

## ТИТАНОВЫЕ, МАГНИЕВЫЕ И АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ. ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ

---

УДК 669.018.29

*В.В. Антипов<sup>1</sup>*

### ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ, МАГНИЕВЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194

*Представлены основные направления развития в области алюминиевых деформируемых сплавов для авиационно-космической техники. Рассмотрены сплавы нового поколения с усовершенствованным химическим составом, технологиями изготовления и термомеханической обработки полуфабрикатов. Приведены результаты выполнения работ по разработке новых высокопрочных и высокоресурсных алюминиевых сплавов. Показаны изыскания, направленные на расширение номенклатуры и областей применения существующих сплавов. Разработаны технологии изотермической штамповки, изготовления сварной прессованной панели крыла из высокопрочного алюминий-литиевого сплава. Разработана технология изготовления холоднодеформированных тонкостенных труб из высокотехнологичного сплава для гидравлических систем и систем кондиционирования воздуха взамен сплавов группы АМг, а также с целью импортозамещения аналогичных конструкций из сплава 6061. Осваивается технология изготовления широких (до 3,2 м) обшивочных листов. Ведутся работы, направленные на разработку нового алюминиевого сплава на основе системы Al–Mg–(Si), для получения металлопорошковых композиций, применяющихся для изготовления деталей с использованием селективного лазерного синтеза.*

**Ключевые слова:** стратегические направления, алюминиевые сплавы, магниевые сплавы, титановые сплавы, металлополимерные композиционные материалы, антикоррозионная защита, сварка трением с перемешиванием, панель крыла.

---

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

V.V. Antipov

### Prospects for development of aluminium, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering

*The main directions of development in the area of aluminium wrought alloys for aerospace engineering are presented in the article. Alloys of new generation with improved chemical composition, technologies of manufacture and thermomechanical processing of semi-finished products are considered. Results of R&D projects focused on development of new high-strength and high-resource aluminum alloys are given. The researches intended to extension of the nomenclature and application scopes of aluminium alloys are shown. Technologies of isothermal forging, manufacturing of the welded wing panel from high-strength aluminum-lithium alloy are developed. The manufacturing technology of cold-deformed thin tubes from hi-tech alloy are developed for hydraulic and air conditioning systems instead of Al–Mg group alloys, and also for the purpose of import substitution of similar designs from alloy 6061. The manufacturing technology of wide (to 3,2 m) sheathing plates is mastering. The R&D projects focused on development of new aluminum alloy on the basis of Al–Mg–(Si) system are conducted to produce metalpowder compositions, applied to manufacture details with the use of the selection laser synthesis.*

**Keywords:** *strategic directions, aluminium alloys, magnesium alloys, titanium alloys, metal-polymer composite materials, aluminium fiberglass laminates, anticorrosion protection, friction stir welding, wing panel.*

В настоящее время металлические сплавы остаются одним из основных конструкционных материалов для изделий, выпускаемых предприятиями различных отраслей промышленности. Повышение весовой эффективности изделий является актуальной задачей, которая решается применением в конструкции материалов пониженной плотности, таких как алюминиевые, магниевые и титановые сплавы. В соответствии с разработанными в ВИАМ «Стратегическими направлениями развития материалов и технологий их переработки до 2030 года» ведутся работы по разработке новых и освоению существующих материалов [1].

Одним из наиболее важных направлений является развитие алюминиевых деформируемых сплавов. Они нашли широкое применение в различных отраслях промышленности благодаря низкой плотности, комплексу эксплуатационных характеристик, хорошей технологичности, свариваемости и освоенности в металлургическом производстве [2, 3].

Традиционно для изготовления силовых элементов изделий авиационно-космической техники применяют высокопрочные и сверхпрочные алюминиевые сплавы на базе системы Al–Zn–Mg–Cu, которые являются одними из основных конструкционных материалов. Сплав 1933 заменил

сплав АК6 и широко применен для изготовления силовых деталей внутреннего набора планера (шпангоутов, фитингов и др.) для новых серийных самолетов Як-130 и SSJ-100. В современных самолетах широко применяются полуфабрикаты (катаные и прессованные) из высокопрочного сплава В95п.ч./о.ч.

Отдельно следует выделить направление, развивающееся в последние годы, по разработке новых сплавов с одновременным повышением их прочности и вязкости разрушения, что способствует увеличению весовой эффективности и надежности изделий – это новые особо прочные сплавы марок В96Ц3п.ч. и В-1977 [4].

В зарубежных самолетных конструкциях в последнее время все большее распространение получили сплавы системы Al–Mg–Si, благодаря высокой технологичности при деформации в сочетании с относительно высокой прочностью, коррозионной стойкостью и хорошей свариваемостью, в том числе прогрессивными видами сварки. Сплав В-1341 этой системы, легированный модифицирующими добавками кальция, в виде листов применен в конструкции российского самолета SSJ-100 для изготовления трубопроводов, в том числе сварных, и патрубков сложной конфигурации для элементов системы кондиционирования воздуха, а также для элементов законцовки и лобовика крыла.

С целью расширения номенклатуры и областей применения сплава В-1341 (взамен сплавов группы АМг) разработана технология изготовления тонкостенных холоднодеформированных труб, которые обладают высокой пластичностью, что позволит применять их в конструкциях самолета для деталей трубопроводов систем кондиционирования воздуха, топливных и гидравлических систем с компактной компоновкой, обеспечив снижение трудоемкости при изготовлении.

Особым классом алюминиевых сплавов являются алюминий-литиевые сплавы, которые отличаются пониженной плотностью, при этом обладают повышенной жесткостью и прочностью, хорошей свариваемостью.

Высокопрочные свариваемые сплавы третьего поколения марок В-1461 и В-1469 системы Al–Cu–Li разработаны в качестве альтернативы высокопрочному сплаву В95о.ч. Сплав В-1461 применен в изделиях военной авиационной техники (ПАО «Компания «Сухой») в виде плит, из которых изготовлены детали силового набора – шпангоуты, лонжероны, стенки, нервюры и др.

Важным стратегическим направлением является разработка способов получения сварных конструкций с коэффициентом разупрочнения сварного шва не менее 0,9. Во ФГУП «ВИАМ» совместно с ПАО «Туполев» разработана концепция сварной панели верха крыла из сплава В-1469. Проведенные во ФГУП «ЦАГИ» испытания показали, что ее применение

взамен панели из сплава В95о.ч.-Т2 позволит снизить массу крыла на ~15% за счет повышенной удельной прочности сплава, повысить устойчивость и несущую способность [5, 6].

Дополнительное снижение массы изделия в целом возможно благодаря применению гибридной конструкции на основе металлических и металлополимерных материалов. В настоящее время во ФГУП «ВИАМ» разработан и освоен ряд алюмопластиков на базе алюминий-литиевых сплавов марок 1441 и В-1469, а также разработан, изготовлен и исследован фрагмент прототипа гибридной панели крыла самолета из этих сплавов, применение которой взамен монолитной панели из сплава В95п.ч.-Т2 обеспечит повышение несущей способности конструкции – до 20% с одновременным снижением массы элементов конструкции – до 15% [7, 8].

Одновременно с этим ведутся изыскания по разработке новых высокопрочного ковочного (В-1480) и высокоресурсного обшивочного (В-1481) сплавов системы Al–Cu–Li, применение которых позволит снизить массу изделий на 15–20% благодаря повышенной удельной прочности, при сохранении высокого уровня трещиностойкости и усталостной долговечности по сравнению с серийными сплавами-аналогами.

ФГУП «ВИАМ» – прогрессивный научно-исследовательский центр, в котором способны решать любые задачи, предъявляемые к конструкции современных изделий. Сотрудники института большое внимание уделяют аддитивным технологиям применительно к авиационно-космическому материаловедению. В настоящее время ведутся работы, направленные на разработку нового алюминиевого сплава на основе системы Al–Mg–(Si) для металлопорошковых композиций, применяющихся для получения деталей с использованием селективного лазерного синтеза (СЛС).

В процессе реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» разработаны технологии получения фасонных отливок из современных литейных алюминиевых (ВАЛ20 и АЛ4МС) и магниевых (ВМЛ18 и ВМЛ20) сплавов литьем в разовые формы из холоднотвердеющей смеси (ХТС) и в формы, изготовленные трехмерной печатью, для деталей системы рулевого управления, внутреннего набора и агрегатов перспективных самолетов и вертолетов.

Разработан новый литейный жаропрочный магниевый сплав марки ВМЛ25 системы Mg–PЗМ–Zr с повышенным пределом прочности при температурах эксплуатации от 20 до 250°C [9].

Разработана технология получения среднегабаритных поковок из нового жаропрочного магниевых сплава ВМД16. Впервые для деформируемого магниевых сплава системы Mg–Zn–Zr–PЗМ марки ВМД16

установлено наличие высокодисперсной субзеренной структуры. Показано, что сочетание особой морфологии и топологии интерметаллических фаз и их термостабильности обеспечивает высокий уровень прочностных свойств сплава при комнатной и повышенных температурах (до 300–350°С) при их малой анизотропии [10].

В перспективе для развития алюминиевых литейных и магниевых сплавов планируется разработка технологий тиксолитья и тиксодеформации (тиксоформирования) этих материалов применительно к конкретным деталям, что не только позволит повысить эксплуатационные характеристики, но и улучшит их технологическую пластичность, значительно увеличит КИМ, а также разработка технологий изготовления литейного коррозионностойкого алюминиевого сплава системы Al–Mg с пониженной плотностью.

Для решения данных задач на территории ФГУП «ВИАМ» организуется участок литья магниевых и алюминиевых сплавов – приобретены индукционная тигельная печь для бесфлюсовой плавки, оборудование для обезжиривания и очистки полуфабрикатов, оборудование для обеспечения коррозионной защиты отливок.

Следует выделить направление *литейных и деформируемых титановых сплавов*. Предел рабочих температур жаропрочных титановых сплавов типа BT18У и BT41 составляет 550–600°С, что является недостаточным для деталей компрессора и турбины ГТД нового поколения. Поэтому в течение последних лет внимание разработчиков и исследователей всего мира приковано к новому классу материалов [11].

Наиболее перспективными конструкционными жаропрочными сплавами с температурой эксплуатации >600°С являются интерметаллидные титановые орто-сплавы типа ВТИ-4, которые обладают повышенным уровнем прочностных характеристик, имеют высокие упругие, жаропрочные и жаростойкие свойства, низкий температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР).

Одним из наиболее перспективных направлений повышения уровня механических характеристик жаропрочных сплавов на основе интерметаллидов титана является микролегирование РЗМ. Во ФГУП «ВИАМ» разработана новая композиция интерметаллидного титанового сплава ВИТ5, легированного гадолинием. Он обладает прочностными свойствами на 25–30% выше по сравнению с жаропрочными титановыми сплавами марок BT18У и BT25У при обеспечении гарантированной пластичности при комнатной температуре на уровне 6–8%, а также повышенной жаропрочностью.

Во ФГУП «ВИАМ» разработан также листовая сплав BT38, легированный гадолинием, с повышенными жаропрочными свойствами по

сравнению с наиболее применяемым сплавом ВТ20. Проблема повышения температурного интервала применения жаропрочных титановых сплавов в газотурбинных двигателях применительно к лопаткам остается по-прежнему актуальной. Ее решение позволит резко увеличить весовую отдачу двигателя, что является первоочередной задачей при создании двигателей нового поколения. Поэтому внимание специалистов обращено к материалам, создаваемым на базе интерметаллидов титана и в первую очередь на базе соединений титана и алюминия – гамма-алюминидов. Основными преимуществами таких соединений являются низкая плотность ( $3,8 \text{ г/см}^3$  – у  $\gamma$ -TiAl и до  $4,1 \text{ г/см}^3$  – у  $\gamma$ -сплавов) и высокая жаропрочность. К недостаткам следует отнести низкую пластичность и технологичность при обработке давлением, что определяет приоритет развития технологий точного литья  $\gamma$ -сплавов.

Во ФГУП «ВИАМ» разработана и запатентована композиция литейного интерметаллидного титанового  $\gamma$ -сплава и ведутся работы по отработке технологии фасонного литья отливок рабочих лопаток перспективных ГТД.

В конструкции планера и шасси гражданских и военных самолетов широкое применение нашли высокопрочные титановые сплавы. С целью достижения повышенного уровня свойств, их большей стабильности и, как следствие, повышения надежности конструкции, разработаны модификации сплавов ВТ22 и ВТ23 – сплавы ВТ22М и ВТ23М. Поставленная цель достигнута за счет сужения интервалов легирования и снижения допустимого содержания примесей – кислорода, азота и углерода.

Перспективным высокопрочным титановым сплавом является сплав ВТ43, который по уровню прочности и пластичности превосходит сплав ВТ23 более чем на 10%. С целью снижения затрат при производстве точных штамповок разработан сплав ВТ22И, обладающий повышенной технологичностью.

Совершенствование аэродинамических характеристик планера летательных аппаратов и обеспечение весовой эффективности во многом решается путем применения перспективных композиционных материалов. Разработка титанополимерного слоистого материала предполагает решение целого комплекса проблем: получение тонких листов из титановых сплавов, разработка технологии подготовки поверхности титановых сплавов для обеспечения адгезионной прочности соединений титана с углепластиком, получение препрегов углепластиков на основе различных связующих, разработка технологии формования титанополимерного слоистого материала, выбор оптимальных методов резки и механической обработки титанополимерных материалов [12].

Приоритетными являются проблемы *коррозии и антикоррозионной защиты* авиационной техники. Особое внимание уделяется разработке функциональных защитных покрытий с применением так называемых

«зеленых» технологий, позволяющих снизить экологическую опасность производства за счет уменьшения концентрации или полного исключения из составов раствора токсичных компонентов [3].

На основании этого принципа разработаны технологии плазменного электролитического оксидирования алюминиевых и магниевых сплавов, позволяющие получать покрытия с высокими защитными и функциональными свойствами. Применение таких технологий позволяет заменить в малонагруженных узлах трения стальные детали на алюминиевые с плазменным электролитическим оксидированием, обеспечить пожаробезопасность применения магниевых сплавов.

Разработаны и апробированы новые технологии подготовки поверхности под склеивание алюминиевых сплавов с применением анодного оксидирования и химической обработки поверхности, позволяющие повысить не только адгезионную способность поверхности, но и коррозионную стойкость обрабатываемого сплава. Применение анодного оксидирования в растворах, не содержащих токсичных соединений, позволяет повысить прочность клеевого соединения при сдвиге до 35,5 МПа, что должно увеличить ресурс и механические свойства конструкций из слоистого металлполимерного композиционного материала типа СИАЛ. Химическая подготовка поверхности алюминиевой фольги позволила разработать алюминиевый сотовый наполнитель марки АСП-1,8 с повышенной коррозионной стойкостью.

Наряду с разработкой новых технологических процессов получения защитных покрытий ведется оптимизация и совершенствование традиционных процессов, таких как сернокислотное анодное оксидирование. Разработан экологически улучшенный состав раствора для уплотнения при сернокислотном анодном оксидировании, позволяющий получать покрытия, не уступающие по качеству и защитным свойствам покрытиям, уплотненным в растворе бихромата калия.

Основным видом покрытий, применяемых для защиты от коррозии стальных деталей в изделиях авиационной техники, является кадмиевое покрытие. Вследствие высокой токсичности и экологической опасности соединений кадмия проблема его замены остро стоит перед мировым научным сообществом с 80-х годов прошлого века, и до сих пор ни одно металлическое покрытие по защитной способности в среде хлоридов не может сравниться с кадмиевым покрытием, особенно при наличии в покрытии пор, царапин, сколов и других дефектов.

Лишь два покрытия, разработанные во ФГУП «ВИАМ», составляют альтернативу кадмиевому покрытию: гальванотермическое (толщиной 6–12 мкм) и неорганическое композиционное (толщиной 45–60 мкм). Гальванотермическое покрытие можно наносить на все типы стальных

деталей, обрабатываемых на гальваническом оборудовании и эксплуатируемых при температуре до 120°C как на воздухе, так и в среде масел. Неорганическое композиционное покрытие можно наносить и ремонтировать в «полевых» условиях на деталях со свободными размерами, эксплуатируемых при температуре до 460°C как на воздухе, так и в среде масел. Технологии нанесения этих покрытий имеют минимальное влияние на механические свойства конструкционных, в том числе высокопрочных, сталей.

Помимо разработки технологий нанесения новых покрытий и совершенствования существующих проводятся работы по разработке ремонтных технологий, позволяющих восстанавливать противокоррозионную защиту деталей без демонтажа изделий авиационной техники. Основой ремонтных технологий служат разработанные пасты для очистки металлических поверхностей от продуктов коррозии, а также технологии нанесения неорганического композиционного покрытия и покрытия холодного газодинамического напыления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Алюминиевые сплавы в авиакосмической технике / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2001. 192 с.
3. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 157–167.
4. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А. Высокопрочные алюминиевые сплавы // Цветные металлы. 2013. №9. С. 63–65.
5. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмо-стеклопластики на их основе // Цветные металлы. 2016. №8. С. 86–91.
6. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Сварка и пайка в авиакосмической промышленности // Сварка и безопасность: матер. Всеросс. науч.-практич. конф., 2012. С. 21–30.
7. Антипов В.В. Технологичный алюминий-литиевый сплав 1441 и слоистые гибридные композиты на его основе // Металлург. 2012. №5. С. 36–39.
8. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г. Слоистые алюмо-стеклопластики СИАЛ 1441 и сотрудничество с AIRBUS и TU DELFT // Цветные металлы. 2013. №9 (849). С. 50–53.



9. Дуюнова В.А., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю., Уридия З.П., Волкова Е.Ф. Научное наследие академика И.Н. Фридляндера. Современные исследования магниевых и литейных алюминиевых сплавов // Цветные металлы. 2013. №9. С. 71–78.
10. Волкова Е.Ф., Дуюнова В.А. О современных тенденциях развития магниевых сплавов // Технология легких сплавов. 2016. №3. С. 94–105.
11. Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Алексеев Е.Б. Отечественные жаропрочные листовые титановые сплавы // Вестник машиностроения. 2015. №4. С. 57–59.
12. Арисланов А.А., Гончарова Л.Ю., Ночовная Н.А., Гончаров В.А. Перспективы использования титановых сплавов в слоистых композиционных материалах // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №10. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-4-4.