



Современные алюминиевые,  
магниевые сплавы и композиционные  
материалы на их основе

И.Н. Фридляндер

Январь 2002

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ) – 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 30 научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в 4 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 «Металловедение и термическая обработка металлов», №7, 2002г.

Электронная версия доступна по адресу: [www.viam.ru/public](http://www.viam.ru/public)



## **Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные материалы на их основе**

И.Н. Фридляндер

*Всероссийский институт авиационных материалов*

*Алюминиевые и магниевые сплавы являются основным конструкционным материалом в плане авиакосмической техники. Приведены основные этапы разработки и внедрения легких сплавов.*

### **Алюминиевые высокопрочные сплавы**

Высокопрочные алюминиевые сплавы системы Al–Zn–Mg–Cu наряду со сплавами типа дуралюмин остаются основными конструкционными материалами современной и перспективной авиационной техники [1–3].

Самый распространенный среди этих сплавов и универсальный в отношении выпускаемых полуфабрикатов сплав В95 был разработан в 1940-х годах на основании обширных исследований роли основных компонентов, малых добавок марганца и хрома, режимов термической обработки. Временное сопротивление разрыву ( $\sigma_b$ ) сплава В95 на 20%, а предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) на 40% выше, чем у сплава Д16. Впервые этот сплав был применен в состоянии максимальной прочности Т1 в бомбардировщике Ту-16, созданном в КБ А.Н. Туполева, а затем в первом реактивном пассажирском самолете Ту-104 и других самолетах.

В 1956 г. для изделий атомной промышленности был разработан высоколегированный сплав В96Ц, который превосходит сплав В95 по  $\sigma_b$  и  $\sigma_{0,2}$  на 20 и 30% соответственно. В сплав В96Ц впервые в мировой практике введена эффективная малая добавка циркония, что обеспечило его повышенные пластичность и вязкость разрушения (как и других высокопрочных сплавов). Сплав В96Ц сыграл выдающуюся роль в атомной технике, его применение для центрифуг позволило вырабатывать обогащенный уран 235 самым дешевым способом.

В 1957 г. разработан оригинальный отечественный ковочный сплав В93 системы Al–Zn–Mg–Cu, легированный небольшим количеством железа вместо марганца, хрома и циркония, для изготовления крупногабаритных поковок и штамповок. Благодаря такой композиции сплава обеспечена высокая прокаливаемость и однородность механических свойств массивных сечений в трех направлениях. Сплав В93 и его улучшенная модификация В93пч обладают высокой технологичностью при литье, ковке, штамповке и закалке. Из сплава В93 изготовлен силовой каркас большого транспортного самолета «Антей». Из сплава В93пч производят шпангоуты и другие детали внутреннего силового набора пассажирских самолетов.

В 1970-х годах произошла существенная эволюция высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu в направлении повышения их чистоты по примесям Fe и Si. Это было обусловлено увеличением ресурса и изменением принципов конструирования самолетов и, соответственно, требованием наряду с высокой прочностью обеспечить новый комплекс свойств – повышенные характеристики вязкости разрушения, трещиностойкости и коррозионной стойкости. Эти задачи были решены двумя путями. Радикальным способом повышения пластичности, вязкости разрушения, сопротивления развитию трещин усталости явилось жесткое ограничение примесей железа и кремния и разработка сплавов повышенной и особой чистоты (В95пч, В95оч, В93пч). Кардинальным способом повышения стойкости к опасным видам коррозии (коррозионному растрескиванию под напряжением, расслаивающей коррозии) явилась разработка и внедрение ступенчатых режимов смягчающего старения (Т2, Т3). Это открыло возможность широкого применения высокопрочных сплавов в самолетах Ил-86, Ил-96, Ту-154, Ту-204 и других и расширило область их использования (например, в виде неплакированных листов).

На базе сплава В93пч был создан новый перспективный сплав 1933. Введение в этот сплав циркония при оптимизации содержания железа привело к заметному повышению характеристик трещиностойкости,

усталости, прочности при сохранении высокой технологичности. Сплав 1933 был использован в самолете «Мрия» для изготовления крупногабаритных поковок и штамповок. Он перспективен для самолетов нового поколения.

Значительным этапом в развитии высокопрочных сплавов явилась разработка в 1970 г. особо прочного сплава В96Ц-3, отличающегося повышенной технологической пластичностью и высокой прочностью. Сплав широко используется в виде штамповок сложных форм в ракетной технике. В настоящее время оптимизированная композиция сплава В96Ц-3 (сплав 1965-1), для термической обработки которого разработаны новые варианты многоступенчатого старения (Т12), осваивается для применения в самолетных конструкциях (верх крыла и др.). Для пресованных полуфабрикатов создан самый прочный, высоколегированный сплав В96Ц-1 с временным сопротивлением разрыву до 730 МПа.

### ***Алюминиево-литиевые сплавы***

Наиболее эффективным способом повышения удельной прочности сплавов и снижения массы конструкции является уменьшение плотности материалов. Первый сплав с литием ВАД23 системы Al-Li-Cu-Mn-Cd с пониженной на 5% плотностью и повышенным на 5% модулем упругости (по сравнению со сплавом Д16) был разработан в 1960 г. Сплав используется для стабилизаторов ракет малой дальности. Отличаясь высокой жаропрочностью (до 250°C), он был применен в конструкции самолета Ту-144. Из-за присутствия лития сплав ВАД23, как в последующем и все сплавы, легированные литием, оказался очень сложным в металлургическом производстве: в расплавленном состоянии быстро окислялся, имел повышенную склонность к насыщению водородом и образованию литейных трещин, что потребовало разработки специальных способов защиты при плавке и литье. Проведенный комплекс работ позволил на существующем в промышленности оборудовании освоить плавку с использованием флюсов и отлить слитки непрерывным методом. Накопленный научный и

экспериментальный опыт плавки и литья сплава ВАД23 явился основой для дальнейшего успешного освоения новых алюминиево-литиевых сплавов.

Этапное значение в развитии Al–Li-сплавов имело сделанное в 1965 г. И.Н. Фридляндером, В.Ф. Шамраем, Н.В. Ширяевой открытие эффекта упрочнения при термической обработке сплавов системы Al–Mg–Li в большой концентрационной области. На базе этой системы в 1968 г. был разработан не имеющий аналогов за рубежом самый легкий алюминиевый сплав 1420. Этот сплав обладает высокой коррозионной стойкостью, хорошей свариваемостью, повышенным модулем упругости и достаточной статической прочностью. По поводу модуля упругости необходимо отметить, что литий поколебал незыблемую до этого, установленную академиком Н.С. Курнаковым закономерность: модуль упругости сплава – есть среднее между модулями элементов, входящих в сплав. У лития чрезвычайно низкий модуль упругости, а при его введении в алюминий он не снижает, а повышает модуль упругости сплава.

В 1971 г. сплав 1420 применили в клепаной конструкции фюзеляжа самолета вертикального взлета Як-36, получив выигрыш в массе 16%. Благодаря тому что сплав 1420 сваривается всеми видами сварки, в 1980 г. он был рекомендован ОКБ им. А.И. Микояна для создания первого в мире сварного самолета МиГ-29. Для обеспечения сварной конструкции полуфабрикатами из сплава 1420 с регламентированным содержанием водорода и натрия был создан и установлен на КУМЗ принципиально новый плавилисьно-литейный агрегат и разработана технология вакуумной обработки расплава. Кроме того, для сварной конструкции была разработана технология получения штамповок с регламентированными степенями деформации и с охлаждением при закалке водно-воздушной смесью, что обеспечило гарантированный уровень свойств в трех направлениях. Большие работы были проведены по получению прессованных панелей и профилей, по улучшению качества листов и по сварке. В результате проведенных работ из сплава 1420 были изготовлены сварные, герметичные баки и кабина пилота



для МиГ-29 и его модификаций, что позволило получить снижение массы сварных, герметичных отсеков на 24% и внедрить в производство прогрессивную технологию автоматической сварки (взамен клепки). Эта работа была продолжена на серийном заводе «Знамя труда». В ней активное участие принимал Е.Н. Каблов.

На основе сплава 1420 был разработан сплав 1421 с более высоким пределом текучести (на 20–25%) благодаря введению в него скандия. В виде штамповок этот сплав широко используется для корпусов ракет ГРЦ «КБ им. академика В.П. Макеева», что дает возможность снижения их массы на 10–15%. Для изготовления стрингеров фюзеляжа (клепаные и сварные конструкции) самолета Ан-124 разработана модификация сплава 1421. Другая модификация сплава 1420 – сплав 1423 с пониженным содержанием магния и дополнительным легированием скандием – был разработан в 1985–1986 гг. для изготовления листовых деталей сложной конфигурации методом сверхпластичной формовки.

На базе системы Al–Cu–Li разработаны высокопрочные сплавы 1450 и 1451, характеризующиеся высокой прочностью при повышенных температурах и высокой коррозионной стойкостью. В результате дополнительного легирования цирконием и скандием сплавов системы Al–Cu–Li был разработан свариваемый сплав 1460 для сварных криогенных топливных баков космического и авиационного назначения. Из сплава 1460 на НПО «Энергия» была отработана технология изготовления сварных баков для жидкого кислорода диаметром до 4500 мм и высотой до 4000 мм и по заказу фирмы «Макдональд Дуглас» (США) изготовлены баки для ракеты «Дельта», предназначенной для вывода на космическую орбиту спутников мировой системы связи; при этом получено снижение массы на 35%. Летные испытания прошли успешно. В ГКНПЦ им. М.В. Хруничева также предполагается использование сплава типа 1460 для изготовления сварных топливных баков.

На базе системы Al–Li–Cu–Mg разработаны сплавы 1430 и 1441 для планера самолетных конструкций длительного ресурса. По сравнению со сплавом Д16 они обладают более низкой плотностью (на 8%) и более высоким модулем упругости (на 10%). Сплав 1430 имеет высокие вязкость разрушения и трещиностойкость, его повышенная технологическая пластичность позволяет получать рулонной прокаткой с промежуточными отжигами листы толщиной 1,5 мм и самолетные детали по принятой для сплава Д16 технологии. Сплав 1430 рекомендован для обшивки и силового набора планера взамен сплавов 1163 и Д16, что обеспечит снижение массы конструкции на 8%.

Сплав 1441 – единственный Al–Li-сплав, из которого получают тонкие листы рулонной прокаткой по технологии, принятой для сплава 1163 (типа Д16). Он характеризуется высокой малоцикловой усталостью и трещиностойкостью. Сплав 1441 успешно применен в виде листов и гнутых профилей в самолетах Бе-200 и Бе-103 ТАНТК им. Г.М. Бериева и принят в качестве основного материала для фюзеляжа самолета бизнес-класса КБ им. А.Н. Туполева.

### ***Жаропрочные деформируемые алюминиевые сплавы***

Разработка жаропрочных деформируемых алюминиевых сплавов для авиастроения проводилась вначале в основном для деталей двигателей – как поршневых, так и реактивных (поршни, кольца, лопатки, диски, крыльчатки, колеса компрессора и др.). Для этой цели освоены в промышленности жаропрочные сплавы АК4 и АК4-1 системы Al–Cu–Mg–Fe–Ni.

Успешному применению сплавов АК4 и АК4-1 способствовали фундаментальные исследования структуры и свойств и установление роли легирующих элементов железа, никеля и кремния. Наиболее широкое применение для двигателей получил сплав АК4-1 вследствие более высоких технологических свойств. Рабочая температура деталей двигателей из этого сплава составила 200–250°С при ресурсе порядка 1000–2000 ч.

Для работы при температурах до 300°С был разработан жаропрочный сплав Д20 системы Al–Cu–Mn, длительная прочность которого при 300°С за 100 ч в 2 раза выше, чем у сплава АК4-1. Жаропрочный сплав ВД17 также заметно превосходит по жаропрочным характеристикам сплав АК4-1 при температурах выше 200°С. Эти сплавы нашли применение в серийном производстве для лопаток компрессора и в двигателестроении.

В начале 1960-х годов возникла проблема создания сверхзвуковых пассажирских самолетов с длительным ресурсом (примерно 30000 ч) при эксплуатационных нагревах до 120–150°С.

Решающим фактором в выборе алюминиевых деформируемых сплавов в качестве конструкционного материала были их высокие механические свойства при повышенных температурах, особенно жаропрочные характеристики. Наиболее перспективным жаропрочным сплавом для сверхзвуковых пассажирских самолетов Ту-144 оказался сплав АК4-1.

На базе сплава АК4-1 путем снижения содержания железа и никеля в 2 раза и введения циркония разработан новый жаропрочный алюминиевый деформируемый сплав АК4-2ч (1143) с повышенными (на 20–30%) характеристиками трещиностойкости при сохранении механических свойств и жаропрочности на уровне свойств сплава АК4-1. Сплав АК4-2ч рекомендуется к применению для нового поколения сверхзвуковых пассажирских самолетов, испытывающих эксплуатационные нагревы при температурах до 130–150°С.

На базе системы Al–Cu–Mn разработан сплав Д21 с высоким содержанием меди и небольшими добавками магния для работы при температурах до 200°С, отличающийся высокими длительной прочностью и сопротивлением ползучести при 150–200°С, а также повышенными характеристиками трещиностойкости (по сравнению со сплавом АК4-1).

На базе сплава Д21 путем выбора оптимального содержания легирующих элементов и введения добавок тугоплавких элементов разработан более жаропрочный сплав Д25.

Следующим направлением в развитии жаропрочных сплавов системы Al–Cu–Mn с высоким содержанием меди было введение малых добавок элементов, инициирующих процесс распада твердого раствора Al–Cu при искусственном старении. Так, легирование малыми добавками магния, циркония позволило разработать высокопрочный и жаропрочный сплав 1215, который превосходит сплав Д21 по прочности (на 30–40 МПа) и жаропрочности (на 20–30%).

Из жаропрочных сплавов Д21, Д25, 1215 системы Al–Cu–Mn изготавливают все основные виды полуфабрикатов – прессованные, катаные (листы и плиты) и кованные.

Новые жаропрочные сплавы Д25 и 1215 могут быть применены для нового поколения сверхзвуковых пассажирских самолетов при рабочих температурах 150–170°С с ресурсом до 60000 ч.

На основе системы Al–Cu–Mn разработан высокопрочный свариваемый алюминиевый сплав 01205 с небольшими добавками кадмия и циркония, а также освоен в производстве свариваемый жаропрочный сплав 1201.

Сплавы 01205 и 1201 рекомендуется применять для сварных емкостей, баков и других подобных изделий как более прочные и жаропрочные, чем сплав АМгб, а также для криогенной техники.

### ***Жаропрочные свариваемые деформируемые конструкционные алюминиевые сплавы***

С появлением ракетно-космической техники возникла острая необходимость в свариваемых алюминиевых деформируемых сплавах. В 1950-х годах был разработан ряд свариваемых сплавов системы Al–Mg (магналии): АМг1, АМг2, АМг3, АМг4, АМг5, АМг6, способных длительно работать до 70–100°С.

Бурное развитие ракетно-космической техники привело к повышению рабочих температур и нагрузок и потребовало разработки жаропрочных свариваемых сплавов. В результате был разработан сплав М40, отработана технология изготовления промышленных полуфабрикатов, сварки и

изготовления различных сварных конструкций (отсеков) ракетно-космической техники. Сплав М40 был внедрен в изделие «Гранит» (НПО «Машиностроение»), которым в настоящее время оснащены крейсер «Петр Великий» и подводные корабли типа «Орел».

В 1960 г. на основе системы Al–Cu–Mg разработан жаропрочный свариваемый сплав ВАД1. После проведения совместных работ с КБ им. С.А. Лавочкина сплав был внедрен в одно из изделий этого КБ.

Свариваемые сплавы системы Al–Cu–Mg превосходили сплавы системы Al–Mg по прочности и допустимому температурному пределу эксплуатации, но уступали им по свариваемости и технологичности.

В сплавах системы Al–Cu–Mg установлены закономерности влияния на их свойства содержания меди, магния и малых добавок некоторых переходных металлов, что позволило разработать ряд жаропрочных свариваемых сплавов нового поколения: 1150, 1151, 1153, 1177, обладающих хорошей свариваемостью, повышенными жаропрочностью, коррозионной стойкостью и технологичностью. Наиболее полно исследован и опробован в опытных конструкциях сплав 1151. Он применен в конструкции МКБ «Радуга» взамен титановых сплавов и нержавеющей стали.

### ***Высокоресурсные сплавы для широкофюзеляжных самолетов Ил-96-300 и Ту-204***

Сплав Д16ч – основной конструкционный материал для авиационной промышленности. Из него изготавливают все виды полуфабрикатов.

Развитие принципа безопасно повреждаемых конструкций поставило задачу повышения характеристик надежности, особенно вязкости разрушения и сопротивления скорости роста усталостной трещины материалов. Одним из направлений эффективного повышения эксплуатационных свойств алюминиевых сплавов является снижение содержания в них железа и кремния.

Анализ фазового состава сплава Д16 показал наличие большого количества избыточных растворимых, но не растворенных

интерметаллидных фаз. Установлено, что снижение доли нерастворенных фаз до 2% приводит к заметному повышению характеристик вязкости разрушения и сопротивления малоцикловой усталости (МЦУ). Эти исследования привели к разработке сплава 1163. Повышение вязкости разрушения сплава 1163 на 10–20% (по сравнению со сплавом Д16ч) достигнуто за счет уменьшения количества нерастворимых избыточных фаз в сплаве в результате снижения допустимого содержания примесей железа и кремния, а также ограничения верхнего предела содержания легирующих элементов: меди и магния.

Из сплава 1163 освоены и внедрены в широкофюзеляжные самолеты Ил-96-300 и Ту-204 длинномерные (до 30 м) плиты для нижней обшивки крыла и листы с алюминиевой и твердой регламентированной плакировкой для обшивки фюзеляжа.

Изучение сплавов системы Al–Mg–Si–Cu привело к созданию свариваемого коррозионностойкого сплава АД37, который отличается от известных сплавов этой системы (АВ, АД31, АД33 и АД35) более высокими прочностными свойствами при растяжении и сжатии, повышенными характеристиками трещиностойкости и отсутствием склонности к межкристаллитной коррозии. Сплав АД37 по ресурсным характеристикам близок к сплавам 1163Т и Д16чТ, но превосходит их по коррозионной стойкости. Кроме того, сплав АД37 характеризуется высокой технологичностью в металлургическом и машиностроительном производстве. Сплав рекомендован для обшивки и силового набора для замены сплава 1163Т, что обеспечит повышение коррозионной стойкости и надежность в эксплуатации, особенно в морских и тропических условиях.

### ***Композиционные материалы на алюминиевой основе***

Новым классом композиционных материалов конструкционного назначения являются слоистые алюмостеклопластики – СИАЛы, разработанные в 1990-х годах. СИАЛы, состоящие из тонких алюминиевых листов и прослоек высокопрочного стеклопластика, отличаются чрезвычайно

высокими трещиностойкостью ( $d2l/dN < 0,3$  мм/цикл), прочностью ( $\sigma_B = 600-1200$  МПа) и пониженной плотностью ( $\rho = 2500$  кг/м<sup>3</sup>). Созданные композиции (СИАЛ1, СИАЛ2, СИАЛ3) различаются структурой армирования, которая выбирается в зависимости от условий эксплуатации элементов различного назначения, и предназначены для замены монолитных алюминиевых листов из сплавов Д16ч, 1163, В95пч в обшивках фюзеляжа, крыла и внутреннего набора, а также для ремонта поврежденных конструкций в качестве стоппера трещин.

Композиционный материал КАС представляет собой «слоеный пирог», состоящий из тонких листов алюминиевых сплавов В95, 1163 или 1441 и сетки из проволоки высокопрочной стали ВНС-9 с прочностью от 3200 МПа (при диаметре проволоки 0,15 мм) до 4800 МПа (при диаметре проволоки 0,05 мм). Стальная проволока обладает высокой пластичностью, поэтому КАС можно получать различными технологическими методами – прокаткой, прессованием, взрывом. Регулируя направление укладки сеток, можно получить изотропный материал или материал с максимальной прочностью в продольном направлении. КАС отличается крайне малой скоростью роста усталостных трещин – в 1000 раз меньшей, чем у лучших алюминиевых сплавов.

### ***Литейные алюминиевые сплавы***

Основные области применения литейных алюминиевых сплавов – самолетостроение, автомобилестроение, электромашиностроение, бытовая техника.

Особые требования к надежности узлов и деталей в самолетостроении предполагают применение высококачественных, надежных в эксплуатации деталей, изготовленных из литых заготовок алюминиевых сплавов повышенной чистоты. В конструкциях современных самолетов применяется от 250 до 1500–2000 наименований алюминиевых отливок из литейных алюминиевых сплавов четырех основных типов: технологичные, высокопрочные, жаропрочные, коррозионностойкие.

Большую группу высокотехнологичных сплавов, предназначенных для изготовления отливок различными видами литья, составляют сплавы на основе системы Al–Si: АЛ9-1, АЛ5-1, АЛ9М, В124 с прочностью от 320 до 400 МПа.

В отечественной практике самолетостроения широко применяются высокопрочные сплавы на основе системы Al–Cu (ВАЛ10 и ВАЛ14) и Al–Zn–Mg (ВАЛ12). Детали из сплавов системы Al–Cu получают в основном литьем в песчаные формы, они имеют  $\sigma_{\text{в}}=420\text{--}460$  МПа. Сплавы системы Al–Zn–Mg предназначены для изготовления отливок литьем в металлические формы; детали из них имеют  $\sigma_{\text{в}}=550$  МПа. Эти сплавы применяются для деталей внутреннего набора фюзеляжа самолета, в мотогондолах, крыле, системах управления и т.д. Отливки из высокопрочных сплавов в ряде случаев заменяют алюминиевые штамповки.

Жаропрочные сплавы АЛ33 и ВАЛ18 с  $\sigma_{\text{в}}=280\text{--}300$  МПа при комнатной температуре и  $\sigma_{\text{в}}=100\text{--}125$  МПа при  $350^{\circ}\text{C}$  разрабатывались на основе системы Al–Cu–Ni; в качестве дополнительных легирующих элементов использовали марганец, титан, цирконий и церий. Они применяются для изготовления деталей, работающих в мотогондолах вблизи двигателя, в системах воздухоотбора, где температуры могут постоянно или временно достигать  $250\text{--}350^{\circ}\text{C}$ .

Коррозионностойкие сплавы системы Al–Mg имеют достаточно высокий уровень свойств: прочности, пластичности, ударной вязкости, усталостных характеристик, свариваемости и, главное, обладают коррозионной стойкостью, позволяющей применять их в конструкциях гидропланов, работающих в условиях обливания морской водой и воздействия морского тумана. В настоящее время в сварных конструкциях литых и литодеформированных деталей, работающих в сложных условиях нагружения, при длительной эксплуатации в агрессивных средах наиболее широко применяется сплав ВАЛ16 с  $\sigma_{\text{в}}=260$  МПа.



Дальнейшее повышение служебных свойств литейных алюминиевых сплавов возможно при совершенствовании технологических процессов производства литых деталей, включая плавку, обработку жидкого металла, термическую обработку отливок.

Технологические и эксплуатационные возможности литейных алюминиевых сплавов показывают их большую перспективность в качестве конструкционных материалов для многих отраслей машиностроительного комплекса.

### ***Литейные магниевые сплавы***

Разработка новых видов техники, увеличение радиуса действия, необходимость повышения весовой отдачи изделий потребовали создания новых литейных магниевых сплавов, имеющих более высокие характеристики жаропрочности, прочности и коррозионной стойкости при температурах эксплуатации от  $-253$  до  $+(350-400)^\circ\text{C}$  с сохранением минимальной массы работающих деталей.

Этим требованиям соответствуют высокопрочные сплавы системы Al–Zr МЛ8, МЛ12 и МЛ15 с добавками цинка, неодима, лантана, индия, иттрия. Добавка циркония в магниевые сплавы обеспечивает: значительное измельчение зерна; связывание и выведение из расплава вредных примесей железа, кремния, никеля, водорода; получение высоких однородных механических свойств; высокую герметичность отливок. Эти сплавы характеризуются удельной прочностью на уровне 12–15 км.

Большой интерес представляют жаропрочные магниевые сплавы МЛ19, ВМЛ14, ВМЛ17 на основе системы Mg–Nd–Y–Zr с добавками, предназначенные для длительной эксплуатации при температурах  $300-350^\circ\text{C}$  и кратковременной – при  $400^\circ\text{C}$ . Сплавы обладают удачным сочетанием высоких механических свойств при комнатной ( $\sigma_{\text{в}}=220-300$  МПа) и повышенных температурах (при  $300^\circ\text{C}$   $\sigma_{\text{в}}=150-200$  МПа), хорошими литейными и коррозионными свойствами.

Повышение уровня надежности и эксплуатационных характеристик магниевых сплавов достигается оптимизацией существующей литейной технологии и разработкой новых способов обработки расплава, обеспечивающих равномерность химического и фазового составов, мелкозернистое строение литой структуры, отсутствие ликвационных явлений, повышение чистоты по металлическим примесям и неметаллическим включениям.

С целью максимального использования возможностей сплавов разработан ресурсосберегающий процесс плавки и литья магниевых сплавов без применения флюсов в защитных газовых средах. Процесс позволяет повысить качество литья, улучшить условия труда, снизить загрязнение окружающей среды.

### *Деформируемые магниевые сплавы*

Сплавы на основе магния, благодаря своим физико-механическим характеристикам (высокая удельная прочность и удельная жесткость при изгибе и кручении), являются конструкционными материалами, применение которых дает возможность значительно уменьшить массу конструкции. Деформируемые магниевые сплавы нашли применение в основном в авиакосмической технике и ракетостроении (детали управления, кресла самолетов, посадочные устройства, фюзеляжи ракет и т.п.). Отечественные космические программы выполнялись с использованием деформируемых магниевых сплавов в конструкциях космических аппаратов «Восход», «Восток», «Космос», «Союз», «Луна», «Венера», «Марс». Усовершенствованные методы защиты магниевых сплавов неорганическими пленками и лакокрасочными покрытиями обеспечивают устойчивую работу деталей из этих сплавов в различных климатических условиях.

К ультралегким сплавам относятся сплавы, содержащие литий в качестве основного легирующего элемента – МА18 и МА21 ( $\rho=1500\text{--}1600\text{ кг/м}^3$ ). Сплавы оригинальны по композиции, по прочностным характеристикам превосходят американские сплавы La141 и LaZ933. По удельным

характеристикам Mg–Li-сплавы (удельная прочность 13,3–14,4 кМ) близки деформируемому алюминиевому сплаву средней прочности АК6 (13,5 кМ).

К перспективным разработкам относятся высокопрочные и одновременно жаропрочные свариваемые магниевые сплавы системы Mg–Y–Zn: МА22 (ВМД10) и ВМД10-1. Детали из этих сплавов предназначены для длительной эксплуатации до 200°С и кратковременной – до 250°С.

По совокупности основных показателей: высоким прочностным характеристикам при растяжении и сжатии в интервале -70°С÷+250°С, малой анизотропии механических свойств ( $\leq 15\%$ ), хорошей свариваемости сплав МА22 превосходит отечественные (МА5, МА12, МА14) и зарубежные (ZK60A, ZCM711, HM31, AZ60A) высокопрочные и жаропрочные магниевые деформируемые сплавы. Из него могут быть изготовлены прессованные, штампованные и кованные полуфабрикаты (последние – массой до 100 кг) со стабильным уровнем свойств ( $\sigma_{\text{в}}=320\text{--}360$  МПа,  $\delta=6\%$ ,  $\sigma_{\text{в.св}}=270\text{--}300$  МПа). Сплав предназначен для высоконагруженных сварных и несварных конструкций. Для защиты от коррозии деталей из этого сплава разработаны и применяются эффективные системы лакокрасочных покрытий.

Особую группу составляют гранулированные сплавы МА2-1гр и МА14гр с повышенным уровнем механических свойств.

### **Список литературы:**

1. Фридляндер И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. – М.: Металлургия, 1979. 208 с.
2. Квасов Ф.И., Фридляндер И.Н. Алюминиевые сплавы типа дуралюмин. – М.: Металлургия, 1984. 240 с.
3. Машиностроение. Энциклопедия. Том 11-3. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы / Под ред. И.Н. Фридляндера. – М.: Машиностроение, 2001. 880 с.