



Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи

Е.Н. Каблов
академик РАН

Июль 2006

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Все материалы. Энциклопедический справочник», № 1, 2007 г.

Электронная версия доступна по адресу: www.viam.ru/public

Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи

Е.Н. Каблов

Всероссийский институт авиационных материалов

Условия эксплуатации авиационной и космической техники обуславливают крайне жесткие требования к материалам, которые должны обеспечить прочность конструкции при минимальных удельной массе, габаритах и расходе топлива; надежность и длительный ресурс при воздействии переменных и значительных силовых нагрузок, чередования повышенных и пониженных (до -253°C) температур, коррозионно-активных сред, корпускулярных, электромагнитных, рентгеновских излучений и др.

При разработке новых материалов делается упор на такие параметры свойств, объединенные понятием «качество авиационных материалов», как: весовая эффективность (отношение прочности к удельной массе); надежность и ресурс, характеризующиеся, в первую очередь, показателями выносливости, сопротивлением малоциклового усталости (МЦУ), статической (K_{1c} , K_c и др.) и циклической трещиностойкостью ($\sigma_{кр}$, K_{Isc} и др.); контролепригодность, технологичность и ремонтоспособность.

От качества материалов, применяемых в летательных аппаратах (ЛА), в существенной мере зависит конкурентоспособность техники. Для военной техники – это обеспечение требуемых тактико-технических характеристик (ТТХ) и других параметров: дальность, полезная нагрузка, скорость, маневренность, точность, всепогодность, обеспеченность производства отечественным сырьем, для гражданской – надежность, пожаробезопасность, комфортность, экологичность и др., при минимизации стоимости затрат на разработку, освоение и эксплуатацию. Очевидно, что подавляющая часть материалов, разработанных по столь высоким меркам, может быть использована и успешно применяется в других отраслях машиностроения и

народного хозяйства: судостроении, атомной промышленности, транспортном, химическом, энергетическом машиностроении, медицине и др.

Применение перспективных конструкционных материалов в изделиях авиационной отрасли (планер самолетов и вертолетов) должно обеспечить:

- повышение коммерческого срока эксплуатации с 20 до 25–30 тыс. ч;
- повышение ресурса с 15–20 до 40 тыс. ч;
- повышение межремонтного срока с 6–8 до 10–12 лет;
- снижение массы конструкций на 20–25%.

Материалы для планера самолетов и вертолетов

Материальный облик ЛА определяют более 120 конструкционных и функциональных материалов.

Благодаря применению новых алюминиевых сплавов, полимерных композиционных материалов, титановых сплавов, конструкционных сталей, комплекса неметаллических материалов – лакокрасочных покрытий, клеев, герметиков – обеспечено повышение срока эксплуатации изделий (в 1,5–2 раза), ресурса (в 1,5–2 раза), пожаробезопасности интерьера, межремонтного срока при эксплуатации.

Алюминиевые сплавы

Основным конструкционным материалом для планера остаются алюминиевые сплавы. В 2000–2015 гг. их доля в структуре применения сохраняется на уровне 50%.

Задача повышения надежности, улучшения характеристик трещиностойкости, повышения усталостных свойств сплавов для фюзеляжа, крыла и силового набора решалась путем значительного повышения чистоты сплавов (уменьшение содержания примесей кремния и железа, количества избыточных фаз), разработки новых режимов термообработки, улучшения качества полуфабрикатов. Сплав 1163-АТ системы Al–Cu–Mg не уступает по свойствам американскому сплаву 2524.

Высокопрочный сплав системы 1933 в виде ковочных и прессованных полуфабрикатов, обладающий уникальным сочетанием прочности ($\sigma_B=450-500$ МПа) и вязкости разрушения, превосходит по этим показателям сплавы США (7175 и 7050).

Проведенные в последние годы исследования по оптимизации высоколегированной композиции системы Al–Zn–Mg–Cu с малой добавкой Zr (1965 – сплав В96Ц3) позволили обеспечить в новых состояниях T12, T2 на 10–20% более высокую прочность (по сравнению со сплавом В95п.ч., В95о.ч.). Сплав имеет благоприятное сочетание сверхвысокой прочности и повышенной коррозионной стойкости при хорошем уровне вязкости разрушения и технологической пластичности. Сплав В96Ц3 (в виде длинномерных катаных и прессованных полуфабрикатов) предназначен для элементов, работающих преимущественно на сжатие в полете (верхние обшивки крыла и др.).

Перспективный путь повышения весовой эффективности – совершенствование слоистых металлокомпозитов типа АЛОР и СИАЛ. По сравнению с алюминиевыми сплавами СИАЛ обладает более высокой статической прочностью (в 1,5–2 раза), чрезвычайно низкой скоростью роста усталостной трещины (в 10–20 раз), пониженной на 10–17% плотностью и большим сопротивлением усталости (в 1,5–2 раза).

Еще один способ повышения весовой эффективности – уменьшение плотности, который реализуется путем создания рецептур алюминиевых сплавов, легированных литием. Создана серия сплавов средней (1420, 1424, 1441) и высокой прочности (типа 1460). Высокопрочный свариваемый сплав типа 1460 предназначен для эксплуатации в широком интервале температур – от +175 до -253°C; его применение в космических конструкциях взамен сплавов типа АМг6 возможно вследствие существенного повышения прочностных свойств сварных соединений (до 0,94 вместо 0,65 от прочности основного металла) при температурах -253°C, что позволяет снизить массу конструкции (на ~35%).

В области жаропрочных алюминиевых сплавов предстоят работы по уточнению рецептур: например, сплава 1143 системы Al–Cu–Mg–Fe–Ni, в частности содержания Fe, Ni и влияния примесей на длительную прочность на базе не менее 1000 ч при температурах испытания 150 и 175°C; оптимизации интервала легирования, режимов термической обработки, исследованию коррозионной стойкости сплава Д25 (системы Al–Cu–Mn) для обеспечения длительной прочности $\sigma_{1000}^{175^\circ} = 270$ МПа; изучению влияния состава сплава 1215 (Al–Cu–Mg–Ge) на кинетику процесса разупрочнения при температурах 150–200°C с выдержкой до 30000–60000 ч; исследованию режимов искусственного старения для промышленных партий полуфабрикатов сплава 1151 (Al–Cu–Mg) повышенной жаропрочности, свариваемости ($\sigma_{15000}^{150^\circ} = 200$ МПа; $K_c^y = 88,5$ МПа $\sqrt{м}$; $\sigma_{в.св} = 390$ МПа), который может заменить сплавы Д16, Д19, АК4-1ч., АК6, АК8 и 1201 для изготовления обшивки самолета, и особенно греющихся элементов планера (противообледенители, мотогондолы, передняя кромка крыла и т. п.), с целью повышения надежности и ресурса сверхзвуковых самолетов на 10–15%.

Коррозионностойкие высокотехнологичные сплавы систем Al–Mg–Si и Al–Zn–Mg–Cu используют для обшивки фюзеляжа гидросамолетов и палубной авиации (АД37), а также в виде штамповок и прессованных полуфабрикатов (В91-Т3) для самолетов морской авиации. Это позволит увеличить календарный срок службы изделий и их узлов, сократить в 2–3 раза количество ремонтов при эксплуатации морской авиации и снизить трудоемкость изготовления деталей на 10–20%.

Высокопрочные титановые сплавы

В области конструкционных, в том числе литейных, титановых сплавов, задача повышения ресурса и надежности будет решаться созданием нового поколения комплексно-легированных сплавов с повышенными характеристиками предела выносливости (на 30%) и трещиностойкости (КСТ – на 200%) при снижении стоимости сплава (на 20–30%) за счет полного

перехода на отечественное сырье и недефицитные легирующие компоненты (снижение содержания молибдена и ванадия).

Перспективные сплавы типа ВТ23, ВТ22 за счет комплексного легирования ($\alpha+\beta$)-твердых растворов могут упрочняться на различные уровни прочности – от 1100 до 1400 МПа.

Сочетание широкого ассортимента полуфабрикатов и высокой технологичности позволяет изготавливать практически все силовые элементы конструкций ЛА из сплавов ВТ23 и ВТ22 с обеспечением снижения массы конструкций (на 20–30%), стоимости и трудоемкости изготовления.

Создание нового класса конструкционных сплавов с регламентированным типом упрочнения для высоконагруженных деталей при использовании прогрессивных технологических процессов сверхбыстрого охлаждения из жидкой фазы, гранулирования, газостатирования и изотермического прессования должно обеспечить повышение прочностных и ресурсных характеристик на 15–25%.

Конструкционные стали

Стали стабильно применяются в современном самолетостроении, и объем их применения находится на уровне 5–10%. В некоторых самолетах, например, сверхзвуковых истребителях, стали являются профилирующим материалом. Основное назначение сталей – использование их в конструкциях, от которых требуются высокие жесткость, удельная прочность, усталостная долговечность, теплопрочность, коррозионная стойкость и ряд других параметров. Кроме того, как при производстве полуфабрикатов, так и при изготовлении сложных, в том числе сварных, конструкций, для которых сварка должна являться финишной операцией, применение сталей особенно целесообразно из-за их хорошей технологичности.

Благодаря новым разработкам удалось повысить минимальный уровень прочности стали до 1950 МПа при сохранении значений величины K_{1c} . В последнее время созданы новые экономнолегированные высокопрочные

конструкционные свариваемые стали ВКС-8 ($\sigma_B=1800-2000$ МПа) и ВКС-9 ($\sigma_B=1950-2150$ МПа), которые по значениям трещиностойкости не уступают стали 30ХГСН2А, а в ряде случаев и превосходят ее.

В области среднелегированных свариваемых сталей для шасси и силовых деталей планера должны быть достигнуты высокие характеристики прочности, вязкости и надежности: $\sigma_B \approx 2100-2300$ МПа, $\sigma_{0,2}=1600$ МПа, $K_{1c} \geq 62$ МПа $\sqrt{м}$, МЦУ (при $\sigma_{max}=500$ МПа): $N=300$ кцикл – к 2010 г.

Для шасси и силовых деталей планера гидросамолетов с целью обеспечения снижения массы узлов, высоких коррозионной стойкости и сопротивления повторным нагрузкам будут разработаны коррозионностойкие высокопрочные свариваемые стали с прочностью $\sigma_B=1700-1900$ МПа, $KCU \geq 0,7$ МДж/м², $\psi \geq 40\%$ (для сравнения: наиболее прочная сталь этого класса ВКС-43 имеет $\sigma_B \approx 1600$ МПа, зарубежная АМ-355 – $\sigma_B \approx 1550$ МПа).

Для получения принципиально новых паяных сотовых конструкций должны быть разработаны свариваемые стали с прочностью $\sigma_B \geq 1350$ МПа; это позволит обеспечить ремонтпригодность теплообменных аппаратов с помощью сварки.

Важным направлением исследований является совершенствование износостойких сталей. В частности, для увеличения (в 1,5–2 раза) ресурса шестерен агрегатов управления будут разработаны износостойкие, не подвергаемые поверхностному упрочнению стали с высокой твердостью (≥ 60 НРС), вязкостью $KCU \geq 0,4$ МДж/м², прочностью $\sigma_{B,изг}=2500-3000$ МПа, теплопрочностью до 500°С.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ)

Благодаря существенным преимуществам по удельной прочности и жесткости, исключительному сочетанию конструкционных, теплофизических, специальных свойств ПКМ все в большем объеме применяются в конструкциях ЛА. Если в конструкции планера и в интерьере

самолета Ту-204 объем применения ПКМ составил 14% от массы, то в перспективных пассажирских аэробусах (типа А3ХХ) он достигнет 25%.

Применение ПКМ на основе углеволокна – одно из эффективных средств снижения массы конструкции. Совершенствование прочностных, деформационных, теплофизических характеристик углепластиков и повышение их теплостойкости даст возможность использовать их не только в слабо- и средненагруженных конструкциях пассажирских самолетов (интерьер, средства механизации крыльев, зализы и т. п.), но и в перспективе, по аналогии с военными самолетами – в высоконагруженных деталях типа крыльев, вертикальных рулей и др.

С целью создания теплостойких ПКМ, способных работать при температурах 300–400°C, разработаны научные основы получения полимерной матрицы методом изомеризационной полициклизации непосредственно на наполнителе предварительно полученного форполимера, образующего в процессе реакционного формирования макрогетероциклическую структуру лестничного типа, содержащую конденсированные ароматические и гетероциклические фрагменты.

Формирование лестничного полимера методом изомеризационной полициклизации протекает без выделения низкомолекулярных продуктов реакции и приводит к образованию плотноупакованной сверхжесткой лестничной структуры с высоким уровнем межмолекулярного взаимодействия и тепло- и термостойкостью, находящимися практически на максимально возможном уровне, характерном для органических полимеров.

Полученные таким образом полимерные матрицы с плотностью 1,44–1,5 г/см³ характеризуются физико-механическими показателями, не уступающими свойствам лучших эпоксидных связующих, и обладают одновременно термоокислительной устойчивостью вплоть до температур 500–520°C и температурой стеклования $T_c \geq 400^\circ\text{C}$.

На основе разработанного связующего изготовлены опытные образцы угле-, стекло- и органопластиков. Полученный на первой стадии синтеза

форполимер подвергается измельчению в порошок и напыляется на наполнитель в электростатическом поле, что позволяет реализовать экологически чистую безрастворную технологию и получить препреги практически неограниченной жизнеспособности. Благодаря отверждению связующего по механизму многостадийной ступенчатой изомеризационной полициклизации без выделения летучих продуктов возможно использование упрощенного технологического процесса формования, включающего в себя формообразование при 200°C в оснастке с последующей термообработкой при 200–350°C в свободном состоянии.

Изготовленные по указанной технологии опытные образцы ПКМ обладают следующими прочностными характеристиками:

углепластик – $\sigma_{\text{в.и}}^{400^\circ}$ до 1320 МПа; $\tau_{\text{сдв}}^{350^\circ}$ до 40 МПа;

стеклопластик – $\sigma_{\text{в.и}}^{350^\circ}$ 670 МПа; $\tau_{\text{сдв}}^{300^\circ}$ 280 МПа.

Объем применения в конструкциях вертолетов ПКМ (стекло-, органо-, углепластики) и гибридных материалов существенно выше, чем в самолетных конструкциях и достигает в изделиях последних модификаций до 60% от массы. Их применение в конструкциях несущих винтов, лонжеронов, обшивки и нервюр хвостовых секций, обшивок сотовых панелей руля, киля, стабилизатора, топливных баков, антенных обтекателей обеспечивает снижение массы на 30%, увеличение ресурса в 2–4 раза, существенное повышение боевой живучести.

Особенно эффективно применение ПКМ для изготовления лопастей вентиляторов для двигателей самолетов Ан-70, Ил-114, Ан-140, Ан-38.

Благодаря снижению массы лопастей (по сравнению с алюминиевым сплавом на 66%) обеспечиваются: высокая тяга на старте, сокращение разбега при взлете и посадке, снижение в 2–3 раза шума и вибрации, расхода топлива на 25% и повышение КПД до 0,85–0,88.

Дальнейший прогресс в применении ПКМ для сильнонагруженных конструкций связывается с разработкой нового класса слоисто-волоконистых

анизотропных полимерных материалов – адаптирующихся композиционных материалов (АКМ).

Применение традиционных композиционных конструкций может принести определенный эффект, однако применение адаптирующихся КМ этот эффект значительно увеличивает. Например, согласно расчетам применение обычных КМ в концевой части крыла самолета на одной трети размаха приводит к уменьшению массы конструкции планера на 150 кг, в то время как применение адаптирующихся КМ, деформирующих крыло в нужном направлении, при расчетных режимах позволит уменьшить массу крыла на 3200 кг.

На практике реализована возможность достижения высоких массовых и аэродинамических характеристик при использовании адаптирующегося материала – углепластика АКМ-1у в крыле обратной стреловидности истребителя С-37 «Беркут» АО ОКБ «Сухого».

Эффект адаптации можно использовать во многих областях техники: машиностроении, строительстве, медицине и др.

Дальнейшее развитие получит направление использования клеев при изготовлении авиационных конструкций (в том числе сотовых), что обеспечит повышение уровня прочности (на 25%), ресурса и надежности (в 2–3 раза), снижение энергозатрат (в 1,5 раза) за счет снижения температуры отверждения клеев до 100°C.

Высокопрочные клеи ВК-25, ВК-31, ВК-40, ВК-36, ВК-51, ВК-41 и другие и клеевые препреги (КМК) широко применяются в конструкциях практически всех современных ЛА. Так, площадь клеевых соединений в самолетах «Руслан», Ил-96-300 составляет более 3000 м².

Важнейшей задачей по реализации на практике концепции создания безопасно повреждаемых конструкций планера с увеличением ресурса является разработка новых высокопрочных материалов – информкомполитов, способных нести нагрузку и осуществлять передачу информации о повреждениях, возникающих в материале в процессе эксплуатации.

В последние годы дальнейший прогресс в совершенствовании свойств полимерных материалов, в частности клеев, композитов, компаундов и др., связывают с исследованиями в области наноструктурированных материалов и технологий.

Особые свойства материи на наномасштабном уровне проявляются в силу того, что размеры частицы (молекулы, кластера, зерна, домена) становятся сравнимы с масштабами таких физических величин, как средний пробег электронов в металлах, размеры доменов в ферромагнетиках, пробег фононов в кристаллах, эффективные размеры экситонов в полупроводниках. В основе функционирования наносистем лежат, таким образом, квантовые проявления материи. На базе этих представлений и уже наработанного эксперимента прогнозируется создание наноструктурированных углеродных и керамических материалов, в десятки раз более прочных, чем сталь; полимерных материалов в 3 раза более прочных, чем существующие полимеры, – для применения в самолетостроении.

Исключительный интерес представляют углеродные наномодификаторы – фуллерены и нанотрубки (H.W. Kroto, R.E. Smalley – Нобелевская премия, 1996 г.).

Фуллерены следует рассматривать как особый универсальный объект для широкого круга прикладных разработок. В рамках проблем авиационного материаловедения целесообразность применения фуллеренов, нанотрубок рассматривается также при разработке таких авиационных материалов на полимерной основе, как клеи и герметики с повышенной адгезионной и когезионной прочностью, резины с улучшенной сопротивляемостью истиранию, лакокрасочные покрытия с повышенной адгезией и стойкостью к эрозии, тепло- и электропроводящие неметаллические покрытия [1].

Материалы для газотурбинных двигателей (ГТД)

В настоящее время идет конструкторская, технологическая и материаловедческая проработка проблемы создания двигателя нового шестого поколения. При этом задача по повышению работоспособности

материалов в условиях жесткого комплексного воздействия высоких температур, напряжений и агрессивной среды является одной из важнейших.

В двигателе шестого поколения необходимо обеспечить отношение тяга/масса на уровне 20:1. Для сравнения это отношение для двигателей четвертого поколения (1970–1975 гг.) равняется 8:1, а для современных двигателей пятого поколения (1985–2000 гг.) – 10:1.

В области материаловедческих задач исследования по этому направлению предусматривают как разработку классических жаропрочных сплавов (титановых, никелевых – литейных и деформируемых), теплобарьерных покрытий, уплотнительных материалов, так и создание новых классов материалов – таких как интерметаллидные сплавы, металлические композиционные материалы.

Применение материалов и технологий должно обеспечить:

- рост рабочей температуры газа двигателей нового поколения с 1300–1400 до 1600–1800°С;
- снижение расхода топлива с 0,6 до 0,4 кг топлива/кг тяги в час;
- рост тяги с 280 до 400 кН (с 28000 до 40000 кгс);
- повышение надежности и ресурса дисков в 2–3 раза, рабочей температуры на 50–70°С, снижение массы дисков на 10–15%;
- снижение расхода дефицитных легирующих элементов (Co, W, Nb, Re и др.).

Для повышения ресурса и надежности жаропрочных титановых сплавов в первую очередь предстоит наиболее полно реализовать потенциальные возможности отечественных сплавов (стабильность свойств) путем усовершенствования технологических схем производства серийной продукции (сплавы BT8M-1, BT8-1, BT25Y, BT18Y). Необходимо жестко регламентировать состав, равномерную по сечению и длине предварительных заготовок макро- и микроструктуру.

Вместе с тем потенциальных возможностей по дальнейшему повышению жаропрочности титановых сплавов при температурах $>620^{\circ}\text{C}$ остается крайне мало, а возможности легирования практически исчерпаны.

Основные перспективы в разработке и освоении нового поколения конструкционных жаропрочных титановых сплавов с повышенной плотностью, пониженной окисляемостью и горючестью связаны с развитием интерметаллидных сплавов на основе Ti_3Al и TiAl для работы при температурах $600\text{--}800^{\circ}\text{C}$.

Предстоит завершить комплекс исследований и разработок по многокомпонентному легированию базовых композиций активными элементами, освоению новых методов плавки, технологий производства поковок, листов и плит, регламентации структуры в процессе деформации и термообработки, поверхностной обработке готовых деталей.

Завершение перечисленных исследований и разработок позволит получить следующие характеристики для интерметаллидных титановых сплавов:

- на основе Ti_3Al : $d=5,0$ г/см³; $\sigma_{\text{в}}=1200$ МПа; $\delta>6\%$; $\sigma_{-1}=750$ МПа; $\sigma_{100}^{650^{\circ}}=420$ МПа;
- на основе TiAl : $d=3,8$ г/см³; $\sigma_{\text{в}}=500$ МПа; $\delta>2,5\%$; $\sigma_{100}^{850^{\circ}}=300$ МПа;
- для сплавов с интерметаллидным типом упрочнения: $\sigma_{\text{в}}=1250\text{--}1300$ МПа; $\delta=8\text{--}16\%$; $\sigma_{\text{в}}^{650^{\circ}}=1080$ МПа.

Основной задачей при создании ГТД является повышение жаропрочности турбинных лопаток, испытывающих исключительно высокие температурные и силовые нагрузки.

В области создания перспективных ГТД авиационного и наземного назначения важнейшей задачей является изыскание новых жаропрочных сплавов для рабочих и силовых лопаток, разработка процессов и оборудования для производства монокристаллического литья, решение проблем эффективного охлаждения деталей, а также обеспечение выхода годной продукции по геометрическим и кристаллографическим параметрам и структурному совершенству получаемых отливок.

В отношении жаропрочных литейных сплавов поставленные задачи решаются как разработкой классических жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) путем поиска оптимальных композиций с повышенным содержанием тугоплавких элементов (Re, Ta, W), так и созданием сплавов на основе интерметаллидов (главным образом алюминидов никеля), а также освоением в качестве сверхжаропрочных материалов так называемых естественных композитов — направленно закристаллизованных эвтектических сплавов, упрочненных нитевидными карбидами ниобия и тантала.

Следует отметить, что способ повышения жаропрочных свойств монокристаллических сплавов путем оптимизации традиционного легирующего комплекса, включающего W, Mo, Ta, Ti, Cr, Co, в настоящее время исчерпан. Современная тенденция совершенствования монокристаллических ЖНС заключается в использовании в качестве легирующего элемента рения [2, 3]. Концентрация рения в промышленных ЖНС достигает 3–4% (2-е поколение); в опытных сплавах – 5–6% (3-е поколение). Наибольший эффект в повышении жаропрочности достигнут у опытного сплава с содержанием рения 9%. При этом должен быть достигнут уровень жаропрочности $\sigma_{100}^{1000} \geq 300\text{--}320$ МПа. Разрабатываемые композиции должны быть мало склонны к объемной и поверхностной рекристаллизации при проведении высокотемпературной термообработки и технологических нагревов. Сплав с такими показателями свойств обеспечит повышение рабочей температуры на 30–40°C и увеличение долговечности лопаток в 2–3 раза (в условиях эксплуатационных воздействий).

Необходимость дальнейшего повышения рабочих температур и ресурса деталей ГТД вызвала потребность в изыскании новой, более термостабильной основы сплавов, чем фазоупрочненный твердый раствор на основе никеля.

В качестве такой основы целесообразно использовать интерметаллические соединения типа Ni_3Al , ковалентные связи в которых способствуют более эффективному решению проблем жаропрочности (по сравнению с обычными

металлическими связями твердого раствора). В зависимости от дополнительного легирования основы Ni₃Al, а также от структуры отливок, определяемой технологией литья, можно регулировать уровень жаропрочности этих сплавов. При этом при переходе от равноосной структуры к столбчатой и далее – к монокристаллу жаропрочность сплава возрастает.

Комплекс свойств интерметаллидного сплава с монокристаллической структурой ВКНА-1В МОНО представлен в табл. 1.

Таблица 1.
Свойства сплава ВКНА-1В МОНО

Свойства	Показатели свойств при температуре испытаний, °С							
	-70	20	800	900	1000	1100	1200	1250
σ _в , МПа	1350	1350	890	760	520	410	230	160
δ, %	14	14	26	25	30	22	24	29
σ ₁₀₀ , МПа	–	–	530	360	200	100	50	–
σ ₅₀₀ , МПа	–	–	470	290	150	75	30	–

Следует отметить, что при одинаковом уровне жаропрочности (температура 1100°С) интерметаллидные сплавы содержат существенно меньшее количество дефицитных дорогостоящих тугоплавких элементов, таких как W, Mo и др.

Наиболее эффективно применение сплавов на интерметаллидной основе для изготовления охлаждаемых и неохлаждаемых сопловых лопаток, деталей жаровых труб и реактивного сопла, работающих в интервале температур 900–1150°С.

Новейшие разработки в этом направлении позволяют повысить жаропрочность сплавов до уровня $\sigma_{100}^{1200} > 50-70$ МПа.

Дальнейший прорыв в области жаропрочных материалов (рабочие температуры до 1300°С и более) обеспечивают также металлические композиционные материалы. В качестве матрицы используют различные материалы, такие как Al, Ti, интерметаллиды и др., а в качестве армирующих материалов – нитевидные кристаллы, дисперсные частицы тугоплавких

соединений, в частности карбида кремния, оксидные или вольфрамовые волокна и др.

В настоящее время разрабатываются металлические композиционные материалы со следующим уровнем свойств:

$$\sigma_B^{1200^\circ} > 100 \text{ МПа}; d < 7 \text{ г/см}^3 \text{ (интерметаллидная матрица);}$$

$$\sigma_B^{800^\circ} > 300 \text{ МПа}; d < 6,5 \text{ г/см}^3 \text{ (титановая матрица);}$$

$$\sigma_B^{400^\circ} > 150 \text{ МПа}; d < 3 \text{ г/см}^3 \text{ (матрица из легких сплавов).}$$

К классу композиционных материалов относятся и естественные композиты, получаемые по технологии направленной кристаллизации эвтектических сплавов. В этих сплавах каждая из эвтектических фаз растет перпендикулярно фронту кристаллизации, что позволяет путем перемещения плоского фронта кристаллизации получить ориентированную структуру волокнистого строения. Упрочнителем в этих материалах является непрерывный взаимопроникающий каркас из нитевидных кристаллов монокарбидов тугоплавких металлов (TaC, NbC). Разработанные естественные композиты позволяют получить высокий уровень длительной прочности при температурах до 1200°C ($\sigma_B^{1200^\circ} > 70 \text{ МПа}$). Анализ требований к материалам и достигнутый уровень свойств позволяет прогнозировать существенное возрастание объема применения КМ в перспективных ГТД (до 40%).

Эффективный способ повышения долговечности работы лопаток и других деталей ГТД – применение высокотемпературных защитных покрытий, формируемых в вакууме из многокомпонентной плазмы при высоких энергиях частиц ($10\text{--}10^3 \text{ эВ}$). Стоит задача по разработке системы защиты металла лопаток от сульфидно-оксидной коррозии (ресурс $> 15000 \text{ ч}$), в том числе:

- металлических (конденсированных, конденсационно-диффузионных) систем Me–Cr–Al–Y; (Me–Cr–Al–Y)+(Me–Al–Cr–Y), где Me: Ni; Ni–Co; Co–Ni (рабочая температура до 1250°C);

- теплозащитных из конденсированной керамики на основе стабилизированного диоксида циркония;

- коррозионностойких на основе Ni–Co–Cr–Al–Y; (Ni–Co–Cr–Al–Y)+(Ni–Al–Si–B);

- эрозионно-стойких, коррозионностойких на основе карбидов и нитридов металлов и других для лопаток компрессора из титановых и жаропрочных сплавов и сталей.

Применение таких покрытий обеспечивает также и повышение надежности работы деталей ГТД.

Особой задачей двигателестроения является создание сварных жаропрочных конструкций, таких как жаровые трубы, сварные корпуса камер сгорания и др. К ним предъявляется комплекс жестких технологических требований, в частности хорошая свариваемость, высокая технологическая пластичность. Наиболее перспективными являются отечественные никелевые жаропрочные свариваемые сплавы, такие как ВЖ145, ВЖ155, ВЖ159.

Сплав ВЖ155 является наиболее высокотемпературным свариваемым материалом для жаровых труб камер сгорания. По рабочей температуре (1200–1250°C) этот сплав превосходит все отечественные и зарубежные материалы на Cr–Ni и Cr–Ni–Co основе.

Сплав ВЖ159 по основной характеристике материалов для жаровых труб – термостатичности – в несколько раз превосходит серийные отечественные материалы. Он обладает высокими прочностными характеристиками, что позволяет снизить массу сварных узлов и использовать его в качестве материала как жаровых труб, так и корпусов (табл. 2).

Таблица 2.

Сравнительные свойства никелевых жаропрочных свариваемых сплавов

Сплав	σ_{100} , МПа, при температуре, °С			
	900	1000	1100	1200
ВЖ155	–	60	40	20
НС-188	71	35	15	–
ЭИ868	52	25	–	–
ВЖ145	70	35	15	–

Применение свариваемых сплавов ВЖ145, ВЖ155, ВЖ159 позволило повысить рабочие температуры жаровых труб на 150–200°C, увеличить ресурс в 2–5 раз, а для сварных корпусов существенно повысить удельную прочность, снизить массу (на 15%) и уменьшить трудоемкость при изготовлении и ремонте (на 15–30%).

Материалы для приборов и агрегатов

Целенаправленная разработка высокопрочных сталей, титановых сплавов, магнитных материалов, специальных клеев, теплоаккумулирующих материалов и т.п. позволила значительно повысить «весовую культуру» агрегатов и приборов, надежность их работы и ресурс, нечувствительность к помехам и многие другие важные специфические характеристики.

Для золотниковых пар гидроагрегатов разработан сплав на Cu–Ni основе вакуумной выплавки с высокими механическими свойствами в литом состоянии ($\sigma_{\text{в}}=1120$ МПа; $KCU=0,4-0,5$ МДж/м²) и отсутствием газовой пористости. Сплав обладает высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью (исключается «схватывание» деталей золотников при использовании в гидроагрегатах топлива с повышенным содержанием серы). Продолжаются исследования по разработке деформированного варианта этого сплава с целью повышения КИМ.

Для зубчатых пар редукторов ГТД и вертолетов разработана сталь ВКС-10 с поверхностной твердостью после химико-термической обработки 60 HRC. Сталь работоспособна при 300°C (длительно) и при 550°C (кратковременно – без разупрочнения в течение 2 ч). Применение сталей позволяет передавать значительные крутящие моменты при ограниченных размерах редуктора и обеспечивает безаварийность его работы при перегревах в зоне контакта зубьев в условиях «масляного голодания».

Разработка композиций элинварных сплавов, обладающих малоизменяющимися при колебаниях температуры упругими свойствами, позволила повысить точность срабатывания (в 5 раз) датчиков приборов измерения физических параметров (давление, плотность, скорость),

обеспечить снижение массы и габаритов приборов. Быстродействие и точность навигационных приборов и системы автоматики ЛА обеспечиваются также кольцевыми магнитами с радиальной структурой на основе магнитотвердых материалов системы Nd–Fe–B, разработанных в ВИАМ. Материалы обладают магнитной энергией 320–350 кДж/м³ и в перспективе за счет новых систем легирования и микролегирования величина магнитной энергии достигнет 360–400 кДж/м³.

Таким образом, широкое применение в самолетах, вертолетах и двигателях материалов нового поколения и технологий наряду с внедрением прогрессивных методов неразрушающего контроля, развитием системы управления качеством обеспечат создание и эксплуатацию конкурентоспособной отечественной авиационной техники XXI века.

Список литературы:

1. Пономарев А.И., Никитин А.В., Скворцов Н.К., Кржижановский В.А. Высокоадгезивные и высокопрочные полимерные композиционные материалы повышенной теплостойкости, модифицированные полидисперсными многослойными нанотрубками и астраленами // Материалы Семинара «Моторола-ВНИИЭФ». Саров, 2000.
2. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой (часть I) // Материаловедение. 1997. № 4. С. 32–38.
3. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой (часть II) // Материаловедение. 1997. № 5. С. 14–17.