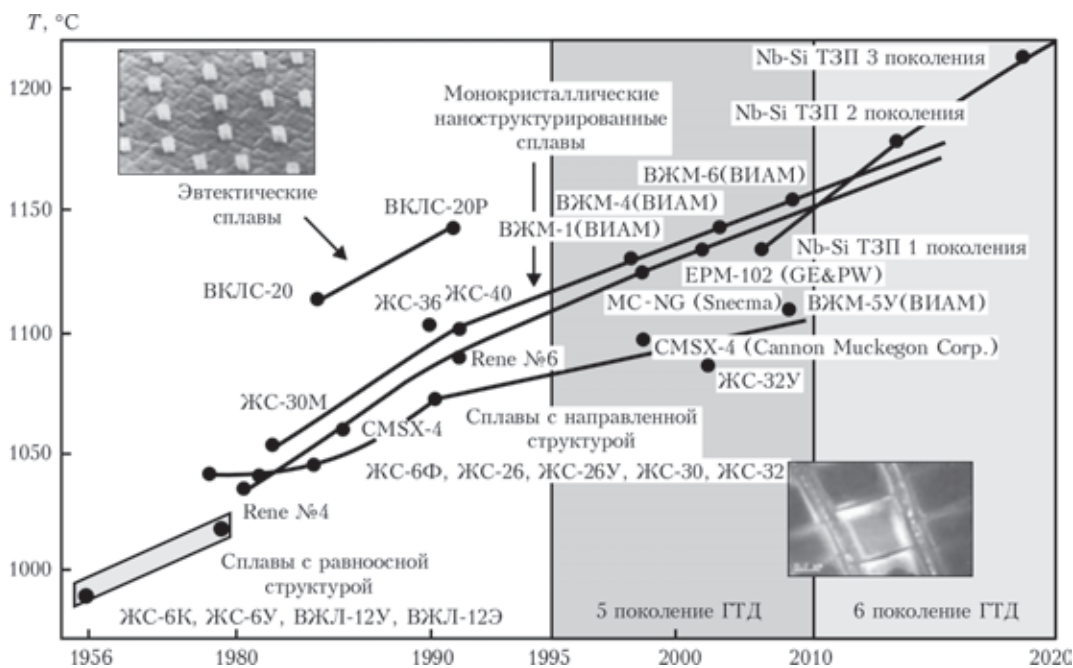


Рис. 1. Динамика развития литейных жаропрочных сплавов

- металломатричные и полиматричные композиционные материалы;
- полимерные композиционные материалы;
- высокотемпературные керамические, теплозащитные и керамоподобные материалы;
- наноструктурированные, аморфные материалы и покрытия;
- сверхлегкие пеноматериалы;
- комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия;
- климатические испытания для обеспечения безопасности и защиты от коррозии, старения и биоповреждений материалов, конструкций и сложных технических систем в природных средах.

Современная тенденция развития литейных жаропрочных никелевых сплавов заключается в использовании дефицитных элементов VII и VIII группы Периодической системы Д. И. Менделеева, таких как рений и рутений (рис. 1).

Для литья монокристаллических лопаток ГТД разработали специальную высокоогнеупорную керамическую оболочковую форму, работоспособную до температуры 1750 °С [3].

Современные никелевые жаропрочные сплавы (ЖС) для литья лопаток ГТД достигли предела рабочих температур 1100...1150 °С, что составляет 80...85 % их температуры плавления. Эволюционное развитие жаропрочных никелевых сплавов привело к созданию сплавов I, II, III, IV и V поколений, температура плавления которых повышалась за счет легирования тугоплавкими элементами вольфрамом, рением и рутением, достигнув 1350...1370 °С. В настоящее время внедряется в

производство для изготовления рабочих монокристаллических лопаток жаропрочный никелевый рений-рутений содержащий сплав IV поколения ВЖМ4 с уровнем длительной прочности 120 МПа при 1150 °С на базе 100 ч. [4, 5].

Одним из многообещающих направлений разработки высокожаропрочных сплавов для лопаток, работающих при температурах выше 1100 °С, является создание естественных композиционных материалов, получаемых методом высокоградиентной направленной кристаллизации сложнолегированных эвтектических сплавов на никелевой основе. Такие разработки были осуществлены созданием эвтектических сплавов с естественно-композиционной структурой γ/γ' -MeC. Для достижения рабочей температуры лопаток с естественно-композиционной структурой, равной 1250 °С, из ЖС на основе никелевых эвтектик необходимо в качестве матрицы использовать никелевые жаропрочные рений-рутений содержащие сплавы. Разработку таких эвтектических сплавов с повышенным содержанием рения и рутения предполагается осуществить к 2025 г. [2, 6].

С целью повышения температур газа перед турбиной и, как следствие, КПД двигателя создан новый класс литейных конструкционных высокотемпературных экономнолегированных материалов на основе интерметаллида Ni_3Al серии ВКНА, предназначенных для изготовления деталей газотурбинных двигателей, эксплуатируемых в диапазоне температур 900...1200 °С.

Интерметаллидные сплавы отличает низкая плотность (на 10...12 % ниже, чем у жаропрочных никелевых), высокая жаростойкость при рабочих температурах. Применение легких сплавов на ос-

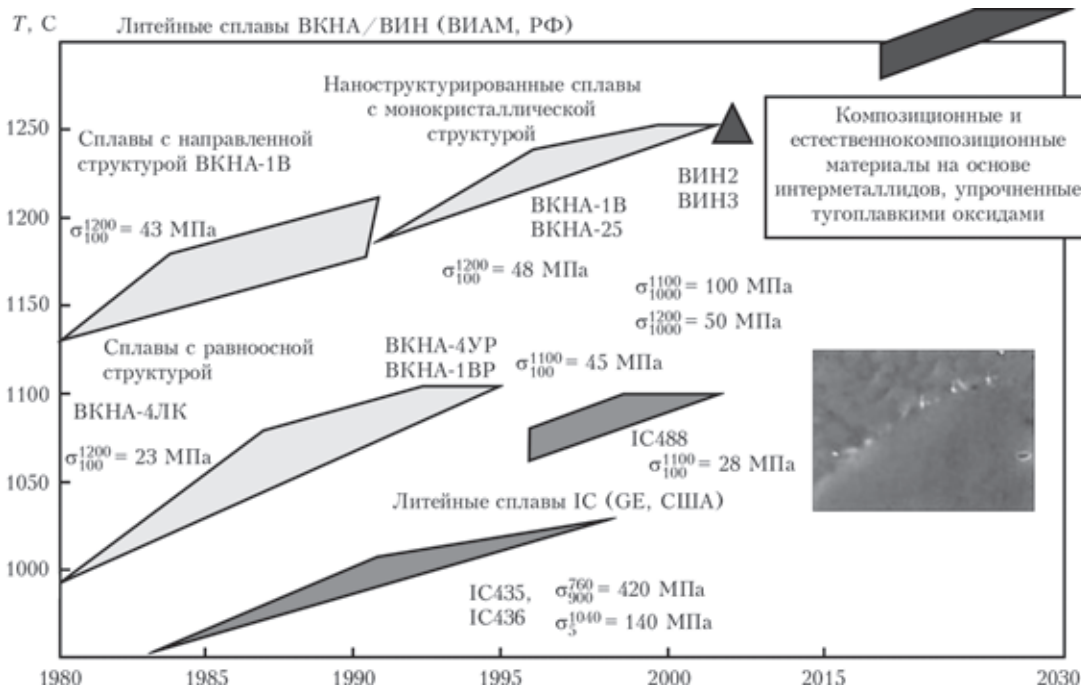


Рис. 2. Развитие литейных сплавов на основе интерметаллидов никеля

нове интерметаллида никеля в качестве рабочих лопаток позволит снизить нагрузку на диски турбины и повысить ресурс ГТД в 2,5...3,0 раза.

В соответствии с комплексом физико-механических свойств интерметаллидные сплавы марки ВКНА рекомендуются для литых сопловых лопаток, деталей жаровых труб, створок и проставок реактивного сопла с монокристаллической структурой, длительно эксплуатируемых при температурах 900...1200 °С. Впервые в мире сплавы на основе интерметаллидов никеля применяются в авиационной технике (рис. 2) [7–9].

Создание новых перспективных ГТД связано с повышением рабочих температур, что требует разработки высокотемпературных сплавов на основе тугоплавких матриц. Для решения этой проблемы необходимо разрабатывать высокотемпературные процессы направленной кристаллизации с использованием расчетных методов управления переменным температурным градиентом, специализированное высокотемпературное оборудование и технологии получения деталей ГТД из сплавов на основе тугоплавких матриц.

Для производства современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов, в том числе наноструктурированных в ФГУП «ВИАМ», создан производственный участок мощностью до 200 т/год. Участок включает современные вакуумные индукционные печи: ВИАМ-2002 с емкостью тигля 20 кг разработки и производства ФГУП «ВИАМ» и печи VIM-50 и VIM-150 производства фирмы «ALD Vacuum Technologies» (ALD) емкостью 350 и 1000 кг. Печи оснащены компьютерными системами управления, позволяют проводить отбор проб для химического анали-

за выплавляемого металла в процессе выплавки и последующую доводку его состава до оптимального, а также проводить фильтрацию расплава во время его слива в стальные трубы через горячий пеннокерамический фильтр. Перечисленные особенности плавильного оборудования обеспечивают поддержание стабильного оптимального химического состава выплавляемых сплавов, низкий уровень вредных примесей и газов, высокую чистоту по неметаллическим включениям, сохранение в оптимальных количествах микролегирующих добавок, что обеспечивает получение из них отливок с наноструктурой.

Контроль механических свойств изготовленных сплавов, содержание основных легирующих элементов, примесей и газов осуществляется на современном компьютеризированном оборудовании и Испытательном центре ФГУП «ВИАМ» (рис. 3).

Используя результаты научно-исследовательских работ, проведенных в ВИАМ совместно с ИМЕТ РАН им. Байкова, разработана и серийно применяется ресурсосберегающая технология рафинирующего переплава всех видов отходов, образующихся в металлургическом и литейном производстве, которая позволяет из 100 % отходов получать сплавы, которые полностью отвечают по чистоте и свойствам требованиям действующих ТУ и не уступающие сплавам, изготовленным из свежих шихтовых материалов.

Данная технология позволяет создать замкнутый цикл возврата дорогих и дефицитных легирующих металлов (рения, рутения, тантала, кобальта, ванадия и др.) в производство. ВИАМ приобрел и в настоящее время монтирует новую

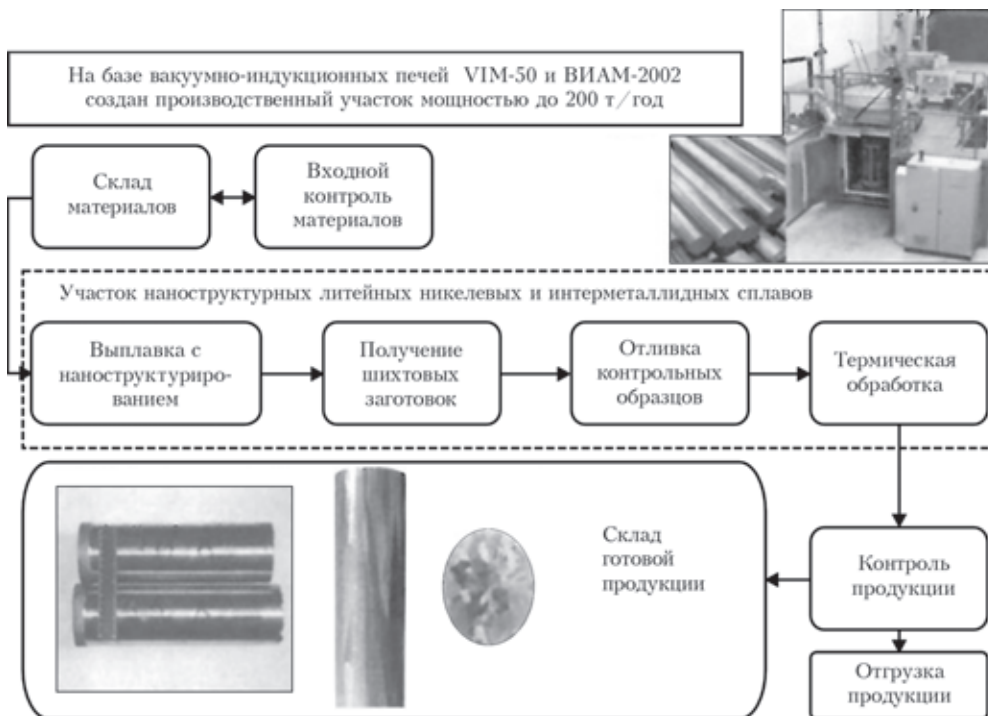


Рис. 3. Производство жаропрочных литейных сплавов

вакуумную индукционную печь VIM-150 фирмы «ALD» (Германия) последнего поколения емкостью тигля 1 т, в конструкцию которой по техническому заданию ВИАМ включены современные устройства и системы регулирования, которые позволяют дополнительно повысить качество выплавленного металла [10–13].

ВИАМ является разработчиком технологии и ведущим в мире предприятием в области ионно-плазменного нанесения защитных жаростойких, упрочняющих и теплозащитных покрытий на лопатки и другие детали ГТД и ГТУ. ВИАМ создал промышленное автоматизированное оборудование (установки типа МАП), в том числе установку МАП-3 для ассистированного газовыми ионами с энергией до 40 кВ (плотность ионного тока до 200 мкА/см²) осаждения, позволяющего за счет бомбардировки поверхности растущего конденсата (покрытия) ускоренными газовыми ионами (Ar, N₂) изменять структурно-фазовое состояние конденсатов (покрытий) и тем самым повышать функциональные свойства получаемых покрытий. ВИАМ поставил на ОАО «Мотор Сич» автоматизированную установку МАП-2 и в настоящее время готовится контракт на поставку установки МАП-3 [14–19].

Технология обеспечивает нанесение всех типов защитных покрытий (на основе металлов и сплавов различного легирования, на основе нитридов, карбидов, оксикарбонитридов, нанослойные покрытия из периодически повторяющихся от двух до четырех слоев различных материалов с общей толщиной свыше 15 мкм и др.), в том чис-

ле высокотемпературных градиентных покрытий конденсационно-диффузионного типов (не имеют аналогов), а также позволяет проводить процессы ионной обработки поверхности в металлической плазме (новейший процесс ионного модифицирования поверхности, например, низкотемпературное (до 600 °С) титанирование или титаноцирконирование подложки из конструкционных сталей) и процессы упрочнения ЖС (рис. 4).

Для двигателя ПД-14 ФГУП «ВИАМ» разработал жаростойкий соединительный слой ТЗП типа цементация+газовое алитирование+ВСДП-3 (Ni–Cr–Al–Hf–Re–Y)+ВСДП-16+Т/О и совместно с ОАО «ПМЗ» отработал технологию нанесения комплексного теплозащитного покрытия с нанесением керамического слоя ТЗП методом EB/PVD на рабочие лопатки ТВД на электронно-лучевой установке EB/PVD фирмы «ALD» (Германия).

ВИАМ начал работы по созданию нового поколения плазмохимического оборудования для осаждения защитных и упрочняющих покрытий из газовых потоков плазмы, содержащих элементы синтезируемого покрытия. Оборудование позволит в едином процессе получать многослойные жаростойкие и ТЗП с барьерными слоями на основе самоорганизующихся нанокомпозитов для лопаток турбин из ЖС на основе тугоплавких элементов (ниобия, молибдена, хрома, тантала), в том числе эвтектических композиционных материалов на основе ниобия (или молибдена, хрома) с интерметаллидным упрочнением на рабочую температуру 1300...1500 °С, а также функциональные упрочняющие моно- и многослойные 2-D и



Рис. 4. Ионно-плазменные защитные и упрочняющие покрытия

3D наноструктурные покрытия с самоорганизующейся упорядоченной структурой на основе твердых соединений металлов и сплавов для деталей ГТД при температурах до 800 °С [14–19].

Особое внимание уделяется развитию технологий получения мелкодисперсных металлических порошков различного назначения. Это порошки припоев и наполнителей для высокотемпературной вакуумной диффузионной пайки, в том числе и композиционной, а также порошки различных сплавов (на никелевой, железной, титановой, алюминиевой

и др. основах) для аддитивных технологий и порошков магнитных материалов на основе РЗМ.

В настоящее время серийного производства таких порошков в стране нет. В ФГУП «ВИАМ» смонтирован и введен в эксплуатацию новейший атомайзер HERMIGA10/100VI, предназначенный для производства мелкодисперсных металлических порошков на основе никеля, железа и алюминия, на базе которого сформирован участок производства порошковых припоев и пилотных партий порошков сплавов для аддитивных технологий. Порошки по-



Рис. 5. Развитие технологий атомизации для получения мелкодисперсных высококачественных металлических порошков



Рис. 6. Перспективные материалы на основе интерметаллидов титана

ставляются на ведущие предприятия отрасли: ОАО «Авиадвигатель», ОАО «ПМЗ», ОАО «Сатурн», ОАО «НПК «Теплообменник» и др. [20].

Дальнейшее развитие этого направления связано с разработкой технологий получения порошков активных сплавов заданного гранулометрического состава с использованием бестигельной плавки расходного электрода.

Переход на получение порошков по данной технологии позволит при серийном производстве получать порошки сплавов отечественных марок на основе титана, никеля, ниобия и др. по стоимости, соизмеримой с зарубежными производителями, при широкой номенклатуре и объеме производства до 30 т/мес. (рис. 5).

В ВИАМ разработаны и широко применяются в авиационной промышленности припои марки ВПр (Впр1, Впр4, Впр7, Впр16, Впр28, Впр24, Впр27, Впр36, Впр42, Впр44, Впр50 и др.), а также технологические процессы пайки этими припоями различных материалов.

В настоящее время технологии пайки, в том числе диффузионной, разработанные в ВИАМ, нашли широкое применение при изготовлении деталей и узлов ГТД.

Интерметаллидные сплавы на основе титана наиболее востребованы в области двигателестроения. Для достижения положительных результатов промышленного производства должны быть успешно решены следующие технологические задачи:

- разработка сплавов на основе γ -фазы интерметаллида TiAl с прецизионной системой легирования и плотностью 3,5...3,9 г/см³ и рабочей температурой до 800 °С;

- создание технологий выплавки интерметаллидного γ -сплава с управлением структурой в слитках;

- разработка технологий механической обработки деталей и лопаток (рис. 6).

Развитие жаропрочных сплавов для дисков ГТД как отечественных, так и их зарубежных аналогов в первую очередь связано с увеличением рабочей температуры и повышением комплекса механических свойств: длительной и кратковременной прочности, а также усталостных характеристик (в первую очередь МЦУ).

Специалистами ФГУП «ВИАМ» разработан новый деформируемый жаропрочный сплав ВЖ175, который характеризуется уникальным сочетанием механических свойств, превосходящий известные отечественные и зарубежные сплавы — по кратковременной и длительной прочности до 15 %, по малоцикловой усталости до 30 %, с максимальной температурой работы до 800 °С. Такие показатели достигнуты благодаря сбалансированному легированию, однородной мелкозернистой структуре (зерно 15...30 мкм) и оригинальному режиму термической обработки, обеспечивающему выделение упрочняющих фаз различной дисперсности, в том числе частиц размером менее 80 нм.

Из сплава ВЖ175 освоено промышленное производство крупногабаритных штамповок дисков (диаметром до 550 мм) на ОАО «МЗ «Электро-сталь» и ОАО «СМК» для ГТД пятого поколения [21].

Дальнейшее повышение эксплуатационных свойств жаропрочных сплавов на никелевой основе за счет увеличения упрочняющих тугоплавких и γ' -образующих элементов крайне проблематич-

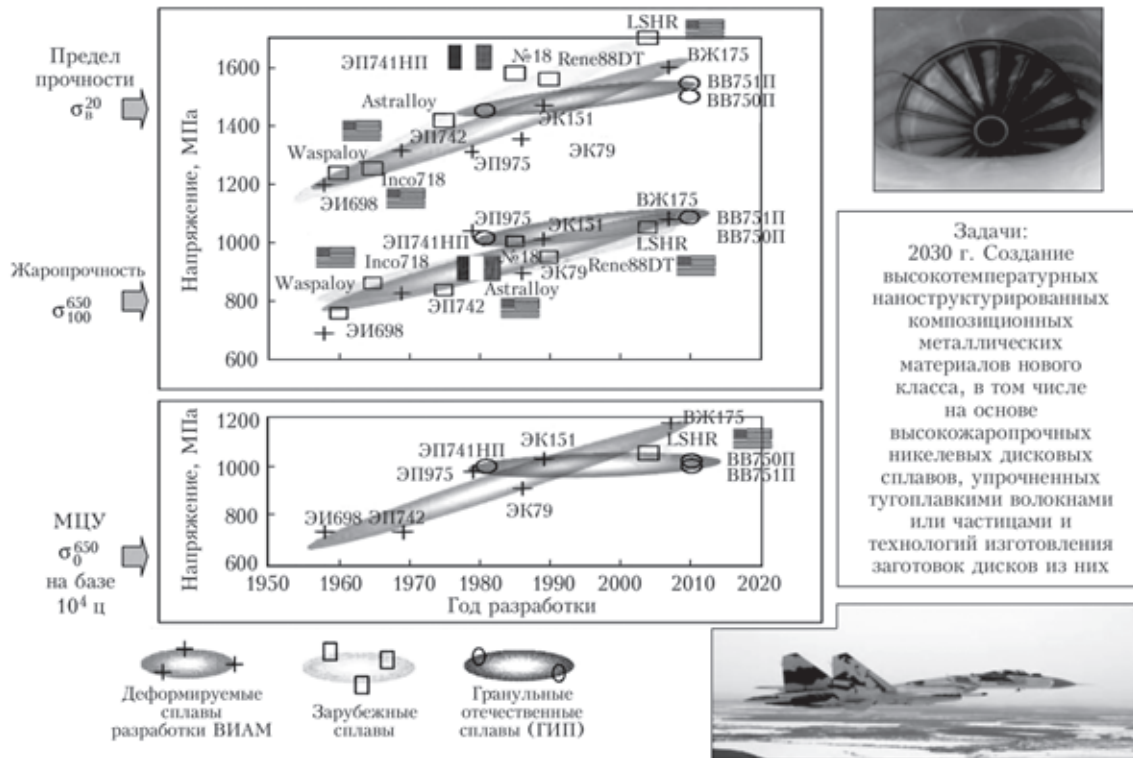


Рис. 7. Развитие жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД

но, так как уже сегодня уровень легирования этих сплавов достиг критического значения. Поэтому основные направления развития материалов для дисков ГТД связаны с разработкой новых наноструктурированных композиционных материалов, в том числе на основе высокожаропрочных никелевых деформируемых сплавов, упрочненных тугоплавкими волокнами или частицами (рис. 7).

Высокопрочный свариваемый сплав ВЖ172, благодаря сбалансированному легированию и оптимальному содержанию упрочняющей фазы, по показателям прочности и жаропрочности превосходит существующие отечественные и зарубежные сплавы аналогичного назначения на 15...70 % при сохранении высоких для данного класса материалов характеристик свариваемости и технологической пластичности.

Сплав ВЖ 172 предназначен для применения в качестве материала для корпусов камеры сгорания и турбины других нагруженных деталей и узлов статора горячего тракта ГТД, работающих при температуре до 900 °С. Кроме того, сплав ВЖ172 может быть применен в качестве материала дисков сварного ротора КВД и вальцованных лопаток КВД с температурой работы до 750 °С.

Определены технологические параметры аргодуговой сварки нового высокожаропрочного листового никелевого сплава ВЖ171, упрочняемого химико-термической обработкой (внутренним азотированием), предназначенного для изготовления сварных деталей и узлов камер сгорания, их наиболее высокотемпературных элементов и других

деталей перспективных ГТД. Нитриды отличаются большей термодинамической стабильностью чем интерметаллиды и карбиды, что позволяет повысить рабочую температуру до 1200...1250 °С. Сварка сплава ВЖ171 с азотированием после сварки с использованием основного материала в виде присадки позволяет получить сварные соединения с высокой сопротивляемостью к образованию горячих трещин ($A_{кр} \geq 4,5$ мм/мин), с прочностью, близкой к прочности основного материала ($\sigma_{св.с} = 0,95...1,0 \sigma_{осн.м}$) [22].

Во ФГУП «ВИАМ» разработана и реализована инновационная технология изотермической штамповки на воздухе с целью получения экономичных высококачественных заготовок дисков из высокожаропрочных никелевых сплавов для малоразмерных ГТД.

Новая энергоэффективная и ресурсосберегающая технология отличается высоким коэффициентом использования материала (его значения в 2...3 раза выше по сравнению со штамповкой в открытых штампах, которая используется на крупных промышленных предприятиях), лучшей проработкой структуры металла, что обеспечивает высокую стабильность механических свойств.

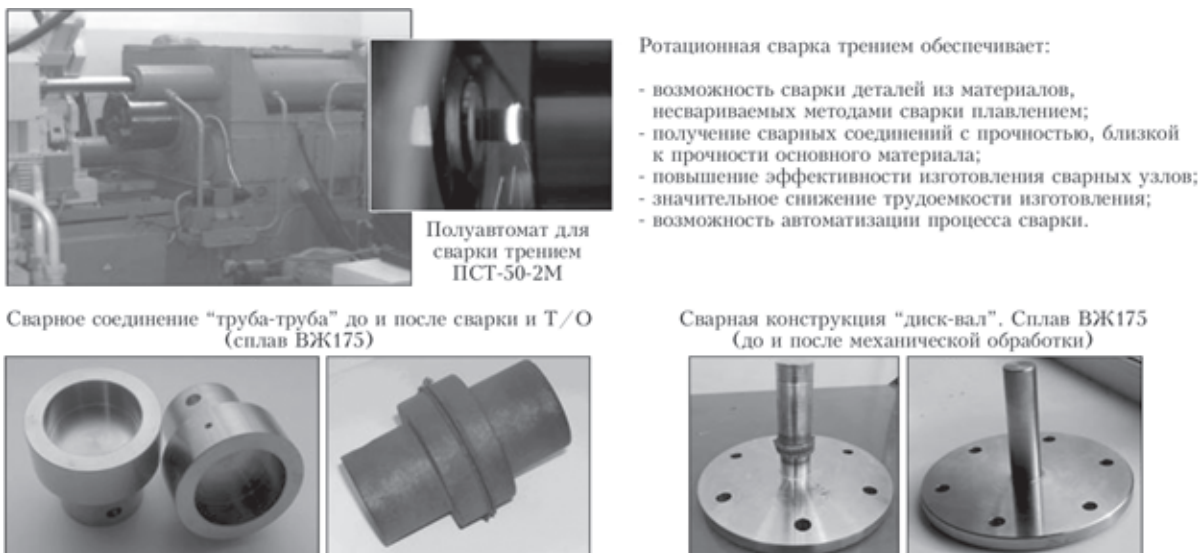
В качестве исходной заготовки для изотермической штамповки может использоваться как серый пресспруток диаметром 80...150 мм, так и мерный слиток, полученный методом высокограддиентной направленной кристаллизации (ВГНК).

По сравнению с зарубежными разработками высокотемпературная изотермическая штамповка



Рис. 8. Изотермическая штамповка жаропрочных дисковых сплавов на воздухе для малоразмерных ГТД

производится на воздухе, а не в конструктивно-сложных малопроизводительных вакуумных установках с дорогостоящими молибденовыми штампами (рис. 8).



Механические свойства сварных соединений жаропрочных деформируемых никелевых сплавов

Свариваемые материалы	Технологический вариант	$\sigma_{в}^{20}$, МПа	$\sigma_{в}^{650}$, МПа	σ_{100}^{750} , МПа	$\sigma_{в}^{750}$, МПа	КСУ ⁻²⁰ , кДж/м ²	$K = \sigma_{св.с} / \sigma_{о.м.}$
ВЖ175+ВЖ175	Закалка+старение+сварка	1232	1295	638	-	295	≥0,8
	Закалка+сварка+старение	1550	1500	940	-	220	0,90-1,0
	Сварка+закалка+старение	1560	1510	850	-	280	0,85-1,0
ЭИ698+ЭИ698	Сварка+закалка+старение	1120	-	-	770	400	≥0,9
ЭП975+ЭП975	Сварка+закалка+старение	1120	-	-	990	360	≥0,9
ВЖ172+ЭК79	Сварка+закалка+старение	1300	-	-	850	380	≥0,8-0,95

Рис. 9. Разработка технологий ротационной сварки трением



Для силовых деталей двигателя (валы, крепеж)
(рабочая температура стали до 450 °С)

Сплав	σ_b	$\sigma_{0,2}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	σ_{100}^{400}	$\sigma_{0,2/100}^{400}$
	МПа (20 °С)		МПа (при 400 °С)			
ВКС-170	1570	1520	1300	1200	1000	800
ВКС-180	1720	1600	1400	1350	1000	825
ЭП517(серийный)	1100	950	850	800	880	490
Maraging 250 (США)	1725	1690	1523	1447	н/д	н/д

Обеспечивают:
снижение массы деталей
двигателя до 30 %

Мелкозернистая структура
стали после упрочняющей
термической обработки
полуфабрикатов

→



x100

Применение: вал ТНД двигателя ПД-14 ОАО «Авиадвигатель»
(сталь ВКС-170ТУ 14-1-4479-88; поковки шифра «6-33» ТУ 1-801-5421-2009)



ОДК

Производство: ОАО «МЗ «Электросталь», ОАО «СМК»

Рис. 10. Механические свойства высокопрочных мартенситносталящих сталей

На базе ФГУП «ВИАМ» будет создан центр трансфера технологий изотермической деформации на воздухе нового поколения гетерофазных труднодеформируемых ЖС [23, 24]. Разработаны технологии ротационной сварки трением жаропрочных деформируемых никелевых сплавов в одноименном и разноименных сочетаниях применительно к изготовлению изделий типа «диск-вал», «блиск», «блинг», обеспечивающие получение сварных соединений с прочностью 0,8..0,9 прочности менее прочного сплава ($K = \sigma_{св.с} / \sigma_{осн.м}$). Выбраны основные параметры процесса сварки трением сплавов. Исследована зависимость режимов сварки трением и механических свойств сварных соединений от термической обработки свариваемых заготовок. Проведена сварка трением имитатора диска из сплава ВЖ175 диаметром до 300 мм и вала диаметром 35 мм (рис. 9).

В ФГУП «ВИАМ» разработаны высокопрочные конструкционные мартенситносталящие особо низкоуглеродистые стали системы легирования 18Ni-8Co-5Mo-Ti-ВКС-170 ($\sigma_b \geq 1570$ МПа) и ВКС-180 ($\sigma_b \geq 1720$ МПа), рекомендованные для работы до 400..450 °С.

В таблице (рис. 10) представлены механические свойства сталей ВКС-180 и ВКС-170 в сравнении с серийно применяемой сталью ЭП517 и зарубежным аналогом Maraging 250. Из данных, приведенных в таблице, видно, что конструкционные мартенситносталящие стали ВКС180 и ВКС-170 превосходят по прочностным характеристикам до +400 °С сталь ЭП517, не уступают по соответствующим характеристикам зарубежному аналогу. Также эти стали превосходят применяемые по долговечности, выносливости, длительной прочности и ползучести.

Высокопрочные конструкционные мартенситносталящие стали ВКС-180 и ВКС-170 будут

использоваться для валов ГТД с целью снижения массы вала примерно до 30 % по сравнению с применяемыми мартенситными сталями (рис. 10).

За период 2010–2012 гг. разработан состав теплостойкой стали ВКС241 для подшипников ГТД, редукторов вертолетов, технология выплавки, горячей пластической деформации и упрочняющей термической обработки, обеспечивающие твердость при 20 °С не менее HRC 60, теплостойкость 500 °С, технологичность и структурную однородность.

По уровню свойств (ударная вязкость, твердость) сталь ВКС241-ВИ находится на уровне аналога — М50 (США) и превосходит примерно в 2 раза по ударной вязкости применяемую сталь ЭИ347.

Новая теплостойкая подшипниковая сталь ВКС241 по стоимости легирующих элементов дешевле ЭИ 347 в 1,5 раза.

В заключение следует отметить, что применение разработанных в ФГУП «ВИАМ» новых материалов позволит решить серьезные научно-технические задачи, а именно: создать ГТД с отношением тяги к весу 20:1, повысить рабочую температуру газа до 2000 К, увеличить ресурс и срок службы ГТД в 1,5...1,7 раза, обеспечивая, тем самым, опережающее развитие отрасли авиационного двигателестроения.

1. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. // Авиаци. материалы и технологии. — 2012. — № 5. — С. 7–17.
2. Осенникова О. Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // Там же. — С. 19–35.
3. Роль направленной кристаллизации в ресурсосберегающей технологии производства деталей ГТД / Е. Н. Каблов, В. В. Герасимов, Е. М. Висик, И. М. Демонис // Тр. ВИАМ. — 2013. — № 3. (электрон. журн.).
4. Никелевые жаропрочные сплавы нового поколения / Е. Н. Каблов, Н. В. Петрушин, И. Л. Светлов, И. М. Демо-



- нис // *Авиац. материалы и технологии.* — 2012. — № 5. — С. 36–52.
5. *Каблов Е. Н., Петрушин Н. В., Елютин Е. С.* Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей // *Вест. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спец. вып. «Перспективные конструкционные материалы и технологии».* — 2011. — С. 38–52.
6. *Светлов И. Л.* Высокотемпературные Nb–Si композиты – замена монокристаллическим никелевым жаропрочным сплавам // *Двигатель.* — 2010. — № 5 (71). — С. 36–37.
7. *Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Базылева О. А.* Литейные конструкционные сплавы на основе алюминиды никеля // *Там же.* — 2010. — № 4. — С. 22–26.
8. *Базылева О. А., Аргинбаева Э. Г., Туренко Е. Ю.* Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы // *Авиац. материалы и технологии.* — 2012. — № 5. — С. 57–60.
9. *Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Базылева О. А.* Материалы для высокотеплонагруженных газотурбинных двигателей // *Вест. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение.* — 2011. — С. 13–19.
10. *Каблов Е. Н., Сидоров В. В.* Микрولةгирование РЗМ – современная технология повышения свойств литейных жаропрочных никелевых сплавов // *Перспективные материалы.* — 2001. — № 1. — С. 23–34.
11. *Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Вершков А. В.* Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // *Тр. ВИАМ.* — 2013. — № 2. (электрон. журн.).
12. *Современные технологии получения прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов нового поколения / Е. Н. Каблов, В. В. Сидоров, В. Е. Ригин, А. В. Горюнов // Авиац. материалы и технологии.* — 2012. — № 5. — С. 97–105.
13. *Производство литых прутковых (шихтовых заготовок) из современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов / Е. Н. Каблов, О. Г. Оспенникова, В. В. Сидоров, В. Е. Ригин // Тр. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР».* — Т. 1. — Екатеринбург: УРОРАН, 2011. — С. 31–38.
14. *Никелевые жаропрочные сплавы нового поколения / Е. Н. Каблов, Н. В. Петрушин, И. Л. Светлов, И. М. Демонис* // *Авиац. материалы и технологии.* — 2012. — № 5. — С. 36–52.
15. *Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский, А. Н. Луценко // Металлы.* — 2007. — № 5. — С. 23–34.
16. *Защитные и упрочняющие покрытия лопаток и деталей ГТД / Е. Н. Каблов, С. А. Мубояджян, С. А. Будиновский и др. // 75 лет. Авиац. материалы. Избранные тр. «ВИАМ» 1932–2007 гг.: Юбилейный науч.-техн. сб.* — М.: ВИАМ, 2007. — С. 107–124.
17. *Каблов Е. Н., Будиновский С. А., Мубояджян С. А.* Промышленное ионно-плазменное оборудование для нанесения защитных покрытий // *Тр. 6-й Междунар. конф. «Пленки и покрытия».* — С.-Пб: Изд-во СПбГТУ, 2001. — С. 247–254.
18. *Каблов Е. Н., Мубояджян С. А., Луценко А. Н.* Наноструктурные ионно-плазменные защитные и упрочняющие покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // *Вопр. материаловедения.* — 2008. — № 2(54). — С. 175–187.
19. *Мубояджян С. А.* Защитные покрытия для деталей горячего тракта ГТД // *Все материалы. Энциклопедический справочник.* — 2011. — № 3. — С. 26–30; №4. — С. 13–20.
20. *Евгенов А. Г., Неруш С. В.* Технология получения порошков и полуфабрикатов припоев для диффузионной вакуумной пайки, полученных методом атомизации расплава // *Тезисы докл. VI Всерос. науч.-техн. конф. молодых специалистов: Материалы конф.* — Уфа: УМПО, 2011. — С. 162.
21. *Ломберг Б. С., Овсепян С. В., Бакрадзе М. М.* Новый жаропрочный никелевый сплав для дисков газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) // *Материаловедение.* — 2010. — № 7. — С. 24–28.
22. *Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей / Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. // Авиац. материалы и технологии.* — 2012. — № 5. — С. 52–57.
23. *Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Ломберг Б. С.* Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов // *Там же.* — С. 129–140.
24. *Оспенникова О. Г., Бубнов М. В., Капитаненко Д. В.* Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением // *Там же.* — С. 141–147.

Поступила в редакцию 18.04.2013