

РОЛЬ МАТЕРИАЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

© 2023 г. Е. Н. Каблов^{а,*}, В. В. Антипов^{б,**}

^аРоссийская академия наук, Москва, Россия

^бФедеральное государственное унитарное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов” Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*E-mail: enkablov@pran.ru

**E-mail: admin@viam.ru

Поступила в редакцию 08.08.2023 г.

После доработки 18.08.2023 г.

Принята к публикации 28.08.2023 г.

Создание материалов нового поколения, разработка и внедрение импортозамещающих технологий — один из локомотивов технологического развития России в условиях перехода страны к шестому технологическому укладу. С целью формирования опережающего научно-технического задела необходимо на основе неразрывно связанных между собой фундаментальных и поисковых исследований реализовывать базовые принципы материаловедения применительно к сложным техническим системам. При этом многоуровневое математическое моделирование материалов на нано-, микро-, мезо- и макроуровнях должно сочетаться с прикладными и технологическими разработками, а затем их внедрением предприятиями реального сектора экономики. В создании новых материалов (с учётом полного жизненного цикла) и комплексных систем их защиты важна роль цифровых технологий. В статье предложены ключевые научные направления для реализации мероприятий раздела “Специальная химия и материалы” Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период с 2021 по 2030 год.

Ключевые слова: материалы нового поколения, технология, импортозамещение, фундаментальные исследования.

DOI: 10.31857/S0869587323100055, EDN: XLHBR5

В новых геополитических условиях, при беспрецедентном внешнем давлении, санкционной



КАБЛОВ Евгений Николаевич — академик РАН, заместитель президента РАН. АНТИПОВ Владислав Валерьевич — доктор технических наук, заместитель генерального директора по науке НИЦ “Курчатовский институт” — ВИАМ.

блокаде и резком ограничении доступа к передовым зарубежным научным знаниям, технологиям, оборудованию и программному обеспечению Россия столкнулась с необходимостью решения комплекса стратегических, социально-экономических и оборонных задач по импортозамещению иностранной продукции, обеспечению научного и технологического суверенитета и, как результат, вхождению в шестой технологический уклад на основе сугубо собственных технологий и реализации крупных инновационных проектов полного цикла. Эти задачи были сформулированы Президентом Российской Федерации В.В. Путиным на заседании Президиума Государственного Совета, на котором обсуждался вопрос “О развитии промышленности Российской Федерации в условиях санкционного давления”. Без их реализации уже в среднесрочной перспективе Россия может вступить в затяжной экономический и технологический кризис [1].

Особо следует выделить два критически важных направления технологий, которые непосредственным образом влияют на развитие всех сфер промышленности: создание электронной компонентной базы и новых материалов — от выпуска исходных химических компонентов широкой номенклатуры до полуфабрикатов и готовых изделий. Оба эти направления требуют консолидации научного сообщества и воссоздания цепочки — от идеи до внедрения, то есть от глубоких фундаментальных знаний, генерируемых институтами РАН, поисковых и прикладных исследований, проводимых государственными научными центрами и отраслевыми институтами, до воплощения передовых разработок предприятиями реального сектора экономики. Мы остановимся на втором из этих направлений.

Современный уровень материаловедения характеризуется многоуровневым подходом к исследованиям и разработкам: моделирование материала на нано-, микро-, мезо- и макроуровнях, исследование механизмов поведения элементарных образцов с валидацией результатов для элементов конструкций и изделий. Применяются технологии и атомного масштаба, с использованием которых можно собирать элементы систем из отдельных атомов или молекул, в связи с чем требуется разработка новых физических принципов и подходов, новых экспериментальных методов и метрологического обеспечения. Такие исследования невозможны без применения компьютерного конструирования состава материалов и математических моделей их производства. Цифровые технологии служат одной из основ многоуровневого подхода к разработке материалов и технологий нового поколения на базе единой цепочки “материал—технология—конструкция—высокотехнологичное автоматизированное оборудование” [2].

По инициативе ВИАМ в 2011 г. с учётом приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, мировых тенденций в материаловедении, стратегии инновационного развития интегрированных структур были разработаны “Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года”. В подготовке этого документа принимали участие свыше 80 научно-исследовательских и конструкторских организаций, в том числе институты РАН. В декабре 2011 г. он был одобрен научно-техническим советом Военно-промышленной комиссии Российской Федерации, а в 2017 г. актуализирован в соответствии со Стратегией научно-технологического развития Российской Федерации и в марте 2021 г. утверждён тем же научно-техническим советом [3].

В документе заложены базовые принципы создания материалов нового поколения для сложных технических систем, включающие:

- фундаментальные и поисковые исследования с широким применением многоуровневого математического моделирования материалов для подготовки опережающего научно-технического задела;
- “зелёные” технологии при создании материалов и комплексных систем их защиты;
- реализацию полного жизненного цикла с использованием цифровых технологий (создание материала — эксплуатация в конструкции — диагностика, ремонт, продление ресурса — утилизация);
- неразрывность цепочки “материал—технология—конструкция—высокотехнологичное автоматизированное оборудование”.

В настоящее время наибольшее внимание следует уделить таким направлениям, как разработка основ синтеза новых органических, элементоорганических, неорганических и полимерных веществ, что в дальнейшем может позволить российской химической отрасли отказаться от значительной части импортных компонентов; разработка новых ресурсо- и энергосберегающих металлургических и химико-технологических процессов, что будет способствовать повышению конкурентоспособности продукции отечественных металлургического и химического комплексов на мировом рынке; аддитивные технологии, играющие ключевую роль в совершенствовании технологического процесса изготовления деталей сложных технических систем.

Аддитивные технологии, которые с полным основанием можно отнести к технологиям XXI века, позволяют с минимальными затратами посредством прямого синтеза (добавления) материала создавать детали высокого качества, которые невозможно изготовить с применением традиционных, “вычитающих” технологий: литьём, механической обработкой и т.д. Аддитивные технологии имеют огромный потенциал возможностей снижения энергетических затрат при создании разнообразных видов продукции. Сегодня уже очевидно, что показатель интенсивности использования таких передовых технологий может служить одним из индикаторов индустриального и инновационного развития страны [4, 5].

Важнейшее направление технологического развития — создание полимерных композиционных материалов (ПКМ) нового поколения. Для этого необходимы новые высокопрочные высококомодульные наполнители, в первую очередь углеродное волокно. Следует отметить, что в настоящее время в России отсутствуют не только производство среднемодульных углеродных волокон, аналогичных по свойствам высококачественному, лёгкому и прочному, устойчивому к коррозии и усталости композиту Т-800, но и мощности полного цикла производства полиакрилонитрилового волокна, качество которого опре-

деляет свойства углеродных волокон. При этом развитие отрасли ПКМ напрямую зависит от достижений химической отрасли. Крайне необходимо создать компоненты полимерных матриц — олигомеров, каталитических систем, отвечающих высоким требованиям не только по свойствам, но и по экологичности получения. В современных условиях технологический прорыв связан прежде всего с интенсивной разработкой и широким применением принципов “зелёной” химии и молекулярного дизайна, созданием технологий атомно-молекулярного конструирования при получении новых соединений.

НИЦ “Курчатовский институт” — ВИАМ¹, являясь ведущей организацией в России по разработке и общей квалификации материалов нового поколения и технологий их переработки для авиационного двигателестроения, реализует такой комплексный подход, выполняя, в том числе по заданию предприятий АО “Объединённая двигателестроительная корпорация”, ключевые НИОКР, направленные на создание конструкционных высокотемпературных металлических, интерметаллидных, полимерных композиционных, керамических, функциональных материалов нового поколения и технологий их изготовления для перспективных и модернизируемых авиационных двигателей гражданского и двойного назначения: ПД-8, ПД-14, ПД-35, ВК-650В, ВК-1600В, ТВ7-117СТ. В этой связи напомним, что в июне 2008 г. по инициативе Министерства промышленности и торговли РФ, АО “ОДК-Авиадвигатель” и ВИАМ Председателем Правительства Российской Федерации В.В. Путиным было принято решение о создании семейства газотурбинных двигателей гражданской авиации на базе унифицированного газогенератора и разработке первого за последние три десятилетия отечественного двигателя для гражданской авиации с тягой 14–16 т.

Создание конкурентоспособного газотурбинного двигателя (ГТД) было бы невозможно без применения в его конструкции материалов и технологий нового поколения. В двигателе пятого поколения ПД-14 используются более 20 новых материалов, разработанных в НИЦ “Курчатовский институт” — ВИАМ в рамках федеральной целевой программы “Развитие гражданской авиационной техники России на 2002–2010 годы и на период до 2015 года”, и более 50 доработанных серийных марок материалов: супержаропрочный монокристаллический сплав ВЖМ4 для лопаток турбины высокого давления, интерметаллидный сплав ВКНА-1В для сопловых лопаток, высокопрочная мартенситостареющая сталь

для валов турбины низкого давления, жаростойкие и теплозащитные покрытия, полимерные композиционные материалы нового поколения — углепластики ВКУ39/ВтКУ-2.200, ВКУ29/ВтКУ-3, ВКУ25/SYT-49С, стеклопластик ВПС-48/778.

На основе научно-технического задела в области жаропрочных и жаростойких сплавов и сталей, алюминиевых и титановых сплавов разработаны технологии изготовления полуфабрикатов с обеспечением высокой чистоты по примесям благодаря специальным методам раскисления, в том числе с использованием редкоземельных металлов (РЗМ) — иттрия, лантана. Генеральным конструктором АО “ОДК-Авиадвигатель” академиком РАН А.А. Иноземцевым в рамках единого меморандума о закупке материалов и полуфабрикатов для обеспечения серийного производства двигателей семейства ПД-14 была организована кооперация поставщиков заготовок и полуфабрикатов в интересах их серийного производства на предприятиях авиационной отрасли.

В свою очередь, в НИЦ “Курчатовский институт” — ВИАМ в рамках указанного меморандума организовано малотоннажное производство литой прутковой шихтовой заготовки для лопаток турбины двигателя ПД-14 и катодов для нанесения покрытий. Впервые в отечественной инженерной и технологической практике сконструирована и изготовлена из полимерных композиционных материалов мотогондола двигателя ПД-14. Для её угле- и стеклопластиковых деталей и агрегатов созданы клеевые препреги КМКС-2м.120.Т60.37, КМКС-2м.120.Т60.55, КМКС-2м.120.Т10.37 и КМКС-2м.120.Т10.55, которые по характеристикам не уступают лучшим мировым аналогам и также выпускаются в условиях малотоннажного производства.

Кроме того, методом аддитивных технологий из отечественной металлопорошковой композиции в НИЦ “Курчатовский институт” — ВИАМ была изготовлена первая “боевая” деталь двигателя ПД-14 — завихритель фронтального устройства кольцевой камеры сгорания, полностью отвечающая требованиям конструкторской документации (рис. 1). Технологический цикл производства этих деталей составил всего шесть дней при стопроцентном выходе годных, тогда как традиционный технологический цикл — литьё по выплавляемым моделям — составляет 60 дней при выходе годных 40%.

С 2017 г. НИЦ “Курчатовский институт” — ВИАМ по заданию АО “ОДК-Авиадвигатель” выполняет НИОКР по 18 критическим технологиям для создания перспективного двигателя большей тяги ПД-35. В институте разработано 14 наименований материалов нового поколения и более 30 технологий изготовления крупногабаритных полуфабрикатов, технологий нанесения защитных и функциональных покрытий. Так, для

¹ В 2021 г. Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов вошёл в состав Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”. (Прим. ред.)



Рис. 1. Завихритель фронтального устройства камеры сгорания двигателя ПД-14, изготовленный методом аддитивных технологий

рабочих лопаток двигателя разработан никелевый рений-рутениеосодержащий сплав, длительно работоспособный при температуре 1200°C с забросом до 1250°C, а также впервые в Российской Федерации взамен жаропрочных никелевых сплавов для двукратного снижения массы лопаток разработан интерметаллидный титановый сплав и технология литья лопаток восьмой ступени с рабочей температурой до 750°C.

Для обеспечения возможности применения жаропрочных никелевых сплавов в составе газотурбинного двигателя в институте разработаны два варианта теплозащитных покрытий, дополнительно стабилизированных оксидами РЗМ (иттрий, гадолиний, иттербий) с уникальными высокотемпературными металлическими соединительными слоями, обеспечивающими работоспособность поверхности сплава при температурах 1350°C с забросами до 1450°C. Подтверждена работоспособность покрытий при термоциклическом нагружении до 1350°C в условиях стенда АО «ОДК-Авиадвигатель», обеспечившая их стойкость на протяжении 5000 циклов.

Возрастающий интерес в последние годы вызывает переход от металлических к полимерным композиционным материалам при изготовлении деталей авиационной техники. Производство ответственных деталей двигателя ПД-35, в том числе лопаток вентиляторов, из ПКМ крайне перспективно для снижения массы конструкции, обеспечения высокой прочности при воздействии ударных нагрузок, например попадания птиц. В ПД-35 будут применены углепластиковые лопатки вентилятора, что обеспечит снижение массы вентилятора на 30%.

Расширение возможностей аддитивного производства позволило разработать пять уникальных, не имеющих аналогов в мире материалов из жаропрочных никелевых и титановых сплавов, применимых в изготовлении 90 наименований

деталей камеры сгорания, компрессора, турбины высокого и низкого давления; изготовить и поставить более 2000 топологически оптимизированных деталей.

Для замены зарубежных материалов в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ создан научно-производственный комплекс, специализирующийся на серийном производстве литой прутковой заготовки из жаропрочных сплавов на никелевой основе. Мощность комплекса (до 530 т в год) позволяет поставлять эту заготовку ведущим авиационным моторостроительным предприятиям для изготовления рабочих, сопловых лопаток турбин газотурбинного двигателя, а также других литых деталей.

С целью импортозамещения французского двигателя SaM-146 авиалайнера Sukhoi Superjet 100 и двигателя Д-436ТП самолёта-амфибии Бе-200 на основании поручения Президента Российской Федерации в 2018 году АО «ОДК» поставлена задача разработать авиационный двигатель ПД-8 с тягой 8 т. В рамках данного проекта в беспрецедентно короткие сроки в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработаны и паспортизованы пять новых литейных жаропрочных сплавов – ВЖМ12, ВЖМ200, ВЖЛ125, ВЖЛ718, ВЖЛ220 (в качестве замены зарубежных сплавов AM1, DS200Hf, Rene 125, In718 и Rene 220 соответственно), а также деформируемые сплавы ВЖ718 и ВЖ180 и технологии их производства – для статорных корпусных деталей турбины и опоры двигателя. Новые сплавы превосходят по механическим и эксплуатационным свойствам зарубежные аналоги. Они используются в двигателе ПД-8 в качестве материалов рабочих и сопловых лопаток с монокристаллической, направленной и равноосной структурами и по совокупности механических свойств, технологичности (в том числе благодаря раскислению редкоземельными металлами) не имеют отечественных аналогов, обладают преимуществами перед зарубежными аналогами по пределам длительной прочности при температурах 900–1100°C и ограниченной выносливости.

Помимо аналогов зарубежных жаропрочных никелевых сплавов, выпускаемых научно-производственным комплексом для изготовления литой прутковой заготовки, в институте производится более 20 марок жаропрочных сплавов, в том числе новые высоколегированные рений-рутениеосодержащие сплавы ВЖМ4-ВИ, ВЖМ5-ВИ, ВЖМ6-ВИ, ВЖМ8-ВИ, интерметаллидные сплавы на основе соединения Ni_3Al серии ВКНА (ВКНА-1В-ВИ, ВКНА-1ВР-ВИ, ВКНА-4У-ВИ, ВКНА25-ВИ, ВИН4-ВИ), используемые в отечественных двигателях.

Благодаря разработанным в институте технологиям выплавки, а также современному высоко-

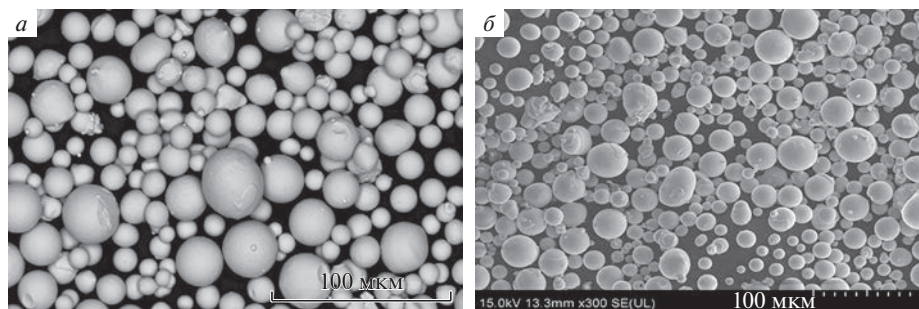


Рис. 2. Металлопорошковая композиция Metco 68F-NS-1 производства OC Oerlikon Corporation AG (а) и металлопорошковая композиция Co–Mo–Cr производства НИЦ “Курчатовский институт” – ВИАМ (б)

технологичному оборудованию, обладающему системой поддержания температуры расплава и определения содержания в нём кислорода в ходе плавки, стало возможным получать сплавы (в том числе с использованием 100% литейных отходов), полностью соответствующие по химическому составу и механическим свойствам требованиям нормативной документации.

Одна из важнейших задач в достижении технологического суверенитета России, касающихся производства и обслуживания газовых турбин, состоит в импортозамещении металлопорошковых композиций для нанесения покрытий и пайки. Локализация производства и ремонта энергетических газотурбинных установок (ГТУ) большой мощности упрощается благодаря тому, что у российских сервисных предприятий и сопровождающих их профильных научно-исследовательских институтов в наличии практически полный перечень материалов и технологий, допущенных разработчиком к использованию при изготовлении ГТУ.

В НИЦ “Курчатовский институт” – ВИАМ сформирован специализированный научно-производственный комплекс по разработке опытных и серийных технологий изготовления металлических порошков, представленный тремя атомизерами для производства металлопорошковых композиций на основе никеля, кобальта, железа, меди, алюминия и титана. В настоящее время выпускается свыше 64 марок металлических порошков для аддитивных технологий, высокотемпературной пайки и нанесения высокотемпературных защитных покрытий, в том числе 12 аналогов зарубежных сплавов, применяемых в энергетической отрасли (рис. 2).

Кроме того, в институте освоено производство керамических материалов для нанесения защитных покрытий. Необходимо отметить, что замена иностранных материалов на производимые в России не полные аналоги ведёт к необходимости проведения полного цикла дорогостоящих ресурсных испытаний ГТУ. Например, керамические порошки Sicoat3479, предусмотренные зарубежной конструкторской и ремонтной докумен-

тацией, получают в результате реализации сложной многостадийной технологии на базе метода “agglomerated–sintered”, включающей сфероидизацию и агломерирование методом распылительной сушки с последующим спеканием. В России полные аналоги порошков Sicoat3479 не производятся, а наиболее близкие по химическому составу порошки (HOSP и др., получаемые методом распылительной сушки без спекания) отличаются по механической прочности и/или насыпной плотности, что критически влияет на качество наносимых покрытий.

В настоящее время только в НИЦ “Курчатовский институт” – ВИАМ имеется полный комплекс опытно-промышленного оборудования для реализации метода “agglomerated–sintered”. Совместно с ООО “СТГТ” и ПАО “Интер РАО” ведутся работы по полному импортозамещению зарубежных материалов для минимизации затрат на проведение испытаний ГТУ.

Всё больший интерес в настоящее время вызывает также получение импортозамещающих материалов для изготовления прецизионных деталей, таких как подшипники малых размеров – от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров. За рубежом для таких изделий разработан новый класс коррозионностойких мартенситных сталей со сверхравновесным содержанием азота, обладающих высокой коррозионной стойкостью при сохранении уровня прочностных свойств, – например, сталь марки Cronidur-30, имеющая твёрдость не ниже 58 HRC с равномерно распределёнными в микроструктуре частицами карбонитридов размером до 10 мкм.

Изготовление высокопрочных сталей со сверхравновесным содержанием азота требует специальных методов выплавки и рафинирующего переплава, в частности в печах электрошлакового переплава под избыточным давлением азота, позволяющих получать слитки с плотной беспористой и дисперсной макроструктурой. Поскольку предельная равновесная растворимость азота в высокопрочных коррозионностойких сталях мартенситного класса при атмосферном давлении не превышает 0.10%, НИЦ “Курчатовский

Таблица 1. Механические свойства сталей ВНС78, 95Х18, Cronidur-30

Сталь	σ_b , МПа	Твёрдость, HRC	Максимальный размер включений, мкм
Отечественные материалы			
95Х18	2100	≥ 58	20
ВНС-78	2150–2250	≥ 58	3
Зарубежные материалы			
440С (США)	2030	59	63
Cronidur30 (Германия)	2150	≥ 58	10
XD15NW (Франция)	2320	59	10

институт” – ВИАМ приобретена печь электрошлакового переплава под давлением ДЭШП-0.1, разработанная специально по техническому заданию института и позволившая выплавлять различные стали, в том числе со сверхравновесным содержанием азота более 0.2% под избыточным давлением до 30 атм. [6].

Благодаря созданной технологии электрошлакового переплава под давлением в институте разработаны состав и технология изготовления прутков из новой коррозионностойкой износостойкой стали мартенситного класса 30Х15АМФ (ВНС78) со сверхравновесным содержанием азота 0.3%, являющейся аналогом стали Cronidur-30. Сталь ВНС78 имеет высокую (не ниже 58 HRC) твёрдость и микроструктуру, состоящую из равномерно распределённых частиц карбонитридов размером не более 3 мкм, и рекомендуется для применения в деталях трения и деталях, работающих на износ: подшипники, в том числе прецизионные; режущие инструменты; свёрла [7–9]. В таблице 1 представлены сравнительные свойства сталей для подшипников ВНС78, серийной стали 95Х18 и Cronidur-30.

Специалистами НИЦ “Курчатовский институт” – ВИАМ накоплен уникальный опыт разработки термостабильных постоянных магнитов системы РЗМ–ПМ–В и налажено мелкосерийное производство, включающее полный цикл изготовления постоянного магнита – от выплавки сплава до конечного изделия. Институт является единственным в России производителем термостабильных кольцевых магнитов с радиальной текстурой системы Pr–Dy–Fe–Co–B.

Разработка нового термостабильного магнитотвёрдого материала и технологии изготовления из него цельных кольцевых магнитов с радиальной текстурой позволила повысить технологичность производства и точностные характеристики динамически настраиваемых гироскопов [10]. Однако следует учитывать, что применяемые в настоящее время для изготовления постоянных магнитов редкоземельные металлы производятся в основном в КНР и имеют высокую стоимость.

Для снижения сырьевой зависимости и в связи с нарастающей потребностью отрасли приборостроения в кольцевых магнитах с радиальной текстурой НИЦ “Курчатовский институт” – ВИАМ совместно с АО “Всероссийский НИИ химических технологий” ГК “Росатом” разработана технология получения редкоземельных металлов высокой чистоты (массовая доля основного РЗМ – не менее 99%) из российского сырья.

Предложенные технологии получения фторидов из оксидов редкоземельных элементов, кальциетермического восстановления фторидов редкоземельных элементов и рафинирующего переплава в вакуумной дуговой печи позволили впервые в России решить вопрос получения таких редкоземельных металлов, как празеодим, диспрозий, тербий, и тем самым снижения сырьевой зависимости от Китая (рис. 3).

Сегодня также требуют решения принципиально важные проблемы в области химических компонентов и веществ. Несмотря на весомый объём финансирования работ, множество критически значимых для технологического суверенитета Российской Федерации химических компонентов и веществ до сих пор отсутствуют в должном количестве. По наиболее острым проблемам, таким как производство термопластичных материалов, высокотемпературных ПКМ, клеев, герметиков, для которых в подавляющем большинстве случаев основная компонентная база закупается за рубежом.

Отечественные предприятия активно работают над внедрением полимерных композиционных материалов на основе полиэфирэфиркетонов, при этом предлагаемые углеродные наполнители (взамен волокон типа Т300 и Т700) изготавливаются из полиакрилонитрила китайского производства.

Разработка и получение теплонагруженных деталей нового поколения, изготовление новых оболочек тепловыделяющих элементов ядерных реакторов невозможны без организации производства текстильно-перерабатываемых непре-



Рис. 3. Редкоземельные магниты высокой чистоты из российского сырья: Tb (а), Pr (б), Dy (в)

рывных бескernовых волокон карбида кремния со свойствами на уровне волокон третьего поколения марки Hi-Nicalon S производства японской фирмы Nippon-Carbon, а также исходных компонентов высокой чистоты для их производства — полидиметилсилана и поликарбосилана, однако мероприятия по выпуску этих компонентов в настоящий момент не предусмотрены.

Для термопластичных порошковых композиций на основе ПА-12, занимающих 90% мирового рынка материалов для аддитивной технологии селективного лазерного спекания, нет отечественных компонентов (ω -доделактам выпускается странами ЕС), в которых крайне заинтересованы предприятия, входящие в структуры АО «Вертолёты России», АО «Корпорация «Московский институт теплотехники»». Отсутствуют компоненты для крайне важных материалов на основе высокотемпературных терморезактивных связующих и клеев (полиимидное, бисмалеимидное, бензоксазиновое и др.) для предприятий АО «Объединённая двигателестроительная корпорация», ГК «Роскосмос», АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»». Отсутствие производств этих компонентов влечёт за собой невозможность устранения технологического отставания России в области высокотемпературных полимерных композиционных материалов, критически важных для производства перспективной гражданской и военной техники.

Следует также отметить, что при столь огромном потреблении эпоксидных смол (только за 2018 г. в первичной форме — 4.5 тыс. т, в виде простых эфиров и их производных — 1.26 млн т) в России до сих пор не налажено собственное производство эпихлоргидрина — критически важного компонента для их получения.

В НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ в инициативном порядке подготовлен перечень химических соединений (компонентов), критически значимых с точки зрения обеспечения технологической независимости Российской Федерации. С целью формирования и ускоренного развития столь важных направлений необходимо полностью пересмотреть подход к решению вопросов развития химической промышленности с учётом реальных потребностей гражданских и

оборонных отраслей России. В разработанной при участии института актуализированной редакции паспорта продуктового направления перечень критически важных химических компонентов уже включён в стратегический сценарий для дальнейшей проработки.

В настоящее время в Российской Федерации на государственном уровне оказывается поддержка развитию производства композиционных материалов и изделий из них [11–15]. Обеспечение технологического суверенитета нашей страны в части разработки и производства полимерных композиционных материалов невозможно без организации серийного выпуска отечественных стеклянных, углеродных и арамидных наполнителей. Так, производство востребованных в аэрокосмической отрасли препрегов на основе кварцевой ткани ТС 8/3 возможно только при условии наработки кварцевого волокна. Производственной мощности АО «НПО «Стеклопластик»» — единственного в РФ предприятия, выпускающего кварцевые волокна и ткань на их основе, недостаточно для обеспечения необходимых объёмов рынка, в связи с чем в стране возник дефицит упомянутых компонентов.

Армирование полимеров углеродными волокнами позволило создать принципиально новый класс полимерных конструкционных материалов — углепластиков. Они отличаются от традиционных конструкционных материалов сочетанием таких свойств, как высокие удельные прочность и жёсткость, низкие коэффициенты линейного теплового расширения и трения, высокие износостойкость и устойчивость к воздействию агрессивных сред, термическому и радиационному ударам, повышенная теплопроводность и электрофизические свойства, изменяющиеся в широких пределах, высокое сопротивление усталости при статических и динамических нагрузках. По удельным показателям прочности и жёсткости углепластики превосходят практически все наиболее широко используемые полимерные конструкционные и металлические материалы [16–18]. Для обеспечения требуемого уровня приведённых характеристик в конструкциях сложных технических систем необходимы углеродные волокна различных классов (Т-300, Т-700, Т-800, Т-1000)

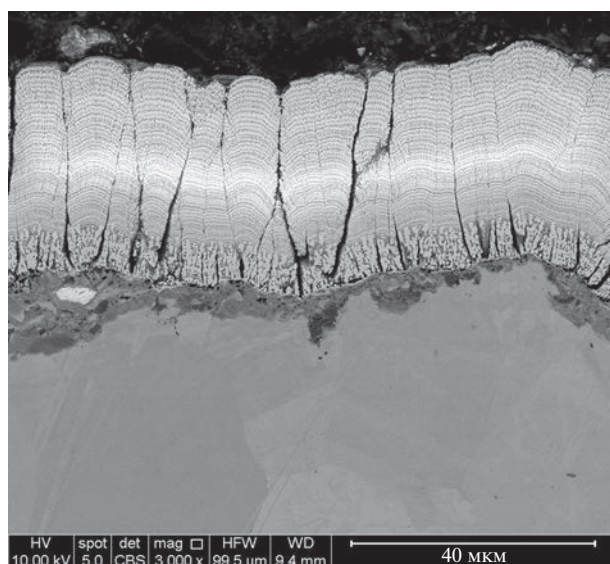


Рис. 4. Конденсированный керамический слой $\text{Sm}_2\text{O}_3\text{--Y}_2\text{O}_3\text{--HfO}_2$

с высокой стабильностью и однородностью свойств. В результате санкционной политики в отношении России в 2016–2018 гг. полностью прекращены поставки углеродных наполнителей производства США, Японии и стран ЕС. Отечественные углеродные волокна классов Т-300 (UMT42S-3K) и Т-700 (UMT49S-12K) выпускает ООО “Алабуга-Волокно”.

Параарамидные волокна служат ключевым компонентом для изготовления органопластиков конструкционного и баллистического назначения [19]. В настоящее время при их изготовлении используются компоненты импортного производства: парафенилендиамин, хлорпарафенилендиамин, растворитель диметилацетамид. Для изготовления композиционных трёхслойных панелей в отрасли применяются соты на основе арамидной бумаги, основным компонентом которой являются метаарамидные волокна. Производство метаарамидных волокон и бумаги на их основе в России отсутствует.

Развитие современного материаловедения невозможно без разработки керамических композиционных материалов нового поколения с высокими значениями прочности, твёрдости, коррозионной и эрозионной стойкости в совокупности с длительным жизненным циклом в условиях высокотемпературного окисления для изготовления теплонагруженных элементов конструкций перспективных изделий авиационной и ракетно-космической техники. (Такие зарубежные компании и международные корпорации, как General Electric, Safran, NASA и другие, активно внедряют керамические композиционные материалы в конструкцию летательных аппаратов.) Дальнейшая разработка и внедрение изделий из высоко-

температурных материалов оказываются одним из важных факторов обеспечения импортонезависимости и технологического суверенитета России.

В части передовых исследований НИЦ “Курчатовский институт” — ВИАМ совместно с Санкт-Петербургским государственным университетом и Институтом химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН ведутся работы в области высокотемпературных теплозащитных покрытий. Керамические материалы на основе оксидов РЗМ используются в качестве перспективных термобарьерных слоёв теплозащитных покрытий. За рубежом идёт интенсивное освоение промышленного производства новых керамических материалов для такого рода покрытий. Например, ведущим мировым производителем порошков для газотермического напыления Oerlicon metco освоено промышленное производство новейших керамических порошков Metco206A системы Zr--Y--Yb--Gd--O , Metco6042 системы Gd--Zr--O , Metco205NS системы Zr--Ce--Y--O с уникальными характеристиками по максимальной рабочей температуре до 1500°C . НИЦ “Курчатовский институт” — ВИАМ совместно с указанными соисполнителями реализует широкий спектр исследований в области новых керамических материалов для высокотемпературных теплозащитных покрытий на рабочие температуры до $1450\text{--}1500^\circ\text{C}$. Проведены поисковые исследования по определению основных теплофизических характеристик широкой гаммы керамических материалов различных систем, введена характеристическая функция физико-химических свойств керамического слоя теплозащитного покрытия (рис. 4).

По результатам исследований установлены закономерности изменения теплофизических свойств керамических материалов, которые будут использованы для постановки фундаментально ориентированных прикладных НИР с целью разработки современных теплозащитных покрытий и материалов для их нанесения. Однако несмотря на достигнутые успехи в прикладных разработках и их успешном внедрении в производство, крайне необходимо сформировать опережающий научно-технический задел, востребованный отечественной экономикой. Без фундаментальных и поисковых исследований в области материаловедения невозможно создать новое поколение материалов с недостижимыми в настоящее время характеристиками, как невозможно строить дом, не возведя фундамент.

Научному сообществу (в первую очередь институтам Российской академии наук, НИЦ “Курчатовский институт”, университетам) для создания российских аналогов материалов и химических компонентов, по которым отсутствует

научно-технический задел, необходимо в рамках государственно-частного партнёрства провести целый комплекс фундаментальных и поисковых научных исследований с целью достижения в среднесрочной перспективе технологической независимости Российской Федерации. Для этого важно предусмотреть реализацию в рамках Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) мероприятий раздела “Специальная химия и материалы” по следующим направлениям.

1. *Создание теоретических основ формирования структурно-фазового состояния тугоплавких металлических, высокотемпературных металлокерамических, керамических и полимерных материалов нового поколения, синтезируемых на базе аддитивного производства.* Основные усилия следует направить на исследование: влияния дисперсности и распределения оксидной упрочняющей фазы в матрице на механические свойства сформированного объёмного дисперсно-упрочнённого материала и металлокерамических материалов; процессов усвоения азота при комплексной триплекс-технологии (выплавка/распыление/последующий синтез) применительно к созданию высокопрочных коррозионностойких азотистых сталей (для металлических и металлокерамических материалов); закономерностей структурно-фазовых превращений в стеклокерамических и керамических материалах, синтезированных с применением технологии лазерной стереолитографии, при воздействии высоких температур; влияния химического и гранулометрического состава керамических паст на их реологические свойства, процессы фотополимеризации, спекания, структуро- и фазообразования (для керамических материалов); влияния состава, типа, размера, химической природы наполнителей полимерных матриц на комплекс свойств синтезированных материалов; влияния химической структуры ароматических полиамидных, а также полифениленсульфидных сополимеров на величину окна лазерного спекания (для полимерных материалов).

2. *Создание научных основ химической технологии и разработка методов направленного органического синтеза, обеспечивающего получение веществ и материалов с заданными свойствами, в том числе гибридных материалов.* Необходимо провести исследования закономерностей влияния режимов переработки, химической структуры термопластичных связующих и аппретов, жидкокристаллических полимеров, ароматических полиамидных, а также полифениленсульфидных сополимеров на механические и теплофизические свойства ПКМ; разработать математические модели (по принципу организации биологической нейронной сети) рецептуростроения функциональных материалов; изучить кинетические и

термодинамические параметры синтеза функционализированных полимеров, установить их совместимость с термостабилизирующими добавками с целью повышения теплостойкости эластомерных материалов.

3. *Создание теоретических основ химико-технологических процессов получения сверхвысокотемпературных высокопрочных полимерных композиционных материалов нового поколения на основе лестничных полимеров с повышенной стойкостью к термоокислительной деструкции.* Практическая реализация полученных знаний по данному направлению будет заключаться в разработке сверхвысокотемпературных высокопрочных полимерных композиционных материалов нового поколения с рабочими температурами эксплуатации до 450°C, повышенными не менее чем на 20% физико-механическими характеристиками и, как следствие, в создании элементов конструкций летательных аппаратов, находящихся в зоне теплового воздействия, в частности для сверхзвукового гражданского самолёта второго поколения.

4. *Установление научных основ синергетического воздействия природных и техногенных факторов на материалы для сложных технических систем.* В результате реализации исследований по данному направлению возможны формирование научных основ выявления генетической предрасположенности микроорганизмов к деструкции материалов; разработка системного подхода к созданию единой методологической базы изучения сохраняемости свойств материалов, в том числе в составе конструкций при воздействии комплекса природных и техногенных факторов; создание научно обоснованных подходов к разработке систем защиты материалов, в том числе с возможностью селективного воздействия на организмы-биодеструкторы и разработка концепции базы данных генетических особенностей организмов-биодеструкторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стенограмма заседания Президиума Государственного Совета 4 апреля 2023 года. <http://krem-lin.ru/events/president/news/70860> (дата обращения 07.07.2023).
2. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // XXI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: тез. докл. В 6 т. Т. 2а. С. 24. СПб., 2019.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник РАН. 2020. № 4. С. 331–334.

5. Каблов Е.Н. Российская наука — источник знаний и технологий для шестого технологического уклада // Поиск. № 36 (1474). 15 сентября 2017 г.
6. Гулина И.В., Седов О.В., Яковлев Н.О., Гриневич А.В. Особенности испытания подшипниковой стали // Труды ВИАМ. 2019. № 10 (82). Ст. 07. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-10-76-83>. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 04.11.2019).
7. Коросташевский Р.В., Зайцев А.М. Авиационные подшипники качения. М.: Оборонгиз, 1963.
8. Червяков И.В., Киселёва С.А., Рыльникова А.Г. Металлографическое определение включений в стали. М.: Металлургиздат, 1962.
9. Приборные шариковые подшипники: справочник / Под ред. К.Н. Явленского, В.Н. Нарышкина, Е.Е. Чаадаевой. М.: Машиностроение, 1981.
10. Бузенков А.В., Валеев Р.А., Писковский В.П., Моргунов Р.Б. Влияние содержания иттрия на свойства спечённых магнитов Nd—Dy—Y—Fe—Co—B // Труды ВИАМ. 2022. № 4 (110). Ст. 11. DOI: (дата обращения 24.07.2023). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-4-108-117><http://www.viam-works.ru>
11. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП “ВИАМ” ГНЦ РФ по реализации “Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года” // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3—33. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33>
12. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. № 1. С. 36—39.
13. Сидорина А.И., Гуняева А.Г. Рынок углеродных волокон и композитов на их основе (обзор) // Химические волокна. 2016. № 4. С. 48—53.
14. Курносоев А.О., Вавилова М.И., Мельников Д.А. Технологии производства стекланных наполнителей и исследование влияния аппретирующего вещества на физико-механические характеристики стеклопластиков // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1 (50). С. 64—70. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-1-64-70>
15. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России. Сб. науч.-информ. материалов. 3-е изд. М.: ВИАМ, 2015.
16. Соколов И.И., Раскутин А.Е. Углепластики и стеклопластики нового поколения // Труды ВИАМ. 2013. № 4. Ст. 09. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 09.04.2023).
17. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2015.
18. Бобович Б.Б. Полимерные конструкционные материалы (структура, свойства, применение). М.: Форум, 2014.
19. Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Шульдешова П.М., Куршев Е.В. Структура и физико-механические свойства органопластика нового поколения на основе ткани из арамидного волокна марки Русар-НТ и расплавленного связующего // Труды ВИАМ. 2022. № 10 (116). Ст. 05. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-10-55-65>. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 09.04.2023).

THE ROLE OF NEW GENERATION MATERIALS IN ENSURING THE TECHNOLOGICAL SOVEREIGNTY OF THE RUSSIAN FEDERATION

E. N. Kablov^{1,*} and V. V. Antipov^{2,**}

¹*Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials”
of National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia*

*E-mail: enkablov@pran.ru

**E-mail: admin@viam.ru

The creation of a new generation of materials, the development and implementation of import-substituting technologies is one of the locomotive of Russia's technological development in the conditions of the country's transition to the sixth technological order. In order to form an advanced scientific and technical reserve it is necessary to implement the basic principles of material science in relation to complex technical systems on the basis of inextricably linked fundamental and exploratory research. At the same time multilevel mathematical modelling of materials at the nano-, micro-, meso- and macro levels should be combined with applied and technological developments and then their implementation by enterprises of the real sector of the economy. In the creation of new materials (taking into account the full life cycle) and integrated systems for their protection the role of digital technologies is important. The article suggests the key scientific directions for the implementation of the activities of the section “Special Chemistry and Materials” of the Program of Fundamental Scientific Research in the Russian Federation for the long-term period from 2021 to 2030.

Keywords: new generation materials, technology, import substitution, fundamental research.