

---

---

## Глава 1

# **ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ И СТАЛИ, МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ И ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫЕ СУПЕРСПЛАВЫ**

---

---

*О.Г. ОСПЕННИКОВА*

### **СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ И СТАЛЕЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ЗАЩИТНЫХ И ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ**

Резкое падение в России объемов потребления специальных сплавов и сталей, сокращение заказов на продукцию с высокой добавленной стоимостью привело к тому, что было законсервировано производство и утрачены уникальные технологии изготовления широкой номенклатуры полуфабрикатов из жаропрочных и прецизионных сплавов, специальных приборных сталей. Отсутствие на предприятиях спецметаллургии современного автоматизированного и компьютеризированного промышленного оборудования не позволяет реализовать прогрессивные научные и технологические разработки, что приводит к низкому выходу годного при производстве не только новых, но и серийных хорошо освоенных материалов. Это определяет высокую стоимость полуфабрикатов, которая не выдерживает конкуренции со стоимостью аналогичных зарубежных материалов и часто делает убыточным производство конечной продукции.

Правительственной комиссией по высоким технологиям и инновациям утвержден перечень технологических платформ (протокол № 2 от 01.04.2011 г.), представленный Министерством экономического развития Российской Федерации, в который включена технологическая платформа «Материалы и технологии металлургии». Целью создания технологической платформы является концентрация финансовых и административных ресурсов, направленных на создание современной отрасли по производству нового поколения металлургической продукции на основе разработки и внедрения в серийное производство энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий изготовления и переработки конструкционных и функциональных материалов.

Важным аспектом решения сложившихся в отрасли проблем является техническая модернизация производств с целью индустриализации на новом техническом уровне, которая включает создание совместных производств, основанных на передовых технологиях, в интересах как внутреннего, так и внешнего рынков, приобретение современного автоматизированного оборудования для реализации прогрессивных российских технологий, техническое перевооружение и оснащение металлургических предприятий компьютеризированным оборудованием для реали-

зации современных технологических процессов на базе цифровых IT технологий и нейронного управления.

Техническая модернизация металлургических производств должна основываться на применении «зеленых» технологий и охватывать полный жизненный цикл изготовления и переработки материалов – от исходного сырья до конечного полуфабриката, включая рециклинг отходов изделий из сплавов и сталей, что позволит обеспечить переход металлургии на новый качественный уровень (к новому технологическому укладу).

Согласно экспертной оценке, более 80% приоритетных разработок объектов новой техники в ведущих областях экономики в 2012–2016 гг. будет определяться созданием новых материалов и высоких технологий.

Новейшие технологии в области материаловедения должны стать основой для формирования мощного научно-технологического комплекса, создания центров глобальной компетенции, включая высокотехнологичные производства, обеспечивающие достижение и поддержание лидерства России в научных исследованиях и технологиях по приоритетным направлениям. Это определяет необходимость концентрации усилий материаловедческих центров на решение не отраслевых, а комплексных межотраслевых задач в рамках федеральных целевых программ, обеспечивающих технологическую безопасность России.

Анализ зарубежных источников, а также общие тенденции развития материаловедения показывают, что в настоящее время интенсивно ведутся разработки и исследования в области литейных и деформируемых сплавов и сталей со специальными свойствами, сырья, исходных компонентов для их производства и технологий их переработки в высокотехнологичную наукоемкую продукцию с большой долей инновационной составляющей. Такие разработки в области жаропрочных сплавов и сталей проводят фирмы США, Японии, ЕС, Китая, Индии, ЮВА, Южной Америки, ориентирующиеся на переход от исследовательских работ к их коммерческому использованию.

Проведенный 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 поставленной 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.

Актуальной также является задача развития ряда смежных отраслей производства исходных компонентов, лигатур и вспомогательных материалов, а также создание новых подходов к моделированию технологических процессов и проектированию изделий с применением материалов нового поколения.

Согласно «Стратегии развития металлургической промышленности на период до 2020 года», утвержденной Минпромторгом России (приказ № 150 от 18 марта 2009 г.), акценты инновационной политики должны постепенно переходить от задач закрепления предприятий на мировом рынке металлопродукции (основной приоритет 1990–2006 гг.) к задачам мобилизации потенциала развития (приоритет до 2015 г.) и в дальнейшем – к обеспечению условий для повышения технического уровня отечественной металлургической промышленности (приоритет 2010–2025 гг.).

При этом процесс ресурсосбережения в металлургии будет постепенно распространяться на металлообрабатывающие отрасли. Экономия тонны металла при потреблении приблизительно на порядок эффективнее экономии при производстве.

В период до 2020–2025 гг. процесс изменения технологического уклада в металлургии будет в существенной мере определяться общим изменением экономического уклада в России. Если первоначально металлургия формировалась как отрасль, базирующаяся на использовании природных ресурсов, то в современном обществе технологический облик металлургии отражают экологические, социальные особенности развития экономики постиндустриального типа. Это обеспечивается высокой долей вторичных ресурсов в сырьевом балансе металлургии, темпами снижения металлоемкости отдельных видов продукции, ростом доли материалов со специальными свойствами в балансе металлопотребления.

Долгосрочное инновационное развитие предполагает придание металлургическому комплексу принципиально нового технологического облика (соответствующего новому уровню общественных потребностей). В его основе будет интеграция процессов производства конструкционных материалов (многокомпонентные продукты) и процессов формообразования и обработки металлопродукции, их доминирования в металлургии в рамках единой технологической схемы. Возможны и более радикальные изменения в технологиях вовлечения (химические и биохимические процессы), обогащения природных ресурсов (плазмотехнологии), получение продуктов со свойствами, недостижимыми доминирующими современными технологиями (смарт-материалы, биметаллы, материалы в метастабильном состоянии, продукты, полученные на основе поверхностной инженерии).

За рубежом разработка материалов и технологий проводится в соответствии с утвержденными комплексными программами, целями и задачами которых является создание двигателей-демонстраторов с повышенными эксплуатационными характеристиками. Например, программа Versatile Affordable Advanced Turbine Engine (VAATE) – до 2017 г. должна обеспечить снижение на 25% удельного расхода топлива, повышение на 60% отношения тяги к массе и снижение на 60% стоимости двигателя, обеспечение коэффициента доступности 10 путем применения революционных концепций двигателей новой архитектуры, эксплуатирующихся без технического обслуживания с допустимым уровнем повреждений деталей [1].

Программа NASA Ultra Efficient Engine Technology (UEET) должна обеспечить снижение уровня эмиссии на 70–80%, увеличение нагрузки турбины на 50% и снижение массы на 20% путем разработки и применения в конструкции двигателей перспективных дисковых сплавов, в том числе биметаллических с рабочими температурами более 820°C, перспективных жаропрочных сплавов, интерметаллидов и естественных композитов типа Nb–Si с теплозащитными покрытиями (коэффициент теплопроводности в 2–3 раза ниже существующих), интерметаллидов  $\gamma$ -Ti для лопаток турбины, композитов на основе керамической матрицы для сопловых лопаток и камеры сгорания, а также легких жаропрочных сплавов и сплавов с эффектом памяти формы [2].

В настоящее время одним из самых широко применяемых двигателей гражданской авиации является CFM56, которые ежегодно устанавли-

ваются на 625-ти самолетах А-320 и Boeing-737. В 2012 г. завершается цикл испытаний нового двигателя Leap-X (Leading Edge Aviation Program) в варианте демонстратора, он будет готов к сертификации и серийному производству в 2016 г. Запланировано улучшение его топливной эффективности на 16%, снижение уровня эмиссии  $\text{NO}_x$  на 50–60% по сравнению с показателями современных ТРДД и обеспечение уровня шума на 10–15 дБ ниже действующих норм ИКАО. По компоновке двигатель Leap-X – двухконтурный турбореактивный двигатель с усовершенствованной конструкцией основных узлов:

- новая конструкция вентилятора с лопатками из композиционных материалов с волокнами пространственного переплетения;

- лопатки ТВД из монокристаллических сплавов с теплозащитным покрытием (для двигателя 1-го этапа), далее рассматриваются композиционные материалы на основе керамической матрицы или композиты Nb-Si;

- лопатки ТНД из  $\gamma$ -интерметаллида титана.

Комплексное применение новых материалов, технологий и конструктивных решений позволит существенно уменьшить (на ~80 кг) массу двигателя Leap-X за счет сокращения числа лопаток турбины первой ступени и увеличения степени повышения давления до значения 16:1 (у современных двигателей семейства CFMI – около 11:1) [3].

Развитие современных авиационных ГТД и энергетических ГТУ привело к необходимости создания специальных жаропрочных никелевых сплавов для литья монокристаллических лопаток газовой турбины, работающих в экстремальных условиях (высокие температуры порядка  $0,8T_{пл}$ , большие механические напряжения, длительная эксплуатация до 10 000 ч, агрессивные среды). Обычный способ создания таких материалов путем оптимизации традиционного легирующего комплекса, включающего вольфрам, молибден, хром, кобальт, гафний, титан, ниобий и др., в настоящее время себя полностью исчерпал. Поэтому современная тенденция развития литейных жаропрочных никелевых сплавов заключается в использовании дефицитных элементов VII и VIII групп Периодической системы Д.И. Менделеева, таких как рений и рутений.

Совместное легирование рением и рутением оказывает синергическое влияние на характеристики монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов. В итоге значительно повышается их высокотемпературная длительная прочность и температурная работоспособность. Применение в двигателях разработанных жаропрочных рений- и рутенийсодержащих никелевых сплавов (ВЖМ4, ВЖМ6) с уровнем 1000-часовой длительной прочности 120–130 МПа при температуре 1100°C обеспечит повышение на 50–60°C рабочей температуры монокристаллических лопаток из этих сплавов [4].

Наиболее интенсивно разработки по созданию высокожаропрочных никелевых сплавов IV и V поколений, легированных рением и рутением и предназначенных для отливки монокристаллических лопаток, ведутся в США (фирмы GE Company, GE Aircraft Engines, Pratt&Whitney, NASA), в Японии (NIMS-National Institute for Materials Science), во Франции (ONERA) и в России (ВИАМ).

Для создания газотурбинных двигателей 5-го поколения, включая перспективный двигатель 2-го этапа для ПАК ФА, и промышленных высокоэффективных (КПД – более 60%) энергетических установок (мощ-

ностью 250 МВт и более), а также увеличения объема выпуска серийных двигателей РД-33, АЛ-31Ф, ПС-90А2, 117с и др., необходимо обеспечить новыми высокожаропрочными ренийсодержащими сплавами. Ежегодная потребность в рении к 2017 г. возрастет до 10 т.

Ежегодное потребление рения в мире в настоящее время оценивается в 50–60 т, из которых компания «Cannon Muskegon» (поставщик «Rolls-Royce») потребляет ~14 т, «General Electric»: 14 т, P&W: 5–6 т; на катализаторы для переработки нефти приходится 5–7 т, оставшееся количество используется для изготовления термопар, порошковых сплавов и др. [5].

Россия практически не имеет разрабатываемых природных источников ренийсодержащего сырья. Одним из самых перспективных источников рения являются парогазовые выбросы и вулканические породы, содержащие рений, на склоне вулкана Кудрявый на острове Итуруп (Южные Курилы), где он конденсируется в виде паров сульфида рения. В настоящее время разработан метод улавливания рения с использованием процесса сублимации на природных цеолитах, что позволяет существенно (в 2,5–3 раза) сократить технологический процесс получения металлического рения и снизить его стоимость.

Одним из самых перспективных направлений разработки высокожаропрочных сплавов для лопаток, работающих при температурах выше 1100°C, является создание естественных композиционных материалов, получаемых методом направленной кристаллизации сложнолегированных эвтектических сплавов на никелевой основе.

В ВИАМ созданы сплавы (эвтектические композиты) семейства ВКЛС со структурой  $\gamma/\gamma'$ -MeC. Основой эвтектических композитов служат простые эвтектики Ni–NbC или Ni–TaC. Для получения высоких механических свойств их легируют в соответствии с положениями теории жаропрочности литейных никелевых сплавов и направленно кристаллизуют в условиях плоского фронта роста (при высоком температурном градиенте  $G > 150^\circ\text{C}/\text{см}$  и малой скорости кристаллизации  $R < 10$  мм/ч), обеспечивающего формирование композиционной микроструктуры. После направленной кристаллизации столбчатая структура зерен эвтектического композита состоит из матричного жаропрочного никелевого сплава  $\gamma/\gamma'$ , в котором расположены нитевидные монокристаллы (волокна) карбида NbC (или TaC) сложного химического состава [6]. Эвтектические композиты обладают рекордной жаропрочностью благодаря комбинированному упрочнению: композиционному – нитевидными кристаллами монокарбида ниобия NbC с теоретической прочностью и дисперсионному –  $\gamma$ -матрицы частицами  $\gamma'$ -фазы на основе интерметаллида  $\text{Ni}_3\text{Al}$ .

Однако направленная кристаллизация таких эвтектик с микроскопически плоским фронтом роста, который обеспечивает образование ориентированных нитевидных кристаллов вдоль оси изделия, требует чрезвычайно низких скоростей роста (0,3 мм/мин) – приблизительно в 10–20 раз меньших, чем при кристаллизации монокристаллических никелевых жаропрочных сплавов.

Результаты анализа никелевых эвтектических композитов показывают, что замену монокристаллам из никелевых жаропрочных сплавов с дисперсионным упрочнением следует искать среди эвтектических сплавов на основе тугоплавких металлов с композиционным упрочнением интерметаллидами. В качестве матрицы таких композитов могут служить

тугоплавкие переходные элементы периодической системы элементов – Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo, W, а в качестве интерметаллидных упрочнителей – силициды этих элементов. Силициды переходных элементов  $Me_5Si_3$  (5:3) имеют высокие температуры плавления в интервале 2500–2800 К и низкую плотность. Среди бинарных систем «тугоплавкий металл–кремний» только три системы обнаруживают стабильность между силицидом (5:3) и металлом –  $Nb_5Si_3$ ,  $Re_5Si_3$  и  $W_5Si_3$ . С точки зрения сочетания высокой температуры плавления и низкой плотности силицид ниобия  $Nb_5Si_3$  является оптимальным в сравнении с остальными силицидами. Наиболее перспективными во всем мире считаются эвтектики на основе двойных диаграмм Nb–Si и Mo–Si.

В США и Европе в последние годы активно ведутся разработки новых жаропрочных композиционных материалов (КМ) системы ниобий–кремний и молибден–кремний–бор. Наибольшие успехи в данном направлении достигнуты в компании «General Electric» [7].

Для развития двигателестроения предусмотренная «Стратегическими направлениями развития материалов и технологий до 2030 года» разработка материалов данного класса и технологий изготовления из них лопаток являются ключевыми. Применение новых жаропрочных естественно-композиционных (эвтектических) материалов позволит повысить рабочую температуру лопаток до 1800 К без дополнительного охлаждения и обеспечить снижение массы двигателя на 80–120 кг.

Существенное повышение свойств и эксплуатационных характеристик современных высокожаропрочных сплавов нового поколения достигается за счет наноструктурного состояния материала. На основании термодинамических расчетов и экспериментальных исследований в ВИАМ разработаны и реализованы уникальные эффективные способы рафинирования металла от примесей в вакууме, которые позволяют обеспечить получение химического состава в узких пределах легирования, практически в 3 раза уже, чем при серийных условиях выплавки, а также получение ультрачистого металла [8]. Это необходимое условие обеспечения высоких и стабильных свойств сплавов нового поколения. Современное автоматизированное оборудование, которым оснащен сертифицированный производственный участок и исследовательские лаборатории ВИАМ, позволяет обеспечить проведение химического анализа с высокой точностью (до 1 ppm и выше), а также экспресс-анализа металла в процессе плавки, для последующей корректировки химического состава до оптимального. Применение фильтрации расплава при разливке позволяет улавливать мельчайшие неметаллические и шлаковые включения и тем самым является дополнительной гарантией получения ультрачистого металла.

Для повышения эффективности процессов фильтрации нового поколения сплавов в рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий» будут разработаны составы и технологии изготовления пенокерамических фильтров с поверхностью, модифицированной бинарными оксидными соединениями, и комбинированных фильтров для рафинирования жаропрочных никелевых, интерметаллидных, естественно-композиционных сплавов.

Разработанные в ВИАМ уникальные серийные технологии выплавки обеспечивают получение в монокристаллических сплавах нового поколения: содержание  $O_2$ ,  $N_2$ , S <0,001% каждого, C <0,005%. В сравнении

с металлом серийных заводов (ОАО СМК, ОАО ЧМК и др.) содержание примесей понижено: по кислороду и азоту – в 2–2,5 раза, по сере – в 2–3 раза, что обеспечивает повышение механических свойств сплавов, увеличение ресурса их работы и выхода годного по монокристаллической структуре отливок.

С учетом очень высокой стоимости жаропрочных никелевых сплавов, успешно решена задача комплексной переработки всех отходов, образующихся при производстве сплавов в металлургическом и литейном производстве. Разработана серийная ресурсосберегающая технология переплава отходов в вакууме, которая позволяет из 100% литейных отходов получать шихтовые заготовки, которые по химическому составу, чистоте и свойствам полностью соответствуют требованиям действующих ТУ на поставку. При этом их стоимость снижена для сплавов, содержащих рений (ЖС32), – на 40–50%, для сплавов без рения (ЖС6У) – на 20–30% [9].

Наряду с рафинированием металла в процессе выплавки и получения отливок существует очень эффективный способ повышения свойств литейных жаропрочных сплавов – микролегирование редкоземельными металлами (РЗМ): церием, иттрием, лантаном, скандием. На основании проведенных систематических исследований и полученных экспериментальных данных в ВИАМ создана современная технология микролегирования литейных жаропрочных никелевых сплавов РЗМ при получении отливок с равноосной, направленной и монокристаллической структурами. Данная технология предусматривает выбор наиболее эффективных микродобавок РЗМ и их оптимального содержания, а также способа их введения в металл [10].

Необходимо отметить двойную роль микролегирующих добавок РЗМ в литейных жаропрочных сплавах. С одной стороны, РЗМ являются эффективными рафинирующими добавками, поскольку их высокая химическая активность позволяет нейтрализовать вредное влияние примесей кислорода и серы, образуя с ними тугоплавкие химические соединения. С другой стороны, они как поверхностно-активные элементы располагаются на поверхностях раздела фаз (границы зерен, границы блоков, межфазные границы  $\gamma/\gamma'$ -фаз и др.), упрочняют эти поверхности и задерживают развитие на них диффузионных процессов. РЗМ оказывают положительное влияние на структурную стабильность сплавов, уменьшают их ликвационную неоднородность, предотвращают образование вредных структурных составляющих (ТПУ фазы,  $\mu$ -фазы и др.).

В рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий до 2030 года» для повышения качества жаропрочных суперсплавов предполагается разработка ресурсосберегающих технологий выплавки перспективных литейных и деформируемых супержаропрочных сплавов, которая предусматривает создание способов направленного на- и микролегирования, в том числе РЗМ, с применением рафинирующих шлаковых смесей нового поколения при контролируемом окислительном потенциале расплава, в том числе с использованием до 100% отходов, обеспечивающих снижение в 2–3 раза содержания вредных примесей. Применение современных металлургических технологий нового поколения является ключевым аспектом для создания андронидных материалов, обладающих эффектом памяти формы (ЭПФ).

В рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий до 2030 года» предусмотрено создание новых принципов преци-

зионного легирования никелида титана Nb, Zr и другими элементами, включая РЗМ, исключаящих «паразитные» фазы (типа  $Ti_2N$ ), не обладающих ЭПФ, обеспечивающих максимальную степень «возврата» материала при обратном мартенситном превращении, а также максимальную биосовместимость с живым организмом (для применения в медицине). Разработка нового поколения технологий выплавки сплавов с ЭПФ, в том числе при контролируемом азотном и кислородном потенциалах, позволит обеспечить стабильность химического состава по основным легирующим элементам в пределах  $\pm 0,1\%$  атомн. (вместо  $\pm 0,5\%$  атомн.), снижение содержания примесей ( $N_2$ ,  $O_2$  и др.) в 1,5–2 раза, С – в 5–6 раз.

В настоящее время с развитием научно-технического прогресса наблюдается устойчивый рост потребления и производства РЗМ. К 2010 году в мире произошло перераспределение соотношения применения РЗМ по областям: возросла доля применения РЗМ для производства магнитов (в среднем в 5 раз); в 2 раза снизилось потребление в РЗМ-люминофорах; выросло в 2 раза потребление РЗМ для полировки стекла и керамики [11].

Магниты на основе РЗМ находят широкое применение в различных областях промышленности, в том числе используются в конструкциях систем наведения нового поколения ракетной и специальной техники, центрифуг для обогащения ядерного топлива. Общий объем магнитного производства составляет более 100 тонн в год. Нарастает потребление РЗМ для изготовления магнитов в автомобильной промышленности: в каждом современном автомобиле магниты Nd-Fe-B используются в 80 точках (стеклоочистители, опрыскиватели и т.д.), т.е. речь идет суммарно о тысячах тонн РЗМ.

Одной из ключевых задач в «Стратегических направлениях развития материалов и технологий до 2030 года» является разработка нового класса суперстабильных наноструктурированных магнитотвердых материалов на основе РЗМ, превосходящих существующие по стабильности и технологичности, для навигационных приборов нового поколения и технологий изготовления магнитов с применением сверхбыстрой закалки расплава, обеспечивающей возможность управления фазовым составом и микроструктурой на наноуровне. Для реализации данного мероприятия очень важным является создание методик компьютерного расчета в приближении молекулярного поля сложнолегированных наноструктурированных материалов на основе интерметаллидов с тетрагональной структурой. Применение магнитных материалов нового поколения обеспечит повышение точности навигационных систем на 30–50%, снижение трудоемкости изготовления узлов приборов в 1,5–2 раза и стоимости приборов на 30–40% за счет замены дорогих и трудоемких в изготовлении магнитов системы Sm-Co.

Россия обладает конкурентоспособными месторождениями РЗМ. Уникальные Томторские руды в Якутии, а также Катугинское месторождение в Восточной Сибири обладают богатым спектром РЗМ, эвдиалитовые руды Кольского полуострова – богатейший источник иттриевых РЗМ. Почти три четверти ресурсов РЗМ сконцентрировано в Мурманской области, еще ~16% – в Якутии, некоторое количество в Коми, Красноярском крае, Тыве.

С учетом того, что Россия обладает уникальными и богатыми источниками почти всех редких и редкоземельных металлов, возрождение российской промышленности РЗМ является одной из важнейших задач



отечественной экономики, без решения которой невозможно дальнейшее развитие страны. Ускоренное освоение крупных отечественных месторождений на Кольском полуострове, в Карелии, на Урале, в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке должно стать прорывным в горнодобывающей, рудоперерабатывающей и химической промышленности в условиях инновационной экономики.

Перспективная потребность России в редких и редкоземельных металлах может быть удовлетворена благодаря вводу новых и реконструкции работающих предприятий на базе разведанных запасов различных месторождений. Для возрождения на новом техническом уровне отечественного металлургического производства специального назначения основополагающим является решение на государственном уровне вопроса полномасштабного освоения сырьевых источников (в первую очередь, наиболее рентабельных) и создания заново мощностей для разделения руд. Только при этом условии Россия может обеспечить свои внутренние потребности и составить конкуренцию на мировом рынке признанным зарубежным лидерам.

Усиление роли государства в финансировании работ по возрождению производства редких и редкоземельных металлов является необходимым условием реализации разработанных «Стратегических направлений развития материалов и технологий до 2030 года» в части специальной металлургии, без чего невозможна модернизация отечественной экономики в рамках нового приоритета «Материалы и глубокая переработка сырья».

Развитие авиационного двигателестроения наряду с необходимостью постоянного повышения эксплуатационных свойств жаропрочных сплавов для рабочих лопаток газотурбинных двигателей требует новых технологий.

Для обеспечения высокой степени совершенства структуры высокожаропрочных монокристаллических сплавов нового поколения, снижения дендритной ликвации, пористости в ВИАМ разработана уникальная технология высокоградиентной направленной кристаллизации с применением специальной конструкции затравочного узла. Впервые при литье лопаток достигнут рекордно высокий температурный градиент на фронте кристаллизации, равный 200–220°С/см (вместо 20–40°С/см), позволивший получить в отливках совершенную тонкодендритную структуру монокристалла. Отличительной особенностью структуры монокристаллических лопаток, полученных по высокоградиентной технологии, являются минимальные значения междендритного расстояния, равные 100–150 мкм (вместо 350–450 мкм), и микропористости 0,03% (вместо 0,5%).

Для реализации высокоградиентной технологии литья монокристаллических лопаток разработаны состав и технология изготовления высокоогнеупорной керамической оболочковой формы, которая дает возможность получать качественные отливки при воздействии высоких термических напряжений, т.е. при очень высокой прочности форма обладает достаточной «податливостью» и не препятствует формированию монокристалла. Только уникальная совокупность этих характеристик при температурах свыше 1700°С позволит отливать монокристаллические лопатки для перспективных двигателей нового поколения, включая двигатель 2-го этапа ПАК ФА.

Развитие данного направления согласно «Стратегическим направлениям развития материалов и технологий до 2030 года» будет ориентировано на разработку технологий литья лопаток и деталей ГТД методом направленной кристаллизации с управляемым (переменным) градиентом монокристаллических заготовок лопаток из новых сплавов, включая материалы на основе тугоплавких матриц и интерметаллидов с направленной, монокристаллической и естественно-композиционной структурами. Для создания технологий необходимо внедрение расчетно-математических методов компьютерного моделирования процессов кристаллизации отливок, включая направленную кристаллизацию, и управления технологическими процессами, в том числе направленной кристаллизации отливок деталей переменного сечения, из новых сплавов.

Для реализации разработанных технологий необходимо также создание высокотемпературных (1850–2500°C) автоматизированных плавно-заливочных комплексов с переменным контролируемым градиентом, холодным тиглем и жидкометаллическим охладителем, с нейронными адаптивными системами управления процессом направленной кристаллизации отливок и формирования структуры высокотемпературных жаропрочных сплавов на основе тугоплавких матриц.

В настоящее время самой распространенной системой охлаждения лопаток авиационных ГТД является конвективно-пленочная, оптимизация которой позволит поднять температуру газа не более чем до 1800–1850 К. Применение высокоэффективного транспирационного или проникающего охлаждения лопаток позволит увеличить температуру газа перед турбиной до 2100–2200 К и создать практически «стехиометрический» газотурбинный двигатель.

Основная идея транспирационного способа охлаждения состоит в создании дополнительного охлаждения непосредственно в стенках лопатки, при этом эффективность охлаждения через стенку тем выше, чем ближе к «горячей», внешней поверхности пера лопатки расположены элементы транспирационного охлаждения. Общим признаком для всех конструкций лопаток с транспирационным охлаждением является наличие двойной стенки на спинке и корыте, разделенной либо сплошной полостью, либо дискретными радиальными каналами. Внутренняя, «холодная» стенка является несущей и имеет калиброванные отверстия для прохода охлаждающего воздуха из питающей полости в радиальные каналы; на внешнюю, «горячую» поверхность воздух из радиальных каналов выбрасывается через выходные отверстия.

Практическая реализация рассмотренных конструкций лопаток в первую очередь зависит от развития технологии изготовления керамических стержней, которые в процессе литья формируют как внутреннюю основную полость, так и элементы транспирационного охлаждения, а именно радиальные каналы в стенке лопатки, а также входные и выходные отверстия. В ВИАМ разработана уникальная технология изготовления составных керамических стержней в двух вариантах: с использованием мини-стержней и керамополимерных пленок [12].

Для развития и полномасштабного внедрения технологии с учетом применения нового поколения жаропрочных сплавов, включая естественно-композиционные, в рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий» предполагается разработка составов и технологий получения высокоогнеупорных керамических стержней

и форм с наноструктурным зернограничным упрочнением на основе оксидов РЗМ с рабочими температурами 1800–2000 °С. Разработка составов и технологий получения сложных керамических стержней с сегрегацией ультрадисперсных оксидов РЗМ по границам макрозерен, в том числе селективным лазерным спеканием, позволит получать сложнопрофильные отливки лопаток с высокоэффективным охлаждением с монокристаллической, естественно-композиционной и равноосной структурами.

Для создания перспективных высокоэффективных газотурбинных установок с парогазовым циклом предполагается разработка технологий получения крупногабаритных керамических стержней и форм с использованием золь-гель процессов и гетерофазного механизма упрочнения керамики для отливки деталей длиной до 800 мм и более методом направленной кристаллизации, в том числе с управляемым градиентом.

Среди дисковых сплавов можно выделить материалы, успешно применяющиеся более 35 лет. Широко используются отечественные сплавы ЭИ698-ВД, ЭП742-ИД, ЭК79-ИД и зарубежные марки – Waspaloy, Astraloy, Inconel 718. Современное поколение дисковых сплавов обладает более высоким комплексом свойств, отличается сложными системами легирования, требует применения особых технологических приемов для изготовления полуфабрикатов. Среди них наиболее известными являются сплавы ЭК151-ИД, ЭК152-ИД, ЭП975-ИД, ЭП741НП, Rene 88DT, N18. Предлагаемые фирмой «General Electric Company» (США) жаропрочные никелевые сплавы по химическому составу близки к сплаву ЭК151, но отличаются тем, что содержат до 4% Та и/или до 2,5% Re, что позволяет обеспечить более высокую рабочую температуру (815–820 °С). Основными тенденциями развития химического состава и термической обработки жаропрочных никелевых дисковых сплавов в настоящее время являются: комплексное легирование со сбалансированным содержанием компонентов и ограничением температуры полного растворения  $\gamma'$ -фазы, в том числе танталом, ниобием и (или) рением; снижение содержания вредных примесей; микролегирование; формирование  $\gamma'$ -фазы требуемого размера путем термической обработки с закалкой как выше, так и ниже температуры полного растворения упрочняющей  $\gamma'$ -фазы; применение регламентированного и ускоренного охлаждения.

В ВИАМ разработан дисковый высокожаропрочный деформируемый сплав нового поколения на никелевой основе – ВЖ175, относящийся к классу дисперсионно-твердеющих сплавов. Он предназначен для изготовления дисков и других высоконагруженных деталей ГТД и ГТУ, работающих при температурах до 750 °С с кратковременными забросами до 800 °С. Сплав легирован кобальтом, хромом, вольфрамом, молибденом, ниобием, алюминием, титаном и микродобавками бора, лантана, скандия и церия. Он упрочняется интерметаллидными нано- и микрочастицами  $\gamma'$ -фазы сложного состава и мелкодисперсной карбидной фазой типа (Nb, Ti)C и боридной типа (Mo, Cr, W, Co)<sub>3</sub>B<sub>2</sub> [13]. Для повышения стабильности механических свойств и уменьшения разнотерности штамповок дисков разработан новый режим термической обработки с регламентированными скоростями нагрева и охлаждения, позволяющий формировать в сплаве регламентированную микроструктуру и равномерные выделения нано- и микрочастиц упрочняющей  $\gamma'$ -фазы.

По комплексу эксплуатационных характеристик новый дисковый высокожаропрочный сплав ВЖ175 превосходит известные отечественные и зарубежные аналоги.

В рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий до 2030 года» предусмотрено создание нового класса деформируемых с высокой степенью фазовой стабильности высокотехнологичных жаропрочных дисковых сплавов на интерметаллидной основе с рабочей температурой до 1000°C с низкой плотностью ( $< 8 \text{ г/см}^3$ ) и технологий производства из них дисков и других деталей ГТД, а также 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.

Прорывным проектом в области жаропрочных сплавов будет создание научных основ, технологий и автоматизированного оборудования для конденсационного 3D-«синтеза» из атомов компонентов, составляющих материал, деталей сложной формы из наноструктурированных полиметаллических жаропрочных сплавов. Развитие данного направления позволит существенно расширить возможности изготовления изделий сложной формы с регулируемым переменным химическим составом.

В России и за рубежом для производства заготовок дисков ГТД из жаропрочных никелевых сплавов применяются два типа промышленных технологий:

- с использованием слитка вакуумно-индукционной выплавки с последующим вакуумно-дуговым переплавом и дальнейшей деформацией заготовки;

- с применением гранульной металлургии и последующим горячим изостатическим прессованием, экструзией или штамповкой.

Для решения важнейшей народнохозяйственной задачи – обеспечения производства малоразмерных газотурбинных двигателей экономичными, высококачественными заготовками дисков из высокожаропрочных никелевых и высокопрочных титановых сплавов с эффективными технико-экономическими показателями – в ВИАМ разработан комплекс принципиально новых технологий, реализованных на созданном специализированном уникальном оборудовании для выплавки и обработки давлением, не имеющих аналогов в отечественной и зарубежной промышленности.

В ВИАМ с применением методов компьютерного моделирования разработаны принципиально новые способы термомеханической обработки труднодеформируемых гетерофазных сплавов, обеспечивающие формирование регламентированных структур с повышенной технологической пластичностью и проявлением сверхпластичности при оптимальных температурно-скоростных параметрах деформации. В качестве основного механизма для достижения пластичности металла и однородности его структуры используется процесс контролируемой динамической рекристаллизации [14].

Для практической реализации разработанных технологий в ВИАМ создано опытно-промышленное производство по изготовлению штамповок дисков ГТД и энергетических установок. Проведена модернизация технологического оборудования, позволяющая осуществлять в автоматическом режиме процессы нагрева и формоизменения заготовки по раз-

работанной компьютерной программе с точным исполнением оптимальных термомеханических параметров деформации. Изготовление штампов осуществляется на изотермических прессах усилием 630 и 1600 тс с индукционным нагревом штампов.

Для изотермической штамповки при температурах до 1200°C на воздухе разработана композиция высококачественного жаропрочного штампового сплава, а также защитно-технологические покрытия, являющиеся одновременно эффективными технологическими смазками при штамповке. Разработанные технологии и комплекс созданного оборудования для их осуществления не имеют аналогов в отечественной и зарубежной промышленности, а технология высокотемпературной изотермической штамповки на воздухе превосходит мировой уровень.

«Стратегические направления развития материалов и технологий до 2030 года» предусматривают развитие данного направления в части разработки ресурсосберегающих технологий изотермической деформации на воздухе (повышение КИМ в 3–5 раз) нового поколения титановых, интерметаллидных, ниобиевых и никелевых суперсплавов, включая интерметаллиды и естественные композиты. Для реализации данного мероприятия будут разработаны полифункциональные защитные технологические и смазочные покрытия для термической и термомеханической обработки новых высокопрочных сталей, тугоплавких ниобиево-молибденовых и интерметаллидных сплавов, а также проведен комплекс работ по созданию оснастки для обработки давлением и испытаний, на основе керамических и металлокерамических материалов с использованием нанопорошков и нановолокон с рабочей температурой до 1400°C и удельными усилиями до 1350 МПа.

До настоящего времени в России полностью отсутствовало серийное производство сферических порошков на никелевой, железной и титановой основах. Получение высококачественных припоев и наполнителей, в особенности на титановой основе, для высокотемпературной вакуумной пайки также практически полностью остановлено, а получение порошков альтернативными методами, такими как гидридно-кальциевое восстановление для получения припоев на титановой основе, не обеспечивает надлежащего качества.

Вместе с тем потребность в высококачественных порошках, в особенности на никелевой и титановой основах, с каждым годом увеличивается. Это связано с широким внедрением на ведущих моторостроительных предприятиях современного оборудования, позволяющего производить прототипы и небольшие серийные партии деталей методом селективного лазерного спекания, и технологии, направленной на ремонт ответственных деталей ГТД (лазерная LMD-наплавка). Для этого оборудования критическим является обеспечение сферичности и высокой однородности гранулометрического состава получаемого порошка, что может быть обеспечено только при производстве порошков методом атомизации (распыления струи металла потоком инертного газа).

В настоящее время в ВИАМ создано специализированное производство для получения порошковых никелевых и титановых припоев способом газоструйного распыления расплава, оснащенное опытно-промышленной установкой типа VIGA – газовый атомизатор HERMIGA 10/100 VI производства фирмы PSI (Великобритания). Компьютерная система управления процессом распыления позволяет проводить плавку в автоматическом

режиме, контроль за температурой металла, давлением газа, содержанием кислорода в выходящем газе осуществляется непрерывно в процессе всего технологического цикла, а возможность варьирования технологических параметров позволяет получать порошки заданного гранулометрического состава с допуском  $\pm 40$  мкм.

Разработана и внедрена в серийное производство ВИАМ ресурсосберегающая технология производства ультрадисперсных порошков для селективного лазерного спекания, лазерной LMD-наплавки, а также припоев и сплавов-наполнителей для высокотемпературной вакуумной пайки с высокой однородностью гранулометрического состава порошков (свыше 80% выход годного для фракции 40–100 мкм и 50% – для ультрадисперсных порошков 15–20 мкм) [15].

«Стратегические направления развития материалов и технологий до 2030 года» предусматривают разработку технологий получения сверхчистых по примесям и керамическим включениям ультрадисперсных порошков на основе нового поколения титановых, интерметаллидных, ниобиевых и никелевых сплавов методом атомизации расплава на установке HERMIGA 10/100 IV, в том числе «экстра»-порошков для лазерной LMD-наплавки (гранулометрический состав 40–80 мкм), керамоподобных титановых сплавов, работоспособных до температуры 700°C, а также создание центра компетенции (трансфера технологий) по порошковым материалам и аддитивным технологиям.

Разработка технологий атомизации для новых материалов в совокупности с технологией селективного лазерного спекания будет способствовать значительному ускорению поиска оптимального химического состава интерметаллидных ниобиевых, никелевых и титановых сплавов и оценки их свойств не только на образцах, но и на прототипах деталей ГТД по сравнению с традиционной технологией литья по выплавляемым моделям, где каждый этап, начиная от выплавки шихтовой заготовки и до получения отливки (из-за высокой активности и высоких температур плавки металла), связан с серьезными проблемами.

Развитие аддитивных технологий будет направлено на создание технологий формирования готовых деталей из двух и более металлических порошков (порошка-матрицы и порошка-армирующего элемента) прямым лазерным синтезом с обеспечением расположения армирующих элементов в заданном (не только прямолинейном) направлении (разрабатываемом на основе 3D-моделирования), технологий лазерного синтеза с последующей высокотемпературной газостатической обработкой для гомогенизации переходных зон и повышения структурного совершенства с одновременным формированием на стадии лазерного синтеза защитного покрытия для предотвращения поверхностного обеднения (внешней и внутренней поверхностей пера и замка лопатки).

Среди основных технологий, определяющих повышение ресурса и надежности деталей ГТД, особое место занимает ионно-плазменная технология высоких энергий, обеспечивающая формирование на поверхности жаростойких, коррозионно- и эрозионностойких, износостойких и других функциональных слоев и покрытий. Для монокристаллических рабочих лопаток турбины высокого давления из безуглеродистых жаропрочных сплавов в ВИАМ разработаны специальные покрытия для защиты как внешней поверхности, так и внутренней полости лопаток. Покрытия имеют противодиффузионные барьерные слои, препятст-

вующие диффузии алюминия и хрома в поверхность жаропрочного сплава [15, 16].

Для реализации технологий разработано ионно-плазменное оборудование (установки МАП-1М, МАП-2) с использованием процесса вакуумно-дугового испарения катодными пятнами вакуумной дуги [17]. Испаряемый материал (катод) в этих установках выполнен в виде трубы. Катодные пятна вакуумной дуги генерируют плазму материала катода и удерживаются на кольцевой траектории по поверхности катода при помощи электромагнитного фиксатора, расположенного в катодной оправке. Процесс испарения происходит при непрерывном возвратно-поступательном перемещении катода относительно кольцевой зоны испарения на катоде, что обеспечивает испарение его внешней цилиндрической поверхности.

Новая ионно-плазменная установка МАП-3 для ассистированного осаждения (ионно-плазменное осаждение при постоянной бомбардировке поверхности газовыми ионами высокой энергии от дополнительного ускорителя ионов) снабжена ускорителем газовых ионов, обеспечивающим ассистированное осаждение с параметрами: мощность – 40 кэВ, ток – до 40 мА. Ассистированное осаждение обеспечивает повышение эрозионной стойкости нитридных карбидных покрытий в 2 раза путем изменения структурного состояния покрытий и повышение на 20–25% жаростойкости конденсированных покрытий системы Me–Cr–Al–Y за счет устранения микропористости ионно-плазменных покрытий.

Осаждение защитных и упрочняющих покрытий из плазмы материала катода в высоком вакууме или в среде реакционного газа ( $N_2$ ,  $C_2H_2$ ,  $O_2$ ) при высоких и управляемых энергиях частиц (50–2000 эВ) обеспечивает получение аморфных или субмелкозернистых наноструктурных защитных и упрочняющих покрытий. Испарение составного катода, содержащего кольца из различных материалов, обеспечивает получение нанослойных покрытий с регулируемой толщиной – от 10–20 до 50–70 нм [18].

Без разработки теплозащитных покрытий (ТЗП) с рабочей температурой 1200–1300°C и теплопроводностью  $\leq 1$  Вт/(м·К) создать конкурентоспособный двигатель невозможно. Ведущие зарубежные производители газотурбинных двигателей потратили свыше 20 лет для создания и освоения ТЗП со стандартным электронно-лучевым керамическим слоем на основе стабилизированного диоксида циркония, имеющего коэффициент теплопроводности 2,5–3 Вт/(м·К).

В настоящее время для реализации технологии нанесения ТЗП отсутствует серийное оборудование для нанесения электронно-лучевых и магнетронных керамических слоев ТЗП. В ВИАМ разработана экспериментальная ионно-плазменная установка УОКС-2 для магнетронного осаждения керамических слоев ТЗП, на которой проводится отработка технологий нанесения керамических слоев ТЗП нового поколения с низкой теплопроводностью ( $\leq 1$  Вт/(м·К)). В данной установке для нанесения керамического слоя ТЗП используется новая уникальная и оригинальная технология – реактивное импульсное магнетронное осаждение при повышенной частоте [19].

Разработка теплозащитного покрытия с пониженной теплопроводностью керамического слоя (1–1,5 вместо 3 Вт/(м·К) для керамики на основе стабилизированного оксидом иттрия диоксида циркония при тем-

пературе 1100–1300°С) является одной из ключевых проблем создания перспективных двигателей нового поколения, включая перспективный двигатель 2-го этапа для ПАК ФА. В рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий до 2030 года» будут проводиться работы по созданию энергосберегающих технологий нанесения керамических слоев ТЗП магнетронным методом (энергосбережение до 50 раз по сравнению с электронно-лучевыми технологиями).

Для нового поколения материалов предполагается разработка многослойных жаростойких и теплозащитных покрытий с барьерными слоями на основе самоорганизующихся нанокomпозитов и технологий их нанесения на лопатки турбин и другие детали ГТД из жаропрочных сплавов на основе тугоплавких элементов (Nb, Mo, Cr, Ta), в том числе эвтектических, композиционных и естественно-композиционных материалов на основе Nb, Mo, Cr и других элементов платиновой группы, на рабочие температуры 1300–2000°С.

Очень важным направлением развития в области защитных покрытий является также создание защитных и упрочняющих наноструктурных демпфирующих эрозионно- и коррозионностойких, антифреттинговых, износостойких покрытий, наносимых методами ионно-плазменного ассистированного и плазмохимического осаждения, модифицирования, среднечастотного магнетронного осаждения и термодиффузионного насыщения, а также разработка функциональных износостойких, коррозионно- и эрозионностойких моно- и многослойных 2D и 3D наноструктурных покрытий с самоорганизующейся упорядоченной структурой на основе твердых соединений металлов и сплавов для защиты от износа деталей при температурах до 800°С.

«Стратегические направления развития материалов и технологий до 2030 года» также предусматривают создание новых классов упрочняющих градиентных демпфирующих нанослойных покрытий и комплексных технологий их нанесения, обеспечивающих создание промежуточных наногетероструктур, для защиты лопаток компрессора перспективных ГТД.

Для реализации перспективных технологий нанесения покрытий нового поколения необходимо создание автоматизированного плазмохимического оборудования нового поколения с нейронными системами адаптивного управления для осаждения защитных и упрочняющих покрытий из газовых потоков плазмы, содержащих прекурсоры элементов синтезируемого покрытия.

В целом реализация мероприятий по созданию нового поколения жаропрочных литейных и деформируемых сплавов и сталей, защитных покрытий для деталей ГТД в рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки до 2030 года» станет стимулом для развития российского двигателестроения, позволит обеспечить создание принципиально новых образцов двигателей и в полной мере будет способствовать переходу специальной металлургии Российской Федерации к новому этапу индустриализации и технологическому укладу, включающему:

– проведение технической модернизации производств путем оснащения современным автоматизированным оборудованием в рамках государственно-частного партнерства для внедрения прогрессивных российских техноло-



гий или создания совместных производств, основанных на передовых технологиях в интересах как внутреннего, так и внешнего рынков;

– подготовку высококвалифицированных инженерно-технических и научных кадров, сохранение и развитие потенциала существующих научных и производственных коллективов, расширение кооперации как внутри страны, так и на мировом рынке.

## ЛИТЕРАТУРА

1. VAATE PRDA I. Pre-Proposal Conference. Presentation, 12 December, AFRL. 2002.
2. *Shaw J.* NASA's New Ultra-Efficient Engine Technology Program (UEET). Contributing to U.S. Aeropropulsion Technology Leadership in the 21<sup>st</sup> Century. Presentation, 4 December. 2000. NASA. 2002.
3. *Смирнов А.В.* Исследование и прогнозирование развития гражданского авиационного двигателестроения как сложной системы / В сб.: Научные чтения памяти К.Э. Циолковского. Секция «Авиация и воздухоплавание». 2006.
4. *Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В.* Никелевые жаропрочные сплавы, легированные рутением / В сб.: Авиационные материалы и технологии. Вып. «Высокорениевые жаропрочные сплавы, технология и оборудование для производства сплавов и литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД». М.: ВИАМ. 2004. С. 80–90.
5. *Наумов А.В.* Ритмы рения (обзор мирового рынка) // Известия вузов. Цветная металлургия. 2007. № 6. С. 36–41.
6. *Кишкин С.Т., Петрушин Н.В., Светлов И.Л.* Жаропрочные эвтектические сплавы. / В сб.: Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков. М.: ВИАМ. 1994. С. 252–258.
7. *Светлов И.Л.* Высокотемпературные Nb–Si композиты – замена монокристаллическим никелевым жаропрочным сплавам // Двигатель. 2010. № 5 (71). С. 36–37.
8. *Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е.* Производство литых прутковых (шихтовых заготовок) из современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов / В сб.: Труды науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР». 2011. УроРАН. Т. 1. С. 31–38.
9. *Сидоров В.В., Ригин В.Е., Бурцев В.Т.* Особенности выплавки ренийсодержащих безуглеродистых жаропрочных сплавов для литья монокристаллических лопаток ГТД / В сб.: Литейные жаропрочные сплавы. М.: Наука. 2006. С. 161–171.
10. *Каблов Е.Н., Сидоров В.В.* Микролегирование РЗМ – современная технология повышения свойств литейных жаропрочных никелевых сплавов // Перспективные материалы. 2001. № 1. С. 23–34.
11. *Комольцев В.В., Ларичкин Ф.Д., Александров А.А.* Конъюнктура рынка редкоземельных металлов // Цветная металлургия. 2004. № 11. С. 8–12.
12. Литые лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы, технологии, покрытия. 2-е изд. / Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука. 2006. С. 449–461.
13. *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.
14. *Евгенов А.Г., Неруш С.В.* Технология получения порошков и полуфабрикатов припоев для диффузионной вакуумной пайки, полученных методом атомиза-

ции расплава / Тез. докл. VI Всероссийской науч.-техн. конф. молодых специалистов. Секция 3 технологическая. С. 162.

15. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Луценко А.Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // *Металлы*. 2007. № 5. С. 23–34.

16. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Егорова Л.Н., Луценко А.Н., Галоян А.Г. Защитные и упрочняющие покрытия лопаток и деталей ГТД / В сб.: 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. М.: ВИАМ. С. 107–124.

17. Каблов Е.Н., Будиновский С.А., Мубояджян С.А. Промышленное ионно-плазменное оборудование для нанесения защитных покрытий / В сб.: Труды 6-й Международной конф. «Пленки и покрытия». СПб: ГТУ. 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 // *Вопросы 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.

*Е.Н. КАБЛОВ, Н.В. ПЕТРУШИН,  
И.Л. СВЕТЛОВ, И.М. ДЕМОНИС*

### **НИКЕЛЕВЫЕ ЛИТЕЙНЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

За период 2007–2012 гг. в ВИАМ были выполнены важные теоретические работы и получены многочисленные экспериментальные результаты [1–14], касающиеся исследования существующих и разработки новых более жаропрочных монокристаллических никелевых рений-рутенийсодержащих сплавов (ВЖМ6, ВЖМ8), сплавов с низкой плотностью (ВЖЛ21, ВЖМ7) и интерметаллидных сплавов (ВИН3 и др.), а также определения дополнительных характеристик уже разработанных сплавов, в частности ВЖМ4. Результаты, представленные в данной статье по рассматриваемой проблеме, дополнены данными других исследователей [7–11] и отражают основные закономерности структурных и фазовых превращений, температурной и ориентационной зависимости модуля упругости, характеристик кратковременной прочности и малоциклового усталости монокристаллов из никелевого жаропрочного рений-рутенийсодержащего сплава 4-го поколения ВЖМ4 с ориентациями  $\langle 001 \rangle$ ,  $\langle 011 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$ . В статье также рассматриваются основные результаты конструирования новых жаропрочных сплавов (ВЖМ6 и ВЖМ7) для литья турбинных лопаток с монокристаллической структурой.

#### ***Анизотропия модуля упругости в интервале температур 20–1150°C***

В табл. 1 приведены численные значения статического модуля упругости ( $E$ ) в интервале температур 20–1050°C, а на рис. 1 представлены кривые зависимости  $E$  от температуры для монокристаллов сплава ВЖМ4 трех кристаллографических направлений  $\langle 001 \rangle$ ,  $\langle 011 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$ , отклоняющихся от углов стандартного стереографического треугольника не более чем на 10 град.