
Глава 4

ФУНДАМЕНТАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, КВАЛИФИКАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ. НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

М.Р. ОРЛОВ

СТРАТЕГИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ЦЕНТРА ФГУП «ВИАМ»

Разработка новых материалов и защитных покрытий требует проведения глубоких системных исследований структурных и фазовых составляющих, тонкой структуры межфазных и межзеренных границ, изучения механизмов деформации матричной и упрочняющих фаз в упругой и упруго-пластической областях нагружения, а также механизмов разрушения на макро- и микроуровнях в условиях, приближенных к эксплуатационным.

Переход к новым классам авиационных материалов – интерметаллидам, композиционным материалам на основе металлов, металлокерамики, керамики, полимеров и металлополимеров – ставит новые задачи по обеспечению чистоты по примесным химическим элементам как в составе разрабатываемых материалов, так и в составе исходных компонентов в производстве.

Развитие нанотехнологий в области авиационного материаловедения требует решения задач по исследованию тонкой структуры материалов и изучению поведения наноструктурных элементов на атомном уровне в процессе технологического цикла производства материалов и деталей, их эксплуатации и утилизации.

Испытательный центр ВИАМ обладает уникальным комплексом аналитического, исследовательского и испытательного оборудования, позволяющим решать перечисленный спектр фундаментально-ориентированных задач.

Испытательный центр ВИАМ аккредитован Авиационным регистром МАК (аттестат ИЛ-060), Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (аттестат № РОСС RU/0001/22НН06), Госкорпорацией «Российская корпорация нанотехнологий» (аттестат № РОСС RU.В503.04НЖ00.77.04.0024), фирмой «Snesta» (Франция, аттестат № FAL 422) и имеет область аккредитации, соответствующую перечисленным основным направлениям деятельности.

Испытательный центр ВИАМ укомплектован специалистами высшей квалификации, которые обеспечивают выполнение фундаментально-ориентированных исследований и испытаний широкого класса

материалов в соответствии с областью аккредитации по следующим видам работ:

- разработка стандартных образцов состава сплавов на различных основах категории ГСО, ОСО, СОП для спектрального анализа, разработка методик химического и спектрального анализа исследуемых материалов;
- исследование химического (элементного) состава, в том числе газообразующих примесей, сплавов на различных основах, включая: никелевые жаропрочные сплавы, стали, тугоплавкие сплавы (на основе Со, W, Мо, Ti, Nb, Ta), титановые, алюминиевые и магниевые сплавы; анализ состава электролитных ванн, шлаков, фритт, неорганических и других материалов; экспресс-анализ примесей в монолитных образцах сплавов на уровнях 0,1–10 ppm для более чем 30 элементов (Bi, Pb, Cd, Zn, Cu, La, Ce, Pr, Tl, As, Sb, Sn, Se, Te, Ag и др.) методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и лазерным пробоотбором;
- фундаментально-ориентированные научно-исследовательские работы, направленные на разработку новых материалов, технологий их производства, на определение локального химического, структурного и фазового состава материалов в процессе производства и эксплуатации деталей и элементов конструкции авиационно-космической техники;
- исследование тонкой структуры конструкционных и функциональных материалов методами просвечивающей и растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализа;
- оценка соответствия нанотехнологий и продукции nanoиндустрии по направлению композиционные наноматериалы, производство и аттестация стандартных образцов состава;
- оценка качества и работоспособности конструкционных, функциональных материалов и защитных покрытий широкого промышленного назначения;
- арбитражные исследования эксплуатационных повреждений и разрушений деталей авиационно-космической техники;
- исследование фазовых превращений и взаимодействий компонентов в материалах, анализ влияния параметров технологических режимов на теплофизические характеристики композита, оптимизация технологического процесса;
- исследование теплопроводности материалов в соответствии с ГОСТ 23630.1–79, ГОСТ 7076–99, ГОСТ 12170–85, ГОСТ 25499–82, ASTM E 1461-92, ASTM C 714-05, ASTM C 1113-9, ASTM C 201-68, МИ 1.2.031–2011, МИ 1.2.032–2011;
- измерение удельной теплоемкости в соответствии с ГОСТ 23630.1–79, ГОСТ 23250–78, ISO 11357, ASTM E 1269, DIN 53545, МИ 1.2.030–2011;
- определение температуропроводности в соответствии с ГОСТ 23630.3–79, ASTM E 1461-92, МИ 1.2.031–2011;
- определение температурного коэффициента линейного расширения в соответствии с ГОСТ 8.018–82, ГОСТ 10978–83, ГОСТ 15173–70, ISO 7991, ASTM E 228-85 (89), DIN 51045-1, МИ 1.2.028–2011, МИ 1.2.029–2011;
- термогравиметрический анализ в соответствии с ГОСТ 24104–2001, ISO 11358, ASTM D 3418, DIN 51006;
- определение электропроводности в соответствии с ГОСТ 20419–75, ASTM A712-07, ASTM E 2039-99;

– построение моделей теплопереноса и моделей физических процессов, разработка вариантов структур, обеспечивающих требуемый уровень свойств;

– прогноз поведения материала в условиях эксплуатации на основании результатов, полученных в экспериментальной установке, т.е. в стандартных условиях при стационарных или квазистационарных тепловых режимах;

– проведение квалификационных испытаний материалов в условиях температурно-силового нагружения, максимально приближенных к условиям эксплуатации, включая:

– определение характеристик упругости и кратковременной прочности при растяжении в соответствии с требованиями ГОСТ Р 1497, ГОСТ Р 9651, ASTM E-8, ASTM E-21 в интервале рабочих температур работы планера и газотурбинного двигателя, в том числе характеристик длительной прочности и ползучести при растяжении в соответствии с требованиями ГОСТ Р 10145, ГОСТ Р 3248, ASTM E-139 в интервале долговечностей до 1000 ч;

– определение характеристик малоциклового усталости (МЦУ) в соответствии с требованиями ГОСТ Р 25.502, ASTM E-606 в интервале рабочих температур при осевом (растяжение–сжатие) «жестком» цикле нагружения (при заданной деформации в цикле) с регистрацией петли гистерезиса до значений $N = 10^5$ циклов и «мягком» цикле нагружения, а также при повторно-переменном кручении до $N = 5 \cdot 10^5$ циклов с построением кривой МЦУ в диапазоне 10^3 – 10^5 циклов;

– определение характеристик многоциклового усталости (МнЦУ) в соответствии с требованиями ГОСТ Р 25.502, ASTM E-466, ASTM E-468 в интервале рабочих температур при осевом (растяжение–сжатие) «мягком» цикле нагружения (при заданном напряжении в цикле) до значений $N = 10^7$ или $N = 2 \cdot 10^7$ циклов с построением кривой МнЦУ;

– определение характеристик трещиностойкости (СРТУ) при малоцикловом нагружении в соответствии с требованиями ОСТ 1.92-127–90, ASTM E-647;

– развитие неразрушающих методов контроля в части разработки методик и технологий неразрушающего контроля деталей и конструкций из металлических, неметаллических и композиционных материалов для рентгеновских, акустических, магнитных, капиллярных, вихретоковых и тепловых методов в сотрудничестве с ведущими производителями оборудования для неразрушающего контроля и предприятиями авиационной отрасли;

– разработка широкого спектра рекомендаций, начиная от разработки узкоспециализированных методик и карт контроля конкретных деталей и конструкций и заканчивая рекомендациями по организации участков НК в производстве;

– экспертный контроль качества небольших партий изделий, разработка стандартных и специализированных образцов для настройки, оценки качества и чувствительности контроля, с соответствующей метрологической аттестацией. Изготовление специальных оправок, датчиков и приборов для НК. Разработка технических требований к аппаратуре и технологиям применения новых приборов и методов НК, в том числе к автоматизированным процессам неразрушающего контроля;

- испытания в сотрудничестве с ведущими производителями оборудования для НК и предприятиями авиационной отрасли нового оборудования и средств неразрушающего контроля, разработка соответствующего технологического и методического обеспечения, а также проведение оценки целесообразности его применения в производстве и эксплуатации авиационной техники, а также в других отраслях;
- исследование пожаробезопасности материалов по основным видам испытаний, таким как:
 - определение горючести согласно требованиям авиационных правил АП-23, 25, 27, 29 п.п. 853(a), 855(d), Приложение F, Часть I;
 - определение тепловыделения при горении (п. 25.853(d)), Приложение F, Часть IV;
 - определение дымообразования (п. 25.853(d)), Приложение F, Часть V, ГОСТ 24632;
 - определение горючести материалов тепловой и акустической изоляции при воздействии теплового потока (п. 25.856(a)), Приложение F, Часть VI;
- климатические испытания для обоснования сроков безопасной эксплуатации авиационно-космической техники и сложных технических систем различного назначения, такие как:
 - натурная экспозиция материалов в различных климатических зонах согласно требованиям ГОСТ;
 - тепловой ресурс в течение заданного времени и при заданной температуре (от 40 до 1100°C), в том числе в топливной среде;
 - тепловлажностные испытания при заданной температуре и влажности, в том числе в камере, имитирующей суточный ход температуры и влажности в условиях тропиков;
 - экспозиция при отрицательных температурах – до -60°C;
 - термоциклирование при заданных температурах;
 - ускоренные испытания в камере светопогоды SUNTEST XXL+, проводимые с целью определения сроков службы в заданных условиях эксплуатации (ГОСТ 9.707, ГОСТ 15150, ГОСТ 15151, ГОСТ 14892, ГОСТ 9.906); подтверждения и продления гарантийных сроков службы материалов и изделий, в том числе военного и специального назначения (ГОСТ РВ 20.57.304, ГОСТ 9.906, РВ 51012); определения теплового ресурса (наработки) при воздействии отдельных климатических факторов (температуры, влажности, перепадов температуры и др.), в том числе при воздействии топлива (ГОСТ Р 51368, ГОСТ Р 51369); определения и подтверждения светостойкости по комплексу параметров внешнего вида при эксплуатации в условиях различных климатических зон (ГОСТ 9.401);
 - микробиологические испытания согласно требованиям нормативных документов: ГОСТ 9.023-91, 9.048-9.053, ГОСТ РВ 20.57.306-98, ИСО/ПМС 7137, ASTM G-21-70, КТ-160D, СТП 1.595-20-355-2001 и др., включая лабораторные испытания образцов материалов на воздухе и в топливной среде; топлив на микробиологическую поражаемость в течение 1 или 3 мес; лабораторные испытания элементов конструкций, узлов и деталей; оценку эффективности антисептических препаратов; исследование состояния и анализ микробиологического поражения материалов, узлов и изделий; дезинфекцию изделий от микробиологического поражения; испытания материалов, узлов и изделий на микробиологическую стойкость в природных условиях теплой влажной зоны.

В настоящее время перед Испытательным центром ВИАМ стоят задачи развития научной, исследовательской и экспериментальной базы по трем комплексным проблемам в рамках направления «Фундаментально-ориентированные исследования, квалификация материалов, неразрушающий контроль» «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ»:

- фундаментально-ориентированные исследования;
- квалификация и исследования материалов;
- методы неразрушающих исследований и контроля.

Для реализации комплексной проблемы «Фундаментально-ориентированные исследования» перед лабораториями Испытательного центра ВИАМ – спектральных, химико-аналитических исследований и эталонных образцов; металлофизических исследований; исследований теплофизических свойств – стоят задачи дальнейшего развития исследовательской и экспериментальной базы и решения следующих комплексных задач:

– разработка новых методов и методик рентгенофлуоресцентного, опико-эмиссионного, масс-спектрометрического, газового и послыйного анализа химического состава перспективных материалов авиационного назначения. Разработка стандартных образцов состава, структуры и свойств перспективных наноструктурированных композиционных материалов и сплавов различного назначения;

– разработка моделей процесса теплопереноса, построение моделей структуры композиционных материалов и расчет теплопереноса в этих структурах, описание тепловых процессов в моделях структуры материалов. Решение методических задач теплофизического эксперимента, разработка методик измерений, отвечающих международному уровню. Создание электронной базы теплофизических свойств композиционных материалов;

– исследования, экспериментальное и теоретическое моделирование, изучение процессов формирования и изменения структуры, механизмов деформации и разрушения металлических, интерметаллидных и полимерных материалов, защитных и функциональных покрытий, в том числе под воздействием различных факторов, таких как температура, статическое и динамическое нагружение, излучение и др.;

– исследование развития процессов обратимых и необратимых изменений в материалах деталей газотурбинных двигателей и планера в процессе эксплуатации, установление механизмов коррозионного и эрозионного повреждения;

– исследование процессов деформации и разрушения перспективных авиакосмических материалов с целью моделирования их структурной стабильности в условиях длительной эксплуатации с применением современных сверхмощных компьютеров;

– разработка базы данных по предельному структурному состоянию жаропрочных материалов, функциональных и защитных покрытий, интерметаллидов, металлокерамических, керамических и полимерных композиционных материалов, определяющих безопасную эксплуатацию авиационной техники;

– разработка методов математического моделирования для прогнозирования изменений структуры и свойств авиакосмических материалов в процессе длительной эксплуатации.

Для реализации комплексной проблемы «Квалификация и исследование материалов» перед лабораториями Испытательного центра ВИАМ – прочности и надежности конструкционных материалов им. проф. С.И. Кишкиной; прочности и надежности материалов авиационных двигателей и силовых энергетических установок им. проф. Н.М. Склярова; лабораторией исследований неметаллических материалов на климатическую, микробиологическую стойкость и пожаробезопасность – стоят задачи дальнейшего оснащения современным испытательным оборудованием и развития методов испытаний, приближенных к условиям температурно-силового нагружения материалов и деталей авиационной техники в условиях эксплуатации:

- развитие инфраструктуры, оснащение испытательным и исследовательским оборудованием, создание компьютерной базы по методикам для проведения всего комплекса квалификационных испытаний в соответствии с требованиями международных и национальных стандартов в интервале температур от -196 до $+1600^{\circ}\text{C}$;

- изучение процессов деформации и разрушения конструкционных материалов для разработки новых методик испытаний с целью получения комплекса расчетных значений физико-механических характеристик и расчетных диаграмм деформирования перспективных авиакосмических материалов в условиях комплексного температурно-силового воздействия (статического и динамического, в том числе с «жестким» циклом нагружения);

- разработка методик испытаний, исследование механики и физики разрушения конструкционных материалов для авиакосмической техники в условиях воздействия коррозионно-активных сред, содержащих влагу, молекулярный и атомарный водород, ионы галогенов. Создание базы данных расчетных характеристик прочности металлических и интерметаллидных авиационных материалов, работающих в условиях различных природных сред;

- разработка электронной базы данных для выпуска справочника-руководства по расчетным значениям характеристик прочности конструкционных материалов для авиакосмической техники (аналог – справочник-руководство MMPDS-02 (Metallic Materials Properties Development and Standardization), выпускаемый в США);

- исследование и разработка лабораторных и полумасштабных методик оценки пожарной безопасности материалов для авиакосмической техники.

Для реализации комплексной проблемы «Методы неразрушающих исследований и контроля» перед лабораторией неразрушающих методов контроля Испытательного центра ВИАМ стоят задачи по оснащению участков ультразвуковой, рентгеновской, капиллярной, магнитопорошковой и вихретоковой дефектоскопии современным оборудованием, развитию методов неразрушающего контроля и решению комплексных задач:

- разработка новых методов исследований, контроля качества и диагностики деталей и конструкций в технологическом цикле производства и эксплуатации, обеспечивающих конкурентоспособный уровень качества и надежности авиационно-космической техники гражданского, военного и специального назначения;

- разработка методов неразрушающего контроля с компьютерной визуализацией результатов и вычислительным восстановлением трехмерной внутренней структуры объектов;

- разработка методологии вероятностной оценки достоверности результатов неразрушающего контроля;
- разработка методов исследования и развития структурных изменений в деталях газотурбинных двигателей и планера в процессе эксплуатации. Математическое моделирование физических процессов неразрушающего контроля;
- разработка методик и единых норм неразрушающего контроля по мере внедрения на предприятиях отрасли новых технологий и средств неразрушающего контроля;
- развитие системы подготовки и сертификации специалистов по неразрушающему контролю авиационной техники.

Решение задач, поставленных в рамках рассмотренных комплексных проблем, позволит оснастить Испытательный центр ФГУП «ВИАМ» современным исследовательским, аналитическим и испытательным оборудованием, обеспечить методологическую базу для проведения фундаментально-ориентированных исследований и квалификационных испытаний разрабатываемых материалов авиационно-космического назначения на современном научно-техническом уровне, соответствующем международным требованиям и стандартам, создать научно-технический задел для разработки перспективных материалов на основе новых классов интерметаллидов, а также композиционных материалов на основе керамики, металлокерамики, металлополимеров и полимерных композиционных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кишкин С.Т.* Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов. Избранные труды к 100-летию со дня рождения. М.: Наука. 2006. 407 с.
2. *Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р.* Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение. 1998. 464 с.
3. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия / Под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд. М.: Наука. 2006. 632 с.

*А.Ф. ЛЕТОВ, Ф.Н. КАРАЧЕВЦЕВ,
Н.В. ГУНДОВИН, В.И. ТИТОВ*

РАЗРАБОТКА СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ СОСТАВА СПЛАВОВ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Возрастающая конкуренция среди производителей сплавов авиационного назначения привела к заметному ужесточению требований, предъявляемых потребителями к качеству этих сплавов. Для обеспечения конкурентоспособности сплавов отечественных производителей необходим высокоэффективный контроль качества сырья и готовой продукции, который проводят аналитические и испытательные лаборатории предприятий и испытательных центров. Измерение содержания элементов в сплавах необходимо осуществлять с применением методик, основанных на различных химических, физико-химических и спектральных методах, предусматривающих градуировку средств измерений с применением стандартных образцов (СО) состава соответствующих материалов.