

---

---

## Глава 2

### **АЛЮМИНИЕВЫЕ, ТИТАНОВЫЕ, МАГНИЕВЫЕ, БЕРИЛЛИЕВЫЕ СПЛАВЫ И МАТЕРИАЛЫ НА ИХ ОСНОВЕ**

---

---

*В.В. АНТИПОВ*

#### **СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ТИТАНОВЫХ, МАГНИЕВЫХ, БЕРИЛЛИЕВЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

Металлические сплавы в настоящее время остаются одним из основных конструкционных материалов для изделий, выпускаемых предприятиями различных отраслей промышленности. Повышение весовой эффективности изделий является актуальной задачей, и в основном решается применением в конструкции материалов пониженной плотности, таких как алюминиевые, титановые, магниевые и бериллиевые сплавы.

В ВИАМ на протяжении 80 лет для авиационной и ракетно-космической промышленности, транспортного машиностроения, судостроения, атомной энергетики, строительства и медицины разрабатываются легкие сплавы, обладающие требуемым комплексом свойств.

Однако для создания изделий авиационной и космической техники нового поколения, ВВСТ, гиперзвуковых летательных аппаратов, судов с увеличенной в разы грузоподъемностью, промышленных высокоэффективных (КПД более 60%) энергетических установок (мощностью 250 МВт и более) необходимо разработать новые материалы с кардинально улучшенным комплексом служебных характеристик.

В ближайшие 20 лет отечественный рынок гражданской и военной авиационной техники имеет большие перспективы развития. В связи с этим основной целью ОАО «ОАК» в области гражданской авиации является превращение гражданского сегмента российского авиастроительного комплекса в конкурентоспособную отрасль, обеспечивающую к 2025 году достижение 10%-ной доли мирового рынка в гражданской авиации и более 50%-ной – внутреннего рынка. Достижение поставленной цели невозможно без использования в конструкции перспективных изделий авиационной техники современных материалов и технологий их обработки.

Активно развиваются космические программы, направленные на создание многофазной пилотируемой транспортной системы нового поколения, навигационной платформы ГЛОНАСС. Помимо этого, работа вне околоземной орбиты рассматривается также как одно из основных направлений космической деятельности. Для освоения Луны и Марса потребуется создание космической инфраструктуры и технических средств нового поколения. Основные требования, предъявляемые к материалам, в основном относятся к снижению их плотности.

Учитывая это, в ВИАМ разработаны «Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» и «Прогноз развития науки и технологий в авиастроении по направлению «Авиационные материалы и технологии их переработки»».

Рассмотрим основные тенденции развития и планируемые работы, направленные на создание новых материалов и технологий их переработки в рамках научного направления «Титановые, магниевые, бериллиевые и алюминиевые сплавы».

Несмотря на большие перспективы по применению в планере самолетов полимерных композиционных материалов (ПКМ), доля металлических материалов остается на уровне 60%. Именно поэтому остро встала проблема создания новых легких и высокопрочных сплавов. За рубежом многие металлургические гиганты активно разрабатывают и продвигают новые сплавы в конструкции планеров самолетов гражданского и военного назначения, в том числе алюминийлитиевые сплавы для обшивки и силового набора гражданских самолетов фирм «Boeing», «Airbus», «Bombardier». Во всем мире в течение достаточно длительного времени наблюдается устойчивая тенденция увеличения доли титановых материалов в конструкциях авиационной техники всех типов и назначений. Так, в планере самолетов фирмы «Boeing» динамика применения титана выглядит следующим образом: Боинг-727 – 1%; Боинг-777 – 10%; Боинг-787 – более 20%. Особый интерес в настоящее время у конструкторов авиационной и космической техники вызывают магниевые и бериллиевые сплавы, являющиеся одними из самых легких конструктивных металлических материалов.

Современные требования к материалам становятся все более жесткими, поэтому в настоящее время основным направлением в разработке сплавов на основе алюминия и технологий их обработки является повышение характеристик трещиностойкости и вязкости разрушения. На данный момент достигнута величина  $K_{Ic} = 45 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ , но имеется большой потенциал по ее увеличению. Используя открытый И.Н. Фридляндером эффект положительного влияния лития на прочность и модуль упругости алюминиевых сплавов, а также на характеристики трещиностойкости и вязкости разрушения благодаря образующимся в сплавах этого класса фаз, в ВИАМ разработаны и освоены перспективные высокопрочные алюминийлитиевые сплавы В-1461 и В-1469. Эти сплавы обладают высокими удельной прочностью, вязкостью разрушения и коррозионной стойкостью. Поставлена задача по разработке самозакаливающихся свариваемых алюминиевых сплавов, обладающих повышенными служебными характеристиками. Важным стратегическим направлением является разработка способов получения сварных алюминиевых конструкций, основанных на новейших технологиях сварки – трением, лазерной сварки и т.д., обеспечивающих коэффициент разупрочнения сварного шва не менее 0,9.

Одно из самых перспективных направлений – исследования по введению в алюминиевые сплавы редкоземельных и переходных металлов, наночастиц в качестве микродобавок. Введение таких частиц позволит повысить прочность конструкционных сплавов до 1000 МПа, что даст возможность применять сплавы на основе алюминия наряду с титаном и сталями в особо нагруженных частях конструкций и, естественно, приведет к снижению массы. С технологической точки зрения необходимо

найти решение по соединению алюминиевой матрицы с наночастицами, разработке способов их введения в расплав.

Отдельную нишу среди конструкционных материалов занимают литейные сплавы. Литейные алюминиевые сплавы применяют в авиационной и ракетной технике, так как они обладают высокой прочностью, герметичностью, коррозионной стойкостью и при этом высокими литейными свойствами. За последние годы в ВИАМ разработаны: новый высокопрочный высокотехнологичный литейный алюминиевый сплав АЛ4-МС, из которого возможно изготовление фасонных отливок всеми способами литья, а также технология герметизации отливок из алюминиевых сплавов новыми пропитывающими материалами для изделий энергетики и машиностроения.

В последние годы в мире возрастает производство и потребление магниевых сплавов, которые являются самым легким конструкционным металлом.

В ВИАМ ведутся изыскания в области новых композиций деформируемых магниевых сплавов. На основе системы Mg–Zn–Zr–РЗМ в последние годы созданы наиболее перспективные сплавы, например высокотехнологичный сплав средней прочности МА20-СП, превосходящий по свойствам известные серийные магниевые сплавы аналогичного назначения. Одновременно применительно к магниевым сплавам разрабатываются новые технологии деформации, например – СПД (сверхпластическая деформация), технология высокоскоростной кристаллизации сплавов. Эти технологии дают возможность изготавливать деформированные полуфабрикаты с высокими характеристиками прочности ( $\sigma_B$  – до 450 МПа,  $\sigma_{0,2}$  – до 370 МПа) и очень малой анизотропией (не более 5–7%). Получению высоких технологических и пластических свойств у данных сплавов способствует равномерное распределение (как в объеме, так и по границам зерен) высокодисперсных наноразмерных интерметаллидных частиц  $Zr_3Zn_2$ ,  $Mg_2Zn_3$ , а также частиц гидрида циркония  $\epsilon-ZrH_2$ . Основным направлением научных исследований в области магниевых сплавов является разработка не только новых дисперсионно-упрочненных магниевых сплавов, но и ресурсосберегающих аддитивных технологий производства деформированных полуфабрикатов с повышенным уровнем эксплуатационных характеристик ( $\sigma_B \geq 450$  МПа,  $\sigma_B/d \geq 25$  км (усл. ед.)).

Большое внимание уделяется разработке литейных магниевых сплавов. Специалистами ВИАМ разработано более 17 марок высокопрочных, коррозионностойких, жаропрочных литейных магниевых сплавов, обладающих различными эксплуатационными характеристиками. Самую высокую удельную прочность имеют сплавы системы Mg–Zn–Zr.

Наиболее перспективными в этой области являются разработки по исследованию и созданию сплавов нового поколения системы магний–цирконий, легированных редкоземельными металлами, серебром и другими микродобавками. Исследования будут направлены также на создание принципиально новых технологий формообразования фасонных отливок тиксолитом с использованием при плавке фильтрации, ультразвуковой и лазерной обработки расплава, автоматизации проектирования и изготовления оснастки.

Помимо создания новых сплавов в ВИАМ разрабатываются новые составы противопопригарных присадочных материалов, применяющиеся в промышленности для получения качественных отливок.

Катастрофическое сокращение объемов производства авиационной техники в России привело к резкому спаду потребления титановых сплавов. Однако в настоящее время титановые сплавы переживают свое второе рождение – новые концепции создания, прежде всего, авиационной техники привели к резкому увеличению применения титановых сплавов. Если к этому добавить, что в современном авиационном двигателе доля титановых сплавов составляет  $>30-35\%$ , то становится совершенно очевидным, насколько важны эти материалы для авиации, и почему необходимо интенсивно развивать металлведение и технологию переработки титановых материалов.

Для обеспечения создания газотурбинных двигателей 5-го поколения, включая перспективный двигатель 2-го этапа для ПАК ФА, промышленных высокоэффективных энергетических установок, новых военных авиационных комплексов 5-го поколения, гражданских самолетов МС-21, SSJ NG в рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» планируется провести работы по созданию центра компетенции по интерметаллидным титановым сплавам на базе ВИАМ. Основными направлениями исследования этого центра будут:

- разработка сплавов на основе  $\gamma$ -фазы интерметаллида TiAl с прецизионной системой легирования, плотностью  $3,5-3,9 \text{ г/см}^3$  и рабочей температурой до  $800^\circ\text{C}$ ;

- создание технологий выплавки интерметаллидного  $\gamma$ -сплава с управлением структурой на стадии получения слитков;

- создание технологий моделирования процессов заполнения форм и затвердевания отливок, разработки конструкций литниково-питающих систем, в том числе для лопаток турбин;

- разработка составов и технологий изготовления керамических форм для литья лопаток турбин;

- разработка технологий механической обработки деталей и лопаток. Решение этих задач позволит на  $40-50\%$  снизить массу комплекта статорных лопаток последней ступени ТНД, улучшить маневренность самолета, повысить энергетическую отдачу двигателя и его экономичность;

- разработка новых жаропрочных материалов на основе орто-ромбических интерметаллидов титана для деталей ротора и статора КВД. Применение данных материалов позволит значительно повысить рабочие температуры деталей – с  $600^\circ\text{C}$  до  $700-750^\circ\text{C}$ , обеспечит существенное повышение безопасности полетов, поскольку полностью исключается возможность титановых пожаров в двигателе. Внедрение роторных деталей из данного класса материалов приведет к существенному снижению уровня вибраций ротора, а следовательно, к повышению долговечности двигателя в целом. Помимо прочего они позволят снизить массу конструкций при эксплуатации – на  $20-30\%$  за счет замены тяжелых материалов на никелевой основе, соответствующим образом уменьшить расход топлива, увеличить дальность полета и т.д. Для производства деталей из алюминидов титана данного класса потребуются создать инновационные технологии выплавки слитков, их деформации в изотермических условиях, технологии лазерной и электронно-лучевой сварки и пайки узлов и конструкций.

Важным направлением в создании конкурентоспособных конструктивных титановых сплавов является разработка высокотехнологичных

титановых сплавов на основе низкосортных марок дешевой титановой губки и дешевых легирующих элементов с использованием в качестве таковых примесей внедрения, так называемых экономнолегируемых сплавов. Решение данной задачи позволит снизить стоимость деталей на 20–50% не только за счет удешевления исходных шихтовых материалов, но и за счет снижения стоимости их переработки. Кроме этого, высокая исходная пластичность данных сплавов позволит в значительной мере снять проблемы, связанные с холодной листовой штамповкой деталей планера. Решение этой задачи особенно важно в связи с резким увеличением применения титана в конструкции планера самолета.

Восстановление утраченных технологий производства фасонного литья титановых сплавов на новом уровне обеспечит возможность замены сложных сварных конструкций монолитными литыми деталями, при этом значительно уменьшатся трудоемкость механической обработки деталей (на десятки нормо-часов) и количество образующейся стружки (КИМ: 0,3–0,4 вместо 0,08–0,12 сегодня). Будет создана возможность резкого сокращения объема сварки деталей, включающей также процессы термоправки и отжига сварных узлов. Все это значительно сократит трудоемкость и стоимость изготовления изделий при одновременном повышении их конструктивной прочности и надежности. Предполагается применение вакуумной дуговой гарниссажной плавки в медном «холодном» тигле, обеспечивающей минимальное содержание примесей и устраняющей разного рода неоднородности в сплаве за один переплав вместо трех переплавов, используемых сегодня; применение керамических форм по выплавляемым моделям на основе двуоксида циркония, позволяющих получать тонкостенные отливки (1,5–2 мм) практически любой сложности из новых технологичных титановых сплавов, и газостатической обработки, позволяющей устранять все внутренние дефекты отливок без применения операций механической разделки дефектов и их заварки.

Разработка принципов микролегирования редкоземельными элементами и оптимизации за счет этого комплекса свойств высокопрочных и жаропрочных листовых титановых сплавов позволит решить одновременно две проблемы: резко увеличить жаростойкость сплава и повысить его технологичность в целях получения высококачественных по геометрии и свойствам тонких листов при ощутимом снижении трудоемкости их изготовления.

Создание принципиально новых сверхвысокопрочных и технологичных материалов на базе естественных титановых композитов, с использованием наночастиц интерметаллидов, образующихся во время термообработки при регулируемом распаде пересыщенных твердых растворов замещения и внедрения, изменение количества, геометрии, размеров и характера распределения интерметаллидов в матрице сплава позволит в широких пределах регулировать свойства деталей.

Одной из самых актуальных задач является также создание новых принципов прецизионного легирования никелида титана Nb, Zr и другими элементами, обеспечивающими исключение «паразитных» фаз (типа  $Ti_2N$ ), не обладающих эффектом памяти формы, обеспечение максимальной степени «возврата» материала при обратном мартенситном превращении, а также максимальную биосовместимость с живым организмом (для применения в медицине).

Как уже упоминалось, бериллий сочетает в себе исключительно ценные свойства, наиболее важные из которых – низкая плотность и очень высокий модуль упругости, высокие значения теплоемкости и теплопроводности. Благодаря низкому поперечному сечению захвата тепловых нейтронов, бериллий обладает проникаемостью для рентгеновских лучей в 17 раз выше, чем алюминий. Именно поэтому бериллий не имеет аналогов для изготовления устройств, пропускающих рентгеновские лучи и радиационные пучки, – выходных окон рентгеновских трубок, детекторов частиц и пропорциональных счетчиков.

Однако высокая чувствительность к концентраторам напряжений осложняет применение чистого бериллия и сплавов на его основе в силовых сложнагруженных конструкциях. В связи с этим были созданы конструкционные сплавы бериллия с алюминием, сочетающие высокую жесткость бериллия с пластичностью алюминия и обладающие высокой эксплуатационной надежностью и хорошей свариваемостью. В США эти сплавы ныне известны под торговой маркой AlBeMet, на территории СНГ – это разработанные в ВИАМ сплавы АБМ. Эти сплавы выгодно отличаются от промышленных алюминиевых сплавов более высокой выносливостью и меньшей скоростью роста усталостных трещин.

ВИАМ обладает уникальной экспериментально-технологической базой (ВЭТЦ ВИАМ) по разработке и производству бериллиевых сплавов с замкнутым металлургическим циклом. Ряд конструктивных элементов для космического комплекса «Буран» – комплекты тормозных дисков, рамки остекления и т.д. – были изготовлены из сплавов серии АБМ. В последние годы разработаны уникальные технологии переработки отходов бериллиевого производства в лигатуры, начаты работы по восстановлению производства бериллийсодержащей стали ВНС-32ВИ, по разработке технологий изготовления радиационно-прозрачной бериллиевой фольги толщиной 10–150 мкм и вакуум-плотных окон из нее. Высокая цена вакуум-плотной бериллиевой фольги связана с относительно небольшим потреблением ее в мире (до 50 кг/год), высокой себестоимостью и монопольным производством. Промышленное производство тонких вакуум-плотных бериллиевых окон в России еще отсутствует, и поэтому Россия импортирует ~400 г/год бериллиевой фольги толщиной 20 мкм по цене 10 тысяч \$/г.

В рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» предусматривается разработка технологий получения вакуум-плотных соединений (пайка, диффузионная сварка) из бериллиевой фольги повышенной чистоты с защитным покрытием, а также из ультрачистого и наноструктурного бериллия с рамками из других конструкционных материалов (монель, медь, нержавеющая сталь), применяемых в приборостроении и изготовлении электрофизической аппаратуры. Реализация разработок, проводимых в указанном направлении, позволит повысить характеристики вакуумной плотности и выхода годного сборочных единиц с использованием паяных и сварных узлов из бериллиевой фольги – на 75–90%, обеспечить потребности военной и специальной техники, а также экспорта высокотехнологичной продукции.

Актуальной задачей также является создание легких свариваемых конструкционных высокомодульных алюминийбериллиевых сплавов, имеющих высокие прочность и жесткость, а также технологий изготов-

ления из них полуфабрикатов для таких конструкций авиационно-космической техники, как силовые корпуса, фермы крепления, кронштейны, подкосы, переходные отсеки и др.

В связи с возросшими требованиями к конструкциям и изделиям, исследователи все чаще обращают свое внимание на «гибридные» материалы, состоящие из различных разнородных сплавов и полимеров. Сочетание различных металлов или сплавов позволяет не только объединить полезные свойства отдельных составляющих, но и получить совершенно новое качество, которым исходные материалы не обладают. Так, на сегодняшний день биметаллы находят все большее применение в различных конструкциях: компания «Boeing», например, в авиалайнере Боинг-787 применила биметалл (алюминий/титан/сталь) в пилонах; в зарубежном судостроении и судоремонте применяют биметаллические плиты из материала алюминий/сталь, биметаллы алюминий/медь (электротехническое назначение) и алюминий/титан (применяются в космической отрасли). В ВИАМ разработан материал класса СИАЛ, состоящий из слоев алюминия и стеклопластика. Данный материал обладает высокой прочностью, пожаростойкостью, а главное его характеристики СРТУ в 3–5 раз выше, чем в листах высокоресурсных алюминиевых сплавов.

Уникальная комбинация характеристик СИАЛа делает материалы этого класса перспективными для строительства самолетов нового поколения и ремонта эксплуатирующейся техники. Отличительной особенностью данного материала является возможность получения требуемой анизотропии свойств, что обеспечивается выбором количества слоев, а также регламентированной укладкой стекловолокна по различным направлениям. Зарубежный аналог СИАЛов – материал GLARE – с успехом применяется в планерах самолетов в обшивке. Замена стекловолокон углеродным позволит выйти на новый уровень свойств в алюмополимерных материалах, что отразится не только на повышении прочности, но и модуля упругости – важнейшей характеристики жесткости конструкции. Для обеспечения наилучшего комплекса свойств необходимо создать подходы по подбору металлических материалов и обеспечению в них требуемой структуры переходного слоя, который будет принимать на себя основную часть нагрузки. Следует сосредоточить поиск на оптимальной технологии, обеспечивающей простое и качественное получение материалов.

Основные исследования и разработки ВИАМ направлены на создание высокопрочных ( $\sigma_B \geq 750$  МПа,  $\sigma_{0,2} \geq 400$  МПа) и высокомодульных ( $E = 80$  ГПа) слоистых материалов на основе тонких длинномерных алюминиевых листов из сплавов систем Al–Zn–Mg–Cu, Al–Cu–Li, Al–Cu–Mg–Li, в том числе с барьерными антикоррозионными полимерными покрытиями и клеевыми препрегами, армированными стеклянными, углеродными и гибридными наполнителями.

Параллельно планируется разработка трещиностойких биметаллов на основе алюминия (Al/Al), теплостойких биметаллов типа Al/Ti(Ni) с рабочей температурой 300–350°C, высокомодульных ( $E \geq 170$  ГПа) биметаллов на основе бериллия и титана, методов подготовки поверхности и энергоэффективных технологий их получения прогрессивными способами.

С точки зрения повышения весовой эффективности перспективными являются пенометаллические материалы. Ячеистые и пористые метал-

лические материалы относят к материалам будущего: они расширят существующий спектр свойств металлопродукции, поскольку на 50–90% легче компактных материалов, имеют потенциал применения в конструкциях, взаимодействующих с объемом или потоком вещества или энергии, а также как основа для армированных и композиционных материалов. Отличительной особенностью такого материала является низкая плотность: 0,4–1,5 г/см<sup>3</sup>. Благодаря своим качествам пенометаллы нашли применение во многих областях промышленности (капитальное строительство, энергетика, топливная промышленность). Главная ценность пеноматериалов заключается не в каком-либо одном уникальном свойстве, а в уникальной совокупности характеристик. В силу особенностей своей структуры металлическая пена способна поглощать большое количество энергии при относительно низком уровне напряжения, что необходимо при создании композитной брони для военной техники. Помимо всего прочего металлические пены обладают отличной шумоизоляцией и теплостойкостью. Несмотря на наличие большого количества пор, материал обладает высокой жесткостью и с легкостью может вытеснить металлические сотовые конструкции с заменой их на наполненные. За рубежом имеются проекты по созданию кораблей с каркасом из пенометаллов, что позволит повысить их грузоподъемность в 2 раза.

Разработки будут направлены на создание сверхлегких теплостойких пеноматериалов на основе алюминия, никеля, стали для применения в качестве наполнителя в перегородках техники авиационного, наземного и морского назначения, а также на создание ударостойких КМ на основе пенометаллов для применения в качестве брони вертолетов и техники наземного базирования. Планируется также разработка нового класса гибридных композиционных полиматричных (гетероматричных) материалов, одной из матриц в которых служит магниевая или алюминиевая основа. В основу разработки будут положены процессы изучения вспенивания, так как процесс получения пенометаллов зависит от реакций, происходящих в жидком, твердом и газообразных состояниях. Варьируя эти параметры можно управлять свойствами конечного материала.

Комбинирование различных матричных материалов позволит получить качественно новый уровень эксплуатационных характеристик, в частности ТКЛР со стабильными, близкими к нулю значениями в интервале температур от –120 до +180°С, высокие прочностные свойства ( $\sigma_b \geq 650\text{--}800$  МПа). Кроме того, гибридизация дает возможность значительно повысить модуль упругости, который у магниевых сплавов недостаточно высок.

В области аддитивных технологий будут созданы композиционные материалы системы титан–бериллий, имеющие низкую плотность и обладающие (помимо высоких механических характеристик) повышенной стойкостью к возгоранию, что крайне актуально для материалов, применяемых в двигателях. Создание слоистых биметаллических материалов системы АБМ–титан и бериллий–титан позволит получить материалы с высокой акустической выносливостью.

В настоящее время, в век создания сложных технических систем и расширения географии базирования техники, к числу приоритетных относятся проблемы коррозии и антикоррозионной защиты авиационной техники, создание опережающего научно-технического задела, методов прогнозирования по влиянию климатических факторов на материалы и конструкции. Воздействие климатических параметров внешней среды,



стимулирующих развитие коррозии, на современные, технически сложные конструкции является зачастую решающим фактором, определяющим ресурс и надежность техники. Среди наиболее опасных коррозионных поражений следует отметить коррозионное растрескивание обшивки панели кесон-баков на 13-ти самолетах Як-40 Краснодарского авиаотряда. Проблемы, связанные с активным развитием коррозии, существуют не только в авиации. На бронетанковой технике выход из строя радиотехнических изделий за пятилетний срок эксплуатации составил 20–30%. Коррозия наносит ущерб народному хозяйству России в размере не менее ~10% от валового национального продукта, в то время как в промышленно развитых странах только 2–4%. Антикоррозионная защита – это комплексная проблема, которая не может быть решена только путем применения новых эффективных защитных покрытий. Защита от коррозии и работоспособность приоритетных объектов новой техники в ведущих областях экономики будет определяться созданием и применением новых коррозионностойких материалов и новейших технологий в области нанесения защитных и функциональных покрытий. Такие технологии должны стать основой для формирования научно-технологических комплексов – центров компетенции для концентрации усилий, направленных на решение не только отраслевых, но и межотраслевых задач в рамках федеральных целевых программ.

Общие тенденции развития технологий и анализ зарубежных источников показывают, что в настоящее время чрезвычайно актуальным направлением является разработка «зеленых» технологий нанесения защитных и функциональных покрытий. Создание нового поколения покрытий, не содержащих вредных компонентов (таких как соединения хрома и кадмия) и не уступающих, а в большинстве случаев значительно превосходящих служебные характеристики серийных покрытий, создание и применение принципиально новых многослойных наноструктурированных, термодиффузионных, металлокерамических, полимерсодержащих покрытий – стратегическое направление, требующее решения в ближайшие годы.

Однако большие возможности получения покрытий с самыми разнообразными свойствами и низкая себестоимость гальванических технологий делают их востребованными в будущем для применения на перспективных изделиях. Реализовать все преимущества гальванических покрытий не позволяют техническая отсталость гальванопроизводства и сложность поддержания большого количества взаимосвязанных технологических параметров электролиза сплавов. Для нанесения сплавов с различными функциональными и защитными свойствами в рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» будут разработаны новые технологии на стыке двух видов производств: гальванической и термической обработки металлов. По данному направлению предполагается разработка технологий нанесения гальванотермических покрытий на основе легкоплавких металлов (цинка, олова, меди), металлов подгруппы железа (никеля, кобальта, железа, меди) и тугоплавких металлов (хрома, молибдена, ванадия, вольфрама и никеля). Поскольку широкомасштабные исследования за рубежом по этому направлению не ведутся, то у России есть возможность добиться конкурентного преимущества в технологии

нанесения покрытий металлическими сплавами для машино-, автомо-  
биле-, судо-, приборо- и авиастроения.

Наиболее перспективными покрытиями для защиты от коррозии, в первую очередь сталей, являются шликерные покрытия (из-за простоты технологии их нанесения), содержащие металлический алюминий в неорганической керамоподобной связке. Такие покрытия разработаны фирмой «SermaTech» и используются в аэрокосмической промышленности, в частности для защиты от коррозии некоторых деталей истребителя F-117.

В ВИАМ разрабатывается шликерное покрытие для защиты от коррозии высокопрочных сталей типа ВКС-170, работающих при температуре до 500°C, тогда как, на данный момент, наилучшее защитное кадмиевое покрытие в тропическом и морском климате эксплуатируется при температурах не более 250°C. Кроме того, технология нанесения шликерных покрытий практически не влияет на механические свойства сталей.

В рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» будут разработаны составы шликерных покрытий для защиты как стальных деталей, так и деталей из алюминиевых сплавов, эксплуатирующихся во всеклиматических условиях, а также технологии их изготовления, не требующие специального оборудования. Защитная способность шликерных покрытий будет составлять порядка 3000 ч в КСТ.

Особое значение имеет разработка технологий нанесения комплексных покрытий (гальванотермические, термодиффузионные и газодинамические покрытия), при этом основной задачей будет достижение защитных свойств покрытий > 3000 ч в КСТ без коррозионных поражений при сохранении металлических свойств поверхности.

Одним из самых перспективных способов защиты на сегодняшний день является сравнительно новый вид электрохимической обработки поверхности, берущий начало от традиционного анодного оксидирования, – микродуговое оксидирование. В настоящее время наблюдается особенно большое количество публикаций исследователей различных институтов и учреждений как в России, так и за рубежом. В ВИАМ проводятся работы по исследованию и разработке защитных неметаллических неорганических покрытий для легких сплавов, формируемых методом микродугового оксидирования, в том числе гетеронаноструктурных микродуговых покрытий, что позволяет повысить эффективность и перейти к формированию защитных покрытий нового поколения. Данные исследования направлены на разработку технологий и определение эффективности использования МДО-покрытий для защиты от коррозии легких авиационных сплавов. При работе используются новейшие технологии и оборудование, позволяющие проводить комплексное исследование, отвечающие мировым стандартам. В результате на базе новейших физико-химических способов формируется новая комплексная отрасль, технологии и оборудование, которые значительно отличаются от применяемых при традиционной обработке поверхности.

Помимо метода микродугового оксидирования среди наиболее перспективных методов можно выделить электрофоретическое осаждение (ЭФО) тонких пленок на обрабатываемую поверхность с применением технологии электрополимиризации. ЭФО не требует специализированного оборудования, практически не зависит от формы покрываемой поверх-

ности, имеет высокую производительность и хорошую адаптируемость к массовому производству. Несмотря на рост публикаций, посвященных данной технологии защиты от коррозии, метод до сих пор не нашел широкого применения в отечественном авиастроении. Это связано с тем, что фундаментальные физико-химические вопросы этой технологии не систематизированы. Необходимо изучение физико-химических процессов на границах раздела металл/электролит и закономерностей формирования покрытий методами ЭФО с целью создания защитных покрытий нового поколения.

Созданные в рамках «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» новые материалы с кардинально улучшенным комплексом свойств, энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии позволят обеспечить задел для производства конкурентоспособной техники будущего. Применение разработанных материалов позволит обеспечить прорыв в области энергосбережения и весовой эффективности конструкций. Одновременно полученные результаты приведут к развитию новых научных направлений и разработке совершенно новых материалов, обладающих еще более высокими характеристиками.

*В.В. АНТИПОВ, О.Г. СЕНАТОРОВА,  
Е.А. ТКАЧЕНКО, Р.О. ВАХРОМОВ*

### **АЛЮМИНИЕВЫЕ ДЕФОРМИРУЕМЫЕ СПЛАВЫ**

Алюминиевые деформируемые сплавы остаются базовыми конструкционными материалами планера современной и перспективной авиационной техники (SSJ-100, Ту-204, Ил-76МД-90, Ан-148, Бе-200, А-380, В-777 и др.) благодаря легкости, удачному комплексу необходимых эксплуатационных характеристик (прочности при растяжении и сжатии, усталости, трещиностойкости, коррозионной стойкости), хорошей технологичности и освоенности в металлургическом и авиационном производствах. Их состав, структура, режимы и методы изготовления полуфабрикатов (начиная от слитков) и деталей продолжают постоянно совершенствоваться и обновляться в соответствии с возрастающими требованиями к конструкциям (весовой эффективности, ресурсу, живучести, надежности, летным характеристикам).

Объем их применения остается большим, особенно для силовых элементов планера, несмотря на «наступление» полимерных материалов, прежде всего углепластиков. Вместе с тем отмечается сохранение или расширение применения алюминиевых сплавов в других отраслях: ракетной технике, атомной энергетике, автомобилестроении, вагоностроении для скоростных поездов, в нефтегазовой и пищевой отраслях.

Следует выделить несколько главных направлений, из которых складывается структура современного развития алюминиевых сплавов: среднечувствительные ресурсные и жаропрочные сплавы, высокопрочные сплавы на базе традиционных систем легирования (Al-Cu, Al-Zn-Mg-Cu), легкие и высокомодульные сплавы на базе системы Al-Li пониженной плотности, технологичные средне- и малопрочные сплавы на базе систем Al-Mg-Si и Al-Mg. Сплавы системы Al-Cu-Mg до настоящего времени