

УДК 629.7:620.22

DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33

Е.Н. Каблов¹**ИННОВАЦИОННЫЕ РАЗРАБОТКИ ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ ПО РЕАЛИЗАЦИИ «СТРАТЕГИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ НА ПЕРИОД ДО 2030 ГОДА»**

Представлены основные результаты инновационной деятельности института за период с 2011 по 2014 год. Особое внимание уделено научно-техническим достижениям в области разработки нового поколения материалов и технологий, полученным в творческом содружестве с академическими институтами, государственными научными центрами, национальными исследовательскими университетами, ведущими вузами, государственными корпорациями и интегрированными компаниями, научными организациями и промышленными предприятиями 15 регионов России. Приведены примеры реализации материаловедческих разработок и рекомендации к их применению при создании перспективных инновационных концептов, определенных в «Стратегических направлениях развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года».

Ключевые слова: высокожаропрочные никелевые и интерметаллидные сплавы; алюминиевые, титановые и магниевые сплавы; связующие и полимерные композиционные материалы; органо-, стекло- и углепластики; высокотемпературные керамические теплозащитные материалы; высокопрочные коррозионностойкие свариваемые сплавы и стали; энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии; комплексная антикоррозионная защита; упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия; климатические испытания; методы квалификации материалов и неразрушающего контроля.

The main results of innovative activities of the Institute from 2011 to 2014 are presented. Special attention is paid to the scientific and technical achievements in the field of developments of materials and technologies of new generation due to a creative cooperation with academic institutes, state scientific centers, national research universities, leading higher education institutions, state corporations and integrated enterprises, scientific organizations and industrial enterprises of 15 regions of Russia. Examples of realization of materials science developments and recommendations on their application for creation of advanced innovative concepts defined in «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030» are given.

Keywords: high heat-resistant nickel and intermetallic alloys, aluminum, titanium and magnesium alloys, binding and polymer composite materials, organic plastics, fiberglass, carbon fiber reinforced plastics, high-temperature heat-protective ceramic materials, weldable high-strength corrosion-resistant alloys and steels, energy-saving, resource saving and additive technologies, complex corrosion protection, strengthening, wear-resistant protective and heat-insulating coatings, climatic tests, methods of materials qualification and non-destructive testing.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации
[Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ – ведущий государственный научный центр в области материаловедения, реализующий полный инновационный цикл – от фундаментально-ориентированных и прикладных исследований по разработке материалов и технологий их переработки до создания высокотехнологичных наукоемких производств по выпуску материалов нового поколения, полуфабрикатов и уникального технологического оборудования, а также работ по импортозамещению и восстановлению производства дефицитных и стратегических материалов.

ФГУП «ВИАМ» предлагает и поставляет широкую номенклатуру металлических и неметаллических материалов, покрытий, разрабатывает технологические процессы, методы и средства защиты от коррозионных поражений и биоповрежде-

ний, средства неразрушающего контроля, высокотехнологичное автоматизированное оборудование и технологическую документацию для авиационно-космической и других отраслей оборонного и гражданского секторов промышленности.

Во ФГУП «ВИАМ» создано 32 научно-технологических комплекса по разработке материалов нового поколения, которые насчитывают более 3600 единиц исследовательского и технологического оборудования.

В институте функционирует независимый Испытательный центр ФГУП «ВИАМ», включающий 19 комплексов уникальной стендовой и испытательной аппаратуры, в котором проводится более 500 видов исследований и испытаний по российским и зарубежным стандартам на 1100 единицах исследовательского и испытательного

оборудования. Испытательный центр аккредитован в качестве технически компетентного центра Росстандартом, ОАО «Роснано», признан компанией Snesma группы Safran, включен в Европейскую Федерацию по коррозии и сотрудничает с компанией Q-Lab.

ФГУП «ВИАМ» имеет три филиала: Воскресенский экспериментально-технологический центр по специальным материалам ВИАМ (Московская область); Ульяновский научно-технологический центр ВИАМ по производству полуфабрикатов и изделий из полимерных композиционных материалов (Ульяновская область) и Геленджикский центр климатических испытаний ВИАМ (ГЦКИ ВИАМ) им. Г.В. Акимова (Краснодарский край) – это единственный в российской промышленности и науке уникальный центр, аккредитованный Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии и Авиационным регистром Межгосударственного авиационного комитета (АР МАК). В ГЦКИ ВИАМ работают 5 совместных лабораторий с национальными исследовательскими университетами и техническими вузами РФ.

В 2010 году при содействии Минпромторга и Минобрнауки России был создан Центр коллективного пользования федерального уровня по испытаниям материалов, техники и сложных технических систем в природных средах (ЦКП «Климатические испытания» ФГУП «ВИАМ»), в состав которого вошли ГЦКИ ВИАМ и Московский центр климатических испытаний (МЦКИ). В 2011 году решением Минобрнауки России Центр включен в состав Федеральной сети Центров коллективного пользования. В 2013 году Центр вошел в международную сеть Центров климатических испытаний ATLAS.

Общая численность сотрудников института по состоянию на 30.12.2014 года составляет 1913 человек, из них до 35 лет – 887 человек (684 с высшим образованием). В институте работают два академика РАН, 27 докторов наук, 182 кандидата наук, 15 профессоров.

В период с 2012 по 2014 год институтом выполнялись работы по 126 контрактам и соглашениям с государственными заказчиками: Минпромторгом России, Минобрнауки России, Минобороны России, Роскосмосом, Росатомом, а также с российскими фондами ФПИ, РНФ и РФФИ. За этот период было разработано 84 материала, 437 технологий, 555 технических условий и других нормативных документов по 53 успешно завершенным контрактам и соглашениям.

В соответствии с поручением в 2002 году Президента Российской Федерации В.В. Путина по восстановлению и развитию научно-технического потенциала отечественной промышленности и организации малотоннажного производства стратегических, дефицитных и импортозамещающих материалов в институте создано 21 высокотехно-

логичное малотоннажное наукоемкое производство по выпуску 210 наименований материалов и полуфабрикатов, технологических установок и приборов. Все производства сертифицированы АР МАК, выпускаемая продукция контролируется и принимается независимой инспекцией.

Система менеджмента качества (СМК) ФГУП «ВИАМ» имеет в Федеральной системе сертификации космической техники сертификат, подтверждающий соответствие СМК требованиям нормативных документов, в том числе ГОСТ Р ЕН 9100–2011 «Системы менеджмента качества организаций авиационной, космической и оборонных отраслей промышленности. Требования».

Практический результат инновационной научно-технической деятельности ФГУП «ВИАМ» – увеличение в 2014 году объема выпускаемой научно-технической продукции по сравнению с 2011 годом на 52,1% – до 5,21 млрд рублей, балансовой прибыли – со 101,7 до 480,0 млн рублей, среднемесячной заработной платы – с 43,8 до 106,5 тыс. рублей, средней численности работников – с 1592 до 1913 человек. Суммарно общие платежи по налогам и сборам в 2011 году составили 621,8 млн рублей, а в 2014 году – 994,0 млн рублей.

Общее количество договоров и объем выполненных институтом работ по заказам предприятий авиационно-космической и других отраслей промышленности увеличилось с 680 (на сумму 0,79 млрд рублей) в 2011 году до 965 договоров (на сумму 1,2 млрд рублей) в 2014 году.

Публикационная активность ФГУП «ВИАМ» на январь 2015 года, оцениваемая по библиометрическим показателям научной электронной библиотеки (eLIBRARY.RU), составила: общее количество публикаций в РИНЦ – 5491, из них 694 за период 2009–2011 годов и 1635 за 2012–2014 годы; суммарное число цитирований публикаций – 11318; число авторов – 598; индекс Хирша – 31 (в 2011 году – 10).

Во ФГУП «ВИАМ» с 2000 года издается научно-технический журнал «Авиационные материалы и технологии», который включен в перечень ВАК и входит в число российских журналов, индексируемых в РИНЦ с импакт-фактором в 2013 году – 3,593.

По данным РИНЦ на январь 2015 года журнал «Авиационные материалы и технологии» занимает 1 место среди всех индексируемых журналов (более 4000) по импакт-фактору 2013 года: двухлетнему – 6,789, пятилетнему – 4,965 (по 2011 году – 0,143 и 0,093 соответственно).

В 2014 году ФГУП «ВИАМ» присвоен рейтинг «ВВ» – высокий уровень научных достижений в категории «Материаловедение» по результатам ежегодного Международного рейтинга научно-исследовательских институтов (WRIR – World Research Institutions Ranking), проводимого Европейской научно-промышленной палатой. Среди

отечественных научных организаций, занимающихся разработками в области материаловедения, деятельность института получила наивысшую оценку.

В 2011 году решением комиссии Минпромторга России по оценке результативности деятельности научных организаций ФГУП «ВИАМ» при подведении итогов аттестации российских научных организаций за период 2006–2010 годов было отнесено к первой категории – лидер среди научных организаций России.

ФГУП «ВИАМ» занимает лидирующие позиции среди 3057 научных организаций России по количеству полученных в период с 2008 по 2014 год патентов – 279 (данные РИНЦ – SCIENCE INDEX, январь 2015 года).

ФГУП «ВИАМ» в период с 1993 по 2014 год получено 930 патентов Российской Федерации. Институт активно вводит в хозяйственный оборот результаты интеллектуальной деятельности: 147 патентов реализовано в собственном высокотехнологичном малотоннажном производстве. ФГУП «ВИАМ» заключено со 131 российским предприятием 600 лицензионных договоров о передаче прав по 62 техническим решениям, защищенным патентами, и по 191 технологическому секрету производства (ноу-хау). В 2014 году выручка по лицензионным договорам составила более 140 млн рублей.

Созданная в институте непрерывная система подготовки и переподготовки кадров на базе совместных базовых кафедр с МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского, МГУ им. М.В. Ломоносова, МГУ им. Н.П. Огарева, НИУ «Высшая школа экономики» (ВШЭ), НИУ «МАИ» обеспечила снижение среднего возраста исследователей с 61,5 года (в 1997 году) до 43,0 лет (в 2014 году) и сохранение преемственности в развитии 12 научных школ, имеющих международное признание, поддержание творческой среды генерации знаний и инновационной деятельности.

Для подготовки специалистов-материаловедов предприятиям авиационно-космической и других отраслей 23 мая 2014 года приказом Рособрназзора ФГУП «ВИАМ» получено право на ведение образовательной деятельности по программам магистратуры по направлению «Материаловедение и технологии материалов». С 1 сентября 2014 года осуществлен первый набор студентов в магистратуру для обучения по очной форме.

В области разработки новых материалов, технологий их получения и переработки, а также комплексных систем защиты от коррозии и по исследованиям климатической и микробиологической стойкости материалов, ФГУП «ВИАМ» активно сотрудничает с 37 институтами РАН и 2 региональными отделениями СО РАН и УрО РАН: ИМЕТ им. А.А. Байкова, ИФТТ, ИСМАН, ИПХФ, ИХТТИМ СО РАН, ИФМ УрО РАН,

ИОНХ им. Н.С. Курнакова, ИЦВО РАН, ИХТТ УрО РАН, Институтом катализа им. Г.К. Борескова, ИХТРЕМС, ИФПМ СО РАН, НИОХ СО РАН, ИПСМ РАН, ИХФ им. Н.Н. Семенова, ИНЭОС им. А.Н. Несмеянова, ИСПИМ им. Н.С. Ениколопова, ИФХЭ им. А.Н. Фрумкина, ИМБП РАН, ИФТП Севера СО РАН, Институтом химии ДВО РАН, ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН, ИПЛИТ РАН, МФ ГУ «ГНИП РАН» и др.; с 13 национальными исследовательскими университетами: МГТУ им. Н.Э. Баумана, ПНИПУ (г. Пермь), СГАУ им. академика С.П. Королева (г. Самара), МГУ им. Н.П. Огарева (г. Саранск), ЮУрГУ (г. Челябинск), КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева (г. Казань), КНИТУ (г. Казань), МИФИ, СГУ им. Н.Г. Чернышевского (г. Саратов), ВШЭ, МГУ им. М.В. Ломоносова, ДВФУ (г. Владивосток), МИМиС; с 15 ведущими техническими университетами и вузами: СПбГПУ, САФУ им. М.В. Ломоносова (г. Архангельск), РХТУ им. Д.И. Менделеева, ВолгГТУ (г. Волгоград), ВлГУ им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (г. Владимир), УГНТУ и УГАТУ (г. Уфа), КФУ им. В.И. Вернадского (г. Симферополь), КубГТУ (г. Краснодар), НГТУ (г. Нижний Новгород), СФУ (г. Красноярск), ИХТУ (г. Иваново), МАМИ, МИТХТ, МАТИ, а также более чем со 150 ГНЦ РФ, научными организациями и промышленными предприятиями авиационной и других отраслей промышленности.

В качестве ведущей научно-исследовательской организации ФГУП «ВИАМ» в тесном контакте с государственными корпорациями и интегрированными компаниями: ОАК, ОДК, Вертолеты России, Ростехнологии, Росатом, Роскосмос, РЖД, НК «Роснефть», АК «Транснефть» и другими – проводит комплексные работы для обеспечения потребности предприятий авиационно-космической отрасли, военно-промышленного сектора экономики, других российских заказчиков в научно-исследовательских работах, услугах, материалах и полуфабрикатах, серийно выпускаемых и разрабатываемых для изделий новой техники.

ФГУП «ВИАМ» повышает инновационный потенциал территориальных кластеров 15 регионов России в рамках действующих соглашений о научно-техническом содружестве в области современного материаловедения.

– С республиками: Мордовия – металломатричные материалы для силовой электроники, климатические испытания строительных материалов; Саха (Якутия) – арматура из базальтопластика, полимерные композиционные материалы (ПКМ) в строительстве и климатические испытания на морозостойкость; Татарстан и Башкортостан – материалы для авиа- и двигателестроения, нефтехимического комплекса и машиностроения.

– С областями: Московская – жаропрочные сплавы и стали; Саратовская – углеродные волокнистые материалы; Ульяновская – ПКМ для авиастроения; Самарская – материалы для двига-

телестроения и авиационно-космической техники; Новосибирская – конструкционные материалы для авиастроения; Томская – высокочистые керамические наполнители композиционных покрытий для авиационно-космической техники.

– С Пермским и Хабаровским краями – материалы для двигателестроения и авиационной техники.

– С республикой Крым, Краснодарским и Приморским краями проводятся совместные климатические, микологические и морские испытания материалов и конструкций.

Специалисты, работающие в области материаловедения на промышленных предприятиях, в вузах и НИИ указанных регионов, проходят в Учебном центре ФГУП «ВИАМ» стажировку, профессиональное повышение квалификации и переподготовку.

Для обеспечения деятельности авиационно-космического кластера Самарской области и республики Татарстан создаются филиалы ФГУП «ВИАМ» в городах Самара (на базе СГАУ) и Казань (на базе совместной лаборатории с ОАО «КМПО»).

К разработкам института проявляют интерес зарубежные фирмы. ФГУП «ВИАМ» сотрудничает более чем с 40 ведущими иностранными компаниями и организациями США, Индии, Франции, Германии, Швейцарии, Китая и других, в том числе с The Boeing Company, Hindustan Aeronautics Limited при участии ОАО «Рособоронэкспорт», Airbus Group, PORCHER Industries, Atlas Material Testing Technology, Q-Lab Weathering Research Service, Aviation Industry Corporation of China (AVIC) и др.

В Послании Федеральному Собранию 4 декабря 2014 года Президент Российской Федерации В.В. Путин отметил, что с целью реализации Национальной технологической инициативы *«нужно объединить усилия проектных, творческих команд и динамично развивающихся компаний, которые готовы впитывать передовые разработки, подключить ведущие университеты, исследовательские центры, Российскую академию наук, крупные деловые объединения страны».*

ФГУП «ВИАМ» по высоким результатам научно-технической деятельности, достигнутым в творческом содружестве с академическими институтами, государственными научными центрами, национальными исследовательскими университетами, ведущими вузами, с государственными корпорациями и интегрированными компаниями, научными организациями и промышленными предприятиями 15 регионов России, готов стать базовой научной организацией для реализации Национальной технологической инициативы в области материалов и технологий нового поколения.

Во исполнение поручений руководства Российской Федерации подготовлены проекты основных нормативно-правовых актов для создания Национального исследовательского центра (НИЦ)

«Материалы и технологии их производства», а также системный проект создания этого центра.

Основная цель функционирования НИЦ – координация деятельности научных организаций и предприятий материаловедческого сектора для реализации крупных инновационных проектов с использованием принципа системного фокусирования научно-технического потенциала на создании нового поколения материалов и технологических решений, обеспечивающих полный «жизненный» цикл материала – от получения исходного сырья до эксплуатации в конечных продуктах (инновационных изделиях), определяющих национальные приоритеты развития, импортозамещение, технологическую независимость и обороноспособность Российской Федерации, в первую очередь оборонно-промышленного комплекса. Указанный комплект документов поддержан всеми Федеральными органами исполнительной власти РФ с учетом замечаний и предложений, откорректирован и представлен в Минпромторг России.

Стратегия развития ФГУП «ВИАМ» базируется на разработанных институтом в 2011 году «Стратегических направлениях развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» (далее – Стратегические направления), определяющих тенденции развития материаловедения во взаимосвязи с задачами авиации, авиационно-космических систем, двигателестроения, электроэнергетики, железнодорожного транспорта, строительной индустрии и др.

Разработка Стратегических направлений осуществлялась в соответствии с приоритетами государственной политики РФ в промышленной сфере, изложенными в указах Президента Российской Федерации, постановлениях Правительства Российской Федерации и других директивных документах о развитии российской промышленности, включая стратегии развития государственных корпораций, интегрированных структур, и на основе анализа тенденций развития материаловедения в мире.

«Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» рассмотрены и одобрены на совещаниях с участием представителей Федеральных органов исполнительной власти, государственных корпораций, Российской академии наук, интегрированных структур, государственных научных центров, ведущих конструкторских бюро, национальных исследовательских университетов, предприятий металлургической и химической промышленности (общее количество организаций 80, экспертов 114) и на заседании научно-технического совета Военно-промышленной комиссии при Правительстве Российской Федерации [1].

В Стратегических направлениях проанализирован отечественный и международный опыт, обобщено и спрогнозировано применение новых

материалов во всех отраслях отечественной экономики, и на основе полученных данных определены 18 стратегических направлений, включающих 71 научную комплексную проблему.

Научные проблемы, сформулированные в Стратегических направлениях, предусматривают создание как новых перспективных материалов и технологий, их глобальную конкурентоспособность на внешнем и внутреннем рынках, так и высокотехнологичных процессов передела отечественного природного сырья для перехода экономики от сырьевой к инновационной.

Реализация основных инновационных идей, на решение которых направлены мероприятия Стратегических направлений, осуществляется в процессе проведения исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию десяти перспективных инновационных концептов, определяющих материальный и технологический облик техники нового поколения гражданского и специального назначения: **1 – «умные» конструкции; 2 – аэроупругость; 3 – легкие конструкции; 4 – гиперзвук; 5 – перспективный двигатель; 6 – интегрированные системы; 7 – системы молниезащиты; 8 – интеллектуальная защита; 9 – плавучесть; 10 – безопасность.**

Впервые в этом документе определены четыре базовых принципа создания современных материалов и сложных технических систем:

- фундаментальные и фундаментально-ориентированные исследования, проводимые совместно с институтами РАН и национальными исследовательскими университетами;
- «зеленые» технологии разработки материалов и комплексных систем защиты;
- реализация полного жизненного цикла материала с использованием ИТ-технологий (создание→эксплуатация в конструкции→диагностика, ремонт, продление ресурса→утилизация);
- неразрывность материала, технологии и конструкции.

Инновационный концепт **№5 – «Перспективный двигатель»** направлен на создание двигательной установки с соотношением тяги к массе 20:1, в том числе благодаря применению новой генерации супержаропрочных материалов и покрытий, а также снижению стоимости жизненного цикла на 20–25%. Решение большинства этих задач предусмотрено в Стратегических направлениях: **№9 – Монокристаллические, высокожаропрочные суперсплавы, естественные композиции; №7 – Интерметаллидные материалы; №10 – Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии получения деталей, полуфабрикатов и конструкций; №13 – Полимерные композиционные материалы.** В рамках этих направлений во ФГУП «ВИАМ» разработаны новые материалы и осуществляется их внедрение: супержаропрочные монокристаллические никелевые сплавы для ра-

бочих и сопловых лопаток с высокоресурсными жаростойкими и комплексными теплозащитными покрытиями; высокопрочные стали и деформируемые никелевые и титановые сплавы для валов, дисков и корпусов; интерметаллидные сплавы для деталей компрессора; полимерные композиционные материалы нового поколения, которые позволяют реализовать весовую эффективность и основные параметры перспективного двигателя [2].

Государственная Программа «Развитие авиационной промышленности на 2013–2025 годы», разработанная Минпромторгом России и утвержденная постановлением Правительства РФ от 15 апреля 2014 года №303, предусматривает в качестве основного приоритетного проекта – проект «Двигатели для самолета МС-21» (ПД-14), головным разработчиком которого является ОАО «Авиадвигатель», г. Пермь (Генеральный конструктор – А.А. Иноземцев, корпорация ОДК).

Инновационность проекта двигателя ПД-14 заключается в том, что, по сравнению с лучшими российскими ТРДД (ПС-90А, ПС-90А2), российско-французским SaM146 и зарубежными аналогами (CFM56, V2500), при разработке двигателя ПД-14 существенно улучшены основные параметры: степень двухконтурности – в 2 раза, температура газа перед турбиной – на 100 К, суммарная степень сжатия в компрессоре – на 20%, что обеспечивает снижение удельного расхода топлива – не менее 12% [3]. Для достижения этих параметров Генеральным конструктором А.А. Иноземцевым предусмотрено применение материалов и производственных технологий нового поколения, разработка которых включена в стратегические направления **№№3, 5, 7, 9, 10, 14, 17 и 18.**

На основании анализа ситуации на мировом авиарынке было выявлено, что доступ к современным зарубежным материалам находится под полным контролем западных компаний. При реализации проекта двигателя ПД-14 – благодаря принципиальной позиции Генерального конструктора ОАО «Авиадвигатель» – применены самые современные российские материалы и энергоэффективные, ресурсосберегающие технологии [4].

Во ФГУП «ВИАМ» осуществляется внедрение в конструкцию газогенератора ПД-14 более 20 современных материалов нового поколения, таких как супержаропрочные монокристаллические никелевые сплавы ВЖМ4 и ВЖМ5 для рабочих лопаток ТВД и ТНД на температуры до 1100°C [5]; интерметаллидные никелевые сплавы ВКНА-1В, ВКНА-4У и ВКНА-4 с жаростойкостью до 1250°C для сопловых лопаток турбины и деталей соплового аппарата [6]; интерметаллидный титановый сплав ВТИ-4 на основе орто-фазы для лопаток, дисков и корпусов компрессора высокого давления на температуру до 700°C [7]; жаропрочный деформируемый сплав ВЖ175, длительно работающий при температурах до 750°C, для дисков компрессора высокого давления и тур-

бины ГТД [8]; жаропрочные титановые сплавы ВТ8-1 и ВТ8М-1 для длительной эксплуатации при 450°C и сплав ВТ25У – до 550°C для деталей компрессора высокого давления (диски, рабочие колеса, лопатки, кольца и т. д.) [9]; высокопрочные мартенситостареющие стали для валов и крепежа типа ВКС-170 и ВКС-180, работающие до 450°C [10]; керамические композиционные материалы на основе SiC–SiC для жаровых труб и створок сопла, работоспособные до температуры 1550°C [11]; порошковые никелевые припои для пайки жаропрочных никелевых сплавов и сталей [12]; алюминидные диффузионные жаростойкие покрытия для защиты от высокотемпературной газовой коррозии в области температур 950–1050°C и комплексные многослойные теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления [13].

На ОАО «Авиадвигатель» отработаны и внедрены режимы деформации и термической обработки штамповок рабочих колес КНД и КВД из сплавов ВТ8-1 и ВТ25У. Впервые в отечественной практике на двигателе ПД-14 будут применены крупногабаритные моноколеса типа «блиск», что позволит снизить массу изделия и повысить надежность конструкции ротора компрессора.

Во ФГУП «ВИАМ» совместно с ОАО «Авиадвигатель» и ОАО «ПМЗ» выполнены работы по разработке жаростойкого подслоя под керамический слой теплозащитных покрытий (ТЗП) лопаток из рений- и рений-рутениевых сплавов и разработан полный комплект нормативно-технической документации для электронно-лучевого нанесения циркониевой керамики на уникальном комплексе фирмы ALD (Германия). Жаростойкий подслои ТЗП содержат: диффузионные слои – барьерный карбидный и алюминидный, наносимый газоциркуляционным алитированием, ионно-плазменный конденсированный слой из сплава ВСДП-3 и диффузионный слой из сплава ВСДП-16, наносимые на автоматизированной установке МАП-2 или МАП-3 [13, 14]. Производительность установки МАП-3, предназначенной для ассистированного осаждения, в 2 раза выше, чем на установке МАП-2. Электронно-лучевая установка фирмы ALD позволяет наносить керамический слой ТЗП одновременно на 10 лопаток ТВД со скоростью до 5 мкм/мин при температуре нагрева лопаток 1000±100°C и потребляемой мощности ~500 кВт·А [4]. Рабочие лопатки с керамическим ТЗП для двигателя ПД-14 успешно прошли испытания на стенде для термоциклирования (>400 циклов).

Двигатель ПД-14 – первый двигатель российского производства, в котором нашли применение интерметаллидные титановые сплавы, в том числе γ -сплавы, имеющие низкую плотность (3,94 кг/м³). Для рабочих лопаток турбины низкого давления это литейный сплав ВИТ-Х, разработанный совместно с ОАО «Авиадвигатель», а для корпусных

деталей турбины и компрессора – деформируемый сплав ВТИ-4.

Применение интерметаллидных титановых сплавов позволяет повысить рабочую температуру деталей на 100–300°C по сравнению с деталями, изготовленными из традиционных жаропрочных титановых интерметаллидных сплавов повышенной жаростойкости, а также снизить массу деталей на 10–40% при замене никелевых сплавов.

Во ФГУП «ВИАМ» при поддержке Минпромторга России и ОДК создается центр компетенций (трансфера технологий) по разработке и производству литейных сплавов на основе интерметаллидов титана. Разработаны технологии получения химически и структурно однородных слитков из интерметаллидных титановых орто- и γ -сплавов (ВТИ-4, ВТИ-3Л), схема деформационной и термической обработки сплава ВТИ-4 [7, 15–19].

Для рабочих колес и лопаток направляющего аппарата компрессора перспективного вертолетного двигателя, созданного в ОАО «Климов», разработана технология изготовления полуфабрикатов из деформируемых интерметаллидных орто-сплавов, а также технология изготовления штамповок типа «блиск» и поковок центробежного колеса из жаропрочных титановых сплавов ВТ8-1 и ВТ41. Применение моноколес компрессора из титановых сплавов обеспечивает повышение удельных характеристик двигателя. По техническому заданию специалистов ФГУП «ВИАМ» и фирмы ALD была изготовлена и поставлена вакуумно-дуговая печь ALD VAR L200, предназначенная для получения однородных слитков из интерметаллидных титановых сплавов. Печь оснащена компьютерной системой управления и позволяет осуществлять процесс плавки как в автоматическом, так и в ручном режимах. Совместно с ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют» и ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» выполнены работы по созданию и разработке эффективных технологий изготовления рабочих лопаток и корпусных деталей КВД двигателя новых модификаций изделия Т-50 [7, 15].

Внедрены в серийное производство ОАО «УМПО» и ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» разработанные в институте технологии выплавки слитков и изотермической деформации орто-сплавов в условиях сверхпластичности [16, 19].

В области авиационного двигателестроения ряд сложнопрофильных деталей изготавливается из труднообрабатываемых материалов, что приводит к повышению трудоемкости и себестоимости изделия. Решение большинства подобных задач возможно только с применением в современном двигателестроении аддитивных технологий изготовления и ремонта деталей и сложнопрофильных облегченных конструкций из металлов с высокой точностью за один технологический процесс. Применение этих технологий позволяет в 20–30 раз по-

высить производительность труда и увеличить коэффициент использования материала с 0,3 до 1,0.

К аддитивным технологиям, имеющим наибольшие перспективы в авиационной отрасли, относятся: селективное лазерное сплавление (применительно к металлическим порошкам) и спекание (для керамических порошков), а также лазерная наплавка металлических порошков (LMD).

Металлопорошковые композиции для аддитивных технологий должны соответствовать ряду определенных требований. В первую очередь, это обеспечение сферичности, строго определенного гранулометрического состава с высоким выходом годного, высокой химической однородности, пониженного содержания газовых примесей – кислорода и азота. В настоящее время предприятия авиационной отрасли закупают и используют порошки сплавов зарубежного производства, поставляемых фирмами-производителями установок. При этом имеется острая потребность в металлопорошковых композициях отечественных сплавов. Серийного производства порошковых материалов для данных технологий в России нет. Потребность существующего парка установок для аддитивного производства в РФ порошковых материалов составляет приблизительно 20 т/год.

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны технологии получения ультрадисперсных композиций порошков на никелевой основе из сплавов ВКНА-1В, ВКНА-4У и ЭП648 на установке Hermiga 10/100 VI, обеспечивающие наиболее высокий выход годного, высокую химическую однородность порошков и пониженное содержание в них газовых примесей [12]. В институте создан замкнутый цикл аддитивного производства деталей ГТД, включающий производство расходуемой шихтовой заготовки, получение методом атомизации мелкодисперсных металлических порошков из отечественных сплавов и разработку технологий селективного лазерного сплавления деталей из этих порошков с последующей газостатической обработкой. Указанные металлопорошковые композиции и технологии нашли широкое применение в прогрессивной технологии ремонта методом лазерной порошковой наплавки LMD рабочих лопаток авиационных двигателей ПС-90А, ПС-90А2, ПС-90А-76 и промышленных газотурбинных установок типа ПС-90-ГП (10–25 МВт) производства ОАО «Авиадвигатель» [4].

ФГУП «ВИАМ» в рамках мероприятия 1.4. ФЦП Минобрнауки совместно с ИПЛИТ РАН, СПбГПУ и выступающего в качестве индустриального партнера ОАО «Авиадвигатель» проводит работы по внедрению аддитивных технологий для изготовления и ремонта статорных (сопловые лопатки, завихрители) и роторных (рабочие лопатки) деталей двигателя ПД-14.

Во ФГУП «ВИАМ» создан центр по разработке металлопорошковых композиций и аддитивных технологий. Совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана

под руководством академика Н.П. Алешина проводятся работы по новым методам неразрушающего контроля материалов, деталей и изделий, полученных по аддитивным технологиям, в связи с особенностями их структурного строения.

Впервые в отечественной практике при производстве мотогондолы двигателя ПД-14 предусматривается широкое (60–70%) применение ПКМ нового поколения, которые позволят существенно снизить массу конструкции при сохранении требуемых упруго-прочностных характеристик, в том числе с высокими ударной вязкостью и стойкостью к климатическим факторам. В противном случае по заявлению Генерального конструктора А.А. Иноземцева «силовая установка не будет конкурентоспособной уже в 2018–2020 гг.» [3].

Для изготовления деталей и агрегатов мотогондолы двигателя ПД-14 в институте разработаны и производятся препреги углепластиков ВКУ-25, ВКУ-29, ВКУ-39, ВКУ-27л, ВКУ-27тр и стеклопластиков ВПС-48/7781, ВПС-48/120, ВПС-47/7781, ВПС-43к, которые по своим характеристикам не уступают лучшим мировым аналогам [20]. Сконструированная в ОАО «Авиадвигатель» мотогондола двигателя ПД-14, изготовленная из ПКМ разработки ФГУП «ВИАМ», будет использована в ОАО «Корпорация «Иркут» при изготовлении самолета МС-21.

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны научные подходы к созданию «калиброванных» препрегов с повышенной точностью весовых характеристик на основе связующих расплавно-типа различной химической природы и вязкости, а также технологии изготовления препрегов, обеспечивающие нанесение в каждую точку ткани требуемого количества связующего, причем отклонение содержания связующего не превышает 1,5% (по массе) по всей длине и ширине (до 1 метра) рулона, а по толщине ± 10 мкм. Применение таких «калиброванных» препрегов для изделий из ПКМ существенно снижает разброс значений (в 2–3 раза) их прочностных и геометрических характеристик [21].

Созданное в институте производство препрегов углепластиков серии ВКУ и стеклопластиков серии ВПС впервые сертифицировано в России Авиационным регистром (АР) МАК. Осуществляется серийное изготовление и поставка препрегов предприятиям, участвующим в кооперации по разработке и изготовлению мотогондолы двигателя ПД-14.

Во ФГУП «ВИАМ» совместно со специалистами ОАО «Авиадвигатель», ОАО «ПЗ Машиностроитель», ОАО «ОНПП «Технология», ОАО «ВАСО» и НОЦ АКТ ФБГОУ ПНИПУ в рамках соглашения о сотрудничестве изготавливаются стандартные, конструктивно-подобные образцы и образцы-демонстраторы деталей мотогондолы. Квалификационные испытания всех ПКМ разработки ФГУП «ВИАМ» для получения

сертификата типа ВС проводятся по международным стандартам в соответствии с требованиями AP МАК и EASA [4].

В Геленджикском центре климатических испытаний имени Г.В. Акимова (ГЦКИ ВИАМ) совместно с ОАО «Авиадвигатель» проводятся натурные климатические испытания конструктивно-подобных элементов и образцов-свидетелей конструкций из ПКМ, применяемых в семействе двигателей ПС-90А, из угле- и стеклопластиков КМУ-4э-2м, ВПС-33, КМКУ-2м.120, КМКС-2м.120 без защитного покрытия и с защитными лакокрасочными покрытиями. Впервые реализуется совместное воздействие натурального экспонирования и эксплуатационных температурных режимов, имитирующих режим «взлет–посадка».

В 2015 году на ОАО «Авиадвигатель» совместно с предприятиями кооперации (ОАО «ПЗ Машиностроитель», ОАО «ОНПП «Технология», ОАО «ВАСО», НОЦ АКТ ФБГОУ ПНИПУ, ОАО «ЦНИИСМ») будет изготовлено 6 комплектов мотогондолы для статических, акустических и ресурсных испытаний мотогондолы, а также для испытаний двигателя ПД-14 на летающей лаборатории – самолет Ил-76 в специальной версии.

Инновационный концепт №3 «*Легкие конструкции*» предусматривает развитие технологической готовности материалов с низкой плотностью и стабильными прогнозируемыми характеристиками для сверхлегких конструкций в различных отраслях промышленности.

В настоящее время при создании перспективных изделий авиационной и ракетно-космической техники для силового набора требуются алюминиевые сплавы не только с высокой прочностью, но и вязкостью разрушения. Необходимы также материалосберегающие технологии производства для снижения стоимости продукции и технологии сварки для замены клепаных соединений на сварные с целью снижения массы конструкции. Решение этих задач во ФГУП «ВИАМ» осуществляется в рамках комплексных проблем: *8.1 Высокопрочные свариваемые алюминиевые и алюминийлитиевые сплавы пониженной плотности с повышенной вязкостью разрушения; 6.2 Слоистые, трещиностойкие, высокопрочные металлополимерные материалы; 10.10 Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии изготовления деформируемых полуфабрикатов и фасонных отливок из магниевых и алюминиевых сплавов* [1, 22].

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны новые алюминийлитиевые сплавы В-1480 и В-1481 третьего поколения с уменьшенным содержанием примесей железа и кремния, а также лития – для повышения характеристик трещиностойкости и технологичности соответственно. В условиях ОАО «КУМЗ» изготовлены опытно-промышленные партии плоских и круглых слитков высокой чи-

стоты – $(Fe+Si) \leq 0,08\%$. Применение полуфабрикатов из новых высокопрочных и высокоресурсных сплавов для силового набора и обшивки фюзеляжа проектируемых изделий «Самолет-2020» и МТА (многофункциональный транспортный самолет) позволит повысить весовую эффективность за счет повышенной на 15–20% удельной прочности при сохранении высокого уровня трещиностойкости и усталостной долговечности.

Для сварки высокопрочных алюминийлитиевых сплавов целесообразно применять лазерную сварку (ЛС) и сварку трением с перемешиванием (СТП). Жесткий термический цикл с высокими скоростями нагрева и охлаждения, характерный для ЛС, существенно сокращает зону термического влияния, предотвращает фазовые и структурные превращения в околосварочной зоне, приводящие к разупрочнению и снижению коррозионной стойкости сварных соединений. Разработка технологии лазерной сварки алюминийлитиевых сплавов проводится в рамках Программ совместных работ ФГУП «ВИАМ» с ИТПМ СО РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана и НТО «ИРЭ-Полус». Данные программы предполагают проведение совместных научно-исследовательских работ и направлены на отработку технологий и повышение качества сварных соединений перспективных алюминиевых и алюминийлитиевых сплавов путем использования нового оборудования и наноструктурирования металла шва с целью дальнейшего внедрения в изделия авиационной и космической техники.

Современные технологии СТП прессованных панелей из высокопрочного алюминийлитиевого сплава В-1469 разрабатываются совместно с ФГУП «НПО Техномаш» и обеспечивают повышение прочности и усталостных характеристик сварных соединений по сравнению со сварными соединениями, выполненными аргоно-дуговой сваркой.

Для успешного внедрения технологий сварки при изготовлении элементов конструкций авиационной техники нового поколения предполагается создание на базе ОАО «КАЗ им. С.П. Горбунова» (г. Казань) центра компетенции по технологиям сварки авиационных конструкций. Реализация поставленных задач позволит получать авиационные конструкции с применением перспективных технологий сварки для существенного снижения массы в сравнении с клепаными соединениями.

Базовыми предприятиями в качестве промышленного партнера для внедрения технологий определены: ОАО «РКЦ «Прогресс» (г. Самара) – для производства обшивок, днищ, емкостей, перегородок, баков, силовых элементов перспективных ракет-носителей семейства «Союз» и ОАО «КАЗ им. С.П. Горбунова» (г. Казань) – для производства основных силовых конструкций перспективной авиационной техники.

Для широкого внедрения прогрессивных технологий создания сложных интегральных конструкций из высокопрочных алюминийлитиевых

и титановых сплавов во ФГУП «ВИАМ» совместно с ФГАУ «НУЦ «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э. Баумана создан центр по разработке технологий получения неразъемных соединений лазерной, электронно-лучевой, гибридной сваркой, сваркой трением, трением с перемешиванием и других, включая математическое моделирование и оценку свариваемости различных классов материалов. Особое внимание уделяется разработке методик ручного и автоматизированного неразрушающего контроля легких сварных конструкций.

С использованием метода компьютерного моделирования разработан новый сверхпрочный сплав В-1977, обладающий повышенной вязкостью разрушения. В производственных условиях ОАО «КУМЗ» отработаны технологические параметры литья, деформации, термообработки и изготовлены опытно-промышленные партии плит и профилей толщиной 20–40 мм из сверхпрочного сплава В-1977. По характеристикам полуфабрикаты из сплава В-1977 превосходят полуфабрикаты из сплава В96Ц-3п.ч. по вязкости разрушения на 15–20%, сохраняя прочность на сверхвысоком уровне, и не уступают зарубежным аналогам – сплавам марок 7056 и 7090.

В современном авиационном повышении аэродинамических характеристик планера летательных аппаратов и обеспечение весовой эффективности решается во многом путем применения композиционных материалов, в первую очередь слоистых, трещиностойких, высокопрочных металлополимерных материалов нового поколения, которые разрабатываются в рамках комплексной проблемы 6.2. В сравнении с металлами эти материалы характеризуются хорошей устойчивостью к усталостным нагрузкам и обладают высокой прочностью, в том числе удельной [20, 23].

Для элементов обшивки перспективных гражданских самолетов создан класс материалов типа СИАЛ на основе тонких листов алюминийлитиевых сплавов, скорость развития усталостных трещин в которых уменьшается в 10 раз [23]. Разработаны схемы и технологии соединений деталей из СИАЛов, обеспечивающие соединения равнопрочные основному материалу.

С целью разработки нового класса перспективных металлополимерных композиционных материалов системы «титан–углепластик» (комплексная проблема 12.4) разработаны технологии получения из титановых сплавов ВТ23М и ВТ20 тонких листов толщиной 0,3–0,8 мм, а также технологии химической и электрохимической обработки листовых поверхностей для обеспечения адгезионной способности к препрегам углепластиков с теплостойкостью 150, 175 и 200°C [24].

В конструкциях авиационной техники нового поколения композиционные материалы находят широкое применение. Однако для силового набо-

ра планера и элементов крыла рекомендуется применение высокопрочных свариваемых алюминиевых и алюминийлитиевых сплавов пониженной плотности с высокой вязкостью разрушения. Во ФГУП «ВИАМ» разработаны технологии изготовления из этих сплавов высокоточных штамповок методами изотермической деформации и тиксоформования, которые по сравнению с традиционными технологиями позволяют повысить КИМ в 2–3 раза и снизить трудоемкость при последующей механической обработке сложноконтурных деталей.

Применительно к силовым деталям планера Т-50 разработана технология изготовления плит толщиной 40–80 мм из высокопрочного алюминийлитиевого сплава В-1461 пониженной плотности. Замена используемого в настоящее время в конструкции сплава В95п.ч. на сплав В-1461 позволила снизить массу конструкций на 150 кг [25].

Для бортовых панелей перспективных скоростного и тяжелого вертолетов разработана технология изготовления тонких листов из сплава В-1461, имеющих повышенную прочность и вязкость разрушения по сравнению с листами из серийного сплава Д16ч. Внедрение разработанных технологий сварки взамен клепаных соединений обеспечивает дополнительное снижение массы.

Для высоконагруженных массивных деталей силового набора перспективных вертолетов разработаны технологии изготовления толстых плит толщиной 100–150 мм из высокопрочных алюминиевых сплавов 1933 и В-1963. Высокие характеристики трещиностойкости сплавов позволяют существенно повысить надежность конструкций [26]. В 2015 году запланировано опробование алюминиевых сплавов для изготовления деталей новых вертолетов разработки ОАО «МВЗ им. М.Л. Миля».

Для изделий ракетно-космической техники разработан сплав В-1579 системы Al–Mg–Sc, обеспечивающий двукратное повышение механических характеристик (по сравнению со сплавом АМг6). Оптимальное сочетание и содержание в сплаве элементов-упрочнителей позволяет материалу сохранять высокие механические свойства до температуры 150°C.

На Новосибирском самолетостроительном заводе «НАЗ им. В.П. Чкалова» восстановлена технология малодеформационной закалки кованых и штампованных полуфабрикатов из базовых алюминиевых сплавов (АК4-1ч., В95п.ч., 1933). Эта технология обеспечила снижение коробления и уровня остаточных напряжений в 2 раза при сохранении уровня свойств, отвечающих требованиям отраслевых стандартов.

Применительно к силовым деталям корпуса необитаемых подводных аппаратов конструкций ОАО «Концерн «МПО-Гидроприбор» разработаны технологии производства полуфабрикатов из сплава 1933 и новые режимы старения (Т33), обеспечившие требуемое сочетание прочности и

коррозионной стойкости для эксплуатации в морских условиях.

Во ФГУП «ВИАМ» в настоящее время, как и за рубежом, разрабатываются технологии получения сложнопрофильных заготовок методами изотермической штамповки и тиксоштамповки, обеспечивающие повышение однородности деформации, размерной точности изделий и КИМ, а также снижение усилий деформирования при одновременном улучшении достигаемого комплекса служебных и технологических свойств – особенно прочности, пластичности и усталостной долговечности.

Основным отличием этих двух способов изготовления точных штамповок является температура формообразования. При изотермической штамповке она не отличается от температуры традиционной горячей объемной штамповки, а в случае менее изученного процесса тиксоформования штамповку проводят при более высокой температуре – в твердожидком состоянии металла. При этом проявляется эффект тиксотропности металлических суспензий – способность значительно снижать сопротивление сдвиговым деформациям, что позволяет проводить процесс штамповки при незначительной удельной нагрузке.

В качестве основного титанового сплава для высоконагруженных деталей и узлов новых модификаций изделия Т-50 рекомендован высокопрочный конструкционный сплав ВТ23М. ФГУП «ВИАМ» разработал и внедрил в ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» промышленную технологию изготовления из него крупногабаритных полуфабрикатов. Разработаны и согласованы с ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» и «ОКБ Сухого» – филиал ОАО «Компания «Сухой» – технические условия на поставку плит, поковок и листов из сплава ВТ23М [27].

На основе титана разработаны перспективные композиции интерметаллидных сплавов, которые обладают повышенными рабочими температурами и могут заменить часть стальных деталей в элементах ГТД благодаря пониженной плотности и повышенной удельной жаропрочности. Интерметаллидные материалы планируются к применению в перспективных двигателях отечественных и зарубежных изделий авиационной техники. При этом остро стоит вопрос о технологиях изготовления деталей из данного класса материалов, так как интерметаллидные сплавы плохо деформируются и обладают высокой твердостью. Во ФГУП «ВИАМ» проводятся работы по разработке режимов деформации и изготовлению деталей лопаток [15, 16].

В ходе выполнения комплексной проблемы 8.4 *Высокопрочные коррозионностойкие свариваемые магниевые и литейные алюминиевые сплавы* создан новый деформируемый жаропрочный магниевый сплав марки ВМД16 с повышенными прочностными, коррозионными и жаропрочными

свойствами ($\sigma_B=320-350$ МПа, жаропрочность при $300^\circ\text{C} - \sigma_B^{300} \geq 120$ МПа), предназначенный для применения в конструкциях, работающих при температурах до 200°C (длительно) и кратковременно – до 300°C . На ОАО «КУМЗ» разработана опытно-промышленная технология изготовления прессованных и кованных полуфабрикатов из этого сплава. Сплав рекомендуется для изготовления деталей системы управления (качалки, кронштейны, рычаги и т. п.) вертолетов Ми-35 и Ми-38 взамен серийного магниевых сплава МА14. Применение сплава ВМД16 позволит повысить надежность эксплуатации деталей на 20–25% благодаря повышению пределов прочности и текучести при сжатии на 15–20%, относительного удлинения – в 1,5 раза, снижению анизотропии предела прочности – в 1,5–2,2 раза. Снижение массы деталей из сплава ВМД16 обеспечит уменьшение расхода топлива и повышение тактико-технических характеристик [28, 29].

Для применения в перспективных вертолетах Ми-8Т, Ми-35 и Ми-38 разработана технология литья разностенных корпусных отливок из алюминиевого сплава АЛ4МС и магниевых коррозионностойкого сплава ВМЛ18 взамен серийных сплавов АЛ9 (АК7ч.), АЛ34 (АК8л), МЛ5 и МЛ5п.ч. Технология литья позволит снизить массу конструкции за счет уменьшения толщины стенок корпусных отливок и повышения надежности деталей в эксплуатации на 25–30% путем увеличения предела прочности на ~50% и коррозионной стойкости – в 2 раза [30].

Для деталей системы рулевого управления модернизируемых и новых изделий ОАО «Туполев» разрабатывается технология изготовления фасонных отливок из современных литейных алюминиевого ВАЛ20 и магниевых ВМЛ18, ВМЛ20 сплавов литьем в формы, полученные по аддитивной технологии – 3D-печатью, что позволит повысить КИМ, снизить в 1,2 раза массу деталей и в 1,5 раза трудоемкость изготовления за счет уменьшения площади обрабатываемых поверхностей.

Комплекс работ по стратегическому направлению №13 *Полимерные композиционные материалы* направлен на реализацию большинства инновационных концептов (№№1–3; 6–10), сформулированных в Стратегических направлениях. Создание ПКМ нового поколения невозможно без разработки связующих, отвечающих требованиям экологических стандартов и принципов «зеленой химии».

В рамках комплексной проблемы 13.1 *Связующие для полимерных и композиционных материалов конструкционного и специального назначения* разработаны новые высококачественные связующие как для уже существующих, так и для перспективных технологий получения ПКМ [31–38].

Для процессов автоклавного формования разработаны высокодеформативные эпоксидные свя-

зующие с контролируемой текучестью марки ВСЭ-1212; для процессов вакуумного формования препрегов – эпоксидное связующее ВСЭ-22 [33]; инфузионные связующие холодного отверждения – для конструкционных материалов, в том числе строительного назначения, на основе эпоксидных смол марок ВСЭ-25, ВСЭ-28, ВСЭ-38 [34, 35] и на основе винилэфирных смол ВСВ-41; для процессов пропитки под давлением связующие: ВСЭ-21 с рабочей температурой до 100°C, ВСЭ-17 с рабочей температурой до 170°C, ВСИ-23 с рабочей температурой до 230°C, кремнийорганическое связующее ВСКО-29 с рабочей температурой до 300°C; связующее К-9-70С с рабочей температурой до 350°C; серия цианэфирных связующих для композиционных материалов, получаемых по автоклавной технологии (ВСТ-1208), пропиткой под давлением (ВСТ-1210), получения сотовых конструкций (ВСК-1208) [36]; гетероциклическое связующее ВСН-31 с рабочей температурой ПКМ на его основе до 350°C; пленочные связующие ВСЭ-19 и ВСЭ-20 для процессов пропитки с использованием технологии RFI (Resin film infusion) [37]; алюмофосфатное связующее ВСАФ-35 для ПКМ с рабочими температурами до 800°C; фенолформальдегидные связующие марок РС-Н и ВСФ-16М для пожаробезопасных материалов интерьера пассажирских самолетов, в том числе для реализации технологии «crush core» [38].

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны высокодеформативное связующее ВСР-3М и стеклопластики на его основе с повышенной влагостойкостью для несущих систем вертолетов Ми-28 и Ми-35, в том числе эксплуатирующихся в жарком и тропическом климате, с подтверждением их работоспособности стендовыми испытаниями в ОАО «Роствертол» [31].

Разработаны высокопрочные клеи конструкционного назначения и композиционные материалы на основе клеевых препрегов, которые нашли широкое применение при изготовлении клеевых конструкций силовых деталей и агрегатов из металлов и ПКМ в конструкциях авиационной техники, что позволило повысить в 1,5–2 раза прочность и долговечность клеевых конструкций по сравнению с клепаными конструкциями [39]. Клеевые соединения обладают высокой длительной прочностью, стойкостью к воздействию климатических факторов и агрессивных сред (вода, влага, топливо, масла, повышенная температура), что обеспечивает ресурс и надежность эксплуатации изделий авиационной техники.

Разработан высокопрочный пленочный клей марки ВК-36РМ конструкционного назначения с пониженной на 25°C температурой отверждения (150–160 вместо 175–185°C у высокопрочного пленочного клея ВК-36Р) при сохранении основных физико-механических характеристик в интервале температур от -60 до +150°C. Применение

клея с пониженной температурой отверждения позволит сократить энергозатраты в 1,5–2 раза при изготовлении клеевых конструкций, в том числе сотовых. На российском сырье разработан теплостойкий клей ВС-10Т-У универсального назначения, который обеспечил импортозамещение и нашел применение для склеивания элементов тормозных устройств самолетной техники. Конструкционные клеи холодного отверждения многофункционального назначения (быстроотверждающийся клей ВК-93 и зазорозаполняющий клей ВК-67М) позволяют решать задачи по изготовлению крупногабаритных конструкций, а также обеспечивают ремонт агрегатов из ПКМ с восстановлением эксплуатационной надежности.

В рамках комплексной проблемы 13.2 Конструкционные ПКМ получены следующие инновационные разработки:

- созданы новые композиционные материалы на основе клеевых препрегов марок КМКС-1с.80.ТС8/3к и КМКС-1с.80.Т60 с использованием высокомодульного и кварцевого стеклонаполнителей с пониженной температурой отверждения 140±5°C (вместо 175±5°C для существующих российских аналогов). Разработаны энергосберегающие технологии изготовления из этих материалов сотовых конструкций радиотехнического назначения (обтекатель) для работы при температурах от -60 до +80°C;

- созданы композиционные материалы на основе клеевых препрегов марок КМКУ-3м.150 с применением однонаправленных углеродных лент: ЭЛУР-П-КП, высокопрочных марок УОЛ-300Р, УОЛ-300Р(У) улучшенной текстильной формы и арт. 14535 фирмы Porcher [40]. Клеевые препреги КМКУ-3м.150 внедрены в конструкцию изделия Т-50 и используются для интегральных конструкций, а в сочетании с клеевым препрегом КМКС-4м.175.Т64 на основе стеклоткани Т-64(ВМП) – для изготовления деталей и агрегатов сотовой и интегральной конструкции (панели фюзеляжа и крыла, обтекатели привода горизонтального и вертикального оперения и др.). Разработанные клеевые препреги на основе сетчатого заполнителя марки КМКС-2м.120.ПС-1-5,6 внедрены в конструкцию обтекателя ОАО «РСК МиГ». Во ФГУП «ВИАМ» организовано опытно-промышленное производство прецизионных (калиброванных) клеевых препрегов. Клеевые препреги марок КМКУ-3м.150 и КМКС-4.175.Т64 поставляются на предприятия для изготовления деталей и агрегатов изделий «ОКБ Сухого» (филиал ОАО «Компания «Сухой»). Препрег КМКУ-2м.120.Э0,1 поставляется ОАО «ВАСО» для изготовления агрегатов сотовой конструкции изделия «Сухой-Суперджет».

Для термонагруженных узлов и агрегатов ГТД, а также размеростабильных конструкций, работающих при температуре 300°C и кратковременно при 400°C, разработаны углепластики марок

ВКУ-38, ВКУ-38ТР и ВКУ-38ЖН на основе средне- и высокомолекулярных волокон и фталонитрильного связующего ВСН-31 [41, 42].

Для деталей конструкционного назначения летательных аппаратов (обшивка стабилизатора, лонжеронов, элементы хвостового оперения, закрылки и т. п.), а также для судостроения (высокопрочные корпуса судов), строительства (легкие конструкции-трансформеры) и автомобилестроения разработаны углепластики марок ВКУ-31-3101, ВКУ-35, ВКУ-40 и ВКУ-41, изготавливаемые по безавтоклавным технологиям (инфузией, пропиткой под давлением, пропиткой пленочным связующими и др.), снижающих стоимость изготовления изделий из углепластиков [42–45].

Разработан первый наноструктурный углепластик ВКУ-18 без применения металла, используемый в качестве молниезащитного покрытия конструкций из углепластика на основе растворных связующих, который успешно прошел испытания в лабораторных условиях и выдержал практически без повреждений воздействие токов в зоне смещающихся разрядов со следующими параметрами: сила тока $I=200$ кА и переносимый заряд $Q=20$ Кл. Ведутся разработки электропроводящего покрытия марок ВЭП-1 и ВЭП-2 на основе углеродных тканей для защиты от накопления статического электричества и разрядов молнии конструкций из угле- и стеклопластиков, изготавливаемых способом инфузионного формования (VaRTM) [46]. Для этих целей исследуется возможность применения в составе материала наноструктурированного материала – терморасширенного графита, входящего в состав полицианэфиринового или эпоксидного связующего [47, 48].

Разработаны новые конструкционные и баллистически стойкие арамидные органопластики 12Т(М)-Рус, ВКО-19, ВКО-19Л, ВКО-2ТБ, ВКО-20. Конструкционные органопластики ВКО-19 и ВКО-19Л отличаются высокой стойкостью к виброакустическим нагрузкам, ударным и эрозийным повреждениям, способностью сохранять высокую конструкционную прочность при локальных повреждениях. Использование этих материалов в конструкциях вертолетов позволяет решить проблему создания легких герметичных тонкослойных обшивок, обеспечивающих при толщине от 0,5 мм требуемые весовые характеристики и ресурс [49–51]. Органопластики обладают высокой стойкостью к ударным и виброакустическим нагрузкам, способны сохранять высокую конструкционную прочность при наличии локальных повреждений. Конструкционные органопластики применяются для изготовления обшивок планера и несущих винтов вертолетов Ми-28Н, Ми-38, «Ансат» и других. Во ФГУП «ВИАМ» в 2014 году было изготовлено и поставлено в «Роствертол» (г. Ростов-на-Дону) 11000 обшивок для хвостовых секций несущих винтов вертолета Ми-28Н.

Баллистически стойкие органопластики ВКО-2ТБ и ВКО-20 предназначены для изготовления конструкций с высокими требованиями к ударной и баллистической стойкости: корпусов вентиляторов авиационных двигателей, защитных экранов различного назначения, средств индивидуальной баллистической защиты [51, 52]. В конструкции самолета «Суперджет-100» использован органопластик ВКО-2ТБ для изготовления перегородки кабины экипажа с целью защиты от проникновения пуль легкого ручного оружия и осколков взрывных устройств при возникновении нештатной ситуации [52, 53]. В 2014 году во ФГУП «ВИАМ» было изготовлено и поставлено в «ВАСО» (г. Воронеж) 2000 м препрега шириной 1200 мм для изготовления этих изделий.

Для изготовления методом пропитки под давлением радиопрозрачных конструкций для ОАО «ГосМКБ „Радуга” им. А.Я. Березняка» разработан высокотемпературный конструкционный стеклопластик ВПС-52 на основе кремнийорганического связующего с рабочей температурой до 300°C (длительно) и кратковременно – до 900°C, обладающий низкой пористостью (менее 10%) и высокими прочностными характеристиками (предел прочности при растяжении ~350 МПа) [54]. В процессе разработки стеклопластика ВПС-52 во ФГУП «ГНИИХТЭОС» было восстановлено производство кремнийорганических смол и олигомеров.

Для изготовления деталей интерьера разработана энергосберегающая технология получения методом «crush core» трехслойных сотовых панелей с обшивками из пожаробезопасного стеклопластика ВПС-42П на основе быстротвердеющего (при 140°C в течение 20 мин) фенолформальдегидного связующего [55]. Разработанный стеклопластик ВПС-39П для изготовления монолитных деталей и трехслойных сотовых панелей интерьера, производимый полностью из отечественных компонентов, обладает высокими показателями по пожаробезопасности – материал самозатухающий и слабодымящий, а также характеризуется низким тепловыделением. Использование разработанных стеклопластиков позволит обеспечить изготовление интерьера самолета «Суперджет-100» с применением материалов отечественного производства.

Для заполнения сотовых конструкций в местах установки закладных элементов, заделки торцевых участков изделий ОАО «Туполев» и ОАО «Ил» разработан эпоксидный сферопластик ВПЗ-18 с сокращенным режимом отверждения (не более 12 ч при комнатной температуре), обеспечивающий сокращение не менее чем в 2 раза продолжительности технологического цикла изготовления сотовых панелей со сферопластиком как в условиях производства, так и при проведении ремонтных работ [56]. Листовой цианэфиновый сферопластик ВПЗ-17, разработанный для приме-

нения в изделиях «ОКБ Сухого» – филиал ОАО «Компания «Сухой» (изготовление панелей кессонной части крыла и агрегатов механизации системы управления), характеризуется комплексом высоких физико-механических (плотность 0,6–0,7 г/см³, предел прочности при растяжении 80–100 МПа) и диэлектрических (диэлектрическая проницаемость 2,0–2,1) свойств, обеспечивает более высокие (в 3–5 раз) эксплуатационные свойства многослойных конструкций со сферопластиком по сравнению с традиционными конструкциями с сотовым наполнителем [57].

Во ФГУП «ВИАМ» особое внимание уделяется работам по стратегическому направлению №14 **Высокотемпературные керамические и керамоподобные материалы**. Выполнение этих работ в значительной степени определяет создание следующих концептов: аэроупругость, гиперзвук, перспективный двигатель и интеллектуальная защита.

Для реализации задач по комплексной проблеме 14.1 **Конструкционные керамические материалы** разработаны:

- состав и полимеркерамическая технология получения наноструктурированного трещиностойкого композиционного материала марки ВМК-12П системы C/SiC–Si₃N₄ с применением прекурсоров керамообразующих полимеров на основе поликарбосиланов и полисиланов. Материал обладает уникальными свойствами: низкая плотность сочетается с высокой механической прочностью, трещиностойкостью и температуростойкостью [58]. Совместно с ЦИАМ разработана технология изготовления из материала ВМК-12П сложноконтурных, крупногабаритных деталей высокотемпературной (>1400°C) камеры сгорания для беспилотного летательного аппарата изделия МД120. Применение этих деталей взамен традиционных металлических охлаждаемых конструкций обеспечит снижение массы конструкций в 1,5–2 раза и позволит существенно снизить стоимость изделий;

- композиционный стеклокристаллический материал марки ВМК-10 [59] (совместная разработка с РХТУ им. Д.И. Менделеева), полученный с применением золь-гель прекурсоров керамической системы состава BaO–Al₂O₃–SiO₂ и обладающий высокой термостабильностью при 1450°C, предназначен для изготовления радиопрозрачных обтекателей;

- композиционный материал марки ВМК-11 (совместная разработка с ИОНХ РАН) на основе тугоплавкой керамической матрицы, модифицированный наноразмерными нитевидными кристаллами карбида кремния с применением золь-гель и CVI методов. Материал рекомендуется для изготовления узлов и деталей авиационной техники нового поколения в качестве элементов горячего тракта газотурбинных двигателей ракетной, авиационной и космической техники с рабочей температурой 1400–1600°C;

- высокотемпературное антиокислительное покрытие марки ВПКА-1 [58] для работы изделий из углеродсодержащего материала при температурах 1400–1600°C в окислительной среде, в том числе в условиях воздействия высокоэнthalпийных потоков. Покрытие предназначено для защиты кромок крыла и носовых обтекателей перспективных летательных аппаратов.

Для реализации задач по комплексной проблеме 14.3 **Многофункциональные теплозащитные и теплоизоляционные материалы** разработаны:

- низкоплотный гибкий волокнистый тепло-звукоизоляционный пожаробезопасный материал марки ВТИ-25, обладающий низкой сорбционной влажностью (влагопоглощение), низкой теплопроводностью, высокими упругостью и прочностью при разрыве, с высоким значением коэффициента звукоизоляции в диапазоне частот 125–4000 Гц. Материал предназначен для тепло- и звукоизоляции салона и кабины пилотов летательных аппаратов. Применение материала марки ВТИ-25 рекомендуется взамен импортного аналога – материала Microlite AA компании Johns Manville (США);

- технология изготовления уплотнительных шнуров марки ВШУ-1 на основе наполнителя из дискретных волокон оксида циркония на рабочую температуру до 1800°C. Материал применяется для уплотнения соединений и теплоизоляции в узлах тепловых установок и газотурбинных двигателях, обеспечивая повышение надежности работы существующих электрических систем изделий гражданской авиации и их пожаробезопасности, ограничивая утечку горячих сжатых газов и несгоревшего топлива для предотвращения образования взрывоопасных смесей [60, 61].

Для реализации задач по комплексной проблеме 12 **Металломатричные и полиматричные композиционные материалы** разработаны:

- высокотемпературные металлические композиционные материалы (МКМ) на основе ниобиевой, молибденовой, железной и никелевой матриц, упрочненные частицами и волокнами тугоплавких соединений, и технологии их получения. Разработанные материалы рекомендованы для работы в условиях высоких температур (1300°C и выше) для перспективных авиационных двигателей, в первую очередь это неохлаждаемые и пустотелые лопатки ТВД и ТНД, элементы соплового аппарата, форсунки камеры сгорания, стабилизаторы пламени, теплозащитные экраны, а также другие детали и узлы неохлаждаемой турбины. Применение высокотемпературных МКМ позволит снизить массу элементов неохлаждаемой турбины на 10–15%, эксплуатационные расходы – в 1,5–2 раза и увеличить ресурс работы турбины на 10–20% [62, 63];

- материал (МКМ) на основе алюминиевого сплава, армированного частицами карбида кремния (Al–SiC), и технология его получения, по ко-

торой ОАО «Электровыпрямитель» изготавливает теплоотводящие основания для силовых модулей на биполярных транзисторах с изолированным затвором – IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Уникальная совокупность свойств этого материала (высокие теплопроводность и прочность, низкие ТКЛР* и плотность) позволяет минимизировать термические напряжения в конструкции силовых модулей, что обеспечивает их высокую надежность и ресурс при нагрузках не менее 100 тысяч циклов [64, 65].

Данная работа выполнялась при поддержке Минобрнауки России совместными усилиями ФГУП «ВИАМ», ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н.П. Огарева» и ОАО «Электровыпрямитель» в рамках Постановления Правительства РФ №218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства». Благодаря разработанной технологии было обеспечено импортозамещение МКМ на основе алюминиевого сплава, армированного частицами карбида кремния, и изделий из него, что обеспечило стратегическую независимость в высокотехнологичном секторе силовых модулей на биполярных транзисторах с изолированным затвором.

По комплексной проблеме 8.2 *Высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие свариваемые стали с высокой вязкостью разрушения* разработаны высокопрочные мартенситостареющие стали (Maraging) марок ВКС-170 и ВКС-180, которые по уровню свойств не уступают лучшим зарубежным аналогам [66, 67]. Применение этих сталей в конструкциях ГТД взамен сталей ЭП517, ЭП866, ЭИ961 ($\sigma_{\text{в}}=1000\text{--}1100$ МПа) обеспечит повышение весовой эффективности и ресурса (с учетом конструктивных особенностей) – до 20%.

Мартенситостареющая сталь ВКС-170 ($\sigma_{\text{в}}=1570$ МПа) рекомендована для изготовления валов турбин низкого давления двигателя ПД-14, сталь ВКС-180 ($\sigma_{\text{в}}\geq 1720$ МПа) будет применена в изделиях ОАО «Климов» для валов перспективного вертолетного двигателя.

Разработанная коррозионностойкая сталь 23X15H5AM3-Ш (ВНС-9-Ш) применяется для изготовления пластин торсионов несущих винтов вертолетов семейства «Ка», а также пластинчатых муфт привода несущего винта вертолетов семейства «Ми» [68]. ФГУП «ВИАМ» совместно с ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина» на предприятиях группы «Мечел» разработана, опробована и внедрена в производство технология изготовления ленты толщиной 0,8; 0,3 и 0,4 мм из стали ВНС-9-Ш. На ОАО «Белорецкий металлургический комбинат» разработана и внедрена технология изготовления проволоки диаметром 0,36 мм из этой стали.

На ОАО «Металлургический завод «Электросталь» разработана и внедрена технология производства поковок и прутков из высокопрочной коррозионностойкой стали ВНС-65 ($\sigma_{\text{в}}\geq 1670$ МПа), обладающей высокой вязкостью разрушения и трещиностойкостью. Сталь ВНС-65 применяется для силовых деталей планера и крепежа изделия Т-50 [69].

По комплексной проблеме 8.3 *Высокопрочные наноструктурированные конструкционные стали и диффузионные покрытия, получаемые методами химико-термической обработки*, разработаны теплостойкая высокопрочная сталь ВКС-10У-Ш ($\sigma_{\text{в}}\geq 1270$ МПа) с рабочей температурой 450–500°C и высокоэффективные экологически чистые процессы газовой, ионно-плазменной, вакуумной химико-термической обработки (газовое и ионное азотирование, вакуумная цементация и нитроцементация, комбинированная химико-термическая обработка, сочетающая несколько видов обработки). Разработанные процессы нашли свое применение для упрочнения поверхности деталей авиационных редукторов.

Взамен стали М50 (США) разработаны состав, режимы выплавки и термической обработки стали ВКС241, а также технология получения полуфабрикатов из этой стали. Выпущена технологическая документация для изготовления горячекатаных прутков и прутков со специальной отделкой поверхности из стали ВКС241, не уступающей по своим прочностным характеристикам и твердости стали М50 (США) [70].

По комплексной проблеме 9.7 *Высокотемпературные деформируемые сплавы и композиционные материалы, упрочненные тугоплавкими металлическими волокнами и частицами, карбидами, нитридами и др., истираемые уплотнительные материалы* разработаны истираемые уплотнительные материалы с высокими эксплуатационными характеристиками на основе металлических волокон из сплавов систем Ni–Cr–Al, Ni–Cr–Al–Y и Fe–Cr–Al–Y на рабочие температуры до 700–900°C, обладающие низкой плотностью ($\leq 1,8$ г/см³), высокими пористостью и эрозионной стойкостью и очень высокой истираемостью (10:1), что обеспечивает уменьшение величины зазора между ротором и статором турбин авиационных ГТД и повышает КПД двигателя за счет снижения утечек рабочего газа в зазоры [71, 72].

Совместно с ОАО «Климов» проводятся работы по опробованию новых уплотнительных материалов на основе металлических волокон в конструкции вертолетного двигателя. Одновременно с работами по внедрению новых материалов разрабатывается технология изготовления металлических волокон из жаростойкого сплава, легированного редкими металлами, в том числе платиновой группы, для получения истираемого уплотнительного материала из них с рабочей температурой до 1400°C для применения в турбинах перспективных ГТД.

* Температурный коэффициент линейного расширения.

По комплексной проблеме *10.1 Ресурсосберегающие технологии выплавки перспективных литейных и деформируемых супержаропрочных сплавов с учетом переработки всех видов отходов* 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 (снижение примесей по кислороду и азоту в 2–2,5 раза, по сере – в 2–3 раза, по свинцу – в 1,5–2 раза). Применение этих процессов позволяет повысить механические свойства сплавов на 20–30%, выход годного по монокристаллической структуре – в 1,5–2 раза, а также снизить стоимость сплавов на 30–40% [73–75];

– серийная ресурсосберегающая технология переплава отходов в вакууме, которая позволяет из 100% отходов производства моторных заводов и деталей газотурбинных двигателей, выведенных из эксплуатации, получать литейные жаропрочные сплавы, легированные редкоземельными металлами. Полученный по этой технологии металл полностью отвечает требованиям ТУ, причем стоимость его снижается в 2–3 раза [74, 76].

Это дало возможность выпускать литейные жаропрочные сплавы, превосходящие по своим характеристикам лучшие американские и английские суперсплавы для изготовления монокристаллических лопаток ГТД.

В ВИАМ организовано сертифицированное серийное производство (мощностью до 400 тонн в год) жаропрочных сплавов для предприятий: ОАО «УМПО», ОАО «НПО «Сатурн», ОАО «МПП им. В.В. Чернышева», ОАО «Авиадвигатель», ОАО «ПМЗ», ОАО «Климов» и др.

Одной из задач, решаемой институтом по комплексной проблеме *10.6 Технологии производства сварных конструкций перспективных ГТД из жаропрочных свариваемых сплавов*, является создание сварных конструкций ротора из жаропрочных никелевых сплавов с рабочей температурой 550–750°C.

Сплав ВЖ172, разработанный во ФГУП «ВИАМ», является наиболее жаропрочным из всех существующих деформируемых свариваемых сплавов-аналогов (ЭП693, ЭП708 и ЭП718) и превосходит их по значениям кратковременной и длительной прочности на 15–20% [8, 77]. Впервые было предложено использовать сплав ВЖ172 в качестве материала рабочих колес ротора, имеющих неразъемное сварное соединение.

На металлургических предприятиях ОАО «Металлургический завод «Электросталь» и ОАО «Русполимет» отработаны технологии вакуумно-индукционной выплавки, электродугового и электрошлакового переплава [78],ковки, штамповки и раскатки при получении крупногабаритных полу-

фабрикатов: прутков, поковок, раскатных колец. Получены заготовки дисков – поковки-шайбы диаметром более 600 мм.

Во ФГУП «ВИАМ» разработана технология электронно-лучевой сварки деталей ротора из сплава ВЖ172. Совместно с ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют» и ОАО «НПО «Сатурн» разрабатывается технология электронно-лучевой сварки крупногабаритных заготовок из сплава ВЖ172, обеспечивающая высокое качество сварного шва и равнопрочность сварного соединения и основного материала [79, 80].

На ОАО «Климов» для изделия ВК-2500М и перспективного вертолетного двигателя осуществляется внедрение технологии получения сварного ротора из сплава ВЖ172. В 2015 году запланировано изготовление и испытание в составе узлов двигателя сварной конструкции роторного блока из сплава ВЖ172, что позволит снизить массу узла на 10–15%.

По комплексной проблеме *10.7 Ресурсосберегающие технологии сварки в твердой фазе трудносвариваемых конструкционных и функциональных материалов* разработана технология сварки трением с перемешиванием (СТП) высокопрочных алюминийлитиевых сплавов В-1461 и В-1469, обеспечившая повышенную чистоту поверхности сварного шва, отсутствие дефектов и прочность сварного соединения на уровне 0,75–0,85 от прочности основного материала [81–83]. В сравнении со сваркой плавлением технология СТП позволяет снизить на 30% трудоемкость изготовления сварных конструкций за счет уменьшения количества технологических операций.

Эти конструкции планируется совместно с СГАУ (г. Самара) и ОАО «РКЦ Прогресс» применить в новых носителях класса «Союз».

Разработаны комбинированные системы защитных покрытий, включающие неметаллические неорганические и лакокрасочные покрытия, которые повышают в 1,5–2 раза коррозионную стойкость сварных соединений алюминийлитиевых сплавов В-1461 и В-1469 при их эксплуатации во всеклиматических условиях, и новые технологические процессы нанесения неметаллических неорганических (химических и анодно-оксидных) покрытий со снижением в 2 раза трудоемкости при проведении подготовки поверхности.

Образцы сварных соединений (с покрытиями и без покрытий) выставлены на натурные коррозионные испытания в условиях промышленной зоны умеренного климата (г. Москва) и умеренно теплого климата (г. Геленджик).

По комплексной проблеме *10.8 Технологии сварки плавлением новых конструкционных материалов* для сварки плавлением высокопрочных алюминиевых и жаропрочных никелевых сплавов выбраны оптимальные составы присадочных материалов, легированных РЗМ [73], обеспечивающие повышение показателя трещиностойкости

($V_{кр}$) до 3,5 мм/мин при сварке плавлением алюминиевых сплавов и более 4,0 мм/мин при сварке жаропрочного никелевого сплава [84–86].

По комплексной проблеме *10.9 Припой и технологии высокотемпературной диффузионной пайки с компьютерным управлением технологическими параметрами* для формирования оптимальной структуры паяного соединения разработаны жаропрочные припои на никелевой основе (ЭП975, ВКНА-25, ВИНЗ, ВЖМ4, ВЖМ5, ВЖ145 и др.) и технологии диффузионной пайки, а также технологии пайки истираемых уплотнительных материалов для уплотнения горячего тракта ГТД. Созданы технологии изготовления лент и паст порошковых припоев на органическом связующем, позволяющие точно дозировать и надежно фиксировать припой. Разработанные припои и технологии пайки обеспечивают рабочую температуру паяных соединений на уровне соединяемых материалов и применяются для различных деталей и узлов ГТД [87–89]. В институте функционирует малотоннажное производство припоев, которое по объему удовлетворяет потребности авиационной, ракетно-космической и других отраслей промышленности.

По комплексной проблеме *11.1 Термостабильные магнитотвердые материалы и математические модели расчета их температурных характеристик для навигационных приборов нового поколения* разработана методика расчета температурной зависимости намагниченности фазы $R_3M_2(Fe, Co)_{14}B$ от ее химического состава. Для динамически настраиваемых гироскопов и акселерометров разработаны спеченные цельные кольцевые магниты с радиальной текстурой системы $R_3M-Fe-Co-B$, которые характеризуются высокой термостабильностью в диапазоне температур от -60 до $+80^\circ C$ и минимальными значениями температурного коэффициента индукции [90–92].

В рамках реализации задач по комплексной проблеме *15.2 Эластомерные уплотнительные материалы* созданы герметизирующие материалы и резиновые смеси, не уступающие, а по некоторым показателям превосходящие лучшие мировые аналоги.

Резина марки ВР-38М на основе силоксанового каучука, разработанная в плане импортозамещения, превосходит свой зарубежный аналог – резину SE фирмы General Electric (США), по относительному удлинению в 2 раза, по верхнему температурному пределу работоспособности – на $50^\circ C$ и по коэффициенту морозостойкости по эластическому восстановлению (K_b) – на 10%. Резина марки ВР-38М рекомендуется для изготовления уплотнительных деталей неподвижных соединений, работающих на воздухе. Материал рекомендуется для работы в интервале температур от -60 до $+350^\circ C$ (до $500^\circ C$ – кратковременно). Резина марки ВР-39М на основе фторсилоксанового каучука превосходит термостойкую резину на анало-

гичной основе LS-53U фирмы Dow Corning (США) на 8% по температурному интервалу эксплуатации, на 4% – по условной прочности при растяжении, на 47% – по относительному удлинению при разрыве, на 9% – по сопротивлению раздиру, на 60% – по коэффициенту морозостойкости по эластическому восстановлению. Материал рекомендуется для изготовления уплотнительных деталей неподвижных соединений, работающих на воздухе, в среде топлив и масел в интервале температур от -50 до $+200^\circ C$.

На основе жидких тиоколов, произведенных на ОАО «КЗСК» (г. Казань) по оригинальной технологии, разработаны полисульфидные герметики марок ВГМ-10, ВГМ-11 и ВГМ-12. Данные материалы превосходят соответствующие серийные аналоги (герметики марок У-30МЭС-5М, У-30МЭС-5МА и ВИТЭФ-1) по грибостойкости и обеспечивают (в отличие от аналогов) необходимую для потребителей увеличенную жизнеспособность, длительные сроки хранения компонентов [93, 94].

На основе ленточных герметиков типа ВГМ-Л [94], разработанных в целях импортозамещения, впервые в отечественной практике изготовлены и поставлены заказчику термостойкие (до $180^\circ C$) герметизирующие ленты из герметика марки ВГМ-Л-3 для герметизации крышек люков приборных отсеков и ленты из герметика ВГМ-Л-1 (до $130^\circ C$) для герметизации нерегламентированных зазоров топливных баков изделия Т-50.

Разработан фторсодержащий термоэластопласт марки ВТЭП-3-Л, предназначенный для изготовления уплотнителей, фиксаторов электропроводов, манжет и других деталей пневмо-, вакуум- и гидросистем на рабочие температуры от -60 до $+120^\circ C$ и соответствующий свойствам и возможностям применения зарубежного аналога – термоэластопласта марки «Ритефлекс 425» (Германия) [95, 96].

В рамках реализации задач по комплексной проблеме *15.3 Функциональные материалы и покрытия для защиты от ЭМИ, акустических и электрических воздействий* разработан комплекс методик по оценке акустических характеристик материалов в частотных диапазонах от 50 до 15000 Гц, по прогнозированию шумопоглощающих свойств материалов, звукопоглощающих конструкций и по математическому моделированию радишумопоглощающих материалов. Созданы звукопоглощающие материалы, предназначенные для применения в различных отраслях промышленности [97].

При разработке конструкционных радиопоглощающих материалов (ВРМ-10, ВРМ-11, ВРМ-12) и материалов для безэховых камер (типа ВРБ и ВРМ-13) во ФГУП «ВИАМ» используют компьютерные методы моделирования структуры и свойств. В области функциональных материалов и покрытий для защиты от ЭМИ, акустических и электрических воздействий разработан конструк-

ционный радиопоглощающий материал (КРПМ) в виде монолитного стеклопластика радиотехнического назначения с высокими прочностными характеристиками, коэффициентом отражения не выше -10 дБ в рабочем диапазоне длин волн, с максимальной длиной волны – не менее десятикратной толщины материала [98].

Разработан и внедрен в производство высокоэффективный радиопоглощающий пожаробезопасный материал типа ВРБ на основе неорганического волокна, предназначенный для обеспечения снижения радиолокационного отражения в интервале частот от 150 МГц до 40 ГГц при углах падения электромагнитной волны от 0 до 75 град. Материал типа ВРБ используют при оборудовании безэховых камер [99]. В институте организовано малотоннажное производство мощностью до 2000 м²/год, на котором реализуется вся технологическая цепочка – от изготовления радиопоглощающего компонента до выпуска готового материала и проведения контроля радиотехнических параметров.

В рамках реализации задач по комплексной проблеме 15.4 *Оптические материалы и материалы остекления* ФГУП «ВИАМ» совместно с ФГУП «НИИ полимеров им. В.А. Каргина» (г. Дзержинск) созданы новые высококачественные полиметилметакрилатные органические стекла частично сшитой структуры марок СО-120С, АО-120С, СО-120СМ, АО-120СМ с рабочей температурой при перепаде по толщине оргстекла до 160°С и сополимерные оргстекла частично сшитой структуры марок ВОС-1, ВОС-2 и ВОС-2АО с рабочей температурой при перепаде по толщине оргстекла до 200°С [100].

Институтом разработаны технологии ориентации, формования, изготовления деталей остекления на основе новых оргстекол. Основными преимуществами новых органических стекол частично сшитой структуры перед серийными оргстеклами линейного строения являются повышенная температура эксплуатации, более высокая «серебростойкость» в исходном состоянии, при воздействии механических нагрузок и при воздействии на поверхность агрессивных растворителей, в том числе ацетона [101].

Промышленный выпуск по лицензионному договору с ФГУП «ВИАМ» разработанных оргстекол освоен опытным заводом ФГУП «НИИ полимеров им. В.А. Каргина» и ООО «РОШИБУС» (г. Дзержинск), которые осуществляют поставки на все самолетные и вертолетные заводы.

С целью защиты материалов от воздействий электромагнитного излучения разработаны составы многофункциональных оптических покрытий и технологии их нанесения на прозрачные материалы для применения в специальном органическом остеклении, в том числе тепло- и радиозащитном [102, 103], электрообогреваемом и электрохромном [104].

В настоящее время имеются разработки слоистых полимерных материалов (в том числе адаптивных) с покрытиями на основе металлических, диэлектрических, полупроводниковых тонких пленок [105, 106] и их комбинаций для повышения тактико-технических характеристик (снижения заметности в оптическом и радиодиапазонах) военной техники.

В рамках реализации задач по комплексной проблеме 16.1 *Полимерные синтактные и пеноматериалы* разработаны трудногорящие полиимидные пенопласты марок ВПП-1 и ВПП-3 [107].

Эластичный пенополиимид ВПП-1 разрабатывался как для замены импортного материала марки «Солиимид» (США), так и вместо снятого с производства теплоизоляционного материала АТМ-1, применяемого в качестве легкой теплоизоляции в изделиях авиационной и космической техники. По комплексу свойств материал ВПП-1 не уступает импортному, а в сравнении с АТМ-1 имеет существенно меньшее влагопоглощение и лучшие характеристики по теплопроводности. Пенополиимид ВПП-1 отвечает нормам АП-25 по горючести, дымовыделению и токсичности. В настоящее время проводится ОКР по созданию теплозвукоизоляции на основе материала ВПП-1.

Жесткий листовой пенополиакрилимид ВПП-3 предназначен для замены сот при изготовлении трех- и многослойных панелей конструкционного и радиотехнического назначения. Данный материал по комплексу физических и физико-механических свойств сопоставим с пенопластом марки «Rohacell» фирмы Evonik, но выгодно отличается от зарубежного материала тем, что по характеристикам пожарной опасности относится к категории самозатухающих.

Во ФГУП «ВИАМ» выполнен большой объем работ по стратегическому направлению №17 *Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия*.

В соответствии с задачами комплексной проблемы 17.2 *Шликерные, газодинамические и комбинированные покрытия для деталей из углеродистых сталей, в том числе высокопрочных*, разработано гальваническое модифицированное покрытие взамен кадмиевого покрытия, обеспечивающее (при толщине от 6 до 12 мкм) защитную способность углеродистых сталей от коррозии более 1000 ч в камере солевого тумана (КСТ). Покрытие термостойкое до 200°С и рекомендуется для применения в контакте с топливом и гидрожидкостями. Способ нанесения этого покрытия защищен патентом [108].

Для защиты от коррозии углеродистых сталей, в том числе высокопрочных, разработано термостойкое шликерное покрытие, не ухудшающее защитную способность при прогреве при 460°С в течение 500 ч. При нанесении покрытия практиче-

ски не происходит насыщение водородом стальной основы, что позволяет наносить его на высокопрочные стали [109, 110]. Толщина покрытия составляет 40–60 мкм, покрытие обладает высокой защитной способностью: более 3000 ч в КСТ и более трех лет в климатической зоне ГЦКИ ВИАМ (г. Геленджик). Покрытие наносится краскораспылителем, может наноситься на деталь без ее демонтажа; имеет хорошую маслостойкость и рекомендовано для защиты валов из стали ВКС-180-ИД двигателя ВК-2500М, предназначенного для модернизации средних вертолетов.

Для защиты легких сплавов от коррозии выполнен комплекс исследований по разработке защитных неметаллических неорганических покрытий, формируемых методом плазменного электролитического оксидирования (ПЭО) магниевых сплавов в силикатно-щелочном электролите [111–113]. Формируемые покрытия обладают высокими защитными свойствами: первые очаги коррозии на образцах появляются только после 240 ч экспозиции в КСТ, при этом дополнительно ингибитором коррозии покрытие не обрабатывается. Технология рекомендуется для защиты деталей системы управления (качалки, кронштейны, рычаги и т. п.) вертолетов Ми-28МН и Ми-171А2 взамен традиционных неметаллических неорганических покрытий.

В технологии защиты легких сплавов важное значение имеет минимизация или полное исключение из растворов токсичных соединений шестивалентного хрома. Для решения этой задачи по просьбе ОАО «Научно-производственная корпорация «Иркут» разработан процесс наполнения анодно-оксидной пленки [114], формируемой на алюминиевых сплавах, позволяющий в 2 раза снизить температуру наполнения и в 1000 раз уменьшить концентрацию ионов хрома. При этом по защитным свойствам такие покрытия не уступают традиционным анодно-оксидным покрытиям.

В соответствии с задачами комплексной проблемы 17.5 *Теплозащитные материалы и покрытия* разработаны рецептура и технология изготовления теплозащитной шпатлевки ВШ-27Ф-А на основе экологически безопасного фосфорорганического антипирена «Фоспорен 2». По технологическим и физическим свойствам новая шпатлевка не уступает шпатлевке ВШ-27Ф, содержащей токсичный антипирен фосполиол II, снятый с производства.

Перспективным направлением в области приборостроения является создание теплоаккумулирующих материалов (ТАМ), способных поглощать тепловую энергию за счет фазовых переходов (процесс плавления → затвердевания) высокомолекулярных плавких наполнителей, которые используются в системах защиты радиоэлектронного оборудования от перегревов при многократном периодическом тепловом воздействии. Разработанные во ФГУП «ВИАМ» теплоаккумулирующие материалы обеспечивают тепловые режимы

работы (термостатирование) радиоэлектронного оборудования при температурах 50, 80 и 130°C, обладают высоким коэффициентом теплопроводности (не менее 0,30 Вт/м·К), сохраняют исходную форму в течение 1 ч при температуре 170°C [115].

В рамках комплексной проблемы 17.6 *Тканепленочные материалы* разработаны материалы ВРТ-9, ВРТ-10 и ВРТ-11 для надувных авиационных средств спасения.

Тканепленочный материал марки ВРТ-9 с теплоотражающим покрытием для надувной оболочки трапа представляет собой техническую ткань из нитей СВМ с двухсторонним полиуретановым покрытием, с внешней (лицевой) стороны дополнительно имеет теплоотражающее покрытие [116, 117].

В сравнении с применяемым в настоящие время отечественным материалом (арт. 8-238) разработанный материал имеет пониженную массу 1 м², существенно повышенную прочность при разрыве и отвечает требованиям международного стандарта TSO-69с по стойкости к тепловому потоку мощностью 1,7 Вт/см². Материал может эксплуатироваться в интервале температур от -60 до +100°C, по уровню свойств превосходит либо сопоставим с зарубежным аналогом фирмы Air Cruisers Company (США) – материалом арт. М-11849-5.

Пожаробезопасный, токосъемный тканепленочный материал ВРТ-10 для дорожки скольжения представляет собой текстильную основу из синтетических нитей с двухсторонним многослойным антипирированным полиуретановым покрытием. На лицевую сторону материала дополнительно нанесен электропроводящий слой. В качестве текстильной основы использована полиэфирная ткань [118].

В сравнении с применяемым в настоящие время отечественным материалом арт. 51-ЗТ-031 и зарубежным аналогом марки SFO-3305-6 (фирма LAMCOTEC, США) материал марки ВРТ-10 отвечает требованиям TSO-С69с по снятию статического электричества с рабочей поверхности дорожки.

Тканепленочный материал ВРТ-11 с пониженной газопроницаемостью для баллонета представляет собой текстильную основу из лавсана с двухсторонним многослойным полиуретановым покрытием. В сравнении с применяемой в настоящее время прорезиненной баллонной тканью арт. А565 материал имеет меньшую массу и существенно выигрывает по газопроницаемости. Материал может эксплуатироваться в интервале температур от -60 до +80°C [119].

В соответствии с задачами комплексной проблемы 17.7 *Лакокрасочные материалы и покрытия на полимерной основе* разработаны высокоэффективные защитные грунтовочные покрытия, шпатлевки, пасты, составы, в том числе не содержащие токсичных хроматных пигментов, с пони-

женным содержанием летучих органических растворителей, фторполиуретановые глянцевые и матовые эмали ВЭ-69 различных цветов и камуфлирующая матовая эмаль ВЭ-69К. Покрытия обладают высокой атмосферостойкостью, грибоустойкостью и стойкостью к воздействию агрессивных сред. Материалы применяются для окраски внешней поверхности изделия Ил-476 взамен импортных грунтов и эмалей марок FE-103, ERC-5 (фирма PPG, Великобритания), Aerodur HFA 132, HFA 133 (фирма AkzoNobel, Нидерланды) [120, 121].

Для внешней окраски изделий военной техники разработаны атмосферостойкие камуфлирующие эмали ВЭ-76К с температурой эксплуатации 200°C, превосходящие в 1,5–2 раза импортные аналоги по атмосферостойкости, грибоустойкости, стойкости в агрессивных жидкостях. Применение эмалей позволит обеспечить требуемые спектральные характеристики изделий Т-50, МиГ-29, МиГ-31 и Су-30 в УФ, видимой, ИК областях спектра и импортозамещение эмалей Aerodur Finish HF A 132 и HFA 133 (фирма AkzoNobel, Нидерланды).

Для защиты внутренних поверхностей элементов кабины экипажа, панелей приборов из алюминиевых сплавов, стали и ПКМ вертолетов Ми-28, Ка-52 и Ка-62 разработана глубокоматовая износостойкая черная эмаль ВЭ-75 с коэффициентом поглощения более 0,8 и высокими эксплуатационными свойствами. Применение эмали ВЭ-75 позволит заменить покрытия на основе черных эмалей: отечественных ЭП-1143, ПФ-19М, ХВ-16 и зарубежных Aerodur Finish HF A 132, HFA 133, Aerodur 5000 (фирма AkzoNobel, Нидерланды).

С целью защиты внешней и внутренней поверхности кэссон-баков из ПКМ (углепластиков) перспективных самолетов Т-50 и МС-21 разработана бесхроматная грунтовка ВГ-38, превосходящая применяемые покрытия (грунт ЭП-0215) по работоспособности в среде топлива и температуре эксплуатации до 150°C.

Для деталей радиотехнического назначения разработаны грунт-шпатлевка ВШ-20 и эрозионностойкая радиопрозрачная эмаль ВЭ-71, которые применяются не только для окраски обтекателей самолетов, но и мотогондолы нового двигателя ПД-14 [122]. Для защиты лопастей вертолетов, панелей приборов, деталей кабины, печатных плат, элементов бортового радиоэлектронного оборудования и др. созданы и нашли применение влагозащитные, эрозионностойкие, износостойкие, термостойкие, водоразбавляемые пожаробезопасные лакокрасочные покрытия [123, 124].

Одновременно с разработкой рецептур отрабатываются технологии изготовления и нанесения лакокрасочных материалов. За последние годы на базе созданного во ФГУП «ВИАМ» производства изготовлены и поставлены предприятиям отрасли десятки тонн более чем 30 марок эпоксидных,

фторопластовых, кремнийорганических и других лакокрасочных материалов.

Разработан состав и технология получения защитного тонкопленочного покрытия на основе элементоорганических полимеров и бескислородных стеклообразующих соединений и нанесения на истираемые уплотнительные материалы системы Fe–Cr–Al–Y. Покрытие внедрено на предприятии ОАО «Климов» [125].

Разработано комплексное покрытие марки ВЭС-5, обеспечивающее защиту деталей из бериллия от окисления и сублимации токсичных паров оксидов бериллия при рабочей температуре 850°C, снижение окисляемости бериллиевого сплава в 20 раз. Применение комплексной системы защиты позволит осуществить безокислительный нагрев бериллия в интервале температур до 850±20°C в обычных печах вместо печей с контролируемой атмосферой, повысить качество и надежность деталей, обеспечить экологическую безопасность производства, получить экономию металла до 10% [126].

На основе стеклокерамики разработаны полифункциональные защитные технологические покрытия: ЭВТ-108 – для супержаропрочных никелевых сплавов ЭК151, ЭП742, ЭИ698; ЭВТ-113 и ЭВТ-114 – для интерметаллидных сплавов систем Ti–Al, Ti–Al–Nb и Ni–Al–Co. Применение этих покрытий позволило создать и впервые реализовать процесс изотермической штамповки на воздухе без применения дефицитных и дорогостоящих вакуумных камер; повысить КИМ на 30% и стойкость штампового инструмента – в 2–3 раза. Покрытие внедрено на опытно-промышленном производстве ФГУП «ВИАМ» при штамповке дисков из жаропрочных сплавов по заказам предприятий ОАО «Мотор Сич», ОАО «Кадви» и ОАО «ОМКБ» [127].

Особое внимание было уделено реализации стратегического направления *№18 Климатические испытания для обеспечения безопасности и защиты от коррозии, старения и биоповреждений материалов, конструкций и сложных технических систем в природных средах.*

ФГУП «ВИАМ» внес существенный вклад в работу по созданию современных центров климатических испытаний [128]. Решениями НТС ВПК при Правительстве Российской Федерации одобрены предложения института по развитию в стране национальной сети центров климатических испытаний.

Основные исследования и разработки по комплексной проблеме *18.2 Развитие методов климатических испытаний и инструментальных методов исследований* осуществляются в созданном в 2011 году Центре коллективного пользования (ЦКП) «Климатический центр коллективного пользования ФГУП «ВИАМ» по испытаниям материалов, техники и сложных технических систем в природных средах».

По итогам конкурса Минобрнауки России в 2014 году по ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы» ЦКП признан победителем с выделением финансовых средств на выполнение темы: «Комплексное развитие инфраструктуры ЦКП «Климатический центр коллективного пользования ФГУП «ВИАМ» по испытаниям материалов, техники и сложных технических систем в природных средах» для проведения научно-исследовательскими организациями испытаний и исследовательских работ по изучению влияния агрессивных сред, климатических и эксплуатационных факторов на кинетику процессов коррозии, старения, биоповреждения и разрушения конструкционных материалов и функциональных покрытий».

В состав ЦКП входят ГЦКИ ВИАМ и Московский центр климатических испытаний (МЦКИ), расположенный в черте города с промышленной атмосферой, включающий лаборатории «Коррозия и защита металлических материалов», «Исследования неметаллических материалов на климатическую, микробиологическую стойкость и пожаробезопасность», «Металлофизические исследования», «Прочность и надежность материалов воздушного судна», «Исследования теплофизических свойств».

ГЦКИ ВИАМ является единственным в России центром климатических испытаний, аккредитованным Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии, а также Авиарегистром Межгосударственного авиационного комитета. В 2013 году центр был включен в международную сеть Центров климатических испытаний ATLAS.

В ГЦКИ ВИАМ создано 5 совместных лабораторий коррозионных и климатических испытаний с ведущими университетами России: с Мордовским государственным университетом им. Н.П. Огарева, Кубанским государственным университетом, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Крымским федеральным университетом им. Н.И. Вернадского, Самарским государственным аэрокосмическим университетом им. С.П. Королева. В этих лабораториях выполняются исследования коррозии, старения и биоразрушения материалов, механики разрушения металлических материалов и их соединений при статических и динамических нагрузках в условиях воздействия коррозионных сред; климатической стойкости строительных материалов и элементов конструкций, базальтопластиковой строительной арматуры при сочетании климатического воздействия и механических нагрузок, морских испытаний моделей наружного корпуса изделий морской техники в акватории Черного моря. В этих лабораториях осуществляется проведение студенческих научных практик и выполнение дипломных работ.

Для проведения климатических испытаний материалов и конструкций в различных климатических зонах ФГУП «ВИАМ» привлекает ответственных партнеров (ИПТС РАН, ИФТПС СО РАН, ГБС РАН), а также международные организации (Atlas Materials Weathering Test, Российско-Вьетнамский тропический центр ИПЭЭ РАН).

При поддержке Российского научного фонда в межведомственной лаборатории НГТУ им. Р.Е. Алексеева проводятся климатические испытания материалов нового универсального спасательного средства, предназначенного для эвакуации людей с аварийного объекта в случае техногенной или природной катастрофы на шельфовых территориях северных морей.

В июле 2014 года во ФГУП «ВИАМ» открыт новый комплекс ускоренных климатических испытаний, позволяющий проводить испытания при повышенных и пониженных температурах, имитировать сложные циклы и тропический климат.

С использованием новейшего оборудования исследуется устойчивость перспективных ПКМ к воздействию эксплуатационных факторов (удар, вибрация) в сочетании с натурной климатической экспозицией в четырех климатических зонах; с учетом климатических факторов проводятся квалификационные испытания ПКМ для мотогондолы двигателя ПД-14; расширены объемы испытаний на воздействие плесневых грибов на микологических площадках в различных климатических зонах (Звенигород, Москва, Саранск, Сочи).

Примером комплексного подхода к проведению климатических испытаний является определение корреляции между ускоренными и натурными климатическими испытаниями образцов автомобильных сталей с типовыми защитными покрытиями и проверка прогнозных моделей с реальными дорожными испытаниями моделей Lada Granta для ОАО «АвтоВАЗ» в ГЦКИ ВИАМ.

Примерами исследований коррозии, старения и биостойкости материалов, выполненных в последние годы, являются работы сотрудников института [129–144]. Рассмотрены механизмы климатического старения ПКМ, включающие деформацию, доотверждение и пластификацию атмосферной влагой эпоксидных связующих, причины обратимых и необратимых изменений показателей механических свойств при длительном натурном экспонировании, критерии микро- и макроповреждений в поверхностных слоях, роль механических нагрузок, температуры, влажности, солнечной радиации и других факторов, значимо влияющих на старение материалов [129–132].

В обзорной статье [133] рассмотрена значимость факторов, определяющих кинетику коррозионных процессов металлов и сплавов в приморской атмосфере, таких как скорость выпадения хлорид-ионов, продолжительность увлажнения и микробиологическое воздействие. Проведен анализ результатов многолетних измерений скорости

выпадения хлорид-ионов и продолжительности увлажнения поверхности на побережье Черного моря в районе ГЦКИ ВИАМ. Предложена модель зависимости скорости выпадения хлорид-ионов от характеристик ветрового режима. В работах [134–139] обоснована перспективность методов фрактального анализа и микротвердости, 3D микроскопии для выявления ранних стадий старения и коррозии материалов в натуральных климатических условиях. Установлены новые закономерности влагопереноса в ПКМ [138, 139], позволяющие использовать уровни предельного влагонасыщения и коэффициенты диффузии влаги в качестве индикаторов старения этих материалов в натуральных климатических условиях.

Разработан стандарт организации «Метод испытаний образцов трехслойных сотовых конструкций на изгиб после воздействия вибрационных нагрузок и климатических факторов» (СТО 1-595-30-453–2014). Сущность метода заключается в испытании образцов трехслойных сотовых конструкций при натурной экспозиции в условиях различных климатических зон или подвергнутых испытаниям на старение при воздействии искусственных климатических факторов. Новый метод используется при проведении испытаний образцов трехслойных сотовых конструкций с обшивками на основе клеевых препрегов в натуральных климатических условиях Москвы, Геленджика, Сочи и Якутска.

В 2014 году для ОАО «РосНИТИ» завершены натурные и натурно-ускоренные испытания труб с консервационными покрытиями, проанализированы коррозионные разрушения покрытий труб после испытаний, проведено сравнение полученных результатов для выбора наиболее коррозионно-стойкого покрытия.

Совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана выполняются климатические испытания крупногабаритной секции вертикальной колонны из стеклопластика после натурной экспозиции с наложением циклических напряжений, имитирующих ветровые нагрузки.

В ГЦКИ ВИАМ с 2012 года функционирует уникальный автоматизированный стенд, изготовленный по техническому заданию ФГУП «ВИАМ» швейцарской фирмой «Walter+Bay», для циклического нагружения крупногабаритных конструкций на силовом полу в открытых климатических условиях. Стенд позволяет производить циклическое нагружение в открытых климатических условиях и контролировать кинетику деформативности конструкции при многократных нагружениях.

По заявке «ОКБ Сухого» (филиал ОАО «Компания «Сухой») на этом стенде проходят испытания элемента кессона крыла по 10-летней программе ресурсно-климатических испытаний [140]. Реализована нагрузка элемента циклом $R=0,05$ с максимальным усилием $P_{\max}=49$ кН и

частотой 0,008 Гц. За 2013–2014 годы проведено 630 циклов нагружений из запланированных 4200 циклов.

Совместно с ЦНИИ КМ «Прометей» испытаны образцы судостроительных сталей и сварных соединений в морской среде. Выполнены тестовые испытания трубного стенда для определения стойкости материалов судовой арматуры и элементов трубопроводов к контактной коррозии в движущейся морской воде. В акватории Цемесской бухты (г. Новороссийск) изучены коррозия и обрастание модели наружного корпуса изделия морской техники на глубине 15 м. По результатам коррозионных исследований разработаны методические материалы на проведение коррозионно-механических испытаний модельных сварных конструкций и нагруженных образцов судостроительных сталей при постоянном и переменном погружении в морскую воду.

Для ОАО «АвтоВАЗ» выполнены комплексные испытания образцов из стали 08Ю с консервационными покрытиями в условиях умеренно теплого приморского климата. Исследована кинетика коррозии стали ускоренным методом по европейской методике VDA 621-415 и при экспонировании на открытых атмосферных стендах, в том числе с орошением раствором NaCl. Выявленные корреляционные соотношения проверяются с помощью прямых дорожных эксплуатационных испытаний на автомобилях Lada Granta.

По комплексной проблеме *18.4 Развитие способов защиты от биологического поражения материалов, работающих в условиях различных климатических зон*, во ФГУП «ВИАМ» разработаны методики испытаний, необходимые для решения поставленных задач: «Методика применения культур микроорганизмов при испытании неметаллических материалов на грибостойкость» (СТО 1-595-20-441–2014); «Определение эффективности дезинфицирующих средств, применяемых для защиты материалов топливных систем от микробиологического поражения» (ММ 1.595-20-453–2014); «Предотвращение микробиологического поражения топлива ТС-1 и материалов топливных систем» (ТР 1.2.2281–2012); «По уходу в эксплуатации и профилактическому обслуживанию зон авиационной техники, наиболее подверженных микробиологическому поражению» (ТР 1.2.2315–2013). Составлены проекты справочников по химическим соединениям для защиты неметаллических материалов и топлив от микробиологического поражения [132] и по грибостойкости неметаллических материалов, а также атлас микроорганизмов-биодеструкторов.

Выполнены исследования микробиологической стойкости в натуральных условиях четырех климатических зон (умеренно холодной, умеренно континентальной, теплой влажной, имитации влажной тропической), которые позволили получить новые данные по микробиологической стой-

кости материалов, пополнить коллекцию тест-культур микроорганизмов, необходимых для ускоренных испытаний, и получить более достоверные данные по микробиологической стойкости материалов и нефтепродуктов [132, 141–143]. Планируется проведение испытаний материалов в различных климатических зонах на стойкость к воздействию следующих биофакторов: микроорганизмов, термитов, грызунов и морских обрастателей (микроорганизмы, водоросли, беспозвоночные), выполнение исследований по защите от биологического повреждения материалов и нефтепродуктов путем применения экологически безопасных биоцидов и усовершенствование методов испытаний материалов на стойкость к воздействию биофакторов с применением количественных критериев оценки.

Во ФГУП «ВИАМ» созданы благоприятные условия для проведения всесторонних научных исследований по проблеме биологических повреждений, способам их предотвращения, имеются квалифицированные специалисты, используется современное исследовательское и испытательное оборудование в соответствии с требованиями ГОСТ и ISO.

Для реализации задач по комплексной проблеме 18.5 *Испытания в условиях открытого космоса и при воздействии факторов космического пространства* в институте систематически проводятся исследования по диагностике процессов деградации материалов при длительной экспозиции в космическом пространстве на поверхности околоземных орбитальных станций.

В результате проведенных совместно с Роскосмосом комплексных исследований листовых и склеенных образцов из углепластика КМУ-4л без покрытия и с терморегулирующим покрытием ТР-СО-2, экспонированных в течение 12 лет в составе кассеты «Компласт» №10-1 на внешней поверхности функционального грузового блока Международной космической станции (МКС), и на основании полученных ранее результатов исследований эксплуатационной устойчивости ПКМ, экспонированных на космических станциях «Салют» и «Мир», показана высокая стойкость материалов, разработанных во ФГУП «ВИАМ», к длительному воздействию термоциклов, вакуума, солнечной радиации, потоков частиц и других факторов космического пространства.

По заключению ФГУП «ВИАМ» полимерные композиционные материалы, применяемые в наружных элементах конструкции служебного модуля МКС, могут быть допущены к дальнейшей эксплуатации на срок до 20 лет полета. К этим материалам относятся: углепластик в сотовых панелях для микрометеорной защиты рабочего отсека; стеклопластик в наружной панели гермоотсека, выполняющей роль обтекателя на участке выведения на орбиту, а на участке орбитального полета – роль метеороидной защиты; терморегулирующее покрытие ТР-СО-2 на пане-

лях радиаторов системы терморегулирования, размещенных на наружной поверхности гермоотсека; профили из стеклопластика ВПС-7в, предназначенные для крепления наружных панелей радиаторов к корпусу рабочего отсека; термомосты из стеклопластика ВПС-7в на местах крепления наружного оборудования [144–147].

Испытательный центр ФГУП «ВИАМ» – основная база по реализации стратегического направления **№2 *Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль.***

Новейшее оборудование и квалификация персонала Испытательного центра обеспечили выполнение исследовательских работ по комплексной проблеме 2.1 *Фундаментально-ориентированные исследования.*

Исследованы механизмы деформации и разрушения монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов при кратковременном и длительном статическом нагружении [148].

Изучены и исследованы структурные изменения и повреждения монокристаллических рабочих лопаток турбины в процессе ресурсных испытаний авиационного газотурбинного двигателя нового поколения [149].

Результаты выполненных тонких структурных и аналитических исследований показали, что анизотропия упругопластических характеристик жаропрочных никелевых сплавов непременно должна быть основой при конструировании монокристаллических турбинных лопаток [150].

Впервые методами фрактографии с использованием растровой электронной микроскопии и механики разрушения показано, что разрушение конических шестерен редуктора центрального привода газотурбинного двигателя из стали 20Х3МВФ развивается по усталостному механизму в условиях циклического сжатия [151].

При изучении циклической прочности жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях, актуальными являются исследования в области малоциклового усталости (МЦУ) [152]. Испытания на МЦУ проведены в условиях управления деформацией образца, т. е. при жестком цикле нагружения. Проведено исследование параметров упругопластического деформирования в процессе испытаний на МЦУ. Установлено, что при постоянной величине амплитуды деформации цикла происходит значительное изменение уровня напряжений. Оставаясь относительно постоянными в течение $\sim 0,5N_p$ (N_p – число циклов до разрушения), в дальнейшем напряжения растяжения и сжатия непрерывно изменяются. Исследовано влияние асимметрии нагружения при температурах эксплуатационного интервала и определены характеристики МЦУ жаропрочных никелевых сплавов марок ВЖ175, ВКНА-1ВР и ВКНА-25. [153–155]. По результатам исследования выпущен стандарт организации «Методика

испытаний на малоцикловую усталость при «жестком» цикле нагружения жаропрочных сплавов для авиационных ГТД при температурах до 1100°C» (СТО 1-595-33-456–2014).

В совместной лаборатории коррозионных испытаний ФГУП «ВИАМ»–МГТУ им. Н.Э. Баумана выполнены исследования механизмов разрушения двухфазных титановых сплавов в условиях воздействия водного солевого раствора и в морской воде [156]. Методом моделирования условий нагружения образцов двухфазных титановых сплавов при коррозионном воздействии водного солевого раствора воспроизведен хрупкий механизм замедленного разрушения, идентичный эксплуатационному. Установлено, что склонность к замедленному разрушению титановых сплавов коррелирует с характеристиками их коррозионной стойкости, определяемыми методом потенциометрирования поверхности [157].

При статическом нагружении проведено исследование зависимости коэффициента Пуассона от кристаллографической ориентации (КГО) жаропрочных никелевых сплавов с монокристаллической структурой в интервале рабочих температур.

По результатам исследования монокристаллического сплава типа ВЖМ разработана методика испытаний и выпущен стандарт организации «Методика определения коэффициента Пуассона жаропрочных никелевых сплавов с монокристаллической структурой в интервале рабочих температур» (СТО 1-595-33-444–2014).

Для контроля качества продукции металлургических производств разработаны и выпущены комплекты государственных стандартных образцов (ГСО) утвержденных типов состава жаропрочных никелевых сплавов (ЖС32, ВЖМ4, ВКНА-25, ВЖМ4-ВИ, ВКНА-1В-ВИ, ВЖМ5У, ВЖ172, ВЖ175-ИД), алюминиевых сплавов (В96Ц-3п.ч., 1163, АЛ9, 1933, 1370, В-1341, В-1167), алюминийлитиевых сплавов (1420, 1441, 1424, В-1461, В-1469) и титанового сплава (ВТ18У). Применение разработанных стандартных образцов существенно снижает трудоемкость и энергопотребление, а также сокращает время проведения анализа химического состава сплавов и позволяет проводить экспресс-анализ в процессе плавки [158, 159].

Впервые разработан уникальный комплект стандартных образцов по содержанию редкоземельных элементов и вредных примесей в жаропрочных никелевых сплавах типа ВЖМ (ГСО 10492–2014). Комплект состоит из 7 экземпляров стандартных образцов и предназначен для градуировки аналитического спектрального оборудования, такого как оптико-эмиссионные спектрометры, масс-спектрометры с тлеющим разрядом и лазерным пробоотбором и др. Применение данного комплекта позволяет проводить исследование монокристаллических образцов без операции пробоподготовки в смеси кислот.

В целях контроля и исследования химического состава жаропрочных никелевых сплавов разработаны и аттестованы в установленном порядке методики измерений массовой доли элементов методами атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (МИ 1.2.036–2011, МИ 1.2.037–2011, МИ 1.2.038–2011 [160]), оптико-эмиссионной спектроскопии (МИ 1.2.061–2014), рентгенофлуоресцентной спектроскопии (МИ 1.2.015–2010, МИ 1.2.027–2011), масс-спектрометрии (МИ 1.2.052–2011 [161], МИ 1.2.053–2011, МИ 1.2.054–2011, МИ 1.2.060–2014 [162]); для серийных и перспективных алюминиевых сплавов – методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (МИ 1.2.051–2013, МИ 1.2.062–2014, МИ 1.2.064–2014), определения поверхностного и объемного водорода (МИ 1.2.065–2014). Разработаны методики измерений химического состава перспективных титановых сплавов – методом атомно-эмиссионной спектроскопии (МИ 1.2.016–2010, МИ 1.2.046–2012), определения газообразующих примесей (МИ 1.2.050–2013, МИ 1.2.056–2014, МИ 1.2.057–2014). Разработаны и аттестованы также методики измерений массовой доли легирующих элементов в термостабильных магнитотвердых материалах системы РЗМ–Fe–Co–В (МИ 1.2.055–2013 [163]), высокотемпературных естественно-композиционных материалов на основе Nb–Si (МИ 1.2.049–2013). Комплекс разработанных методик позволяет проводить определение содержания легирующих элементов и примесей в диапазонах от долей ppm до 100% с минимальной погрешностью и успешно применяется для аттестации стандартных образцов и определения химического состава новых сплавов.

Разработаны методика оценки пожарной безопасности ПКМ для внешнего контура при распространении пламени по горизонтальной поверхности в условиях теплового потока переменной интенсивности (СТО 1-595-33-444–2014) и методический материал по мультizonальному ультразвуковому иммерсионному исследованию полуфабрикатов деталей ГТД из титановых сплавов (ММ 1.2.154–2014).

Исследованы процессы теплопереноса в теплозащитных конструкциях внешней тепловой защиты космических аппаратов, позволившие определить влияние разноплотных теплоизоляционных материалов и конструкций отражающих экранов на радиационно-кондуктивный комбинированный теплообмен [164–166].

Исследованы процессы теплопереноса при отверждении толстостенных деталей из ПКМ на эпоксидных матрицах с различными углеродными и стеклянными наполнителями, позволившие установить основные требования к условиям нагревания препрега и получить данные по кинетике отверждения и теплопереносу в одно- и двумерных задачах [167, 168].

При разработке методов неразрушающего контроля основное внимание уделяется внедрению импортозамещающих отечественных приборов, аппаратуры и дефектоскопических материалов. Разработана и внедрена на 17 ведущих предприятиях авиационной отрасли производственная инструкция «Неразрушающий контроль металлических изделий рентгеновскими методами» (ПИ 1.2.226–2008). Данная инструкция – основной документ по проведению рентгеновского контроля отливок, сварных и паяных соединений из алюминиевых, магниевых, титановых, железоникелевых, никелевых сплавов и сталей в условиях опытного и серийного производства, а для некоторых объектов – и в условиях эксплуатации авиационной техники. Инструкция предусматривает применение всех современных отечественных материалов и аппаратуры для рентгенографического метода неразрушающего контроля, содержит описание правил перехода на бесплёночные (цифровые) преобразователи рентгеновского излучения, в ней учтены современные требования российских и зарубежных стандартов [169, 170].

С учетом применения отечественных дефектоскопических материалов и аппаратуры разработаны и внедрены технологические рекомендации «Ультразвуковой контроль панелей из углепластика» (ТР 1.2.1942–2009) и «Ультразвуковой контроль конструкций из углепластика с использованием фазированных решеток» (ТР 1.2.2215–2011) для контроля конструкций из углепластика: монолитные панели и панели с выпуклой поверхностью с радиусом кривизны не менее 250 мм; элементы жесткости [171] – стрингеры, ребра; монолитные зоны трехслойных сотовых панелей [172]. Толщина контролируемых изделий – от 2 до 35 мм. Чувствительность контроля эквивалентна выявлению контрольного отражателя $\varnothing 5$ мм, а производительность контроля достигает 40 м²/ч. Применение разработанной методики позволило проводить 100%-ный контроль Т-образных зон панелей из ПКМ с подкрепленными к ней стрингерами (ребрами) с высокой степенью достоверности результатов, что ранее при контроле традиционными методами было невозможно или неэффективно [173].

Разработан руководящий технический материал РТМ 1.2А.020–2011 «Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод контроля авиационных деталей», который является руководством по проведению контроля полуфабрикатов, деталей и изделий авиационной техники из ферромагнитных материалов магнитопорошковым методом неразрушающего контроля, а также содержит описание технологических процессов, дефектоскопических материалов и оборудования, применяемого при магнитопорошковом контроле деталей и изделий из ферромагнитных материалов.

Данный руководящий материал – основной документ при проведении магнитопорошкового контроля деталей и изделий, внедрен на ведущих предприятиях авиационной и машиностроительной отраслей (ОАО «Климов», ОАО «Роствертол», ОАО «Камов», ОАО «Гидроагрегат», ОАО «КВЗ», ОАО «ПМЗ» и др.).

По комплексной проблеме 2.2 *Квалификация и исследование материалов* Испытательный центр ФГУП «ВИАМ» в рамках специальной квалификации материалов авиационного двигателя ПД-14 проводит исследования характеристик конструкционной прочности сплавов марок ЭИ698-ВД, ВТ6, ЭП718-ИД, ВЖЛ14-ВИ, ВЖЛ12У, ВЖ175-ИД, ВЖМ4-ВИ, ВТ25У, ВТ8-1, ВКС-170-ИД, ЖС6У-ВИ и других. Суммарно по всем видам испытаний для проведения первого этапа специальной квалификации материалов двигателя ПД-14 (с учетом образцов с технологическими особенностями изготовления деталей) требуется испытать порядка 23500 образцов 23 материалов на 44 видах заготовок [4].

Заключение

В ходе реализации первого этапа «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» достигнуты следующие практические результаты инновационной научно-технической деятельности ФГУП «ВИАМ» за 2012–2014 гг.

1. Разработано для авиационно-космической и других отраслей промышленности 84 марки новых материалов, изготавливаемых из отечественных исходных компонентов.
2. Создано 437 технологических процессов нового поколения для переработки материалов и изготовления из них полуфабрикатов, деталей и изделий.
3. Разработано и выпущено 555 технических условий и технологических инструкций на производство и переработку материалов, имеющих литеру О₁; а также методики по оценке качества и свойств материалов и другая нормативная документация.
4. Приобретено и сдано в эксплуатацию 206 единиц технологического оборудования и 110 единиц оборудования для научных исследований и испытаний материалов.
5. Создано 21 высокотехнологичное малотоннажное наукоемкое производство по выпуску 210 наименований материалов и полуфабрикатов (<http://catalog.viam.ru/>).
6. Получено 88 патентов Российской Федерации и оформлено 544 технологических секрета производства (ноу-хау).
7. В собственном производстве института реализовано 147 патентов.
8. Заключено 600 лицензионных договоров со 131 российским предприятием о передаче прав по 62 техническим решениям, защищенным патентами, и по 191 технологическому секрету производства (ноу-хау).
9. Увеличены по сравнению с 2011 годом:

– объем выпускаемой научно-технической продукции на 52,1% – до 5,21 млрд рублей;
– балансовая прибыль – со 101,7 до 480 млн рублей;
– суммарно общие платежи по налогам и сборам – с 621,8 до 994 млн рублей.

10. В настоящее время на предприятиях авиационно-космической и других отраслей промышленности осуществляется освоение и промышленное внедрение более 160 конструкционных и функциональных материалов.

Применение цифровых технологий с реализацией принципа единства «материал–технология–конструкция» в инновационных разработках ФГУП «ВИАМ» по металлопорошковым композициям и аддитивным технологиям, получению неразъемных соединений из легких сплавов, новому поколению связующих и композиционных материалов на их основе, созданию высокотехнологичного автоматизированного оборудования и др. позволяют повысить производительность труда, качество и конкурентоспособность серийно выпускаемых и создаваемых изделий новой техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения //Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. №3. С. 47–54.
3. Иноземцев А.А. Двигатель ПД-14 – будущее российского авиапрома //Инновации. 2013. №12. С. 77–80.
4. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» //ИБ «Пермские авиационные двигатели». 2014. №31. С. 43–47.
5. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 36–52.
6. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Высокотемпературные интерметаллидные сплавы для деталей ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 26–31.
7. Ночовная Н.А., Иванов В.И., Алексеев Е.Б., Кочетков А.С. Пути оптимизации эксплуатационных свойств сплавов на основе интерметаллидов титана //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 196–206.
8. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 52–57.
9. Кашапов О.С., Новак А.В., Ночовная Н.А., Павлова Т.В. Состояние, проблемы и перспективы создания жаропрочных титановых сплавов для деталей ГТД //Труды ВИАМ. 2013. №3. Ст. 02 (viam-works.ru).
10. Маркова Е.С., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б., Громов В.И. Мартенситостареющие стали – новые перспективные материалы для валов ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 81–84.
11. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С., Севастьянов В.Г. Высокотемпературные конструкционные композиционные материалы на основе стекла и керамики для перспективных изделий авиационной техники //Стекло и керамика. 2012. №4. С. 7–11.
12. Неруш С.В., Евгенов А.Г., Ермолаев А.С., Роголев А.М. Исследование мелкодисперсного металлического порошка жаропрочного сплава на никелевой основе для лазерной LMD наплавки //Вопросы материаловедения. 2013. №4 (76). С. 98–107.
13. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбин высокого давления перспективных ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 60–70.
14. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД //Металлы. 2012. №1. С. 5–13.
15. Алексеев Е.Б., Ночовная Н.А., Скворцова С.В., Панин П.В., Умарова О.З. Определение технологических параметров деформации опытного жаропрочного сплава на основе интерметаллида Ti_2AlNb //Титан. 2014. №2. С. 36–41.
16. Ночовная Н.А., Скворцова С.В., Анищук Д.С., Алексеев Е.Б., Панин П.В., Умарова О.З. Отработка технологии опытного жаропрочного сплава на основе интерметаллида Ti_2AlNb //Титан. 2013. №4. С. 24–29.
17. Ночовная Н.А., Панин П.В., Кочетков А.С., Бокков К.А. Современные жаропрочные сплавы на основе гамма-алюминидов титана: перспективы разработки и применения //МиТОМ. 2014. №7. С. 23–27.
18. Алексеев Е.Б., Ночовная Н.А., Панин П.В. Исследование структуры и фазового состава опытного жаропрочного сплава на основе интерметаллида Ti_2AlNb в деформированном состоянии //Титан. 2014. №4. С. 12–17.
19. Алексеев Е.Б., Ночовная Н.А., Скворцова С.В., Грушин И.А., Агаркова Е.О. Влияние термической обработки на структурно-фазовый состав и механические свойства титанового сплава на основе ортофазы //Титан. 2014. №4. С. 34–38.
20. Соколов И.И., Раскутин А.Е. Углепластики и стеклопластики нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 09 (viam-works.ru).
21. Тимошков П.Н., Коган Д.И. Современные технологии производства полимерных композиционных материалов нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 07 (viam-works.ru).

22. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 157–167.
23. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г. Слоистые алюмокомпозиты СИАЛ-1441 и сотрудничество с «Airbus» и «TU Delft» //Цветные металлы. 2013. №9. С. 50–53.
24. Яковлев А.Л., Ночовная Н.А. Влияние термической обработки на свойства листов из высокопрочного титанового сплава ВТ23М //Авиационные материалы и технологии. 2013. №4. С. 8–13.
25. Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Оглодков М.С., Клочкова Ю.Ю. Высокопрочные сплавы системы Al–Cu–Li с повышенной вязкостью разрушения для самолетных конструкций //Цветные металлы. 2013. №9. С. 66–71.
26. Вахромов Р.О., Ткаченко Е.А., Попова О.И., Милевская Т.В. Обобщение опыта применения и оптимизация технологии изготовления полуфабрикатов из высокопрочного алюминиевого сплава 1933 для силовых конструкций современной авиационной техники //Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 34–39.
27. Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Филатов А.А., Бурханова А.А., Попова Ю.А. Эффективность применения титанового сплава ВТ23 в новых изделиях «ОКБ Сухого» //Титан. 2013. №2 (40). С. 39–42.
28. Фролов А.В., Мухина И.Ю., Дуонова В.А., Уридия З.П. Влияние технологических параметров плавки на структуру и свойства новых магниевых сплавов //Металлургия машиностроения. 2014. №2. С. 26–29.
29. Волкова Е.Ф., Рохлин Л.Л., Бецофен С.Я., Акинина М.В. Исследование влияния РЗЭ иттриевой и цериевой подгрупп на свойства магниевых сплавов //Технология легких сплавов. 2014. №2. С. 42–47.
30. Корнышева И.С., Волкова Е.Ф., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю. Перспективы применения магниевых и литейных алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 212–222.
31. Бабин А.Н. Связующие для полимерных композиционных материалов нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 11 (viam-works.ru).
32. Гращенко Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 231–242.
33. Панина Н.Н., Ким М.А., Гуревич Я.М., Григорьев М.М., Чурсова Л.В., Бабин А.Н. Связующие для безавтоклавного формования изделий из полимерных композиционных материалов //Клеи. Герметики. Технологии. 2013. №10. С. 18–27.
34. Чурсова Л.В., Ким М.А., Панина Н.Н., Швецов Е.П. Наномодифицированное эпоксидное связующее для строительной индустрии //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 40–47.
35. Чурсова Л.В., Раскутин А.Е., Гуревич Я.М., Панина Н.Н. Связующее холодного отверждения для строительной индустрии //Клеи. Герметики. Технологии. 2012. №5. С. 40–44.
36. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Ким М.А., Бабин А.Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 260–265.
37. Чурсова Л.В., Душин М.И., Коган Д.И., Панина Н.Н., Ким М.А., Гуревич Я.М., Платонов А.А. Пленочные связующие для RFI-технологии //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. Материалы для авиакосмической техники. С. 63–67.
38. Застрогина О.Б., Швецов Н.И., Постнов В.И., Серкова Е.А. Фенолформальдегидные связующие нового поколения для материалов интерьера //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 265–272.
39. Лукина Н.Ф., Шарова И.А., Шуклина О.В., Чурсова Л.В. Новые разработки в области клеев авиационного назначения //Все материалы. Энциклопедический словарь. 2013. №2. С. 9–13.
40. Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е. Клеевые препреги – перспективные материалы для деталей и агрегатов из ПКМ //Композиты 21 век. 2013. №10 (23). С. 24–27.
41. Гуляев И.Н., Власенко Ф.С., Зеленина И.В., Раскутин А.Е. Направления развития термостойких углепластиков на основе полиимидных и гетероциклических полимеров //Труды ВИАМ. 2014. №1. Ст. 04 (viam-works.ru).
42. Деев И.С., Каблов Е.Н., Кобец Л.П., Чурсова Л.В. Исследование методом сканирующей электронной микроскопии деформации микрофазовой структуры полимерных матриц при механическом нагружении //Труды ВИАМ. 2014. №7. Ст. 06 (viam-works.ru).
43. Хрульков А.В., Душин М.И., Попов Ю.О., Коган Д.И. Исследования и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формования ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 292–301.
44. Душин М.И., Хрульков А.В., Платонов А.А., Ахмадиева К.Р. Безавтоклавное формование углепластиков на основе препрегов, полученных по растворной технологии //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 43–48.
45. Раскутин А.Е., Гончаров В.А. Компьютерное моделирование технологического процесса изготовления ПКМ методом вакуумной инфузии //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 286–291.
46. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Раскутин А.Е., Гуняева А.Г. Молниестойкость современных полимерных композитов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 36–42.
47. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Комарова О.А., Гуняева А.Г. Конструкционные углепластики, модифицированные наночастицами //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 277–286.
48. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов //Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8. №3–4. С. 24–42.

49. Железина Г.Ф., Шульдешова П.М. Конструкционные органопластики на основе пленочных клеев //Клеи. Герметики. Технологии. 2014. №2. С. 9–14.
50. Шульдешова П.М., Железина Г.Ф. Влияние атмосферных условий и запыленности среды на свойства конструкционных органопластиков //Авиационные материалы и технологии. 2014. №1. С. 64–68.
51. Железина Г.Ф. Конструкционные и функциональные органопластики нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4. Ст. 06 (viam-works.ru).
52. Железина Г.Ф. Особенности разрушения органопластиков при ударных воздействиях //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 272–277.
53. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Орлова Л.Г., Войнов С.И. Баллистически стойкие арамидные слоистотканые композиты для авиационных конструкций //Все материалы. Энциклопедический справочник. Композиционные материалы. 2012. №12. С. 23–26.
54. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Стеклопластики в конструкциях авиационной и ракетной техники //Стекло и керамика. 2012. №4. С. 36–42.
55. Вешкин Е.А., Постнов В.И., Застрогина О.Б., Сатдинов Р.А. Технология ускоренного формования трехслойных сотовых панелей интерьера самолета //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Механика и машиностроение. 2013. Т. 15. №4. С. 799–805.
56. Полимерная композиция: пат. №2471830 Рос. Федерация; опубл. 10.01.2013.
57. Соколов И.И., Коган Д.И., Раскутин А.Е., Бабин А.Н., Филатов А.А., Морозов Б.Б. Многослойные конструкции со сферопластиками //Конструкции из композиционных материалов. 2014. №1. С. 37–42.
58. Солнцев Ст.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А. Высокотемпературные стеклокерамические покрытия и композиционные материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 359–368.
59. Щеголева Н.Е., Гращенков Д.В., Ваганова М.Л., Солнцев С.С. Перспективный стеклокерамический композиционный материал //Техника и технология силикатов. 2014. Т. 21. №1. С. 6–11.
60. Способ получения волокна на основе ZrO_2 и SiO_2 : пат. №2530033 Рос. Федерация; опубл. 10.10.2014.
61. Зимичев А.М., Соловьева Е.П. Волокно диоксида циркония для высокотемпературного применения (обзор) //Авиационные материалы и технологии. 2014. №3. С. 55–61.
62. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Ефимочкин И.Ю. Высокотемпературные Nb–Si-композиты //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 164–173.
63. Мурашева В.В., Щетанов Б.В., Севостьянов Н.В., Ефимочкин И.Ю. Высокотемпературные Mo–Si композиционные материалы //Конструкции из композиционных материалов. 2014. №2 (134). С. 24–35.
64. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Гращенков Д.В., Шавнев А.А., Няфкин А.Н. Металломатричные композиционные материалы на основе Al–SiC //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 373–380.
65. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Щетанов Б.В., Шавнев А.А., Няфкин А.Н., Вдовин С.М., Нищев К.Н., Чибиркин В.В., Елисеев В.В., Эмих Л.А. Металлические композиционные материалы на основе Al–SiC для силовой электроники //Механика композиционных материалов и конструкций. 2012. Т. 2. №3. С. 359–368.
66. Покровская Н.Г., Маркова Е.С., Шалькевич А.Б. Высокопрочные конструкционные мартенситостареющие стали в авиастроении //Авиационная промышленность. 2014. №1. С. 24–28.
67. Маркова Е.С., Якушева Н.А., Покровская Н.Г., Шалькевич А.Б. Технологические особенности производства мартенситостареющей стали ВКС-180 //Труды ВИАМ. 2013. №7. Ст. 01 (viam-works.ru).
68. Вознесенская Н.М., Елисеев Э.А., Капитаненко Д.В., Тоньшева О.А. Оптимизация технологических режимов получения тонких листов и ленты из коррозионностойкой стали ВНС-9-Ш //Металлы. 2014. №1. С. 46–51.
69. Шалькевич А.Б., Вознесенская Н.М., Покровская Н.Г., Маркова Е.С. Высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для самолетов нового поколения /В кн. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 142–150.
70. Громов В.И., Курпякова Н.А., Седов О.В., Коробова Е.Н. Вакуумная и ионно-плазменная химикотермическая обработка ответственных деталей газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 147–156.
71. Мигунов В.П., Фарафонов Д.П., Деговец М.Л., Ступина Т.И. Уплотнительные материалы для проточного тракта ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 94–97.
72. Фарафонов Д.П., Деговец М.Л., Серов М.М. Исследование свойств и технологических параметров получения металлических волокон для истираемых уплотнительных материалов авиационных ГТД //Труды ВИАМ. 2014. №7. Ст. 02 (viam-works.ru).
73. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий //Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).
74. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения //Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.
75. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е., Горюнов А.В. Современные технологии получения прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 97–105.
76. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Мин П.Г. Опыт переработки в условиях ФГУП «ВИАМ» литейных отходов жаропрочных сплавов, образующихся на моторостроительных и ремонтных заводах //Металлург. 2014. №1. С. 86–90.

77. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокожаропрочные деформируемые никелевые сплавы для перспективных газотурбинных двигателей и газотурбинных установок //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 98–103.
78. Кабанов И.В., Ильинский А.И., Топилина Т.А., Сидорова Т.Н., Щербаков А.И., Мазалов И.С. Перспективные способы выплавки высокожаропрочного сплава на Ni–Co–Cr основе с высоким содержанием ниобия и циркония методами ИД и ИШ //Бюллетень «Черная металлургия». 2012. №8. С. 28–32.
79. Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Данилов Д.В., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО „Сатурн”» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 6–8.
80. Ломберг Б.С., Мазалов И.С., Быков Ю.Г., Докашев В.В. Особенности технологии изготовления сварных кольцевых конструкций из нового высокопрочного сплава ВЖ172 //Сварочное производство. 2014. №2. С. 8–13.
81. Лукин В.И., Оспенникова О.Г., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д. Сварка алюминиевых сплавов в авиакосмической промышленности //Сварка и диагностика. 2013. №2. С. 47–52.
82. Лукин В.И., Иода Е.Н., Базескин А.В. и др. Повышение надежности сварных соединений из высокопрочного алюминиево-литиевого сплава В-1461 //Сварочное производство. 2010. №11. С. 14–17.
83. Лукин В.И., Иода Е.Н., Базескин А.В. и др. Особенности формирования сварного соединения при сварке трением с перемешиванием алюминиевого сплава В-1469 //Сварочное производство. 2012. №6. С. 30–36.
84. Лукин В.И., Овчинников В.В., Егоров Р.В., Магнитов В.С. Особенности структуры и свойств сварных соединений алюминиевого сплава В-1469, выполненных электронно-лучевой сваркой //Сварка и диагностика. 2011. №3. С. 22–27.
85. Лукин В.И., Ковальчук В.Г., Голев Е.В., Мазалов И.С., Овченкова И.И. Сварка жаропрочного никелевого сплава ВЖ171, упрочненного азотированием //Сварочное производство. 2012. №11. С. 30–35.
86. Быков Ю.Г., Овсепян С.В., Мазалов И.С., Ромашов А.С. Применение нового жаропрочного сплава ВЖ171 в конструкции перспективного двигателя //Вестник двигателестроения. 2012. №2. С. 246–249.
87. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Сварка и пайка в авиакосмической промышленности /В сб. материалов Всероссийской науч.-практич. конф. «Сварка и пайка». Якутск. 2012. Т. 1. С. 21–30.
88. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Исследование мелкодисперсных порошков припоев для диффузионной вакуумной пайки, полученных методом атомизации расплава //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 79–87.
89. Рыльников В.С., Лукин В.И., Базылева О.А., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Технология пайки и термической обработки паяных соединений жаропрочных деформируемого (ЭП975) и литейного монокристаллического интерметаллидного (ВКНА-4У) сплавов //Сварочное производство. 2014. №6. С. 15–18.
90. Каблов Е.Н., Валеев Р.А., Пискорский В.П., Бузенков А.В. Особенности спекания материалов Pr–Dy–Fe–Co–B //Металлы. 2014. №3. С. 69–75.
91. Каблов Е.Н., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Оспенникова О.Г. и др. Кольцевые магниты с радиальной текстурой для навигационных приборов //Новости материаловедения. Наука и техника. 2014. №2. Ст. 1 (materialsnews.ru).
92. Каблов Е.Н., Пискорский В.П., Валеев Р.А. Материалы системы Pr–Dy–Fe–Co–B для навигационных приборов //Металлы. 2014. №4. С. 49–52.
93. Зайцева Е.И., Смирнов Д.Н. Адгезионные и физико-механические свойства полисульфидных герметиков при использовании марковского активного диоксида марганца //Клеи. Герметики. Технологии. 2014. №6. С. 6–11.
94. Зайцева Е.И., Чурсова Л.В., Смирнов Д.Н. Перспективы снижения плотности полисульфидных герметиков //Клеи. Герметики. Технологии. 2012. №5. С. 10–14.
95. Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я., Перфилова Д.Н., Грязнов В.И. Фторсодержащие термоэластопласты с повышенной стойкостью к горючесмазочным материалам //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2013. №12. С. 26–31.
96. Грязнов В.И., Петрова Г.Н., Юрков Г.Ю., Бузник В.М. Смесевые термоэластопласты со специальными свойствами //Авиационные материалы и технологии. 2014. №1. С. 25–29.
97. Образцова Е.П., Краев И.Д., Шульдешов Е.М., Юрков Г.Ю. Гибридные функциональные материалы, сочетающие в себе звукопоглощающие и радиопоглощающие свойства //Материаловедение (в печати).
98. Агафонова А.С., Беляев А.А., Кондрашов Э.К., Романов А.М. Особенности формирования монолитных конструкционных радиопоглощающих материалов на основе композитов, наполненных резистивным волокном //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 56–59.
99. Беляев А.А., Беспалова Е.Е., Романов А.М. Пожаробезопасные радиопоглощающие материалы для беззювых камер //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 53–55.
100. Мекалина И.В., Богатов В.А., Тригуб Т.С., Сентюрин Е.Г. Авиационные органические стекла //Труды ВИАМ. 2013. №11. Ст. 04 (viam-works.ru).
101. Сентюрин Е.Г., Мекалина И.В., Тригуб Т.С., Климова С.Ф. Модифицированные органические стекла для перспективной авиационной техники //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №2. С. 2–4.
102. Петров А.А., Мекалина И.В., Сентюрин Е.Г., Богатов В.А. Исследование особенностей изготовления деталей остекления из частично шитых органических стекол //Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 32–34.

103. Богатов В.А., Кондрашов С.В., Хохлов Ю.А. Многофункциональные оптические покрытия и материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 343–348.
104. Крынин А.Г., Хохлов Ю.А., Богатов В.А., Кисляков П.П. Прозрачные интерференционные покрытия для функциональных материалов остекления //Труды ВИАМ. 2013. №11. Ст. 05 (viam-works.ru).
105. Кисляков П.П., Хохлов Ю.А., Крынин А.Г., Кондрашов С.В. Получение и применение полимерной пленки с прозрачным электропроводящим покрытием на основе оксида индия, легированного оловом //Труды ВИАМ. 2013. №11. Ст. 06 (viam-works.ru).
106. Хохлов Ю.А., Крынин А.Г., Богатов В.А., Кисляков П.П. Оптические константы тонких пленок оксида индия, легированного оловом, осажденных на полиэтилентерефталатную пленку методом реактивного магнетронного распыления (ближняя инфракрасная область спектра) //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 24–28.
107. Бейдер Э.Я., Петрова Г.Н., Изотова Т.Ф., Гурева Е.В. Композиционные термопластичные материалы и пенополиимиды //Труды ВИАМ. 2013. №11. С. 01 (viam-works.ru).
108. Способ нанесения комбинированного защитного покрытия на стальные детали: пат. №2427671 Рос. Федерация; опубл. 27.08.2011. Бюл. №24.
109. Состав для получения защитного покрытия на стальных деталях: пат. №2480534 Рос. Федерация; опубл. 27.04.2013. Бюл. №12.
110. Способ нанесения защитного покрытия на стальные детали: пат. №2510716 Рос. Федерация; опубл. 10.04.2014. Бюл. №10.
111. Демин С.А., Губенкова О.А., Каримова С.А., Виноградов С.С. Термостойкое композиционное покрытие на основе фосфатов для защиты высокопрочных сталей от коррозии //Сталь. 2013. №6. С. 77–79.
112. Козлов И.А., Каримова С.А. Коррозия магниевых сплавов и современные методы их защиты //Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 15–20.
113. Козлов И.А., Павловская Т.Г., Волков И.А. Влияние поляризуемого тока на свойства плазменного электролитического покрытия для магниевых сплавов системы Mg–Zn–Zr //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 7–12.
114. Раствор для уплотнения анодно-оксидного покрытия алюминиевых сплавов: пат. №2447201 Рос. Федерация; опубл. 10.04.2012. Бюл. №10.
115. Брык Я.А., Сергеев А.В., Елисеев О.А., Меншутин Н.В. Теплоаккумулирующие материалы для космической техники //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №12. С. 11–14.
116. Платонов М.М., Нестерова Т.А., Назаров И.А., Бейдер Э.Я. Пожаробезопасный материал на текстильной основе с полиуретановым покрытием для надувной оболочки спасательного трапа //Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 50–54.
117. Платонов М.М., Назаров И.А., Нестерова Т.А., Бейдер Э.Я. Тканепленочный материал ВРТ-9 для надувной оболочки авиационных спасательных трапов //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 05. (viam-works.ru).
118. Нестерова Т.А., Платонов М.М., Назаров И.А., Гертер Ю.А. Пожаробезопасный тканепленочный материал для дорожки скольжения спасательного трапа //Труды ВИАМ. 2014. №6. Ст. 11 (viam-works.ru).
119. Платонов М.М., Назаров И.А., Нестерова Т.А. Тканепленочные материалы для надувных авиационных средств спасения //Новости материаловедения. Наука и техника. 2013. №2. Ст. 6 (materialsnews.ru).
120. Семенова Л.В., Малова Н.Е., Кузнецова В.А., Пожого А.А. Лакокрасочные материалы и покрытия //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 315–327.
121. Кондрашов Э.К., Козлова А.А., Малова Н.Е. Исследование кинетики отверждения фторполиуретановых эмалей алифатическими полиизоцианатами различных типов //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 48–49.
122. Кузнецова В.А., Кузнецов Г.В. Тенденции развития в области топливостойких лакокрасочных покрытий для защиты топливных кессон-баков летательных аппаратов (обзор) //Труды ВИАМ. 2014. №11. Ст. 08 (viam-works.ru).
123. Кузнецова В.А., Семенова Л.В., Кондрашов Э.К., Лебедева Т.А. Лакокрасочные материалы с пониженным содержанием вредных и токсичных компонентов для окраски агрегатов и конструкций из ПКМ //Труды ВИАМ. 2013. №8. Ст. 05 (viam-works.ru).
124. Нефедов Н.И., Семенова Л.В. Тенденции развития в области конформных покрытий для влагозащиты и электроизоляции плат печатного монтажа и элементов радиоэлектронной аппаратуры //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 50–52.
125. Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Гаврилов С.В. Высокотемпературные покрытия SiC–Si₃N₄–SiO₂ для волокнистых металлических уплотнительных материалов //Стекло и керамика. 2011. №6. С. 27–31.
126. Каблов Е.Н., Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А. Композиционные стеклометаллические покрытия для защиты бериллия при высоких температурах //Стекло и керамика. 2012. №4. С. 12–16.
127. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 129–141.
128. Каблов Е.Н., Кириллов В.Н., Жирнов А.Д., Старцев О.В., Вапиров Ю.М. Центры для климатических испытаний авиационных ПКМ //Авиационная промышленность. 2009. №4. С. 36–46.
129. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения //Деформация и разрушение материалов. 2010. №11. С. 19–26.

130. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. II. Релаксация исходной структурной неравновесности и градиент свойств по толщине //Деформация и разрушение материалов. 2010. №12. С. 40–46.
131. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения //Деформация и разрушение материалов. 2011. №1. С. 34–40.
132. Авиационные материалы: Справочник в 13-ти томах. 7-е изд., перераб. и доп. /Под общ. ред. Е.Н. Каблова. Т. 13. Климатическая и микробиологическая стойкость неметаллических материалов. М.: ВИАМ. 2014. 278 с. (в печати).
133. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Панин С.В. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) //Коррозия: материалы, защита. 2013. №12. С. 6–18.
134. Старцев О.В., Медведев И.М., Поляков В.В., Беляев И.А. Оценка коррозионных поражений алюминиевого сплава методами фрактального анализа и микротвердости //Коррозия: материалы, защита. 2014. №6. С. 43–48.
135. Медведев И.М., Старцев О.В. Исследование сезонной неэквивалентности коррозионной агрессивности атмосферы с использованием микромеханических свойств стали Ст3 //Коррозия: материалы, защита. 2014. №5. С. 1–4.
136. Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С. Диагностика начальной стадии климатического старения ПКМ по изменению коэффициента диффузии влаги //Труды ВИАМ. 2014. №7. Ст. 09 (viam-works.ru).
137. Старцева Л.Т., Панин С.В., Старцев О.В., Кротов А.С. Диффузия влаги в стеклопластики после их климатического старения //Доклады академии наук. 2014. Т. 456. №3. С. 305–309.
138. Старцев О.В., Медведев И.М., Курс М.Г. Твердость как индикатор коррозии алюминиевых сплавов в морских условиях //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 16–19.
139. Ерофеев В.Т., Мышкин А.В., Каблов Е.Н., Старцев О.В., Смирнов В.Ф., Смирнова О.Н. Видовой состав микрофлоры, выделенной с полимерных композитов на основе полиэфиракрилатной смолы в условиях влажного морского климата //Региональная архитектура и строительство. 2014. №2. С. 22–29.
140. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Ерасов В.С., Анчевский И.Э., Ильин В.В., Вальтер Р.С. Стенд для испытания на климатической станции ГКЦИ крупногабаритных конструкций из ПКМ /В сб. докладов IX Международной науч. конф. по гидроавиации «Гидроавиасалон–2012». 2012. С. 122–123.
141. Каблов Е.Н., Полякова А.В., Васильева А.А., Горяшник Ю.С., Кириллов В.Н. Микробиологические испытания авиационных материалов //Авиационная промышленность. 2011. №1. С. 35–40.
142. Кириллов В.Н., Старцев О.В., Ефимов В.А. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути решения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 412–423.
143. Полякова А.В., Кривушина А.А., Горяшник Ю.С., Яковенко Т.В. Испытания на микробиологическую стойкость в условиях теплого и влажного климата //Труды ВИАМ. 2013. №7. Ст. 06 (viam-works.ru).
144. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Деев И.С., Никишин Е.Ф. Свойства полимерных композиционных материалов после воздействия открытого космоса на околоземных орбитах //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №10. С. 2–9 (начало); №11. С. 2–16 (окончание).
145. Старцев О.В., Махоньков А.Ю., Деев И.С., Никишин Е.Ф. Исследование старения углепластика КМУ-4л после 12 лет экспонирования на международной космической станции методом динамического механического анализа. 1. Исходное состояние //Вопросы материаловедения. 2013. №4. С. 61–68.
146. Старцев О.В., Махоньков А.Ю., Деев И.С., Никишин Е.Ф. Исследование старения углепластика КМУ-4л после 12 лет экспонирования на международной космической станции методом динамического механического анализа. 2. Влияние места расположения пластин в многослойных пачках //Вопросы материаловедения. 2013. №4. С. 69–76.
147. Старцев О.В., Курс И.С., Деев И.С., Никишин Е.Ф. Термическое расширение углепластика КМУ-4л после 12 лет экспонирования в условиях открытого космоса //Вопросы материаловедения. 2013. №4. С. 77–85.
148. Орлов М.Р., Оспенникова О.Г., Автаев В.В. Деформация и разрушение монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов при кратковременном и длительном статическом нагружении //Деформация и разрушение материалов. 2014. №3. С. 17–23.
149. Оспенникова О.Г., Орлов М.Р., Колодочкина В.Г., Назаркин Р.М. Структурные изменения и поврежденные монокристаллических рабочих лопаток турбины в процессе ресурсных испытаний авиационного газотурбинного двигателя //Деформация и разрушение материалов. 2014. №8. С. 22–29.
150. Оспенникова О.Г., Орлов М.Р., Автаев В.В. Анизотропия упругопластических характеристик жаропрочных никелевых сплавов – основа конструирования монокристаллических турбинных лопаток //Деформация и разрушение материалов. 2013. №11. С. 12–19.
151. Орлов М.Р., Оспенникова О.Г., Наприенко С.А., Морозова Л.В. Исследование усталостного разрушения конических шестерен редуктора центрального привода газотурбинного двигателя, изготовленных из стали 20Х3МВФ //Деформация и разрушение материалов. 2014. №7. С. 18–26.
152. Беляев М.С., Хвацкий К.К., Горбовец М.А. Сравнительный анализ российского и зарубежных стандартов испытаний на усталость металлов //Труды ВИАМ. 2014. №9. Ст. 11 (viam-works.ru).
153. Горбовец М.А., Базылева О.А., Беляев М.С., Ходинев И.А. Малоцикловая усталость монокристалли-

- ческого интерметаллидного сплава типа ВКНА в условиях «жесткого» нагружения //Металлург. 2014. №8. С. 111–114.
154. Беляев М.С., Терентьев В.Ф., Бакрадзе М.М., Горбовец М.А., Гольдберг М.А. Малоцикловая усталость жаропрочного сплава ВЖ175 в условиях упругопластической деформации //Деформация и разрушение материалов. 2014. №7. С. 27–33.
155. Терентьев В.Ф., Беляев М.С., Бакрадзе М.М., Горбовец М.А., Гольдберг М.А. Разрушение жаропрочного сплава ВЖ175 в условиях жесткого малоциклового нагружения //Труды ВИАМ. 2014. №11. Ст. 12 (viam-works.ru).
156. Орлов М.Р., Наприенко С.А., Лавров А.В. Фрактрографический анализ эксплуатационного разрушения диска компрессора высокого давления из сплава ВТ18У //Титан. 2014. №2. С. 16–21.
157. Орлов М.Р., Пучков Ю.А., Наприенко С.А., Лавров А.В. Исследование эксплуатационного разрушения лопатки вентилятора авиационного газотурбинного двигателя из титанового сплава ВТ3-1 //Титан. 2014. №4 (в печати).
158. Каблов Е.Н., Морозов Г.А., Крутиков В.Н., Муравская Н.П. Аттестация стандартных образцов состава сложнолегированных сплавов с применением эталона //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 9–11.
159. Летов А.Ф., Карачевцев Ф.Н. Разработка стандартных образцов никелевых сплавов /В сб. докладов I Международной науч. конф. «Стандартные образцы в измерениях и технологиях». Екатеринбург: ФГУП «УНИИМ». 2013. Ч. 1. С. 208–211.
160. Дворецков Р.М., Карачевцев Ф.Н., Загвоздкина Т.Н., Механик Е.А. Определение химического состава высоколегированных никелевых сплавов авиационного назначения методом АЭС-ИСП в сочетании с микроволновой пробоподготовкой //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. №9. С. 6–9.
161. Якимович П.В., Алексеев А.В., Мин П.Г. Определение низких содержаний фосфора в жаропрочных никелевых сплавах методом ИСП-МС //Труды ВИАМ. 2014. №10. Ст. 02 (viam-works.ru).
162. Алексеев А.В., Якимович П.В. Определение мышьяка и селена в жаропрочных никелевых сплавах методом ИСП-МС с гидридной генерацией паров //Труды ВИАМ. 2014. №11. Ст. 09 (viam-works.ru).
163. Дворецков Р.М., Карачевцев Ф.Н., Исаченко Я.А., Загвоздкина Т.Н. Определение основных и легирующих элементов в термостабильных магнитных материалах системы РЗМ–Fe–Co–В методом АЭС-ИСП //Труды ВИАМ. 2014. №11. Ст. 10 (viam-works.ru).
164. Просунцов П.В., Майорова И.А., Зуев А.В. Использование моделей комбинированного теплопереноса для анализа температурного состояния элементов тепловой защиты многоразовых космических аппаратов //Тепловые процессы в технике. 2014. №7. С. 317–323.
165. Зуев А.В., Просунцов П.В., Майорова И.А. Расчетно-экспериментальное исследование процессов теплопереноса в высокопористых волокнистых теплоизоляционных материалах //Тепловые процессы в технике. 2014. №9. С. 410–419.
166. Зуев А.В., Просунцов П.В. Модель структуры волокнистых теплоизоляционных материалов для анализа процессов комбинированного теплопереноса //Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87. №6. С. 1319–1329.
167. Дмитриев О.С., Кириллов В.Н., Дмитриев А.О., Зуев А.В. Определение оптимальных режимов отверждения толстостенных изделий из полимерных композитов //Тепловые процессы в технике. 2013. №10. С. 467–475.
168. Валева Е.О., Мараховский П.С., Бухаров С.В., Кириллов В.Н., Мелехина М.И. Исследование влагостойкости конструкционных стеклопластиков при лабораторных тепловлажностных испытаниях //Пластические массы. 2014. №1–2. С. 26–30.
169. Степанов А.В., Косарина Е.И., Саввина Н.А. Сравнение требований рентгеновского контроля и качества рентгенографических снимков в европейских нормах и российских стандартах //Вестник МЭИ. 2011. №4. С. 85–89.
170. Степанов А.В., Усачев В.Е., Косарина Е.И. Рентгеноскопический контроль отливок из сплавов «силумин» //Контроль. Диагностика. 2012. №5. С. 19–23.
171. Бойчук А.С., Генералов А.С., Степанов А.В., Юхачкова О.В. Неразрушающий контроль ПКМ с использованием ультразвуковых фазированных решеток //Промышленные АСУ и контроллеры. 2013. №2. С. 13–16.
172. Бойчук А.С., Степанов А.В., Косарина Е.И., Генералов А.С. Применение технологии ультразвуковых фазированных решеток в неразрушающем контроле деталей и конструкций авиационной техники, изготавливаемых из ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 41–46.
173. Бойчук А.С., Генералов А.С., Далин М.А., Степанов А.В. Неразрушающий контроль технологических нарушений сплошности Т-образной зоны интегральной конструкции из ПКМ с использованием ультразвуковых фазированных решеток //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №10. С. 38–43.