Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.Р. Луц, А.А. Суслина

АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ

САМАРА 2013

Издается по решению методического совета ФТФ СамГТУ

УДК 544-971.2

Алюминий и его сплавы: Учебное пособие / Сост. А.Р.Луц, А.А. Суслина. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 81 с.:ил.

Материал предназначен для школьников, школьных учителей, студентов и бакалавров младших курсов. Представляет собой научно-популярные сведения о развитии и становлении алюминиевой промышленности, а также рассказывает о современных сплавах на алюминиевой основе. Материал предназначен для факультативного изучения и популяризации естествознания и технических наук.

УДК 544-971.2

© А.Р. Луц, А.А. Суслина

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 4

1 Алюминий и основные конструкционные алюминиевые сплавы 7

1.1 Классификация и маркировка алюминиевых сплавов 7

1.2 Влияние легирующих элементов на свойства алюминиевых сплавов 14

1.3 Перспективные алюминиевые системы 19

2 Новейшие разработки в области алюминиевых сплавов 34

2.1 Сплавы, неупрочнямые термической обработкой 34

2.2 Сплавы, упрочняемые термической обработкой 37

3 Покрытия алюминиевых сплавов 51

3.1 Современные методы оксидирования 55

3.1.1 Электрохимическое анодирование 55

3.1.2 Микродуговое оксидирование 59

3.2 Другие виды защитных покрытий и способы их нанесения 63

Заключение 68

Список использованных источников 70

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее важные области применения алюминиевых сплавов в настоящее время – авиационная и ракетная техника. Высокие удельные характеристики, технологичность, ценовая доступность – ценные свойства, изначально определившие выбор авиаконструкторов. Для работы узлов в реальных условиях эксплуатации в космосе необходима также стойкость материалов к воздействию факторов космического пространства: высокого вакуума, перепадов температур, радиации и пр. В настоящий момент этим требованиям максимально отвечают алюминиевые деформируемые сплавы, которые и используются наиболее активно.

Наглядные примеры – материалы конструкции планеров отечественного орбитального корабля «Буран» и американского космического корабля "Space Shuttle" [1]. Хотя данные проекты разрабатывались в 80-е годы, выбор материалов весьма показателен.

НПО "Энергия", НПО им. Лавочкина и Всероссийский институт авиационных материалов (ВИАМ), руководствуясь специфическими условиями работы орбитального корабля, особенностями конструкции и предыдущим опытом эксплуатации материалов в конструкциях ракет-носителей одноразового применения, для изготовления «Бурана», помимо прочих, выбрали алюминиевые сплавы 1201, Д16ч, В93пч. Немаловажно, что НПО "Молния" совместно с ВИАМ, ЦАГИ был проведен цикл испытаний для определения работоспособности выбранных материалов. Особое внимание уделялось испытаниям на механические свойства в условиях термоциклирования (от -130 до +150°С), определению длительной прочности и ползучести в интервале рабочих температур, вязкости разрушения. Образцы из листов и плит сплава Д16чТ1 и плит сплава 1201Т1 выдержали 100 циклов нагружения, в то время как образцы из листов сплава 1201Т1 разрушились после 40... 60 циклов. В связи с этим для обшивок, нервюр, стрингерного набора и других элементов из листов был использован алюминиевый сплав Д16 с пониженным содержанием примесей, т.е. химического состава повышенной чистоты. Необходимо отметить, что используемый алюминиевый сплав Д16 хотя и имеет (по отечественным стандартам) химический состав

повышенной чистоты, однако по сравнению с алюминиевыми сплавами, примененными в конструкции планера американского многоразового космического корабля "Space Shuttle", содержит большее количество примесей, снижающих его термоциклические характеристики. Используемый в конструкции орбитальной ступени "Space Shuttle" алюминиевый сплав 2024-Т81 благодаря своему химическому составу (сверхчистый алюминий с легирующими добавками Cu-Mg-Mn) в лабораторных условиях под нагрузкой выдерживает неограниченное количество термоциклов при температурах до 200°С, при этом верхняя граница рабочих температур, обеспечиваемая плиточной теплозащитой, составляет +179°С, что и гарантирует требуемый ресурс конструкции в 100 термоциклов (полетов). Справедливости ради нужно добавить, что послеполетный анализ орбитальных ступеней "Space Shuttle" выявил неопасные усталостные трещины в неответственных деталях конструкции консолей крыла, однако американские инженеры придерживаются мнения об обычных причинах их возникновения, подобно аналогичным трещинам в конструкциях эксплуатируемых широкофюзеляжных самолетов. Отечественные сплавы группы Д16 также допускали кратковременную работу конструкции в температурном диапазоне +150°...160°С, но за это приходилось платить снижением располагаемого ресурса по количеству термоциклов (космических полетов). Не имея в своем распоряжении освоенных промышленностью нужных алюминиевых сплавов, по качеству аналогичных зарубежным, отечественные конструкторы, стремясь гарантированно обеспечить заданный ресурс конструкции в 100 полетов при сходной с "Space Shuttle" картине тепловых нагрузок, были вынуждены пойти на снижение верхней границы допустимых эксплуатационных температур конструкции до +150°С и ввести как обязательный этап послеполетного обслуживания операцию интенсивного охлаждения конструкции системой наддува и вентиляции планера с использованием наземных средств. Для силовой конструкции планера и для модуля кабины был использован свариваемый термоупрочняемый алюминиевый сплав 1201.

В дальнейшем для несварной силовой конструкции (поясов шпангоутов, стенок, лонжеронов и т.д.) применялся высокопрочный термоупрочняемый алюминиевый сплав 1163Т1 (типа Д16ч) взамен штамповок сплава В93пчТ2 и плит сплава 1201Т1, что позволило снизить вес конструкции, а также избавиться от коробления при механической обработке деталей из штамповок В93пчТ2. Несмотря на вышесказанное, широкое применение сплавов 1201, Д16, 1163 и других в искусственно состаренном состоянии требует учета ряда особенностей как при конструировании деталей, так и в технологии их изготовления и сборки.

Последние сообщения исследователей показывают, что металловедение космических материалов развивается преимущественно в направлении усовершенствования высокопрочных алюминиевых сплавов системы Al-Zn-Mg [2]. Так, например, сообщается, что международной группой ученых, в состав которой вошли российские, американские и австралийские исследователи, был разработан новый алюминиевый сплав, прочность которого сопоставима с прочностью стали, передает ScienceNOW со ссылкой на полную версию отчета, опубликованную в Nature Comunications. Сплав с новыми физическими свойствами был создан на основе американского алюминиевого сплава 7075, который давно и широко применяется в аэрокосмической промышленности. Технология включает в себя ряд стадий физического воздействия, а в заключение материалу дают время "состариться" при комнатной температуре. В результате предел текучести алюминиевого сплава составляет 1 ГПа.

Таким образом, очевидно, что усовершенствование существующих и разработка новых материалов на основе алюминия по-прежнему является актуальной задачей современного материаловедения. Попробуем разобраться во всем разнообразии современных алюминиевых материалов и найти самые подходящие из них для службы в трудных условиях стратосферы и космоса.

1 АЛЮМИНИЙ И ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

1.1 Классификация и маркировка алюминиевых сплавов (российская и международная)

Поскольку в данной работе ниже будут рассматриваться новейшие разработанные сплавы, как российских, так и иностранных разработчиков, то для их сопоставления и сравнения имеет смысл привести действующие виды маркировки алюминиевых сплавов.

В *Российской Федерации* ГОСТ 4784 "Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки" дает маркировку сплавов тремя способами: как в буквенно-цифровом виде, так и только в цифровом виде, а также и с учетом требований международного стандарта (международная маркировка) ИСО 209-1 (ISO 209-1 Wrought aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and forms of products - Part 1: Chemical composition). При этом цифровая маркировка по ГОСТ не совпадает с международной маркировкой алюминиевых сплавов [3]. Цифровая маркировка по ГОСТ обозначает слева - направо: первая цифра - основной металл (1-алюминий); вторая цифра - легирующая система; третья и четвертая цифры - марка и модификация.

Марка	Группа сплавов, основная система легирования
1000–1018	Технический алюминий
1019, 1029 и т.д.	Порошковые сплавы
1020–1025	Пеноалюминий
1100–1190	Al—Cu—Mg, Al—Cu—Mg—Fe—Ni
1200–1290	Al—Cu—Mn, Al—Cu—Li—Mn—Cd
1300–1390	Al—Mg—Si, Al—Mg—Si—Cu
1319, 1329 и т. д.	Al—Si, порошковые сплавы САС
1400–1419	Al—Mn, Al—Be—Mg
1420–1490	Al—Li
1500–1590	Al—Mg
1900–1990	Al—Zn—Mg, Al—Zn—Mg—Cu

Помимо приведенной цифровой маркировки, в настоящее время повсеместно используется смешанная буквенная и буквенно-цифровая маркировка алюминиевых сплавов. Например, деформируемые сплавы обозначаются буквами Д, АД, АК, АМ, АВ; литейные – АЛ. Буквой Д обозначают сплавы дуралюминия Д1, Д16 и т.д. Буквы АВ означают сплав авиаль. Буквы АМг и АМц обозначают сплав алюминия с магнием (Мг) и марганцем (Мц), причем цифры, следующие за буквами АМг1; АМг6 соответствуют примерному содержанию магния в этих сплавах. Буквы АД отвечают алюминию деформированному, цифра указывает чистоту алюминия. Чистота сплавов обозначается следующими буквами, стоящими после маркировки сплава: Пч, Ч, Оч – соответственно практически чистый, чистый и очень чистый, по примесям железа, кремния и других контролируемых элементов. Состояние полуфабрикатов из алюминиевых сплавов обозначается следующей маркировкой: М – мягкий, отожженный; Т – закаленный и естественно состаренный; Т1 – закаленный и искусственно состаренный; Н – нагартованный; Н1 – усилено нагартованный (нагартовка листа ~20%) и т.д. [4].

В *США* принята единая цифровая, четырехзначная система обозначений деформируемых алюминиевых сплавов, введенная Алюминиевой Ассоциацией (АА) [3]. Она является наиболее распространенной и используется в качестве *международной.* В её основе - система легирования алюминиевых сплавов, база - основной легирующий компонент. Первая цифра обозначения указывает на систему легирования, к которой относится сплав.

1000 серия — чистый алюминий с минимум 99% содержанием алюминия по весу.

2000 серия — сплавы, легированные медью, дуралюмины, они были когда-то самым распространенным из аэрокосмических сплавов. Главный недостаток — чувствительность к коррозионному растрескиванию и сплавы этой серии все чаще заменяются на серию 7000.

3000 серия — сплавы, легированные марганцем. Сплавы типа АМц.

4000 серия — сплавы, легированные кремнием. Они также известны как силумины.

5000 серия — сплавы, легированные магнием. Сплавы типа АМг.

6000 серия — сплавы, легированные магнием и кремнием, самые пластичные, и могут быть термоупрочнены закалкой на твердый раствор, но не достигают высокой прочности, как в 2000 и 7000 серии.

7000 серия — сплавы, легированные цинком, магнием, термоупрочняемые, самые прочные из алюминиевых сплавов.

8000 серия в основном используются для литиевых сплавов и прочих систем легирования.

1000 серия:

По ISO	1050	1060	1070A	1080A	1200	1350	1370
По ГОСТ	АД0	-	АД00	АД000	АД	АД0Е	АД00Е

2000 серия:

По ISO	2017	2024	2117	2124	2618	2219	2014
По ГОСТ	Д1	Д16	Д18	АД16ч	АК4	1201	АК8

3000 и 5000 серии:

По ISO	3003	3004	3005	5005	5050	5251	5052	5754	5154	5086	5083	5056
По ГОСТ	АМц	Д12	ММ	АМг1	АМг1,5	АМг2	АМг2	-	АМг3	АМг4	АМг4 АМг5	-

6000 и 7000 серии:

По ISO	6063	6101	6061	6082	6151	7005	7075	7175
По ГОСТ	АД31	АД31Е	АД33	АД35	-	1915	-	-

Вторая цифра обозначения указывает на порядковый номер модификации сплава относительно исходного сплава (в исходном - вторая цифра "0") или свидетельствует о чистоте сплава по примесям. Две последние цифры обозначают непосредственно сплав и дают информацию о его чистоте. Если сплав опытный, то ставят индекс "X" и маркировка становится пятизначной.

Число состояний полуфабрикатов из алюминиевых сплавов в США составляет несколько сотен.

Система обозначений состояний распространяется на все виды полуфабрикатов из деформируемых алюминиевых сплавов, кроме слитков. Она основана на последовательности основных термических обработок для получения различных состояний. Обозначение состояний следует за обозначением сплава. Основное состояние обозначается буквой, а их разновидности - одной или несколькими

цифрами, после буквы. Могут быть некоторые различия при той же последовательности основных операций, обусловливающих различие в характеристиках, тогда вводятся дополнительные символы. Обозначение основных состояний: F - после изготовления; O - отожженное; H - нагартованное. За H всегда следуют две или более цифры. Первая цифра указывает на конкретную последовательность основных операций: H1 - только нагартованное; H2 - нагартованное и частично отожженное; H3 - нагартованное и стабилизированное. Цифры, следующие за H1, H2 и H3, указывают на степень нагартовки. Цифра 8 обозначает состояние с пределом прочности, который достигается холодной прокаткой с обжатием (температура прокатки не превышает 50°C) 75 % после полного отжига. Состояние между O (отожженное) и 8 обозначается цифрами от 1 до 7. Материал, имеющий предел прочности посередине между состояниями O и 8, обозначается цифрой 4; между 0 и 4 - цифрой 2; между 4 и 8 - цифрой 6. Цифрой 9 обозначается состояние, в котором предел прочности сплава превышает прочность в состоянии H8 минимум на 13 МПа. Для H состояния с двузначным обозначением, где вторая цифра является дополнительной, стандартные значения предела прочности находятся точно посередине между прочностью двух соседних H-состояний.

Третий знак (цифра) указывает на некоторое отличие от состояния с двузначным обозначением: W - закалка; T - термическая обработка, приводящая к стабильному состоянию, отличному от F, O или H.

Цифры от 1 до 10 после T показывают конкретную последовательность основных термических обработок: T1 - охлаждение с повышенной температуры изготовления полуфабрикатов и естественное старение к стабильному состоянию; T2 - отжиг; T3 - закалка с последующей холодной деформацией; T4 - закалка с последующим естественным старением к стабильному состоянию; T5 - охлаждение с повышенной температуры изготовления полуфабрикатов и искусственное старение; T6 - закалка и искусственное старение; T7 - закалка с последующей стабилизацией; T8 - закалка, холодная деформация и искусственное старение; T9 - закалка, искусственное старение и холодная деформация; T10 - охлаждение с

повышенной температуры изготовления, искусственное старение и холодная деформация. Дополнительные символы к обозначениям Т1-Т10 указывают на различия в термической обработке. Дополнительные обозначения для Т-состояний полуфабрикатов, подвергнутых деформации для снятия напряжений, могут быть двух- и трехзначными и ставятся после основного обозначения состояния полуфабриката (Т551, Т6511).

В *Германии* система обозначений легких металлов устанавливается DIN 1700 [3]. Стандартные обозначения базируются на химических символах основных легирующих элементов с добавлением перед ними или после них буквенных или цифровых обозначений.

В кратком обозначении на первом месте ставится Al - основной металл, потом следует символ основного легирующего элемента с числом, соответствующим его среднему содержанию в сплаве, например AlMn, AlMg3, AlMg4.5Mn, AlZnMgCu1.5.

Чистый алюминий обозначается символом алюминия и цифрой содержания его в %, например Al99.5 - алюминий, содержащий 99,5% Al. В обозначение первичного алюминия вводится буква H, например Al99.5H - первичный алюминий чистотой 99,5 %. Алюминий повышенной чистоты обозначается буквой R, например Al99.99R - алюминий повышенной чистоты в чушках, поставляемый металлургическим заводом, минимальной чистоты 99,99 %; Al99,98R - алюминий повышенной чистоты в виде полуфабриката минимальной чистоты 99,98 %. Для сплавов повышенная чистота основного металла алюминия отмечается обозначением степени чистоты, например Al99.9Mg1; для алюминия повышенной чистоты вместо степени чистоты пишется только значок R, например AlRMg1.

При обозначении деформируемых полуфабрикатов часто перед маркой сплава через дефис ставится буква, указывающая на область применения: E - проводниковый материал для электротехники; S - сварочный материал; L - припой, Sd - электродная проволока. У алюминия для проводников обозначение степени чистоты опускается (E-Al) соответственно для сплавов E-AlMgSi0.5; S-AlMg5; L-AlSi12.

Плакированный полуфабрикат обозначается дополнением pl перед буквой F, например AlCuMgPplF37. Обработка поверхности - "блестящее качество" обозначается дополнительно EQ, например AlMg3F23EQ-E6. Применение нестандартных сокращений не разрешается, но часто применяется для обозначения нестандартных материалов.

Цифровая система обозначения регламентируется DIN 17007. Полная система состоит из семи позиций: 1 - основа сплава или материала (0 - для чистого железа и ферросплавов, 1 - для стали, 2 - для тяжелых металлов, 3 - для легких металлов, 4-8 - для неметаллических материалов); позиции от 2-й до 5-й - специфика марки, определяется в основном химическим составом или технологией получения сплава; позиции 6 и 7 - приведенное число; указывается для всех легких металлов по единой системе обозначения состояний поставки материалов. Для алюминия установлена серия от 3.0000 до 3.4999. Последующее подразделение этой серии осуществляется путем присвоения номера (цифровой маркировки) материалу в соответствии с типом сплава и степенью его чистоты. Знак EQ, предусмотренный для обозначения "блестящего качества", прибавляется и к номеру материала от E0 до E6.

Для указания состояния полуфабрикатов используются так называемые F-числа, например AlMg3F18. Они указывают минимальные значения предела прочности в кгс/мм^2.

Состояния поставки полуфабрикатов обозначаются с помощью буквенных сокращений, которые прибавляются к марке материала, например AlMgSi1p, G-AlSi12g.

Сокращенные обозначения состояний поставки следующие: w - мягкое (отжиг); p - прессованное (трубы, прутки, профили) без окончательной термообработки; как правило, это полуфабрикаты из AlMgSi1p; wh - катаное; для горячекатаных или холоднокатаных на конечную толщину изделий, без последующей термообработки; zh - тянутое; для труб, прутков и проволоки.

В цифровой системе для обозначения состояний поставки используются двузначные числа. Цифры от 0 до 99 делятся на десятки для групп приведенных чисел. Смысл разбитых на десятки цифр одинаков для всех легких металлов и

означает следующее: 00-09 необработанный (00 - чушки, 01 - литье в землю, 02 - литье в кокиль, 05 - литье под давлением, 07 - горячекатаный, нагартованный, 08 - прессованный кованый); 10-19 мягкий, 10 - мягкий без указания величины зерна, 11-18 - с указанием величины зерна, 19 - по специальным условиям поставки); 20-29 холоднодеформированный со средней степенью деформации; 30-39 холоднодеформированный, нагартованный и сверхнагартованный (30 - нагартованный); 40-49 закаленный и состаренный, без последующей механической обработки; 50-59 закаленный и естественно состаренный с последующей холодной деформацией; 60-69 искусственно состаренный, без последующей механической обработки; 70-79 искусственно состаренный, с последующей холодной деформацией; 80-89 отпущенный, без предшествующей холодной деформации; 90-99 специальные виды обработки.

Сопоставление обозначений состояний (обработки) полуфабрикатов из деформируемых алюминиевых сплавов по российской и международной системам приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Обозначений видов обработки деформируемых алюминиевых сплавов

Маркировка		Состояние, назначение
Россия	США	
Без ТО	F	После изготовления, без дополнительной термической обработки. Степень нагартовки и механические свойства не контролируются
ГК	–	Горячекатаное
ГП	–	Горячепрессованное
М	О	Отожженное (мягкое). Наиболее высокая пластичность и стабильность размеров
Н	–	Нагартованное (холоднодеформированное)
Н4	Н18	Усиленно нагартованное (прокаткой листов около 20 %, для максимального упрочнения)
Н3	Н16	Нагартованное на три четверти (3/4), повышение прочности
Н2 (П)	Н14	Полунагартованное (1/2), повышение прочности
Н1	Н12	Нагартованное на одну четверть (1/4), повышение прочности
З	W	Закаленное (нестабильное, обычно указывается длительность естественного старения после закалки), повышение прочности
Т	Т3, Т4	Закаленное + естественно состаренное. Получение достаточно высокой прочности, повышенной пластичности, трещиностойкостии, сопротивления усталости

Продолжение таблицы 1

Т1	Т6	Закаленное + искусственно состаренное на максимальную прочность
Т12	Т77	Закаленное + искусственно состаренное. Улучшение характеристик сопротивления коррозии, трещиностойкости, пластичности при некотором снижении прочности. В русской маркировке возрастание первой цифры при букве указывает на увеличение степени перестаривания и разупрочнения
Т2	Т76	
Т3	Т73	
ТН**	Т31, Т36, Т37, Т39	Закаленное + естественно состаренное + нагартованное. На степень деформации нагартовки указывает вторая цифра. Повышение прочности при снижении характеристик пластичности, трещиностойкости
Т1Н	Т81, Т83, Т86, Т87	Закаленное + нагартованное + искусственно состаренное. На степень деформации (нагартовки) указывает вторая цифра. Повышение прочности
Т1Н1	Т9	Закаленное + искусственно состаренное + нагартованное. Повышение прочности особенно при совмещении с процессом формообразования детали

1.2 Влияние легирующих элементов на свойства алюминиевых сплавов

Деформируемые конструкционные алюминиевые сплавы – это, главным образом, сплавы алюминия с четырьмя компонентами: Cu, Mg, Zn и Si, к числу которых относительно недавно добавились Li и Ag [5]. Все перечисленные компоненты выбраны по одному признаку – они имеют наибольшую по сравнению с другими известными элементами растворимость в твердом алюминии, резко снижающуюся с понижением температуры, в результате чего при охлаждении сплавов с этими компонентами из твердого раствора выделяются интерметаллидные фазы, а при нагреве – растворяются. Это фазовое превращение (единственное в твердых алюминиевых сплавах) открыло возможность в сильной степени влиять на структуру и свойства сплавов посредством термической обработки.

Промышленные сплавы, разработанные на основе систем Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si, Al-Cu-Mg-Si, Al-Zn-Mg-Cu, Al-Zn-Mg, Al-Mg-Li, Al-Cu-Li, Al-Cu-Mg-Ag, имеют высокий комплекс свойств после упрочняющей термической обработки (закалки и старения), когда матрицей сплава является твердый раствор, упрочненный

дисперсными частицами интерметаллидных фаз, выделившихся из твердого раствора при старении.

Это относится к сплавам всех систем, т.е. механизмы упрочнения всех сплавов едины: твердорастворный + дисперсионное твердение. Отличие рассматриваемых сплавов друг от друга определяется составом, кристаллической структурой и свойствами дисперсных частиц интерметаллидов, выделяющихся из пересыщенного твердого раствора, от которых зависит эффект упрочнения. Главным свойством этих частиц является очень высокая по сравнению с матрицей твердость. В таблице 2 приведены состав и микротвердость упрочняющих фаз, присутствующих в промышленных алюминиевых сплавах.

Таблица 2 – Максимальная растворимость легирующих компонентов в твердом алюминии и микротвердость основных упрочняющих фаз в промышленных алюминиевых сплавах

Система	Максимальная растворимость в твердом алюминии	Фаза	Микротвердость, HV, кгс/мм^2
Al-Cu-Mg	5,7 % Cu 17,4 % Mg	θ (Al_2Cu) S (Al_2CuMg)	400-600 560
Al-Mg-Si, Al-Mg-Si,-Cu	1,65 % Si	Mg_2Si W ($AlMg_5Si_4Cu_4$)	560 580
Al-Zn-Mg-Cu, Al-Zn-Mg	82 % Zn	$MgZn_2$ T ($Al_2Mg_3Zn_3$)	430 420
Al-Cu-Li	4.2 % Li	T1 (Al_2CuLi) δ' (Al_3Li)	430-520

Вторичные дисперсные выделения этих интерметаллидных фаз определили высокий уровень прочностных характеристик, достигнутый для алюминиевых сплавов и определивший возможность их применения для ответственных конструкций, в том числе в самолетостроении. Упрочняющий эффект от интерметаллидных фаз зависит от многих факторов: объемной доли фазы, степени ее диспергирования, когерентности метастабильных и равновесных выделений с матрицей и собственной твердости. Дальнейшие исследования в области химического состава и совершенствования режимов термической обработки продолжаются по сегодняшний день и будут рассмотрены в данном обзоре ниже.

Не менее перспективен путь дальнейшего повышения прочности, жаропрочности, коррозионной стойкости и других эксплуатационных и технологических характеристик за счет легирования алюминиевых сплавов металлами, которые мало растворяются или практически не растворимы в твердом алюминии, но образуют с алюминием различные интерметаллидные соединения [5]. К таким металлам относятся переходные и многие редкоземельные металлы. В таблице 3 приведены состав и микротвердость интерметаллидных фаз, образующихся в сплавах алюминия с некоторыми переходными и редкоземельными металлами.

Таблица 3 – Максимальная растворимость металлов в твердом алюминии и микротвердость алюминиевых фаз, образующихся в сплавах

Система	Макс. растворимость компонентов в твердом алюминии	Интерметаллидная фаза	Микротвердость, HV, кгс/мм^2
Al-Mn	1,8 % Mn	Al_6Mn	540-560
Al-Cr	0,9 % Cr	Al_7Cr	500-700
Al-Ti	0,26 % Ti	Al_3Ti	600-700
Al-Zr	0,28 % Zr	Al_3Zr	420-740
Al-Sc	0,40 % Sc	Al_3Sc	260
Al-Co	0,02 % Co	Al_9Co_2	650-750
Al-Ni	0, 04 % Ni	Al_3Ni	700-770
Al-Fe	0,05 % Fe	Al_3Fe	800-1100
Al-Fe-Si	0,05 % Fe	α (Al-Fe-Si)	1100
Al-Nd	0,05 % Nd	$Al_{11}Nd_3$	350
Al-Ce	0,05 % Ce	Al_4Ce	-

Как видно, из таблицы 3, твердость интерметаллидных фаз, как правило, выше твердости основных упрочняющих фаз в промышленных сплавах (таблица 2) и при условии их рационального диспергирования, они могут стать эффективными упрочнителями алюминиевых сплавов.

Марганец в промышленных деформируемых алюминиевых сплавах, как правило, содержится в пределах от 0,3 до 0,9% [5]. Особенность влияния марганца на свойства алюминиевых сплавов заключается в том, что он после одинаковой термической обработки очень мало упрочняет холоднодеформированные полуфабрикаты (листы, трубы, проволоку) и значительно —

горячедеформированные, полученные при определенных температурно-скоростных условиях деформирования. Так, добавка 0,4% Мп в сплав типа Д16 (с 5 % Си) повышает $\sigma_в$ холоднотянутых прутков, которые после закалки и естественного старения полностью рекристаллизованы, с 480 до 510 МПа, а $\sigma_в$ горячепрессованных прутков, имеющих после такой же термической обработки нерекристаллизованную структуру, — с 480 до 580 МПа.

Цирконий в алюминиевых сплавах обычно содержится в пределах от 0,1 до 0,25 %. Выделения фазы Al_3Zr более дисперсны, чем алюминида Mn (10- 100 нм). Тем не менее, эффект дисперсионного твердения от выделений фазы Al_3Zr в связи с малым содержанием циркония в сплавах, так же, как и в случае алюминидов Mn, невелик, но влияние выделений более дисперсного циркониевого алюминида на процесс рекристаллизации в деформированных полуфабрикатах и, соответственно, на их зеренную структуру значительно сильнее. Нерекристаллизованная (полигонизованная) структура после термической обработки с высоким эффектом структурного упрочнения для сплавов с добавкой циркония может быть получена для более широкой номенклатуры полуфабрикатов, чем для сплавов с марганцем, — практически для всех прессованных, катаных плит, штамповок и поковок, а также для некоторых холоднодеформированных полуфабрикатов (листов) из сплавов систем A1 - Zn - Mg и Al - Zn - Mg - Си, которые имеют по сравнению с дуралюминами и AI - Cu-сплавами более низкую температуру нагрева под закалку - 450 - 470°С. Малая добавка циркония в высокопрочные сплавы системы AI - Zn - Mg - Си авиакосмического назначения привела к существенному повышению прочности, трещиностойкости и сопротивления усталости. Все сплавы этой системы, разработанные в последние десятилетия в ВИАМе с участием ВИЛСа, содержат 0,1-0,2% Zr (В96Ц, В96Ц-3, 1933) [5].

Скандий, использование которого в качестве легирующего компонента в алюминиевых сплавах началось в 80-х годах, оказался, по крайней мере, применительно к некоторым сплавам, наиболее эффективным легирующим элементом из всех ранее известных; выделения фазы AI_3Sc значительно более дисперсны (1-10 нм), чем выделения алюминидов Мп и Zr . Скандий при содержании в сплавах 0,15 -

0,25 % обусловливает очень высокий эффект дисперсионного твердения слитков при правильно выбранных температурных режимах их обработки. Если упрочнение деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов от добавок Mn, Zr, Cr определяется в большей степени формированием в полуфабрикате субзерен ной структуры и в меньшей степени непосредственным дисперсионным твердением, то упрочнение от добавки скандия, например сплавов системы Al - Mg, в равной мере обусловлено влиянием обоих факторов. Кроме того, упрочнение сплавов систем Al - Mg и Al - Zn - Mg от добавки скандия, особенно совместно с цирконием, после термической обработки присуще всем деформированным полуфабрикатам, включая холоднодефор-мированные листы, подвергнутые значительной холодной дефор-мации. Упрочнение сплавов системы Al - Mg от малых добавок скандия и циркония соизмеримо с упрочнением от основного компонента — магния. Так, отожженные листы из сплава АМг6 (6 % Mg - 0,6 % Mn) имеют предел текучести 160 - 180 МПа, а аналогичные листы из сплава 01570 (6% Mg - 0,4 % Mn - 0,2 % Sc - 0,1 % Zr) — 300 - 320 МПа, т.е. малые добавки скандия и циркония повышают предел текучести почти в 2 раза. Таким образом, можно с достаточным основанием говорить о систе-ме A1 - Mg - Sc - Zr, как о базовой системе термически упрочняемых сплавов нового типа [5].

Серебро. Роль добавки серебра в алюминиевые сплавы изучена в меньшей степени по сравнению с цирконием и скандием. В ранних работах было обнаружено, что микролегирование серебром в количестве 0,1% (масс.) оказывает стимулирующее воздействие на процесс дисперсионного твердения тройных и более сложных Al-Zn-Mg-сплавов в области температур 120-220°C [6].

Бериллий добавляется для уменьшения окисления при повышенных температурах [4] . Небольшие добавки бериллия (0,01-0,05%) применяют в алюминиевых литейных сплавах для улучшения текучести в производстве деталей двигателей внутреннего сгорания (поршней и головок цилиндров).

Бор вводят для повышения электропроводимости и как рафинирующую добавку. Бор вводится в алюминиевые сплавы, используемые в атомной энергетике (кроме

деталей реакторов), т.к. он поглощает нейтроны, препятствуя распространению радиации. Бор вводится в среднем в количестве 0,095-0,1%.

Висмут. Металлы с низкой температурой плавления, такие как висмут, свинец, олово, кадмий вводят в алюминиевые сплавы для улучшения обрабатываемости резанием. Эти элементы образуют мягкие легкоплавкие фазы, которые способствуют ломкости стружки и смазыванию резца.

Железо. В малых количествах (>0,04%) вводится для увеличения прочности и улучшения характеристик ползучести.

Индий. Добавка 0,05 — 0,2% упрочняет сплавы алюминия при старении, особенно при низком содержании меди.

Кадмий. Примерно 0,3% кадмия вводят для повышения прочности и улучшения коррозионных свойств сплавов.

Кальций придает пластичность. При содержании кальция 5% сплав обладает эффектом сверхпластичности.

Кремний является наиболее используемой добавкой в литейных сплавах. В количестве 0,5-4% уменьшает склонность к трещинообразованию.

Олово улучшает обработку резанием.

Титан. Основная задача титана в сплавах — измельчение зерна в отливках и слитках, что очень повышает прочность и равномерность свойств во всем объеме.

1.3 Перспективные алюминиевые системы

Основной прогресс в области исследования конструкционных алюминиевых сплавов в XXI столетии можно ожидать на пути усовершенствования уже известных и разработки технологии сплавов новых систем легирования. К таким системам относятся:

1 Сплавы системы Al-Mg. Традиционно к сплавам этой группы относят, в первую очередь, сплавы алюминия с магнием (АМг) и марганцем (АМц). Они имеет невысокую прочность, хорошую пластичность, свариваемость и коррозионную стойкость [4]. Сплавы могут упрочняться только холодной пластической деформацией. Сплавы АМг5 и АМг6 относятся к наиболее прочным сплавам

системы алюминий-магний. Они характеризуются высокой технологической пластичностью, а также относительно высокими пределом прочности ($\sigma_в$=110-310 МПа) и текучести ($\sigma_{0,2}$=40-160 МПа) по сравнению с другими алюминиевыми сплавами в отожженном состоянии. Применяя различную степень нагартовки, можно получить разные механические свойства. Деформация на 20-30% резко повышает прочностные характеристики, но значительно снижает пластичность. Кроме того, алюминиево-магниевые сплавы обладают высокой вибрационной стойкостью.

2 Сплавы системы Al-Mg-Si (в России эти сплавы называют авиалями, а за рубежом – сплавами 6XXX серии) представлены сплавами АВ, АД31, АД33 [4]. Избыток кремния в сплавах этой группы по сравнению с тем его количеством, которое необходимо для образования силицида магния, значительно повышает прочность состаренного сплава (рис. 1) [7]. Применяются для деталей средней прочности, работающих при температурах от -70 до +50°С, отличаются удовлетворительной обрабатываемостью резанием в закаленном и состаренном состоянии, что связано с присутствием добавок свинца и висмута. Сплавы системы Al-Mg-Si-Cu наиболее перспективны для замены сплавов типа Д16 при изготовлении основных элементов конструкции авиа- и ракетной техники. В частности, преимуществами относительно нового отечественного сплава 1370 являются высокая коррозионная стойкость, технологическая пластичность при горячей и холодной деформации, значительные прочность и сопротивление многоцикловой усталости.

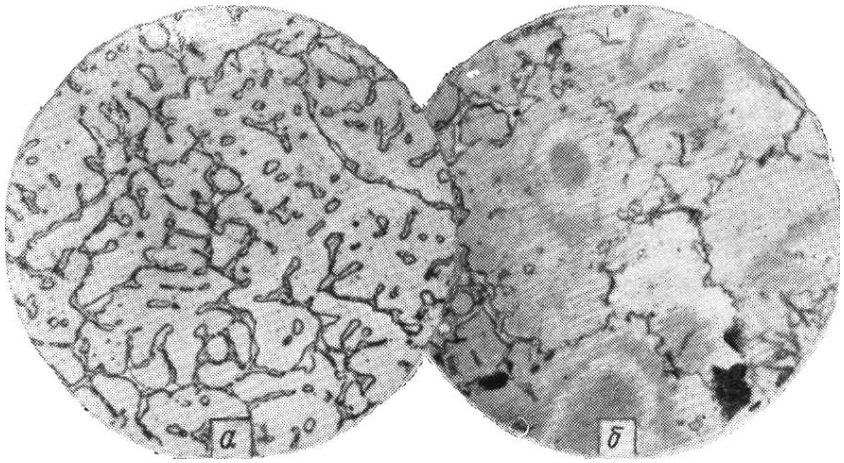


Рисунок 1 - Микроструктура сплавов системы Al-Mg-Si: а - Х 100; б - Х 200

Сплавы данной системы 6013 производства Alcoa (США) и 6056 производства Peshiney (Франция) частично уже используются для самолетов фирмы Airbus и фирмы Boeing последних моделей [8].

3 Системы A1 - Fe - РЗМ и A1 - Ni - РЗМ, где в качестве РЗМ могут применяться Ce, Y, La и др. [5]. Во многих сплавах этих систем при скоростях охлаждения при затвердевании 10^6 °С/с и выше формируется аморфная структура. Лабораторные образцы с аморфной структурой имеют высокую прочность, но прочность дополнительно повышается при смешанной структуре, когда из аморфной матрицы выделяются нанометрические частицы кристаллического алюминиевого твердого раствора и интерметаллических фаз. Формирование смешанной структуры достигается либо регулированием скорости охлаждения сплавов при затвердевании (некоторое снижение скорости по сравнению с той, которая требуется для образования аморфной структуры), либо путем термической обработки образцов с аморфной структурой. Образцы со смешанной структурой (лента толщиной 20 мкм) из сплава $Al_{88}Ni_9Ce_2Fe_1$ имеют $\sigma_в$=1560 МПа, а при 300°С $\sigma_в$=970 МПа. О пластичности таких образцов судят по углу загиба ленты — угол загиба до 180° не приводит к разрушению. Получить в производственных условиях в заготовках аморфную или смешанную на основе аморфной структуру очень трудно, так как температуры кристаллизации рассматриваемых сплавов довольно низкие — 250-350 °С. Однако показано, что при компактировании порошка из некоторых сплавов, например $Al_{85}Y_{10}Ni_5$, имеющего аморфную структуру, при температуре выше температуры кристаллизации образуется смесь нанометрических частиц кристаллических фаз (Al-твердого раствора и интерметаллидных фаз). Так, в результате компактирования и последующей экструзии аморфного порошка из сплава $AI_{xs}Y_{)0}Ni_5$ при температуре 510 °С получены прутки, имеющие при комнатной температуре $\sigma_в$ = 940 МПа, E = 115000 МПа, δ = 2 %, а при температуре 300 °С $\sigma_в$ = 380 МПа, δ=10 % [5].

4 Системы A1 - Ni - Fe и Al - Ni - Co. При очень больших скоростях охлаждения при кристаллизации (10^6 °С/с и выше) аморфная структура и соответственно смешанная структура на основе аморфной были получены и в сплавах этих систем,

т.е. в отсутствии РЗМ, которые являются более сильными аморфизаторами [5]. Изготовленные методом спиннингования ленты из некоторых сплавов этих систем при полностью аморфной структуре имеют $\sigma_в$ = 870-1070 МПа и 280 - 320 *HV*. Образцы из этих же сплавов, изготовленные при пониженной скорости затвердевания, обладали смешанной структурой (аморфная плюс дисперсные частицы А1-твердого раствора размером около 10 нм). При такой смешанной структуре прочность повысилась до 1270 МПа, а твердость до 360 *HV* без снижения пластичности, что делает их весьма перспективными для дальнейшей разработки.

5 Системы А1 - Mg - Sc, Al - Zn - Mg - Sc, Al - Zn - Mg - Cu - Sc. На основе этих систем в ВИЛСе, ИМЕТ им. А. А. Байкова РАН, ЦНИИ КМ "Прометей", ОАО "Композит" применительно к традиционной слитковой технологии разработан ряд высокопрочных свариваемых сплавов (1570, 1970, 1975, 1545 и др.), часть которых успешно применяется в промышленности [5]. Но работы в области легирования сплавов перечисленных систем скандием продолжаются [9] и вполне реальны перспективы дальнейшего улучшения их свойств, особенно при использовании повышенных скоростей охлаждения при кристаллизации, что позволит повысить содержание скандия в сплавах.

Наиболее востребованные сплавы данной системы легирования [10]:

Сплав 1577 системы А1 - Mg, легированный скандием, имеет прочность в отожженном состоянии, близкую к прочности закаленного и естественно состаренного сплава Д16ч.-Т, и позволяет изготовлять сложные по конфигурации детали в режиме сверхпластичности ($\delta_{СПД}$=500-1000%).

1370Т1 - высокотехнологичный коррозионностойкий термически упрочняемый сплав с повышенными характеристиками жаропрочности ($\sigma_в^{20°}$ >400-450 МПа, $\sigma_{0,2}^{20°}$>350-370 МПа, $\sigma_{500}^{150°}$=290 МПа, $\sigma_{500}^{175°}$=240 МПа) и технологичности при холодной деформации. Сплав используется в виде листов толщиной 0,5-1,2 мм на самолете Ан-148 (обшивка и гофры носовой части стабилизатора, гофры предкрылков и отклоняемого носка крыла). Освоено производство листов, прессованных профилей и плит, разработана технология сварки. Рекомендуется для обшивки и внутреннего набора фюзеляжа.

1913 (В91п.ч.)-Т3 - коррозионностойкий свариваемый термически упрочняемый сплав с высокой прочностью сварных соединений ($\sigma_в^{20°}$>450 МПа, $\sigma_{0,2}^{20°}$>350 МПа, $\sigma_{в.св}$=0,9$\sigma_в$). Освоено производство листов, прессованных профилей и штамповок, разработана технология сварки. Рекомендуется для применения в авиационной технике, в том числе для гидросамолетов и экранопланов, а также для строительных конструкций.

В-1341-Т(Т1) - высокотехнологичный коррозионностойкий свариваемый сплав средней прочности (свойства в состоянии Т1: $\sigma_в \geq 330$ МПа; $\sigma_{0,2} \geq 260$ МПа; $\delta \geq 10\%$, МКК < 0,105 мм). Разработана промышленная технология получения листов толщиной 0,6-3,0 мм с размером зерна менее 50 мкм, что обеспечивает их высокую технологичность при холодном формообразовании ($К_{выд}$ до 40%, r_{min} = (0,5-1)s, s - толщина листа). Рекомендуется использование в изделиях авиационной техники в виде обшивок, деталей внутреннего набора, перегородок, крепежных узлов, трубопроводов, сварных баллонов различного назначения, работающих в диапазоне температур от -70 до +150°С. Применение тонких листов (до 1,5 мм) в сварных баллонах, работающих под внутренним давлением, вместо листов сплава АМг4 (до 3 мм) обеспечивает герметичность по основному металлу и снижение массы изделий на 35-40%. Применен в новом региональном самолете SSJ. Может быть применен в конструкциях наземного транспорта (топливные баки и др.). Освоено промышленное производство всех видов полуфабрикатов.

6 Система Al-Cr-Zr. На основе этой системы были разработаны гранулируемые сплавы, рассчитанные на скорости охлаждения при кристаллизации 10^3 - 10^5 °С/с (1419, 1435) [5]. Эти сплавы по комплексу свойств (прочность, жаропрочность, коррозионная стойкость, свариваемость) имеют преимущества перед многими стандартными сплавами и нашли определенное применение (пока не широкое). Однако остаются большие возможности дальнейшего улучшения свойств (и прочности, и жаропрочности) сплавов на основе системы Al-Cr-Zr как за счет совершенствования технологии производства (в частности, скорости охлаждения при кристаллизации), так и в результате разработки новых сплавов с повышенным содержанием хрома и циркония и с добавками других ПМ.

7 Сплавы системы Al-Cu-Mg с добавками марганца, названные дуралюминами (Д1, Д16, Д18, Д19, ВД17) [5], содержащие мелкодисперсные фазы Al_2Cu и Al_2CuMg (рис. 2), давно нашли наиболее широкое применение в авиационной и ракетной технике благодаря уникальному сочетанию прочностных свойств, получаемых после закалки и естественного или искусственного старения, а также способности работать при повышенных температурах (до 200°С). В последние годы для наиболее ответственных изделий применяют сплав Д16ч (чистый), в котором содержание железа и кремния <0,3%, что обусловливает более высокие значения характеристик вязкости разрушения [11].

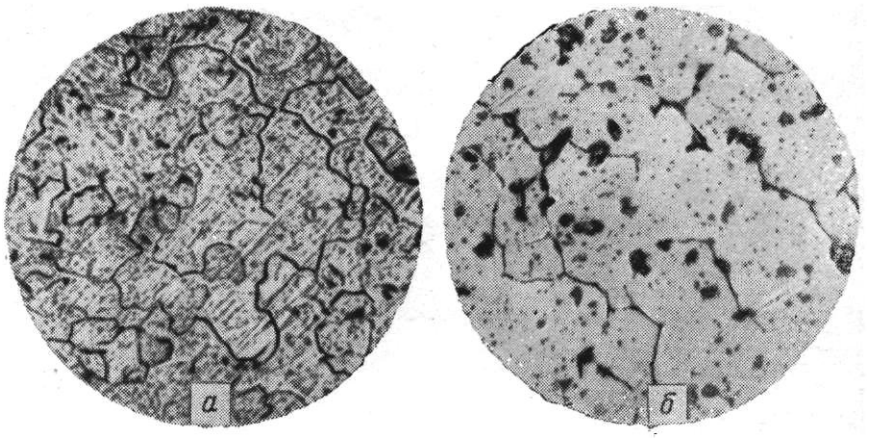


Рисунок 2 – Сплав Д16 после закалки: а — Х 100; б — Х 200

8 Сплавы системы Al-Cu-Li. На основе данной системы разработан отечественный сплав ВАД23 с добавками кадмия, марганца в количестве 1,2%. После закалки и искусственного старения сплав ВАД23 имеет предел прочности до 600 МПа, предел текучести до 55 МПа при повышенном модуле упругости до 75000 МПа и хорошей жаропрочности. Однако из-за низкой пластичности ($\delta \leq 5\%$), и большой анизотропии свойств полуфабрикатов, сплавы данной системы пока не нашли широкого промышленного применения [4].

9 Сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu. Из анализа структуры применяющихся материалов, очевидно, что, как минимум, в ближайшие два десятилетия преобладающее место для производства авиаракетной техники будут занимать высокопрочные алюминиевые сплавы. Отечественные исследователи прогнозируют

создание высокопрочных материалов на основе системы Al-Zn-Mg-Cu с повышенными характеристиками (таблица 4) [6].

Таблица 4 - Свойства алюминиевых сплавов

Характеристика	**Современный уровень**	**Перспективный уровень (2015 г.)**
Суперпрочные сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu-Zr типа В96ц для длинномерных катаных и прессованных полуфабрикатов		
$\sigma_в$, МПа	615-645	700
$\sigma_{0,2}$, МПа	595-625	670
Высокопрочные сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu-Zr типа 1933 для массивных кованых полуфабрикатов		
$\sigma_в$, МПа	500-520	600
$К_{1с}$, МПа·м$^{1/2}$	39-42	32-40
$\sigma_{кр}$, МПа	175	175

Яркими представителями сплавов этой группы являются сплавы В93, В95, В96ц3 и особо прочный В96ц. Сплавы этой системы являются наиболее высокопрочными среди алюминиевых сплавов, но характеризуются меньшей пластичностью, чем, например, дуралюмины. Многие элементы конструкции современных самолетов КБ Туполева - Ту-204, Ту-334 - изготавливают тоже из сплавов В95 и 1163 [12]. В отличие от дуралюминов в высокопрочных сплавах после закалки получается более стабильный твердый раствор. Поэтому сплавы применяют только после искусственного старения. Закалку производят с 460-470°С в холодной или подогретой (до 80-100°С) воде. С целью уменьшения склонности высокопрочных сплавов к коррозии, полуфабрикаты из сплавов В95 и В93 помимо старения на максимальную прочность, подвергают перестариванию при более высоких температурах, что способствует повышению конструкционной прочности сплавов (табл. 5, рис. 3).

Таблица 5 – Механические свойства высокопрочных алюминиевых сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu

Марка сплава	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	σ_{-1}, МПа	KCU, кДж/м	$К_{1с}$, МПа·м$^{1/2}$
В95	600	560	8	155	20	27
В95пч	600	560	8	-	45	32
В96ц	670	640	7	-	20	24
В93	500	470	8	140	35	29

Рисунок 3 - Динамика развития комплекса свойств высокопрочных сплавов для авиационной техники

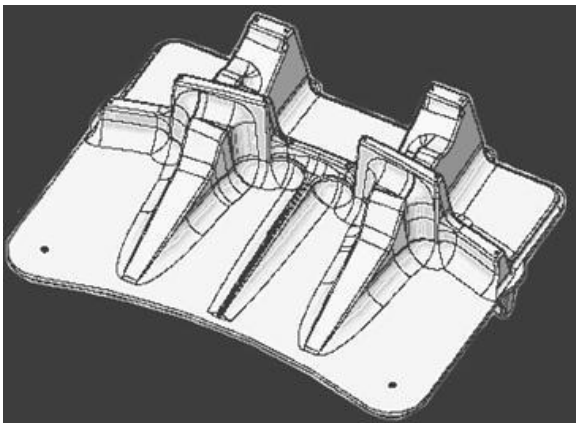
Популярные высокопрочные сплавы серии Al-Zn-Mg-Cu [10]:

В96Ц3п.ч. (1965-1) Т12/Т22 - особопрочный ($\sigma_в$ ≥615-645 МПа; $\sigma_{0,2}$≥595-620 МПа; δ>7-8%) сплав, рекомендуется вместо сплавов типа В95о.ч.-Т2 в основном в виде длинномерных катаных (плиты, листы) и прессованных (профили, панели, полосы) полуфабрикатов для верхних обшивок крыла, стоек, балок и других элементов в преимущественно сжатых зонах планера перспективных самолетных конструкций. Из сплава освоено литье крупногабаритных круглых и плоских слитков; сплав обладает хорошей технологической пластичностью при изготовлении полуфабрикатов в металлургическом производстве.

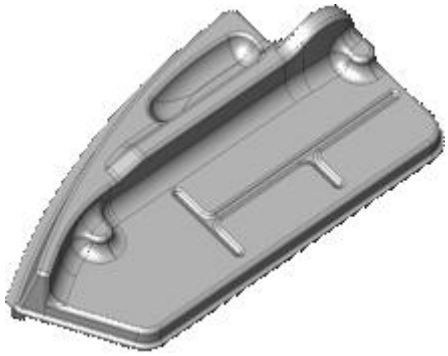
В95о.ч., В95п.ч., ($\sigma_в$ ≥ 500-560 МПа) - ($\sigma_в$ ≥ 500-540 МПа; $\sigma_{0,2}$ ≥ 430-480 МПа; δ>7-8%) - наиболее широко применяемые высокопрочные сплавы преимущественно в виде катаных и прессованных длинномерных (до 30 м) полуфабрикатов для обшивок верха крыла (плит, листов), стрингеров (гнутых листовых и прессованных), балок, стоек и других элементов фюзеляжа и крыла современных самолетов (Ту-204, Ил-96, Бе-200).

1933-Т2/Т3 - основной высокопрочный ковочный алюминиевый сплав для внутреннего силового набора (фитингов, шпангоутов и др.), обладает высоким уровнем прочностных свойств (в зависимости от состояния $\sigma_в$≥450-520 МПа; $\sigma_{0,2}$≥380-460 МПа), характеристик ресурса (вязкости разрушения: $К_{1с}$≥37-44 МПа·√м; сопротивления усталости), коррозионной стойкости. Благодаря высокой

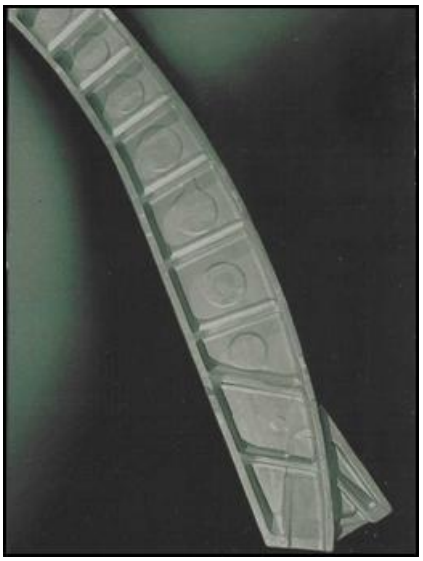
технологичности сплава 1933 при литье, обработке давлением и термической обработке в серийном производстве изготовляют кованые и прессованные полуфабрикаты в широком диапазоне размеров - массой до 2000 кг и толщиной до 400 мм (рис. 4). Разработаны режимы малодеформационной закалки в полимерные среды и трехступенчатого старения Т123 крупногабаритных штамповок из сплава 1933, обеспечивающие улучшенный комплекс прочностных и ресурсных характеристик в сочетании с пониженным в 1,5-3 раза уровнем закалочных напряжений, что позволяет значительно уменьшить поводки и коробление деталей при механической обработке, снизить массу конструкции на 10-15% и продлить эксплуатационный ресурс конструкции в 1,5 раза.



а)



б)



в)

Рисунок 4 - Штамповки из сплава 1933 для фитингов самолета SSJ (а, б) и для шпангоута самолета Ан-225 «Мрия» (в)

Квоты преимущества сплава 1933 в состояниях Т122 и Т123 перед серийными отечественными (1933-Т2) и зарубежными сплавами составляют: по прочностным характеристикам - 6-12%, по вязкости разрушения - 15-50%, по малоцикловой усталости - 35-80%. Сплав 1933 в состояниях Т2 и Т3 широко применен в современных самолетах Ан-148, SSJ в виде крупногабаритных поковок, штамповок и прессованных полос для массивных элементов внутреннего силового каркаса.

Новый ковочный высокопрочный сплав В-1963 предназначен для сильно нагруженных деталей внутреннего набора планера (типа шпангоутов, фитингов, балок и др.) в изделиях перспективной авиакосмической техники. Благодаря легированию серебром и скандием удалось одновременно повысить прочностные характеристики ($\sigma_в \geq$560-580 МПа; $\sigma_{0,2} \geq$480-520 МПа; δ>8%) - на 10-20%, вязкость разрушения ($К_{1с} \geq$33-34 МПа$\cdot\sqrt{м}$) - на 15-25% и сопротивление усталости - в 1,8 - 2,3 раза по сравнению с серийными отечественными и зарубежными сплавами. Сплав обладает также улучшенными характеристиками свариваемости по сравнению с аналогичными сплавами без серебра ($\sigma_{в.св.} = 0,7\sigma_в$).

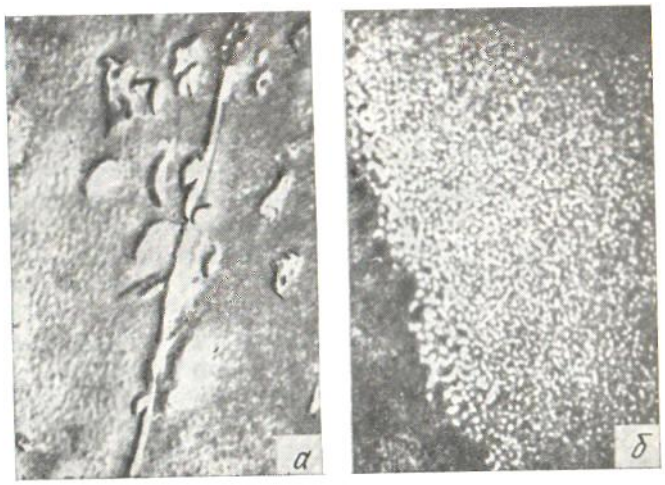
В96Ц, В96Ц1 - самые прочные сплавы ($\sigma_в$=670-700 МПа) - нашли широкое эффективное применение для концевых деталей центрифуг, предназначенных для получения обогащенного урана 235, в виде горячепрессованных труб и штамповок, а также прессованных полуфабрикатов для корпусов ракет и винтовых насосов.

10 Сплавы системы Al-Be и Al-Be-Mg. Сплавы этой системы относятся к числу сплавов с высоким модулем упругости (высокомодульные сплавы). Свойства двойных алюминиево-бериллиевых сплавов (локеллоев) существенно улучшаются при легировании их элементами, взаимодействующими только с алюминиевой фазой и упрочняющими ее [4]. Так, магний, практически не взаимодействует с бериллием, но растворяется в алюминии и упрочняет его. При этом повышаются прочность и модуль упругости сплавов. Старение сплавов системы Al-Be-Mg не увеличивает прочностные характеристики, поэтому данные сплавы можно применять без термической обработки. Алюминиево-бериллиевый сплав с 30%Be и 5% Mg имеет следующие механические свойства при 20°С: $\sigma_в$= 400-470 МПа, $\sigma_т$ = 270-300 МПа, δ = 11-18%, Е = 135 ГПа. Сплав по величине модуля упругости

превосходит аналоги более чем в 2-3 раза, малочувствителен к надрезам. Из сплава объемной и листовой штамповкой могут быть получены детали любой формы. Сплавы системы Al-Be-Mg целесообразно применять в тех случаях, когда определяющим конструктивным фактором является жесткость. При создании жестких конструкций (например, оболочковых конструкций) выигрыш в весе по сравнению со стандартными алюминиевыми сплавами составляет 40-60%.

11 Сплавы системы Al-Li. Алюминий-литиевые сплавы являются перспективными авиакосмическими сплавами, которые за счет сочетания высоких удельной прочности и удельного модуля упругости, способны обеспечивать высокие эксплуатационные характеристики авикосмических узлов [4]. Так, например, в [2] сообщается, что Alcan Global Aerospace, Transportation and Industry (Alcan Global ATI, подразделение корпорации Rio Tinto Alcan) подписал долгосрочное соглашение с Bombardier, одним из лидеров мировой авиастроительной индустрии, о поставках полуфабрикатов из алюминий-литиевых сплавов, производимых по технологии Aiware™ для нового самолета Cseries. Планируется, что доля продукции, изготовленной по данной технологии, составит 20% от всех материалов, используемых в самолете Cseries. Технология Aiware™, позволяет производить полуфабрикаты из сплавов с низкой плотностью, обеспечивая тем самым легкость фюзеляжа самолета и его высокую скорость. Полуфабрикаты будут использоваться для изготовления оболочки фюзеляжа, стрингеров и др. Новый самолет Cseries, как ожидается, будет иметь эксплуатационные расходы на 15% меньше по сравнению с используемой в настоящее время модификацией. Отечественные ученые также уделяют особое внимание сверхлегким сплавам данной системы. Так, главный металлург Государственного космического центра им. М.В. Хруничева (ракетно-космический завод) А.Л. Соловьев сообщил [13], что вместо применявшихся длительное время сплавов АМг6 и 1201 в перспективных разработках космических аппаратов и ракет-носителей планируется использовать алюминий-литиевые сплавы.

Применение сплава 1420 (микроструктура которого, содержащая дисперсную фазу Al_3Li, представлена на рисунке 5) в конструкциях вместо сплава Д16 позволяет снизить массу на 10-15% [7].



а) б)

Рисунок 5 – Выделения фазы Al_3Li в сплаве 1420 после старения:
а – старение 170°С – 500 ч; б – старение 170°С – 16 ч

Алюминий-литиевые сплавы хорошо деформируются в горячем состоянии, быстро упрочняются при холодной деформации, однако при высокой степени деформации в них появляется склонность к охрупчиванию. Сплавы хорошо прессуются, штампуются и обрабатываются резанием. Многим алюминий-литиевым сплавам присуще явление сверхпластичности, что значительно расширяет возможности их применения. Сравнительные свойства традиционных алюминиевых и алюминий-магний-литиевого сплава 1420 приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Свойства традиционно применяемых алюминиевых сплавов и сплава 1420

Марка сплава	γ, кг/м^3	E, ГПа	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ, %	$\sigma_{0,2}/\gamma$	$\sigma_в/\gamma$
Д16	2780	72,66	430	290	10	10,3	15,3
В95	2800	72,0	480	420	7	14,3	17,1
ВАД 23	2720	77,25	520	380	4	13,9	19,1
1420	2500	76,0	520	260	6	10,4	16,8

Среди наиболее часто применяемых можно выделить следующие алюминий-литиевые сплавы [10]:

Сплав 1420-ТГ1(ТВ1) - среднепрочный коррозионностойкий высокомодульный свариваемый сплав пониженной плотности (d = 2,47 г/см^3, Е = 78 ГПа; свойства в направлении Д: $\sigma_в \geq 420$ МПа, $\sigma_{0,2} \geq 270$ МПа, $\delta \geq 9$ %). Предназначен для использования в конструкции самолетов (сварные герметичные отсеки, окантовки иллюминаторов, компоненты кабины); корпусах ракет; в наземном транспорте (штампованные колеса) (рисунок 6).

Рисунок 6 - Штамповка - окантовка иллюминатора - из сплава 1420ТГ1

Применение сплава обеспечивает для изделий авиакосмической техники снижение массы клепаной конструкции до 12 %, сварной - до 24 %. Эффективно использование сплава 1420 для изготовления штамповок вместо сплава АК6 в связи с пониженной на 10% плотностью, повышенными характеристиками усталости и коррозионной стойкости, модулем упругости. Применен в клепаных фюзеляжах палубных штурмовиков вертикального взлета ЯК-36 и ЯК-38; в виде штамповок в пассажирском самолете ЯК-42; в сварных топливных баках и сварной кабине пилота истребителя МиГ-29М; в изделиях Су-27 (до 800 деталей); Ту-204; Ми-26Т.

Сплав 1424-ТГ1/ТГ2 - среднепрочный коррозионностойкий свариваемый сплав пониженной плотности, с высокими модулем упругости (d=2,54 г/см3, Е=80 ГПа, $\sigma_в$>430-460 МПа, $\sigma_{0,2}$>290-350 МПа) и характеристиками вязкости разрушения, трещиностойкости и термической стабильности при длительных солнечных

нагревах. Освоено производство листов, прессованных профилей, в том числе с закалкой на желобе пресса (ТГ2), разработаны технологии сварки ($\sigma_{в.св}=0,8\sigma_в$) и изготовления деталей сложной конфигурации в режиме сверхпластичности. Рекомендуется для клепаных и сварных конструкций авиакосмической техники (обшивка и внутренний набор фюзеляжа, сварные элементы конструкций), обеспечивает снижение массы на 10-20%.

Сплав 1441-Т1 - высокотехнологичный среднепрочный высокомодульный сплав ($\sigma_в \geq 410$ МПа, Е=80 ГПа, d=2,6 г/см^3), позволяет получать плакированные и неплакированные листы толщиной до 0,3 мм методом холодной рулонной прокатки. Показано, что СРТУ в листах сплава 1441Т1 в коррозионной среде (3,5 %-ный раствор NaCl) при низких частотах нагружения (f=0,01Гц) сохраняет низкие значения, сопоставимые с СРТУ листов сплава Д16чТ. Освоено промышленное производство листов с различной регламентированной плакировкой, прессованных профилей и плит. Рекомендуется для силовых элементов планера (обшивок фюзеляжа, стрингерного набора), работающих во всеклиматических условиях до температуры 130°С. Обшивочные листы сплава 1441 успешно и длительно применяются в гидросамолетах Бе-103 и Бе-200 ОАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева».

Сплав В-1461-Т1 - высокопрочный коррозионностойкий свариваемый сплав пониженной плотности, с повышенным модулем упругости (d=2,63 г/см^3, Е=79,5 ГПа, $\sigma_в$>540-560 МПа, $\sigma_{0,2}$>490-510 МПа), обладает высокими характеристиками. Освоено производство листов, плит и прессованных полуфабрикатов. Рекомендуется для клепаных и сварных конструкций авиакосмической техники (обшивка и силовой набор планера, элементы конструкций), обеспечивает снижение массы на 8-15% и работоспособность в широком интервале температур - от криогенных до повышенных ($\sigma_{1000}^{150°}$ = 270 МПа, $\sigma_{1000}^{160°}$=250 МПа).

Сплав В-1469-Т1 - высокопрочный коррозионностойкий свариваемый сплав пониженной плотности (d = 2,67 г/см^3, Е = 78-80 ГПа, $\sigma^в \geq$ 580-600 МПа, $\sigma_{0,2} \geq$ 540-560 МПа, $\delta \geq 8$ %, $\sigma_{кр}$ = 400 МПа, $\sigma_{всв}/\sigma_в > 0,6$). Технологичен при литье и обработке давлением, что позволяет получать из него все виды полуфабрикатов, в том числе листы холодной рулонной прокаткой, сваривается всеми видами сварки. Освоено

промышленное производство листов толщиной 1,2-6,0 мм и прессованных профилей. Рекомендуется для элементов, работающих на сжатие длительно во всеклиматических условиях до температур 150 °С (верхние поверхности крыла, лонжероны, балки, стрингеры). Эффективное использование в авиационной и ракетно-космической технике обеспечивает снижение массы деталей и узлов на 10 % в клёпаной и на 20 % в сварной конструкции (рисунок 7) [10].

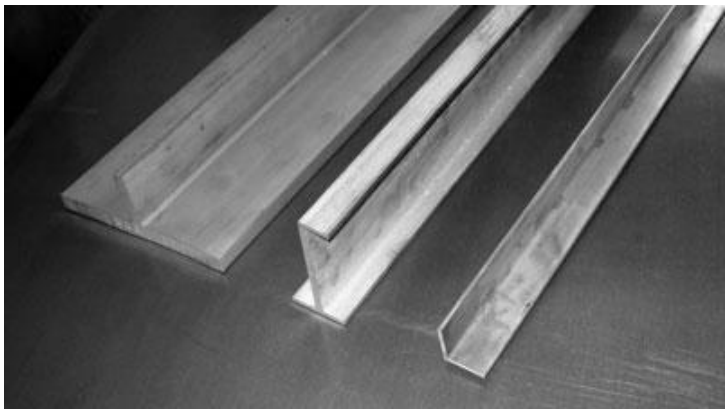


Рисунок 7 - Прессованные профили из сплава В-1469

2 НОВЕЙШИЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В данном разделе обзора представлены новые алюминиевые сплавы, как только запатентованные, так и уже используемые в качестве аналогов существующих сплавов.

2.1 **Сплавы, неупрочняемые термической обработкой**

Сплавы систем Al-Mg, Al-Mg-Sc

1 Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия [14]. Изобретение относится к области металлургии, в частности к деформируемым термически неупрочняемым алюминиевым сплавам, предназначенным для использования в качестве конструкционного материала космических летательных аппаратов. Сплав на основе алюминия содержит следующие компоненты, мас.%: марганец 0,3-0,6, магний 0,9-1,4, скандий 0,17-0,35, цирконий 0,05-0,12, титан 0,01-0,05, церий 0,0001-0,005, алюминий - остальное.

2 Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия [15]. Изобретение относится к области металлургии, в частности к деформируемым термически неупрочняемым алюминиевым сплавам, предназначенным для использования в виде деформированных полуфабрикатов в качестве конструкционного материала преимущественно для теплообменников системы терморегулирования космических летательных аппаратов. Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия содержит следующие компоненты, мас.%: магний 0,9-1,4, скандий 0,2-0,4, цирконий 0,05-0,15, титан 0,01-0,05, церий 0,0001-0,005, алюминий остальное. Получается сплав, обладающий повышенной прочностью, что позволяет снизить массу изготавливаемых из него конструкций.

3 Термически неупрочняемый, свариваемый, деформируемый, коррозионностойкий алюминиевого сплава системы алюминий-магний-скандий для работы в качестве конструкционного материала в изделиях ответственного назначения, элементы деталей которых работают до температур - 196^{o}С [16]. Сплав

содержит следующие компоненты, в мас. % магний 1,8-2,6, марганец 0,2-0,6, цирконий 0,05-0,015, бериллий 0,0002-0,005, скандий 0,1-0,19 водород 0,0179774-0,35948, алюминий - остальное.

4 Алюминиевый сплав системы Al - Mg - Sc, относящийся к деформируемому термически неупрочняемому свариваемому материалу [17]. Из предлагаемого сплава могут изготавливаться все виды полуфабрикатов (листы, плиты, поковки, штамповки, прутки, трубы, фольга) на металлургических заводах. Из этих полуфабрикатов могут изготавливаться детали, в том числе содержащие сварные герметичные соединения, используемые в конструкциях ответственного назначения, например самолетостроении, ракетной, космической и судостроительной технике. Механические свойства сплава близки к сплаву АМг6, однако его структура не охрупчивается до -196°С, а коррозионная стойкость после инициирующих нагревов при 150°С в течение 50 ч выше, чем у сплава АМг6. С учетом высокой свариваемости, коррозионной стойкости и др. характеристики он может найти широкое применение, например, при изготовлении криогенных топливных баковых конструкций в самолетостроении.отличающемуся от известных тем, что содержит марганец, бериллий и водород при следующем соотношении компонентов, мас.%: магний 1,8 - 2,6; марганец 0,2 - 0,6; цирконий 0,05 - 0,15; бериллий 0,0002 - 0,005: скандий 0,1 - 0,19: водород 0,017974 - 0,035948; алюминий - остальное. Учитывая, что он менее легирован дефицитным дорогостоящим элементом скандием новый сплав является более дешевым по сравнению с другими сплавами системы Al - Mg - Sc. Совместное введение скандия с цирконием повышает механические свойства сплава, как основного металла, так и свойства сварных соединений. Большее их количество, чем указанное в сплаве, может снизить как прочностные характеристики, так и характеристики вязкости и надежности сплава. Взаимодействие элементов: циркония (перитектическая диаграмма состояния с алюминием) и скандия (эвтектическая диаграмма состояния с алюминием), из-за ограничения последнего в сплаве до 0,1-0,19% недостаточно, для влияния скандия (как поверхностно активного элемента) по границам зерен сплава. Поэтому введение, дополнительно, менее дорогого не дефицитного легирующего элемента

марганца, компенсирует недостаточную концентрацию скандия. При этом марганец увеличивает сопротивление сплава образованию горячих трещин при отливке слитков и при сварке деталей, а также увеличивает коррозионную стойкость. Содержание водорода в количестве 0,0179774 - 0,035948% в сплаве, обеспечивает минимальную пористость приводящую к снижению брака сварных соединений. Предлагаемый сплав может быть использован для изготовления авиационных конструкций, работающих в интервале температур от - 196 до + 150^{o}C.

Вызывает интерес исследование совместного влияние скандия и хрома на структуру и механические свойства алюминиево-магниевых сплавов [18], скандия и циркония [19]. Создание алюминиевых сплавов системы алюминий-магний, легированных скандием, в частности сплавов марок 1515, 1523, 1545, 1545К, 1570 и 1570°С, побуждает многих авторов исследовать их механические свойства в сравнении со свойствами традиционных сплавов АМГ6, 1420, 1421 и др., причем результаты свидетельствуют в пользу новых разработок [20].

Высокие пластические свойства дают основание исследовать структурные изменения сплавов данной группы при сверхпластической деформации [21], а также влияние режимов термообработки на конечные свойства [22].

Несмотря на то, что в качестве авиационных материалов чаще всего используются деформируемые алюминиевые сплавы, современные разработки литейных композиционных сплавов, обладающие достаточным запасом прочности, также способны вызвать интерес с точки зрения трибологии. Например, разработан алюминиевый сплав, получаемый методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, содержащий до 10 масс.% TiC, дисперсные частицы которого способствуют повышению износостойкости конечного литейного сплава [23]. Также сообщается о способе получения литого композиционного материала для изготовления деталей, работающих в условиях трения, который в качестве матричного компонента содержит сплав Al + 3% Mg, а в качестве армирующего компонента применяются дискретные керамические частицы карбида кремния SiC с зернистостью 30-50 мкм в количестве 3-5 или 15-19 мас.% [24]. Технический результат - получение высоких трибологических свойств материала.

2.2 Сплавы, упрочняемые термической обработкой

Основными в этой группе, как было показано выше, являются сплавы систем алюминия с медью, магнием, марганцем, кремнием, литием и бериллием. Помимо главных элементов, в сплавы одной системы могут добавляться другие элементы, которые придают сплавам дополнительные свойства без изменения основных. В данном обзоре предлагаются к рассмотрению новые сплавы на базе существующих и успешно используемых систем легирования.

Сплавы системы Al-Mg-Si

Наиболее удачной из отечественных разработок сплавов данной системы можно считать уже используемый сплав 1370 [25], наиболее близкий по своему составу к французскому 6056. Характеризуется высоким сопротивлением коррозии, а по прочности и ресурсным характеристикам приближается к сплавам типа Д16. Режимы термической обработки, в частности, влияние закалки и старения на фазовый состав и механические свойства в настоящее время являются предметом научного исследования [8].

Последние исследования направлены на усовершенствование сплавов системы Al-Mg-Si путем добавления небольших количеств Mn, Cu, Cr, а также изменение режимов термической обработки [26]. В работе показано, что при варьировании скорости охлаждения формируется разная плотность вторичных выделений фазы Mg_2Si различного размера, что положительно сказывается на конечных свойствах сплава.

Сплавы системы Al-Cu-Mg

Научные исследования с целью разработки вариантов химического состава в рамках данной системы легирования наиболее интенсивно проводятся зарубежными учеными (США, Нидерланды), о чем свидетельствует проведенный патентный обзор.

1 Сплав серии 2000 с улучшенными характеристиками стойкости к повреждениям для авиационно-космического применения [27]. В описании изобретения к патенту приводятся следующие данные. Изобретение относится к

алюминиевому сплаву с улучшенной стойкостью к повреждениям, состоящему по существу из следующих компонентов, мас.%: медь 3,0-4,0; магний 0,4-1,1; серебро вплоть до 0,8; цинк вплоть до 1,0 мас.%; цирконий вплоть до 0,25 мас.%; марганец вплоть до 0,9; железо вплоть до 0,5; и кремний вплоть до 0,5; остальное - по существу алюминий, случайные примеси и элементы, причем упомянутые медь и магний присутствуют в отношении 3,6-4,5 частей меди на 1 часть магния. Данный сплав пригоден для изготовления деформированных, литых, а также композиционных изделий. Получается сплав, обладающий улучшенными прочностью, вязкостью и сопротивлением росту усталостной трещины.

2 Сплав алюмо-медно-магниевый, имеющий вспомогательные добавки лития [28]. Деформируемый алюминиевый сплав, содержащий, по существу, от 3 до 4,5 мас.% Cu; от 0,6 до 2 мас.% Mg; от 0,01 до 0,8 мас.% Li, необязательно до 2 мас.% Zn, необязательно до 2 мас.% Ag, необязательно до 2 мас.% Si, необязательно до 1 мас.% элемента, формирующего дисперсную систему и остальное алюминий и случайные элементы и примеси, который обладает по меньшей мере повышенной трещиностойкостью и такой же или повышенной прочностью по сравнению с аналогичным сплавом, который не содержит литий или содержит его в количестве более 0,9 мас.% и повышенной прочностью и такой же или повышенной трещиностойкостью по сравнению с аналогичным сплавом, который не содержит литий или содержит его в количестве более 0,9 мас.%.

3 Для применения в авиационно-космической промышленности заявлен сплав с высокой стойкостью к повреждениям [29]. Изделие из деформируемого алюминиевого сплава с высокими прочностью и вязкостью разрушения и высокой усталостной прочностью и низкой скоростью роста усталостных трещин, содержащего, мас.%: Cu от 4,4 до 5,5; Mg от 0,3 до 1,0, Fe <0,20; Si <0,20 ; Zn от 0,10 до 0,40 и Mn в диапазоне от 0,15 до 0,35 в качестве элемента-дисперсоидообразователя в сочетании с Ag в диапазоне от 0,2 до 0,8 и, необязательно, одним или более из элементов-дисперсоидообразователей, выбранных из группы, состоящей из: Zr <0,5; Sc <0,7; Cr <0,4; Hf <0,3; Ti <0,4; V <0,4, а остальное составляют алюминий и другие примеси или случайные элементы.

Изделие из деформируемого алюминиевого сплава представляет собой лист, плиту, поковку или прессовку для применения в конструкции воздушного летательного аппарата. Способ изготовления обладающего высокой прочностью и высокой вязкостью изделия из алюминиевого сплава серии AA2000, имеющего хорошие характеристики стойкости к повреждениям, включающий в себя следующие технологические стадии: а) литье слитка; б) гомогенизация и/или предварительный нагрев слитка после литья; в) горячая обработка слитка давлением в предварительно деформированную заготовку; г) необязательный повторный нагрев предварительно деформированной заготовки; д) горячая и/или холодная обработка давлением до формованной заготовки нужной формы; е) термообработка на твердый раствор упомянутой формованной заготовки при температуре и в течение времени, достаточных для перевода в твердый раствор по существу всех растворимых компонентов в этом сплаве; з) закалка подвергнутой термообработке на твердый раствор заготовки с помощью закалки орошением или закалки погружением в воду или другую закалочную среду; и) необязательное растяжение или сжатие закаленной заготовки; к) старение закаленной и необязательно растянутой или сжатой заготовки до достижения желательного состояния. Изделие подвергают старению до состояния, выбранного из группы, включающей в себя T3, T351, T352, T36, T3x, T4, T6, T61, T62, T6x, T651, T652, T87, T89, T8x.

4 В работе [30] предлагаются алюминиевые сплавы серии AA2000 и способ их производства, которые также возможно использовать для изготовления деталей авиа-, космического назначения. Сплав содержит меди 2 - 5,5 мас.%, магний 0,5-2 мас. %, марганец – до 1 мас.% и прочие элементы. Полученный продукт может быть использован для изготовления элементов фюзеляжа, нижней поверхности крыла и прочих деталей, получаемых механической обработкой.

5 Сплав Al-Cu-Mg, подходящий для авиационно-космического применения [31], имеющий высокую прочность, высокую вязкость разрушения и высокое сопротивление межкристаллитной коррозии, сплав содержит, мас.%: Cu 4,1-5,5, Mg 0,30-1,6, Mn 0,15-0,8, Ti 0,03-0,4, Cr 0,05-0,4, Ag < 0,7, Zr < 0,2.

В настоящее время многие исследования направлены на усовершенствование технологии получения сплавов этой серии, например, отмечаются особенности формирования структуры в алюминиевых сплавах Д16 в различных условиях жидкой штамповки [32].

Особый интерес ученых направлен на изучение влияния добавок Ag в сплавы данной системы [33-35]. В работах показано, что сплавы системы Al-Cu-Mg-Ag можно рассматривать как конструкционный материал для применения в сверхзвуковых летательных аппаратах при рабочих температурах до 200°C. Прочностные характеристики системы Al-Cu-Mg (при содержании около 6% (масс.) Cu и высоком отношении Cu/Mg) увеличиваются при их легировании Ag в количестве ≈0,5 масс.% и достигают максимальных значений в состоянии Т1 при отношении Cu/Mg=6-9.

Сплавы системы Al-Zn-Mg и Al-Zn-Mg-Cu

Сплав В96ц один из наиболее востребованных из всех деформируемых алюминиевых сплавов. Однако он уступает сплаву В95 в пластичности и коррозионной стойкости, сопротивлении повторным статическим нагрузкам, более чувствителен к надрезам и другим концентраторам напряжений [4]. Поэтому исследования в области совершенствования химического состава в рамках данных систем легирования не прекращаются.

1 В настоящее время разрабатывается немало новых сплавов на основе системы Al-Zn-Mg с добавлением, например, скандия. Так, сообщается о сплаве системы алюминий-цинк-магний-скандий с повышенной коррозионной стойкостью [36]. Алюминиевый сплав содержит от 0,5 до 10 мас.% Zn, от 0,1 до 10 мас.% Mg, от 0,01 до 2 мас.% Sc, по меньшей мере 0,01 мас.% по меньшей мере одной легирующей добавки, выбранной из Ag в количестве до 1 мас.% и Sn в количестве до 0,5 мас.%, алюминий и неизбежные примеси остальное. Способ получения включает получение упомянутого алюминиевого сплава, гомогенизацию, экструдирование, обработку на твердый раствор, закалку, выпрямление вытяжкой и старение. Получаются сплавы, обладающие хорошими свойствами, такими как относительно высокая прочность и отличная коррозионная стойкость.

2 Благодаря отечественным и зарубежным исследованиям было выявлено благотворное влияние добавок серебра, циркония и скандия на комплекс служебных свойств, в частности, прочность и коррозионную стойкость, сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu [37].

3 Из четырех основных компонентов рассматриваемых сплавов определяющими являются цинк и магний. Именно эти компоненты, их содержание (сумма, соотношение) определяют свойства Al-Zn-Mg-Cu-сплавов [38]. Сплавы с высоким отношением Zn/Mg (≈5), легированные цирконием, обладают высокой прочностью и рекомендуются для использования в виде массивных полуфабрикатов. Сплавы с отношением Zn/Mg<1, легированные скандием и цирконием, пригодны для сравнительно тонкостенных полуфабрикатов, получаемых с использованием больших деформаций.

4 Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов (ВИАМ) сообщает о создании нового сплава данной системы [39]. Изобретение относится к области металлургии и машиностроения, а именно к способу получения изделий из высокопрочных, особенно сверхпрочных алюминиевых сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu-Zr, применяемых в качестве обшивок крыла и других силовых элементов планера самолетов, а также наземных транспортных средств. Способ включает горячую прокатку слитка с получением заготовки, закалку, правку растяжением, предварительное старение и деформационное старение, совмещенное с формообразованием в режиме ползучести. Предварительное старение заготовки проводят в две ступени. На первой ступени нагрев проводят при температуре 95-115°С с выдержкой 3-10 ч, на второй ступени осуществляют нагрев при температуре 120-140°С с выдержкой 2-5 ч. Деформационное старение, совмещенное с формообразованием в режиме ползучести, проводят при температуре 145-165°С с выдержкой 5-10 ч и скорости деформирования не более 0,5%/час. Обеспечиваются стабильно высокие прочностные свойства алюминиевых сплавов при достаточном уровне коррозионной стойкости, трещиностойкости и сопротивления усталости, что увеличивает весовую эффективность и ресурс изделия.

5 Предлагается также высокопрочный деформируемый сплав [40]. Изобретение относится к области металлургии, в частности к деформируемым термически упрочняемым высокопрочным алюминиевым сплавам системы Al-Zn-Mg-Cu, предназначенным для изготовления всех видов деформируемых полуфабрикатов, в том числе и тонких листов, используемых в авиастроении, машиностроении и других областях промышленности. Деформируемый сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него, имеют следующее соотношение элементов, мас.%: цинк 2,5-4,0, магний 4,1-6,5, медь 0,2-1,0, железо до 0,25, кремний до 0,15, скандий 0,005-0,3, цирконий 0,005-0,25, никель и/или кобальт до 0,1, титан до 0,15, бор и/или углерод до 0,05, по крайней мере один элемент из группы: гафний до 0,15, молибден до 0,15, церий до 0,15, марганец до 0,5, хром до 0,28, иттрий до 0,15, ванадий до 0,15, ниобий до 0,15, алюминий и неизбежные примеси - остальное, причем отношение содержания Mg к содержанию Zn больше или равно 1,1. Получаются сплав и изделие из него, обладающие повышенными прочностными свойствами при одновременном повышении сопротивления усталости, снижении скорости роста трещин, повышении прочности сварных соединений и снижении плотности, что приводит к повышению ресурса и надежности работы изделий, а также снижению веса конструкций.

6 Интерес представляет сообщение о создании нового сплава серии 7XXX [41]. Изобретение относится к алюминиевым сплавам**,** в частности, к алюминиевым сплавам серии 7XXX в соответствии с обозначением Алюминиевой ассоциации. Алюминиевый сплав содержит следующие компоненты 6,0-10,0 мас.% Zn, 1,2-1,9 мас.% Mg, 1,3-1,9 мас.% Cu, до 0,3 мас.% Zr, до 0,4 мас.% Sc и до 0,3 мас.% Hf, остальное алюминий, сопутствующие элементы и примеси. Из указанного алюминиевого сплава получаются детали с большой толщиной поперечного сечения, обладающие повышенным сопротивлением коррозии, в частности, сопротивлением к образованию трещин в результате коррозии под нагрузкой, а также такими сочетаниями свойств прочности-вязкости, которые делают их пригодными для использования в качестве конструкционных деталей в аэрокосмической промышленности.

7 Предлагается алюминиевый сплав [42], характеризующийся тем, что он содержит, вес. %: 5,0-5,8 Zn, 1,1-1,2Mg, 0,2-0,3 Cr, 0,1-0,3 Mn, 0,1-0,4 Cu, 0,05-0,15 Ti, 0,005-0,05 Ce, 0,005-0,05 Sm, не более 0,2 Si, не более 0,3 Fe, не более 0,005 Zr. Способ получения полуфабриката из алюминиевого сплава, отличающийся тем, что включает последующую обработку, которая включает первую термообработку при температуре до 480°С, охлаждение до комнатной температуры и последующую вторую термообработку при температуре до 200°С. Перед второй термообработкой проводят естественное старение при температуре около комнатной температуры в течение 2-5 суток.

8 Для изготовления конструктивных элементов авиационно-космического назначения предлагаются сплавы данной системы легирования нового химического состава [43]. Способ изготовления продукта из деформируемого алюминиевого сплава серии AA7000, причем способ включает в себя стадии: а) литье заготовки; б) предварительный нагрев и/или гомогенизацию отлитой заготовки; в) горячую деформационную обработку заготовки одним или более способов, выбранных из группы, состоящей из прокатки, экструзии и ковки; г) необязательно холодную деформационную обработку подвергнутой горячей деформационной обработке заготовки; д) термообработку на твердый раствор (ТТР) подвергнутой горячей и необязательно холодной деформационной обработке заготовки; е) охлаждение ТТР заготовки; ж) необязательно растяжение или сжатие охлажденной ТТР заготовки или иную холодную деформационную обработку охлажденной ТТР заготовки для снятия напряжений, например, выравнивание или вытягивание или холодную прокатку охлажденной ТТР заготовки; и) старение охлажденной и необязательно растянутой или сжатой или подвергнутой иной холодной деформационной обработке ТТР заготовки для достижения желательного состояния, и при этом имеется по меньшей мере одна термообработка, осуществляемая при температуре в интервале более чем 500°С, но ниже чем температура солидуса рассматриваемого алюминиевого сплава, причем эту термообработку осуществляют либо: после термообработки гомогенизацией, но перед горячей деформационной обработкой, либо после термообработки на твердый раствор, либо как после термообработки

гомогенизацией перед горячей деформационной обработкой, так и после термообработки на твердый раствор. Продукт из деформируемого алюминиевого сплава серии AA7000 обладает химическим составом, включающим в себя, в мас.%: Zn от 3 до 10%; Mg от 1 до 3%; Cu от 0 до 2,5%; Fe <0,25%; Si от >0,12 до 0,35%, причем остаток составляют Al, неизбежные элементы и примеси. Продукт из деформируемого алюминиевого сплава, представляет собой конструкционный сплав, пригодный для изготовления элементов каркаса фюзеляжа, плиты верхней поверхности крыла, плиты нижней поверхности крыла, толстой плиты для получаемых обработкой резанием деталей, толстого листа для стрингеров, элемента лонжерона, элемента нервюры, элемента балки перекрытия, элемента перегородки и прочих деталей авиационно-космического назначения.

9 Высокопрочный термообрабатываемый алюминиевый сплав [44], который включает: Zn 6,1 - 7,6 вес.%; Mg 1,1 - 1,6 вес.%.; а также по меньшей мере один элемент, образующий интерметаллические дисперсоиды, выбранный из группы, состоящей из: Zr, Mn, Cr, Ti и Sc. Конечный продукт отличается повышенными показателями пределов прочности и текучести.

10 Сплав Al-Zn-Mg-Cu [45]. Изобретение относится к изделию из алюминиевого сплава, содержащего, мас.%: цинк 6,5-9,5, магний 1,92-2,1%, медь 1,0-1,8, железо <0,14, кремний <0,20, предпочтительно <0,12, цирконий 0,04-0,3, необязательно, один или более из: скандия <0,7, хрома <0,4, гафния <0,3, марганца <0,8, титана <0,4, ванадия <0,4 и случайные примеси - <0,05 каждый и <0,15 все вместе, а остальное составляет алюминий**.** Изделие производят способом, включающим литье слитка, его предварительный нагрев, горячую обработку давлением до получения предварительно деформированной заготовки одним или более способами, выбранными из группы, состоящей из прокатки, штамповки и ковки, необязательный повторный нагрев предварительно деформированной заготовки, горячую обработку давлением до получения формованной заготовки нужной формы, термообработку на твердый раствор упомянутой формованной заготовки при температуре и в течение времени, достаточных для перевода в твердый раствор по существу всех растворимых компонентов в сплаве, закалку

подвергнутой термообработке на твердый раствор заготовки путем закалки оросительным охлаждением или закалки погружением в воду или другую закалочную среду, необязательное растяжение или сжатие закаленной заготовки, искусственное старение закаленной и необязательно растянутой или сжатой заготовки до достижения желательного состояния. Получают изделие, обладающее высокой прочностью и вязкостью разрушения и хорошей коррозионной стойкостью.

11 Сплав с повышенным содержанием цинка [46]. Изобретение относится к продукту из свариваемого деформируемого алюминиевого сплава и способу его получения. Продукт состоит из следующих компонентов, мас.%: Zn 9,0-14,0, Mg 1,0-5,0, Cu 0,03-0,25, Fe<0,30, Si<0,25, Zr от 0,04 до менее чем 0,3 и один или более элементов, выбранных из группы, состоящей из: Ti<0,30, Hf<0,30, Mn<0,80, Cr<0,40, V<0,40 и Sc<0,70, случайные элементы и примеси, каждый <0,05, суммарно <0,15, и остальное - алюминий. Получается продукт, имеющий пониженную чувствительность к образованию горячих трещин, имеющий улучшенные свойства прочности и вязкости разрушения и, твердость более 180 НВ при нахождении в искусственно состаренном состоянии.

12 Для изготовления деталей летательных аппаратов предлагается сплав, содержащий, мас.%: цинк 4,5 - 5,5; магний 2,0 - 3,0; марганец 0,2 - 0,4; цирконий 0,1 - 0,2; титан 0,05 - 0,1; бериллий 0,01 - 0,03; никель 0,2 - 0,4; бор 0,05 - 0,1; медь 1,0 - 1,5; хром 0,07 - 0,15; алюминий - остальное. Термообработка сплава**:** закалка от 470^{o}С в воде, искусственное старение при 130^{o}С. Предел прочности сплава на растяжение 630 - 650 МПа [47].

13 Сплав системы Al-Zn-Cu-Mg [48], также отличающийся по химическому составу. Сплав на основе алюминия, полученный путем термообработки на твердый раствор, закалки и старения и состоит по существу из, мас.%: Zn 6,2-7,2; Mg 1,5-2,4; Cu 1,7-2,1; Fe 0-0,13; Si 0-0,10; Ti 0-0,06; Zr 0,06-0,13; Cr 0-0,04; Mn 0-0,04. Конечный сплав - катаный или деформированный продукт авиационного или аэрокосмического назначения.

С целью определения возможности применения сплава В96Ц и других близких по составу сплавов в самолетостроении на протяжении последнего

десятилетия прошлого века и первых лет текущего столетия в нашей стране и за рубежом проведен ряд работ в направлении изыскания режимов термической обработки для повышения комплекса механических свойств сплавов данной группы [49, 50] В частности, в работе [50] рассмотрено применение метода быстрой кристаллизации к созданию высокопрочных термически упрочняемых алюминиевых сплавов систем Al-Zn-Mg и Al-Zn-Mg-Cu, которые по прочностным свойствам, коррозионной стойкости и основным характеристикам конструктивной прочности превосходят серийные сплавы этих систем легирования, получаемые по традиционной технологии. Проанализировано влияние легирующих компонентов на фазовый состав, структуру и свойства быстрозакристаллизованных сплавов. Сформулированы подходы к созданию новых быстрозакристаллизованных сплавов и показаны возможности их реализации на примере высокопрочных сплавов систем Al-Zn-Mg и Al-Zn-Mg-Cu.

Помимо этого изыскиваются пути улучшения комплекса свойств полуфабрикатов из сплавов типа В96Ц-3 за счет оптимизации упрочняющей термической обработки – трехступенчатого старения [51] и повторного старения [52].

Сплавы системы Al-Li-Mg

Новейшие разработки сплавов данной системы принадлежат преимущественно отечественным ученым – представителям ФГУП «ВИАМ» И.Н. Фридляндеру и его коллегам.

1 Сплав, отличающийся коррозионной стойкостью и термической стабильностью [53]. Изобретение относится к металлургии. Сплав на основе алюминия преимущественно системы Al-Li-Mg, содержащий следующие компоненты, масс. %: литий – 1,5-1,9, магний 4,1-6,0, цинк 0,1-1,5, цирконий 0,05-0,03, марганец 0,01-0,8, водород $0{,}9\cdot10^{-5}$-$4{,}5\cdot10^{-5}$ и, по крайней мере, один элемент, выбранный из группы, включающей: бериллий 0,001-0,2, иттрий 0,01-0,5, скандий 0,01-0,3, хром 0,01-0,5, алюминий остальное. Водород в количестве 0,9 10-5 - 4,5 10-5, образуя твердые дисперсные частицы гидрида лития, способствуют уменьшению линейной усадки при кристаллизации и предотвращению образования

пористости в слитках. Содержание магния в сплаве в пределах 4,1-6,0% обеспечивает необходимый уровень прочностных свойств и свариваемость. При уменьшении содержания магния менее 4,1% снижается прочность и возрастает склонность сплава к горячим трещинам, как при литье, так и при сварке. При увеличении концентрации магния в сплаве более 6,0% снижается технологичность при литье, горячей и холодной прокатке, а также пластические характеристики готовых полуфабрикатов и изделий из них. Для обеспечения необходимой технологичности, особенно при изготовлении тонких листов, требуемого уровня механических, коррозионных свойств и вязкости разрушения, а также свариваемости содержание лития следует держать в пределах 1,5-1,9%. При снижении содержания лития менее 1,5% возрастает плотность сплава, понижается уровень прочностных свойств и модуля упругости, при содержании лития более 1,9% - ухудшается технологичность при холодной деформации, свариваемость, характеристики пластичности и вязкости разрушения. Цинк в количестве 0,1-1,5% упрочняет твердый раствор алюминия. При содержании более 1,5% ухудшается свариваемость и коррозионная стойкость. Цирконий в количестве 0,05-0,3% является модифицирующей добавкой при отливки слитков и обеспечивает вместе с марганцем (в количестве 0,01-0,8%) структурное упрочнение в полуфабрикатах в результате формирования полигонизованной или мелкозернистой рекристаллизованной структуры. Введение одного или нескольких элементов бериллия, иттрия, скандия, хрома способствуют формированию однородной мелкозернистой структуры в полуфабрикатах и повышению технологической пластичности при холодной прокатке. Способ термообработки включает закалку, правку и трехступенчатое старение по следующему режиму: первая ступень – при 80-90°С в течение 3-12 ч, вторая ступень – при 110-185°С в течение 10-48 ч, третья ступень – при 90-110°С в течение 8-14 ч. Предлагаемый способ термической обработки в результате применения третьей ступени старения обеспечивает термическую стабильность свойств сплавов после длительного низкотемпературного нагрева за счет дополнительного выделения дисперсной фазы ($A1_3Li$), равномерно распределенной в объеме матрицы. Большой объем

мелкодисперсной фазы обедняет твердый раствор и предотвращает ее появление в процессе нагрева при 85^{o}C, 1000 ч. Технический результат заключается в повышении пластичности сплава в термоупрочненном состоянии при сохранении высокой прочности и обеспечении высокой коррозионной стойкости, хорошей свариваемости, а также хороших характеристик вязкости разрушения и термической стабильности после нагрева при 85°С в течение 1000 ч.

2 Высокопрочный сплав, предназначенный для элементов летательных аппаратов [54]. Сплав на основе алюминия содержит компоненты при следующем соотношении, мас.%: литий 1,8 - 4,0; магний 1,2 - 2,5; медь 0,2 - 0,8; цирконий 0,03 - 0,25; бериллий 0,0005 - 0,25; никель 0,005 - 0,25; бор 0,0002 - 0,05, по крайней мере один элемент, выбранный из группы, содержащей титан 0,010 - 0,15, иттрий 0,005 - 0,2, скандий 0,01 - 0,3, алюминий остальное. Свойства сплава следующие: временное сопротивление в, кгс/мм^2 51,0 - 56,0; предел текучести, кгс/мм^2, 42,0 - 48,0; относительное удлинение, %, 12,0 - 16,0, сопротивление расслаивающей коррозии, балл, 2 - 4.

Система Al-Mg-Li вызывает наибольший интерес у исследователей – множество работ посвящено изучению фазового состава, механических свойств сплавов 1423, 1430 и других [55]. Помимо этого исследуются структурное состояние и поведение наноструктурного сплава системы Al-Mg-Li при высокоскоростном сверхпластичном течении [56]. В рамках современных исследований для улучшения структуры сплавов 1420 и 1421 предлагается использовать импульсное и лазерное излучение [57], а также РКУП и теплую прокатку [58].

Повышению технологичности сплавов данной системы также посвящена работа [59], где исследованы показатели штампуемости и свариваемости алюминиевых деформируемых сплавов 1420, 1421, 1423 в сравнении со сплавами АМг6, Д16Т. Показано, что для получения деталей из сплавов 1420, 1421 и 1423 формообразованием необходимо использовать современные методы и средства, повышающие технологическую пластичность (нагрев, совмещение с термообработкой, остывание в закрытых штампах).

В работе [60] рассматривается новый способ изготовления полуфабрикатов и изделий из алюминиево-литиевых, сплавов для применения, в том числе, в авиационной промышленности с повышенной стойкостью к разрушениям. Предлагаемый способ изготовления полуфабрикатов и/или изделий из Al-Li-сплавов включает получение заготовки, отжиг для коагуляции вторичных избыточных фаз, деформацию при 250-420^{o}C со степенью деформации 15-60% с последующим отжигом при 250-450^{o}C (при выдержке 1-12 час), окончательную деформацию со степенью 15-60% при 270-430^{o}C, закалку со скоростью охлаждения 0,5-3 $V_{кр}$ и старение. Для получения полуфабрикатов и/или изделий используют слиток гомогенизированный, прессованную и катаную заготовки. Отжиг для коагуляции вторичных избыточных фаз проводят на заготовке при 330-420^{o}C (при выдержке 1-12 час). В случае, когда деформацию проводят при температуре ниже или равной температуре коагуляционного отжига, последний можно совмещать с нагревом под деформацию, что позволяет экономить электроэнергию в процессе изготовления полуфабрикатов. Для получения сложных и тонких полуфабрикатов деформацию и промежуточный отжиг проводят многократно. Необходимое количество повторений операций деформация-промежуточный отжиг определяется размерами исходной заготовки и геометрическими размерами конкретного полуфабриката. Полуфабрикаты, обработанные по предлагаемому способу, имеют более высокую вязкость разрушения в сравнении с полуфабрикатами, полученными по известному способу при практически одинаковом уровне механических свойств.

Сплав 1420 и его аналоги системы Al- Li-Mg, характеризующиеся высокой коррозионной стойкостью, хорошей свариваемостью и достаточной статической прочностью, нашли применение во многих деталях и узлах ракетно-космической техники, поэтому в настоящее время разрабатывается немало новых сплавов на базе этой системы. Например, перспективен сплав В-1469 системы Al-Cu-Li-Mg-Ag [61] и его зарубежные аналоги – сплавы 2195 и 2098. Сплав имеет высокие прочностные характеристики, причем при отрицательной температуре (-70°C) они заметно повышаются ($\sigma_{в}$= 575-710МПа), и высокий модуль упругости (E=78400 МПа). Исследование структуры и свойств данного сплава, проведенное в работе [62],

позволяет рекомендовать его к применению взамен сплавов В95пч, В95оч, В96ц-3пч для элементов, работающих длительное время на сжатие при температурах до 150°С во всех климатических условиях.

3 ПОКРЫТИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

При работе деталей, узлов и агрегатов современных летательных аппаратов и двигателей в сложных эксплуатационных условиях чаще всего оказывается поверхность, первая воспринимающая на себя воздействия рабочей среды, внешних нагружений и контактирующих деталей [4].

Характерным изнашиванием поверхности, приводящем к выходу их из строя, являются: механический (в том числе усталостный) и абразивный износы, связанные соответственно с механическими воздействиями или механическим изнашиванием при трении; коррозионно-механический износ трущихся деталей, вступивших в химическое взаимодействие со средой; эрозионный унос материала в местах контакта с движущимися потоками жидкости или газа, который усугубляется воздействием на поверхность твердых частиц, увлекаемых потоком (гидро-, газоабразивное изнашивание); изнашивание в результате схватывания, вырывания и переноса материала с одной поверхности контакта или трения на другую; изнашивание, связанное с селективным испарением компонентов с низкой упругостью пара, особенно в условиях значительных разряжений и вакуума, с окислением поверхности и др.

Таким образом, для обеспечения работоспособности деталей необходимо обеспечить служебные свойства поверхности материала. Для этого наносят специальные поверхностные покрытия, которые по составу, структуре и свойствам отличаются от основного материала. Покрытием называется слой или несколько слоев материала, искусственно полученных на покрываемой поверхности.

В зависимости от количества нанесенных слоев покрытия бывают однослойными и многослойными. По фазовому составу этих слоев различают однофазные и гетерофазные (многофазные) покрытия. По материалу покрытия делятся на металлические — состоящие из металла или сплава, например молибденовые, цинковые и др.; композиционные — представляющие собой металлическое покрытие с равномерно распределенными в нем неметаллическими частицами, например металлокерамические композиции; неорганические — состоящие из неорганических соединений металлов, например оксидов, нитридов, боридов,

карбидов, силицидов, и других керамических, бескислородных и металлоподобных химических соединений. В зависимости от основной выполняемой функции различают износостойкие, жаростойкие, коррозионностойкие, антифрикционные, теплозащитные, технологические и другие виды покрытий. Все покрытия, предназначенные для защиты конструкционного материала от различных видов коррозии, обобщенно называют защитными. По характеру формирования покрытия разделяют на диффузионные, наслоенные (покровного типа) и смешанные (диффузионно-покровного типа). Состав покрытий, получаемых диффузионным насыщением материала, является продуктом взаимодействия компонентов насыщающей среды и основного материала. При этом изделие не изменяет своих размеров, так как диффузионное покрытие образуется за счет толщины основного материала. Наслоенные покрытия образуются без участия основного материала в формировании фазового состава покрытия. Они наносятся и закрепляются на поверхности в виде самостоятельных слоев разной толщины. Примером могут служить напыленные, химически-, электрофоретически осажденные покрытия. Смешанные диффузионно-покровные покрытия получаются методами, сочетающими диффузионное взаимодействие с подложкой и наслоение наносимого материала, например, при формировании покрытий из металлических расплавов, из суспензий и паст — по шликерно-обжиговой технологии.

Разработано большое количество методов получения специальных покрытий, имеющих характерные отличительные особенности технологии. Однако нет единства в их классификации. Наиболее простой и наглядной является классификация, в основу которой положены различия в агрегатном и физическом состоянии наносимого материала. По этому признаку все методы нанесения покрытий разделяют на три большие группы, объединяющие газофазные, жидкофазные и твердофазные методы. Внутри каждой группы существует много методов.

К группе газофазных методов относятся методы, в которых наносимый материал поставляется на поверхность из газовой фазы. Это — вакуумная металлизация, электронно-лучевое распыление, газофазное осаждение, газофазный порошковый

метод и др. Для группы жидкофазных методов характерно, что наносимый материал доставляется к поверхности из жидкой фазы: расплавов металлов, солей, из суспензий и паст, электрофоретическим и электролитическим способами, плазменным, газоплазменным и детонационным напылениями. К группе твердофазных методов относятся такие как плакирование, диффузионная сварка, контактное насыщение из твердой фазы и др., когда наносимый материал или его компоненты находятся в твердом агрегатном состоянии.

Из существующих методов наиболее широко в авиационной промышленности в настоящее время применяются методы диффузионного насыщения; газотермического напыления (газоплазменное, плазменно-детонационное); осаждения из газовой фазы (физическое и химическое); химического и электролитического осаждения из жидких сред; нанесения шликерных композиций с последующим обжигом; наплавки и электроискрового легирования. При этом большое внимание уделяется нанесению покрытий в нейтральных и защитных средах, что позволяет расширить перечень наносимых материалов и улучшить качество покрытий.

Методы диффузионного насыщения с доставкой насыщающих элементов на поверхность из любого агрегатного состояния являются одними из самых распространенных для целенаправленного изменения свойств поверхности. Положительными чертами диффузионных покрытий являются их плотность и равномерность по толщине, хорошая прочность сцепления (адгезия) с основным материалом, простота и невысокая стоимость технологического процесса. Диффузионным насыщением создают защитные и специальные покрытия преимущественно на стальных, титановых деталях, изделиях из никелевых, хромоникелевых сплавов, сплавов на основе тугоплавких металлов. Недостатки всех способов получения диффузионных покрытий состоят в ограничениях, связанных с номенклатурой наносимых и защищаемых материалов, трудностями создания композиционных гетерофазных покрытий, а также с формированием слоев на деталях сложной конфигурации и крупных габаритов. Наслоенные покрытия не имеют выше указанных недостатков. В методах их нанесения отсутствует

диффузионное насыщение в качестве необходимой технологической операции, и для покрытий характерна четкая граница раздела с основным металлом (подложкой) без переходного диффузионного слоя. Большинство этих методов отличаются универсальностью, так как не имеют ограничений по номенклатуре наносимых и защищаемых материалов. Наиболее распространенными являются методы газоплазменного, плазменного, детонационного напылений, металлизации, вакуумного осаждения, конденсации и др. Недостатком является пониженная по сравнению с диффузионными покрытиями прочность сцепления.

Выбор материала для формирования покрытий зависит от многих факторов, в том числе от назначения покрытия, состава и свойств защищаемого материала, области его применения. Однако существует ряд общих требований, предъявляемых к разработке и выбору покрытий: способность обеспечить специальные поверхностные свойства; способность защищать основной материал от воздействия рабочей агрессивной среды; достаточная прочность сцепления с основой; нечувствительность к небольшим повреждениям и способность к самозалечиванию случайных технологических и эксплуатационных дефектов; химическая совместимость с основным материалом, т. е. отсутствие вредного химического взаимодействия на границе покрытие — защищаемый металл (например, образование хрупких или легкоплавких фаз); близость коэффициентов термического расширения покрытия и основы, чтобы предотвратить растрескивание при термоциклировании и обеспечить достаточную термостойкость; достаточная механическая прочность и стойкость к воздействию внешней среды; минимальное взаимное влияние на изменение физико-химических свойств основного материала и покрытия, т. е. стабильность свойств при эксплуатации (для этого скорость взаимной диффузии должна быть мала по сравнению с требуемым сроком службы); применимость метода нанесения к конструкции; должны учитываться критерии технического и экономического характера, в частности по возможности более низкая стоимость материала, простота и воспроизводимость способа, возможность ремонта, обработки, качество и чистота поверхности, и т. д.

Таким образом, покрытие в комплексе должно удовлетворять целому ряду требований, количественные характеристики которых определяются конкретными эксплуатационными условиями, под которые и разрабатывается (или выбирается) покрытие.

3.1 Современные методы оксидирования

3.1.1 Электрохимическое анодирование

Под действием глубокого вакуума в космическом пространстве происходит интенсивное испарение металла. Предотвратить процесс сублимации, возможно, используя поверхностную оксидную пленку. Традиционно применяют в основном электрохимическое оксидирование (анодирование). При анодировании, например, в серной кислоте, поверхность изделий покрывается плотной защитной оксидной пленкой Al_2O_3. Обзор современных исследований в этой области показал, что усилия исследователей направлены, главным образом, на усовершенствование традиционных технологий анодирования [63, 64]. Анодирование также играет значительную роль при эксплуатации деталей, работающих в условиях интенсивного износа. Повысить износостойкость можно в результате увеличения твердости контактирующих слоев за счет создания толстослойного анодированного слоя. При применении традиционных способов оксидирования основными технологическими параметрами являются состав электролита (серная, щавелевая или сульфосалициловая кислота), электрический режим процесса и температура. С целью интенсификации формирования оксидного покрытия в зону реакции также вводят кислород, перекись водорода и другие окислители. Перспективным в этом плане может оказаться применение озона [65]. Озон известен как сильный универсальный окислитель, потенциал которого (2,07 В) по величине уступает только фтору (2,87 В). Он окисляет серебро, золото, платину. Озониды щелочных металлов типа KO_3, NaO_3 являются сильнейшими окислителями, т.к. содержат большое количество активного кислорода в виде аниона O_3. Отмеченная активность озона обусловлена появлением в ходе взаимодействия так называемого синглетного кислорода O_2 в электронно-возбужденном состоянии и других

активных радикалов. Однако использование озона при анодировании алюминия и его сплавов затруднено из-за его малой растворимости в водных электролитах, разложения при столкновении с поверхностью и возможности взрыва при концентрации озона в газовой смеси выше 20 %. В работе предлагается подавать в окислительную зону подавать озоно-воздушную смесь, находящуюся под действием электрического поля. Установлено, что повышение концентрации озона в смеси с воздухом от 1 до 5 % увеличивает конечную толщину оксида алюминия на 30 %. При этом при малом содержании озона рост покрытия практически стабилизируется к 40-й минуте процесса, а при 5 %-м - он продолжается до 50-й минуты, т.е. окислительный потенциал обогащенной озоном смеси выше. Производительность анодирования увеличивается на 40-70 %. С увеличением концентрации O_3 микротвердость возрастает от 5,2 до 6,8 Гпа, т.е. на 30 %, а величина износа снижается в 1,4-2,3 раза. Таким образом, применение озоно-воздушной смеси при анодировании алюминиевых сплавов, позволяет получать оксидные покрытия с повышенной износостойкостью.

Предлагается новый состав электролита для одновременного обезжиривания и травления алюминия и его сплавов для подготовки к анодированию [66]. Электролит содержит, г/л: гидроксид натрия 35-45; сульфосалициловая кислота 15-25; оксифос Б 1-2; пиродоксин бромистоводородный 0,2-0,4. Совмещение операций обезжиривания и травления позволяет сократить производственные площади и трудоемкость предварительной обработки деталей с повышением защитных свойств оксидных пленок на поверхности деталей.

Для нанесения оксидного покрытия предлагается также воздействовать катодно-анодными микроразрядами в электролите [67]. На образцах сплава Д16 показано, что под воздействием электрического поля и тепловой энергии формируется оксидное покрытие с максимальной микротвердостью. Этот же способ более подробно описывается в патенте [68]. Изобретение относится к области нанесения оксидных покрытий путем воздействия катодно-анодными электрическими микроразрядами на поверхность металлических изделий, находящихся в щелочном электролите. Используется переменный ток частотой 50 Гц, плотностью 15,5 - 45,8

А/дм^2 при отношении катодной и анодной составляющих тока 1,36 - 1,92. При этом существенно снижаются энергозатраты процесса (до 10 раз) без ухудшения эксплуатационных характеристик покрытия.

Модернизированная технология анодирования изделий из алюминиевых сплавов представлена в следующем патенте [69]. Технология используется для электролитического нанесения окисных покрытий, в частности, анодирования алюминиевых сплавов. Сущность изобретения: электролит приготавливают путем смешивания с водой 10 - 20 мас.% серной кислоты, 2 - 4 мас.% изопропилового спирта с последующим охлаждением до (- 2,5) - 2,5^{o}С, а формирование окисной пленки ведут в течение 1 - 3 ч в две стадии, при этом на первой стадии плотность тока в цепи формирования доводят до значения 1 - 1,2 А/дм^2 за 15 - 20 мин, а на второй стадии плотность тока доводят до 2 - 4 А/дм^2 по следующей зависимости $\Delta I = \Delta I_o + \Delta I_o t$, где ΔI - плотность тока в цепи формирования окисной пленки в заданный момент времени, ΔI_o - плотность тока в конце первой стадии формирования окисной пленки, t - время, прошедшее от начала формирования окисной пленки, получаются износостойкие антипригарные покрытия, не содержащие микротрещин, с малым отклонением от начальной поверхности.

Способ получения твердых покрытий на алюминиевых сплавах, относящийся к электрохимии, в частности, к оксидированию [70]. Цель изобретения - повышение технологичности способа, снижение стоимости оборудования для его реализации. Результат достигается за счет обработки деталей в щелочном электролите при температуре до 90^{o}С переменным асимметричным током в виде разнополярных импульсов частотой до 1 кГц, амплитудой до 1000 В. Новым в способе является использование импульсов в виде усеченных синусоид с крутыми передними фронтами, которые формируются путем несложного преобразования напряжения промышленной сети. Это позволяет упростить применяемое оборудование, систему управления и тем самым добиться повышения технологичности. Способ может быть использован для деталей, поверхности которых работают в условиях трения, при повышенных требованиях к износостойкости или термостойкости.

Интересен новый способ твердого анодирования изделий из алюминиевых сплавов [71]. Изобретение относится к электрохимической обработке изделий из алюминиевых сплавов и может быть использовано в авиационной, космической, автомобильной промышленности. Способ включает обработку изделий при постоянном токе в водном растворе электролита, содержащего, г/л: серную кислоту 70-140, щавелевую кислоту 30-80, винную кислоту 5-20, лимонную кислоту 2-15 и борную кислоту 1-5, при этом обработку ведут при температуре электролита 18-25°С ступенчато: первую ступень осуществляют при напряжении 5-10 В, 0,5-5,0 минут, вторую ступень осуществляют при напряжении 15-28 В до образования покрытия требуемой толщины. Технический результат: повышение коррозионной стойкости, твердости, скорости роста пленки.

Предлагается также способ формирования анодного покрытия на поверхности изделия из алюминия [72], включающий в себя:

1) приготовление раствора для анодирования, образованного водой, фосфорсодержащей кислотой и/или солью и одним или более дополнительными компонентами, выбранными из группы, состоящей из:

а) водорастворимых комплексных фторидов, б) водорастворимых комплексных оксифторидов, в) вододиспергируемых комплексных фторидов, г) вододиспергируемых комплексных оксифторидов элементов, выбранных из группы, состоящей из Ti, Zr, Hf, Sn, Al, Ge и B и их смесей;

2) обеспечение катода в контакте с упомянутым раствором для анодирования;

3) размещение изделия из алюминия, алюминиевого сплава в качестве анода в упомянутом растворе для анодирования;

4) пропускание тока между анодом и катодом через упомянутый раствор для анодирования в течение времени, эффективного для формирования защитного покрытия на, по меньшей мере, одной из поверхностей изделия.

Предлагается способ уплотнения анодно-окисного покрытия детали из алюминия и его сплавов [73]. Изобретение может быть использовано в авиационной, авиакосмической технике, приборостроительной промышленности и в строительстве для получения защитных покрытий на деталях из алюминиевых

сплавов**.** Способ включает обработку детали, являющейся катодом, при постоянном токе в электролите, имеющем следующий состав, г/л: сернокислый магний ($MgSO_4$) 5-20, хлорное железо ($FeCl_3$) 0,1-0,3, аммоний уксуснокислый (NH_4CH_3COO) 0,001-0,1 и вода до 1 литра. Обработку детали проводят на катоде при плотности постоянного тока 0,1-0,2 А/дм^2, в течение 3-5 мин и температуре 18-22°С. Технический результат: обеспечение высоких защитных свойств покрытия, возможность выявления дефектов на поверхности анодно-окисляемых деталей.

3.1.2 Микродуговое оксидирование

В последние годы большое внимание уделяется методу микродугового оксидирования (МДО), который является экологически чистой технологией электроплазмохимического преобразования поверхностного слоя деталей из алюминиевых сплавов в высокотемпературные модификации оксидов алюминия. МДО позволяет создавать на поверхности изделия керамические многофункциональные покрытия, которые обладают высокими микротвердостью и износостойкостью, низким коэффициентом трения [74-76].

МДО - сравнительно новый вид поверхностной обработки**.** Отличительной особенностью микродугового оксидирования является участие в процессе формирования покрытия поверхностных микроразрядов, в результате действия которых существенно изменяются состав и структура оксидных слоев. Стоит отметить экологичность метода, а также отсутствие необходимости тщательной подготовки поверхности и применения холодильного оборудования для получения относительно толстых покрытий.

Оптимальные технологические параметры, определенные в результате проведенных исследований и отработанная технология, которая применяется при формировании оксидных покрытий на алюминиевых сплавах при традиционном анодировании составили основу для разработки технологического процесса формирования износостойких МДО-покрытий [77]:

- обезжиривание;

- промывка в горячей воде;

- промывка в холодной воде;

- изоляция участков, не подлежащих оксидированию;

- монтаж деталей на подвески;

- микродуговое оксидирование;

- промывка в холодной, а затем в горячей воде;

- демонтаж и сушка деталей;

- контроль качества оксидного покрытия.

МДО покрытия наносятся в гальванических ваннах, в связи с этим, максимальные размеры обрабатываемых изделий ограничиваются только размерами ванны. В ряде случаев, когда нанесение покрытия производится на изделия, имеющие значительные геометрические размеры, может использоваться "потоковый" режим нанесения, который заключается в последовательном пропускании изделия через электролит и нанесении МДО покрытия [78].

В числе основных областей применения разработчики называют и ракетостроение – для создания тепло-эрозионностойких и износостойких покрытий ракетных двигателей. Аналогами метода являются обычное анодирование, искровое оксидирование, плазменное, плазматронное, детонационное напыление. Основными преимуществами микроплазменного оксидирования являются (по сравнению с предлагаемыми, к примеру, фирмой «KERONITE Ltd» Англия):

- возможность создания сверхпрочных покрытий, уступающих по прочности только алмазам;

- возможность нанесения покрытий на внешних и внутренних поверхностях деталей любой конфигурации;

- возможность получения разной толщины покрытий, при использовании одного материала покрытия;

- отсутствие предварительной обработки поверхностей.

- более высокое сопротивление коррозионной усталости образцов и изделий с оксидно-керамическим покрытием (высокий предел выносливости) (таблица 7).

При этом надо отметить, что особенность структуры МДО-покрытий заключается в том, что формируемое покрытие состоит из двух слоев: верхнего – рыхлого, пористого и внутреннего – плотного, бездефектного. Внешний слой покрытия необходимо удалять, так как при эксплуатации, особенно в условиях трения, он будет осыпаться и служить дополнительным источником абразивных частиц.

Таблица 7 - Сравнительный анализ характеристик покрытий на алюминиевых сплавах, полученных методом МДО и электрохимическим анодированием [77]

№	Характристика покрытия	Микродуговое оксидирование		Электрохимической анодирование	
		АМг6	Д16Т	АМг6	Д16Т
1	Толщина, $h_т$/ $h_{общ}$, мкм	6 / 10. .60 / 115	10/10. .70/ 130	/ 72	/ 38
2	Микротвердость Н, ГПа	2,5. .13	2,5. .24,5	5. .5,2	3,3. .3,6
3	Пористость, %	0.. 12	0. .15	0.. 9,5	0.. 17,3
4	Пробивное напряжение, В	1950	1800	1800	980
5	Коррозионная стойкость, мин	21	17	12	10
6	Тангенс угла диэлектрических потерь	0,12	0,14	-	-

После этого внутренний слой необходимо подвергать окончательной механической обработке для обеспечения требуемых параметров шероховатости, точности размеров и взаимного расположения поверхностей деталей [79].

Для предварительной оценки пригодности алюминиевых сплавов к обработке микродуговым оксидированием, толщины, твердости и напряжения пробоя получаемых покрытий предлагается способ [80], включающий предварительно определение точного химического состава, затем для каждого компонента расчет коэффициентов:

$k^{\delta}=1-(0,07\cdot C_{Cu}+0,02\cdot C_{Mg}+0,06\cdot C_{Mn}+0,06\cdot C_{Fe}+0,04\cdot C_{Si}+0,06\cdot C_{Zn}+0,04\cdot C_{пр})$;

$kH=1-(0,06\cdot C_{Cu}+0,015\cdot C_{Mg}+0,05\cdot C_{Mn}+0,05\cdot C_{Fe}+0,03\cdot C_{Si}+0,05\cdot C_{Zn}+0,03\cdot C_{пр})$;

$kU=1-(0,10\cdot C_{Cu}+0,02\cdot C_{Mg}+0,06\cdot C_{Mn}+0,07\cdot C_{Fe}+0,04\cdot C_{Si}+0,07\cdot C_{Zn}+0,06\cdot C_{пр})$,

где k^{δ}, kH, kU - безразмерные коэффициенты, учитывающие влияние компонентов алюминиевых сплавов соответственно на толщину, твердость и напряжение пробоя формируемых на них покрытий; C_{Cu}, C_{Mg}, C_{Mn}, C_{Fe}, C_{Si}, C_{Zn}, $C_{пр}$ - содержание в

сплавах соответственно меди, магния, марганца, железа, кремния, цинка, прочих компонентов в процентах. Далее экспериментально определяют толщину, твердость и напряжение пробоя покрытия, полученного микродуговым оксидированием при определенных условиях на одном выбранном сплаве, рассчитывают ожидаемые значения толщины, твердости и напряжения пробоя покрытий, которые можно получить при таких же условиях на остальных сплавах по формулам:

$$\delta_i = \delta_в \cdot \frac{k\delta_i}{k\delta_в}; H_i = H_в \cdot \frac{kH_i}{kH_в}; U_i = U_в \cdot \frac{kU_i}{kU_в},$$

где δ_i, H_i, U_i - рассчитанные ожидаемые значения соответственно толщины, твердости и напряжения пробоя покрытия на любом из оцениваемых сплавов**;** $\delta_в$, $H_в$, $U_в$ - экспериментально определенные значения толщины, твердости и напряжения пробоя покрытия на выбранном сплаве; $k\delta_i$, kH_i, kU_i - безразмерные коэффициенты, рассчитанные для любого из оцениваемых сплавов**;** $k\delta_в$, $kH_в$, $kU_в$ - безразмерные коэффициенты, рассчитанные для выбранного сплава, в итоге по расчетным значениям толщины, твердости и напряжения пробоя покрытий определяется пригодность всех оцениваемых сплавов к обработке микродуговым оксидированием.

Предлагается к рассмотрению способ на основе микродугового оксидирования, разработанный для упрочнения седел клапанов двигателей внутреннего сгорания из алюминиевого сплава [81]. Способ включает упрочнение поверхности седла клапана в электролите, при этом упрочнение осуществляют методом микродугового оксидирования в течение 2-х часов в электролите, состоящем из дистиллированной воды с добавлением 1-2 г/л КОН и 2-6 г/л Na_2SiO_3, при силе тока на аноде Iа=0,1÷1,0 А, силе тока на катоде Iк=0,1÷1,0 А, напряжении на аноде Uа=345-405 В и напряжении на катоде Uк=90-130 В. Технический результат: повышение износостойкости и микротвердости седел клапанов, а также технологичности способа.

3.2 Другие виды защитных покрытий и методы их нанесения

Для получения защитных покрытий алюминиевых сплавов в последнее время разрабатываются новые полимерные композиции, обладающие высокой устойчивостью к перепадам температур. Например, состав, включающий эпоксидную диановую смолу, полиамидный отвердитель, наполнители - мелкодисперсный квазикристаллический наполнитель системы Al-Cu-Fe дисперсностью менее 10 мкм, ультрадисперсный фторопластовый порошок и органический растворитель [82]. Полученная композиция обладает высокой твердостью, высокими физико-механическими свойствами, адгезией к алюминиевым сплавам, влагостойкостью, устойчивостью к перепадам температур от -60°С до +100°С при толщине покрытия 70-100 мкм.

Подобная композиция для получения защитных полимерных покрытий на основе эпоксидных смол, предназначенных для защиты деталей и элементов конструкций из алюминиевых сплавов от абразивного износа при истирании во время эксплуатации изделий предлагается также в следующем патенте [83]. Состав защитного покрытия включает (мас.ч.): эпоксидную диановую смолу - 100,0, отвердитель аминного типа 10,0-50,0, модификатор-низкомолекулярный эпоксиуретановый, полисульфидный или бутадиенакрилонитрильный каучук в количестве 5,0-40,0 мас.ч., наполнитель - мелкодисперсный квазикристаллический металлический наполнитель системы Al-Cu-Fe, микроармирующий наполнитель волокнистой или пластинчатой формы, выбранный из группы, включающей природные или искусственные силикаты магния, алюминия или кальция, пылевидный кварц или их смесь в количестве 20,0-100,0 мас.ч. и органический растворитель 200,0-420,0. В качестве отвердителя аминного типа состав содержит полиамидную смолу или кремнийорганический амин или их смесь. Состав может дополнительно содержать матирующие добавки в количестве 15,0-35,0 мас.ч. и пигменты в количестве 5,0-40,0 мас.ч. Технический результат - повышение твердости, эластичности, влагостойкости, устойчивости покрытия к перепадам температур до 150°С при сохранении высокого уровня адгезии к алюминиевым сплавам и прочности при ударе.

Представляет интерес полимерный состав на основе фторсодержащих полимеров для получения атмосферостойких покрытий, применяемых для защиты конструкций из алюминиевых сплавов, полимерных композиционных материалов и др. [84]. Состав для защитного покрытия включает, мас.ч.: фторполимер 0,9-0,95, эпоксидную диановую смолу с мол. массой 900-1800 или фторэпоксидную смолу 0,05-0,01, отвердитель-полиизоцианатбиурет 0,07-0,19, γ-аминопропилтриэтоксисилан 0,01-0,04 и органический растворитель - смесь ксилола и этилцеллозольва с растворителем, выбранным из группы, включающей бутилацетат, этилгликольацетат, метоксипропилацетат или их смеси 0,5-1,0. Для дополнительного повышения стойкости к УФ состав может содержать светостабилизатор в количестве 0,1-0,3 мас.ч., а для повышения коррозионной стойкости в агрессивных средах, а также для придания декоративных свойств поверхностям изделий - пигменты в количестве 0,5-1,5 мас.ч. Полимерное покрытие обладает быстрой отверждаемостью, повышенной прочностью при ударе, пониженным водопоглощением, повышенной стойкостью к УФ, водостойкостью.

Помимо новых разработок в области полимерных покрытий, также активно развивается направление композиционных покрытий на металлической основе. Например, интерес вызывает сообщение о составе и технологии нанесения износостойкого покрытия, которое может применяться совместно с микродуговым оксидированием [85]. Износостойкое композиционное покрытие на поверхности алюминиевых сплавов, на основе оксида алюминия и высококремнистых фаз, содержит включения высококремнистой фазы, имеющей максимальные линейные размеры 0,1...10 толщин покрытия. Частицы располагаются таким образом, что промежутки между ними заполнены различными модификациями оксида алюминия, при этом включения высококремнистой фазы, выходящие на поверхность покрытия и (или) имеющие поверхность раздела с алюминиевой основой, закрыты с боковых сторон различными модификациями оксида алюминия. Способ получения покрытия может сопровождаться микродуговым оксидированием которое ведут на глубину, не превышающую 10 средних размеров частиц первичного кремния в обрабатываемом сплаве.

Для получения покрытий с повышенными антифрикционными свойствами предлагается новый состав на основе алюминиевого сплава [86]. Способ получения композиционного покрытия заключается в плазменном напылении порошкового композиционного материала, отличается тем, что в качестве напыляемого порошкового материала для получения покрытия с антифрикционными свойствами используют состав, мас.%: 3-5% карбид кремния (SiC), остальное алюминиевый сплав (Al+3% Mg).

Предлагаются к использованию также многослойные покрытия на изделия из алюминиевых сплавов [87]. Изобретение относится к области нанесения покрытий, в частности к восстановлению изношенных поверхностей деталей, требующих высокой механической прочности и коррозионной стойкости. Способ включает ускорение порошкового материала в сверхзвуковом сопле потоком предварительно нагретого воздуха и напыление на поверхность изделия порошкового материала, содержащего смесь корундового, алюминиевого и цинкового порошков, при этом обрабатываемую поверхность изделия подвергают пескоструйной обработке, после чего на нее наносят слой покрытия напылением порошкового материала, подвергают его механической обработке с получением требуемой толщины слоя, затем наносят дополнительный слой покрытия напылением смеси корундового и алюминиевого порошков, подвергают его механической обработке и осуществляют анодное или микродуговое оксидирование. Способ позволяет получить недорогое покрытие с повышенной механической прочностью и высокими коррозионными свойствами.

Американскими учеными предлагается также способ нанесения многослойного гетерофазного металлического покрытия на изделия из алюминия или алюминиевых сплавов [88]. Способ нанесения покрытия на поверхность компонента из алюминия или его сплава, включающий стадию холодного газодинамического напыления порошкового вещества на поверхность компонента с образованием покрытия, причем порошковое вещество содержит по меньшей мере один металл из группы, состоящей из титана, сплава титана, никеля, сплава никеля, железа, сплава железа, алюминия, сплава алюминия, кобальта, сплава кобальта, меди и сплава меди. Для

повышения износосустойчивости порошковое вещество может дополнительно содержать 5-45 об.% твердых износоустойчивых частиц, которые выбирают из группы, состоящей из WC, TiC, CrC, Cr, NiCr, Cr_2O_3, Al_2O_3, YSZ, SiN, SiC, TiB_2, гексагонального BN, кубического BN и их комбинаций. Для повышения антифрикционных свойств покрытие из порошкового вещества может также дополнительно содержать 5-45 об.% мягких частиц с низким коэфициентом трения, которые выбирают из свинца, серебра, оксида меди, кобальта, рения, бария, фторида магния и их сплавов и комбинаций. Затем проводят стадию холодного газодинамического напыления проводят вплоть до образования покрытия толщиной до 0,8 мм, а также дополнительно стадию тепловой обработки.

Помимо разработки новых композиций для покрытия алюминиевых сплавов, разрабатываются также альтернативные способы нанесения покрытий, что также может существенно повысить эксплуатационные характеристики материалов.

С целью упрочнения покрытий деталей из алюминиевых деформируемых сплавов разработан способ [89], включающий механическую обработку поверхности изношенного участка, обезжиривание бензином или ацетоном, дробеструйную обработку и последующее детонационное напыление покрытия, отличающийся тем, что с целью снижения температуры нагрева поверхности алюминиевых деформируемых сплавов во время нанесения упрочняющего покрытия и исключения возможности появления межкристаллитной коррозии напыление осуществляют сериями детонационных выстрелов, причем каждая серия включает 10-20 выстрелов, при этом время между сериями составляет 0,5-3,0 мин, кроме того непрерывно производят обдувку подложки сжатым воздухом давлением 2-4 атм.

Для повышения качества напыляемых покрытий за счет увеличения прочности сцепления покрытия с основой предлагается способ нанесения покрытий, относящийся к способам газотермического нанесения покрытий на детали из металлических материалов, преимущественно из алюминиевых сплавов [90]. Способ включает механическую подготовку поверхности, ее эпиламирование, нанесение покрытия. Новым в способе является то, что эпиламирование производят после механической подготовки поверхности, а перед нанесением покрытия деталь

нагревают до 60 - 450°С. Использование предложенного технического решения при напылении газотермических покрытий обеспечивает увеличение прочности сцепления в сравнении с имеющимися способами, в частности для алюминиевых сплавов**,** в 1,5 - 3 раза. Это повышает качество покрытия и позволяет расширить область применения деталей с газотермическими покрытиями**.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая рассмотренное выше, для изготовления элементов, работающих в условиях вакуума космоса при значительных перепадах температур, представляется обоснованным:

1) использование современных сплавов с повышенными эксплуатационными характеристиками систем Al-Mg-Sc (сплавы 1577, В1341Т(Т1)), Al-Mg-Si-Cu (сплав 1370), Al-Li-Mg (сплавы 1420, 1424, В1461Т1, В1469Т1) для замены традиционных сплавов типа АМг4, АМг6, АВ, Д16, а также сплавов системы Al-Zn-Cu-Mg (В96Ц, В96Ц3п.ч., В95о.ч., 1933Т2(Т3), В1963) для изготовления деталей, требующих повышенной прочности.

2) применение режимов коагуляционного ступенчатого старения Т2 и Т3, а также использование сплавов повышенной и особой чистоты, что в совокупности положительно влияет на пластичность и трещиностойкость.

В качестве упрочняющего покрытия возможно использование микродугового оксидирования, характеризующегося высокими показателями коррозионной, тепло- и износостойкости. В частности, по показателям износостойкости (микротвердость покрытия, его прочность и пластичность) МДО-покрытия приближаются к уровню твердых сплавов. Сравнительные испытания на абразивный износ МДО-покрытий, анодных покрытий толщиной порядка 100 мкм и покрытий, нанесенных методом твердого анодирования, показали лишь незначительное (3-5 мкм) уменьшение толщины МДО-покрытия, в то время как остальные были полностью удалены [91]. Процесс микродугового оксидирования позволяет получать достаточно толстые покрытия, порядка 200-250 мкм (на сплаве Д16Т была достигнута толщина порядка 400 мкм). Причем температура электролита может изменяться в пределах 15-400°С, т.е. в отличие от традиционных методов анодирования, не требуется глубокое охлаждение электролита, отпадает необходимость в сложном холодильном оборудовании, отсутствует использование вредных компонентов электролита. Наиболее оптимальный комплекс защитных свойств наблюдается при толщине порядка 100-150 мкм (микротвердость поверхностного слоя достигает 2000-2500

кг/мм^2). Помимо этого, исследования, проведенные в РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина [92], показали возможность использования алюминиевых деталей, упрочненных МДО, для работы в тяжелых триботехнических условиях. Помимо кратного увеличения износостойкости и наработки на отказ, использование алюминиевых сплавов с МДО-покрытиями существенно облегчает трение (почти в 3 раза), что значительно улучшает динамические характеристики узлов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 http://www.buran.ru/htm/inside.htm/

2 http://www.aluminiumleader.com/facts/

3 http://metmk.com/

4 Белов, А.Ф. Строение и свойства авиационных материалов [Текст]/ А.Ф. Белов, Г.П. Бенедиктова, А.С. Висков и др.; учеб. для вузов; М.: Металлургия, 1989.- 368 с.

5 Елагин, В.И. Пути развития высокопрочных и жаропрочных конструкционных алюминиевых сплавов в XXI столетии [Текст]/ В.И. Елагин / Металловед. и терм. обр-ка металлов: науч.-техн. и произв. журн.,- №9.-2007. С. 3-11.

6 Фридляндер, И.Н. Перспективные высокопрочные материалы на алюминиевой основе [Текст]/ И.Н. Фридляндер и др. Металлов-е и терм. обработка мет-ов: науч.-техн. и произ. журнал, №7, 2005.- С.17-21/

7 Квасов, Ф.И. Алюминиевые сплавы типа дуралюмин [Текст]/ Ф.И. Квасов, И.Н. Фридляндер/ М.: Металлургия, 1984. 240 с.

8 Бер, Л.Б. Влияние режимов закалки и старения на фазовый состав, механические свойства и сопротивление МКК листов из сплава типа 1370 [Текст]/ Л.Б. Бер, В.С. Синявский, В.В. Захаров, Е.Я. Капуткин, В.Д. Калинин, Т.Д. Ростова, О.Г. Уколова, Е.С. Титкова. Технология легк. сплавов: науч.-техн. журн.; -№4,-2008, 15-23 с.

9 Захаров, В.В. Влияние скандия, переходных металлов и примесей на упрочнение алюминиевых сплавов при распаде твердого раствора [Текст]/ В.В. Захаров, Т.Д. Ростова. Металлов-е и терм. обработка мет-ов: науч.-техн. и произ. журнал, №9, 2007.- С.12-19.

10 http://www.viam.ru/

11 Конструкционные материалы: справочник / Б.Н. Арзамасов, В.А. Бромстрем, Н.А. Буше и др. –М.Машиностроение, 1990.- 668 с.

12 Фридляндер, И.Н. Алюминиевые сплавы в авиаракетной и ядерной технике [Текст]/ И.Н. Фридляндер. Вестник РАН; - т.74,-№12,-2004, 1076-1081 с.; vivovoco, astronet.ru/

13 http://www.novosti-kosmonavtiki.ru/

14 Пат. 2384637 Российская Федерация, МПК С 22 С 21/06. Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия [Текст]/ Филатов Ю.А.; заявитель и патентообладатель ОАО «ВИЛС»; заявл. 21.07.2008; опубл. 20.03.2010.

15 Пат. 2384636 Российская Федерация, МПК С 22 С 21/06. Деформируемый термически неупрочняемый сплав на основе алюминия [Текст]/ Филатов Ю.А.; заявитель и патентообладатель ОАО «ВИЛС»; заявл. 21.07.2008; опубл. 20.03.2010.

16 Пат. 2081933 Российская Федерация, МПК С22С21/06. Алюминиевый сплав [Текст]/ Фридляндер И.Н. Заявитель и патентообладатель ФГУП «ВИАМ»; заявл. 14.11.1994; опубл. 20.06.1997.

17 Пат. 94041234 Российская Федерация, МПК С22С21/06. Алюминиевый сплав системы Al-Mg-Sc [Текст]/ Фридляндер И.Н. Заявитель и патентообладатель ФГУП «ВИАМ»; заявл. 14.11.1994; опубл. 10.09.1996.

18 Рохлин, Л.Л. Исследование совместного влияние скандия и хрома на структуру и механические свойства алюминия и егоево-магниевых сплавов [Текст]/ Л.Л. Рохлин, Т.В. Добаткина, И.Г. Хорькова, М.Н. Болотова. Металловедение и терм. обр-ка: науч.-техн. и произв. журн.; - №3,-2008.

19 Бродова И.Г. Влияние быстрой закалки расплава, отжига и интенсивной пластической деформации на формирование алюминидов скандия и циркония в Al-Mg-Mn-сплавах [Текст]/ И.Г. Бродова, Т.И. Яблонских, И.Г. Ширинкина, С.В. Добаткин. Металловедение и терм. обр-ка: науч.-техн. и произв. журн.; - №10,-2008.

20 Рязанцев, В.И., Филатов Ю.А. Дуговая сварка алюминиевых сплавов, легированных скандием [Текст]/ В.И. Рязанцев, Ю.А. Филатов; науч.-техн. и произв. журнал «Заготовит. произ-ва в машиностроении», - № 8, 2005 http://www.mashin.ru/jurnal/.

21 Позднякова, А.В. Особенности структурных изменений при сверхпластической деформации сплава АМг4 [Текст]/ А.В. Позднякова, В.К. Портной. Цвет. металлургия: науч.-техн. и произв. журн.; -№1,-2004. С.53.

22 Белов, В.Д. Влияние магния и температуры заливки на структуру, механические и литейные свойства сплава системы Al-Mg [Текст]/ В.Д. Белов, В.А. Семенов. Цвет. металлургия: науч.-техн. и произв. журн.; -№2,-2004. С.41.

23 Заявка на пат. № 2009131438/02 Российская Федерация, МПК С 22 С 1/02. Способ получения литейного композиционного сплава алюминий-карбид титана [Текст]/ А.П. Амосов, А.Р. Луц, А.В. Орлов, Герасимов И.О. Заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО СамГТУ; заявл. 18.08.2009.

24 Пат. 2353475, Российская Федерация, МПК В 22 F 3/26, В 22 F 3/02, С 22 С1/05. Литой композиционный материал на основе алюминиевого сплава и способ его получения [Текст]/Курганова Ю.А.(РФ); заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Ульян. гос. техн. ун-т; заявл. 20.03.2007; опубл. 27.04.2009.

25 Пат. 2215055, Российская Федерация. Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него [Текст]/ И.Н. Фридляндер, Н.И. Колобнев, С.В. Самохвалов и др. Заявитель и патентообладатель ФГУП «ВИАМ»; заявл. 17.12.2001; опубл. 27.10.2003.

26 Золотаревский В.С. Исследование влияния добавок Mn, Cu, Cr на структуру слитков сплавов Al-Mg-Si при термической обработке [Текст]/ В.С. Золотаревский, П.Ю. Брянцев, В.К. Портной, В.С. Левченко, М.В. Жирнова. Металловедение и терм. обр-ка.: науч.-техн. и произв. журн.; -2005.

27 Пат. 2379366 Российская Федерация, МПК С 22 С 21/16, С 22 F 1/057. Сплавы серии 2000 с улучшенными характеристиками стойкости к повреждениям для авиационно-космического применения [Текст]/ Лин Джен К. (США); заявитель и патентообладатель АЛКОА ИНК (США); заявл. 14.07.2005: опубл. 20.01.2010.

28 Пат. 2009106650 Российская Федерация, МПК С 22 С 21/16, С 22 F 1/057. Алюмо-медно-магниевые сплавы, имеющие вспомогательные добавки лития [Текст]/ Риоджа Роберто Дж. (США); заявитель и патентообладатель АЛКОА ИНК (США); заявл. 25.04.2006; опубл. 10.09.2010.

29 Пат. 2008141814 Российская Федерация, МПК C 22 F 1/057. Изделие из алюминиевого сплава с высокой стойкостью к повреждениям, в частности для применения в авиационно-космической промышленности [Текст]/ Харгартер Хинрих Йоханнес (NL). Заявитель и патентообладатель КОРУС АЛЮМИНИУМ ВАЛЬЦПРОДУКТЕ ГМБХ (DE); заявл. 21.10.2008; опубл. 27.04.2010.

30 Пат. 2008152793 Российская Федерация, МПК C 22 F 1/057 Продукты из алюминиевых сплавов серии AA2000 и способ их производства [Текст]/ Кхосла Сунил (NL); заявитель и патентообладатель Алерис Алюминум Кобленц ГМБХ (DE); заявл. 05.07.2007; опубл. 10.07.2010.

31 Пат. 2008115928 Российская Федерация, МПК C 22 C 21/16 Сплав Al-Cu-Mg, подходящий для авиационно-космического применения [Текст]/ Морра Паола Валентина Абсала **(NL)**; заявитель и патентообладатель Алерис Алюминум Кобленц ГМБХ (DE); заявл. 24.10.2006; опубл. 27.10.2009.

32 Трифонов, В.Г. Особенности формирования структуры в алюминиевых сплавах Д16 в различных условиях жидкой штамповки [Текст]/ В.Г. Трифонов. Материаловедение: науч.-техн. и произв. журн.;- №7,- 2009. С. 42.

33 Бер, Л.Б. Фазовый состав и механические свойства деформируемых алюминиевых сплавов системы Al-Cu-Mg-Ag-X_i [Текст]/ Л.Б. Бер, В.В. Телешов, О.Г. Уколова. Металловедение и терм. обр-ка: науч.-техн. и произв. журн.;- №5,- 2008.

34 Телешов, В.В. Влияние химического состава на прочность сплавов системы Al-Cu-Mg-Ag после нагрева при 180-210°С [Текст]/ В.В. Телешов, Д.А. Андреев, А.П. Головлева. Металловедение и терм. обр-ка: науч.-техн. и произв. журн.;- №3,- 2006, 9-17 с.

35 Телешов, В.В. Температурные интервалы фазовых превращений и механические свойства сплавов системы Al-Cu-Mg-Ag с различным отношением Cu/Mg [Текст]/ В.В. Телешов, Е.Я. Капуткин, А.П. Головлева, Н.П. Космачева. Металловедение и терм. обр-ка: науч.-техн. и произв. журн.;- №4,- 2005.

36 Пат.2406773 Российская Федерация, МПК C 22 C 21/10. Деформированный алюминиевый сплав системы алюминий-цинк-магний-скандий и способ его

получения [Текст]/ Лэнган Тимоти (США); заявитель и патентообладатель Лэнган Тимоти (США); заявл. 01.02.2006; опубл. 20.12.2010.

37 Елагин, В.И. Пути улучшения комплекса свойств полуфабрикатов из высокопрочных алюминиевых сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu типа В96Ц-3 [Текст]/ В.И. Елагин, М.В. Самарина, В.В. Захаров; науч.-техн. и произв. журн. «Металловед-е и терм. обр-ка металлов»,-№ 11, 2009.

38 Захаров, В.В. Пути развития и совершенствования высокопрочных сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu [Текст]/ В.В. Захаров, В.И. Елагин, Т.Д. Ростова, М.В. Самарина/ Науч.-техн. журн. «Технология легких сплавов».-№4, 2008, с. 7-13.

39 Пат. 2396367 Российская Федерация, МПК С 22 F 1/053. Способ получения изделия из высокопрочного алюминиевого сплава [Текст]/ Сенаторова О.Г.; заявитель и патентообладатель ФГУП «ВИАМ»; заявл. 16.10.2008; опубл. 10.08.2010.

40 Пат. 2394113 Российская Федерация, МПК С 22 С 21/08 С22 С 21/10. Высокопрочный деформируемый сплав на основе алюминия и изделие из него [Текст]/ Крымова Т.В.; заявитель и патентообладатель ООО «ИНТЕЛ-СЕРВИС» (РФ); заявл. 13.11.2008; опубл. 10.07.2010.

41 Пат. 2384638 Российская Федерация, МПК С 22 С 21/10. Алюминиевый сплав серии 7XXX [Текст]/ Чакрабарти Дхруба Дж. (США); заявитель и патентообладатель АЛКОА ИНК (США); заявл. 04.10.2001; опубл. 20.03.2010.

42 Пат. 2009112403 Российская Федерация, МПК С 22 С 21/10. Алюминиевый сплав и способ его получения [Текст]/ Тренда Гюнтер (АТ); заявитель и патентообладатель АЛЮМИНИУМ ЛЕНД ГЕЗЕЛЬШАФТ М.Б.Х.; заявл. 03.09.2007; опубл. 20.10.2010.

43 Пат. 2008152299 Российская Федерация, МПК С 22 F 1/053. Продукты из алюминиевого сплава серии AA7000 и способ их изготовления [Текст]/ Кхосла Сунил (NL); заявитель и патентообладатель Алерис Алюминум Кобленц ГМБХ (DE); заявл. 05.07.2007; опубл. 10.07.2010.

44 Пат. 2009102968 Российская Федерация, МПК С 22 С 1/10. Высокопрочный термообрабатываемый алюминиевый сплав [Текст]/ Чо Алекс (US); заявитель и

патентообладатель Алкан Роллд Продактс-Рейвенсвуд ЭлЭлСи (US); заявл. 29.06.2007; опубл. 10.08.2010.

45 Пат. 2353693 Российская Федерация, МПК С 22 F 1/053. Сплав Al-Zn-Mg-Cu [Текст]/ Бенедиктус Ринзе (NL); заявитель и патентообладатель КОРУС АЛЮМИНИУМ ВАЛЬЦПРОДУКТЕ ГМБХ (DE); заявл. 09.04.2004; опубл. 27.04.2009.

46 Пат. 2413025 Российская Федерация, МПК С 22 С 21/10. Продукт из деформируемого алюминиевого сплава серии AA7000 и способ производства упомянутого продукта [Текст]/ Бюргер Ахим (DE); заявитель и патентообладатель АЛЕРИС АЛЮМИНУМ КОБЛЕНЦ ГМБХ (DE); заявл. 07.07.2006; опубл. 27.02.2011.

47 Пат. 94031906 Российская Федерация, МПК С 22 С 21/10. Сплав на основе алюминия [Текст]/ Щепочкина Ю.А.; заявитель и патентообладатель Щепочкина Ю.А. (РФ); заявл. 31.08.1994; опубл. 27.02.1997.

48 Пат. 2007133521 Российская Федерация, МПК С 22 С 21/10. Al-Zn-Cu-Mg сплавы на основе алюминия и способы их получения и применение [Текст]/ Данджерфилд Вик (US); заявитель и патентообладатель АЛКАН РОЛЛД ПРОДАКТС-РЕЙВЕНСВУД ЭлЭлСи (US), АЛКАН РЕНАЛЮ (FR); заявл. 10.02.2006; опубл. 20.03.2009.

49 Пучков Ю.А. Прогнозирование свойств деталей из сплава В91Т3 системы Al–Zn–Mg–Cu [Текст]/ Пучков Ю.А., Ван ЯньЛун., Герасимов С.А., Мухин Г.Г., Щербаков С.П., Ларкин В.А. «Заготовит. произ-ва в машиностроении: науч.-техн. и произв. журн.», -№ 8, 2010.

50 Осинцев, О.Е. Высокопрочные быстрокристаллизованные алюминиевые сплавы систем Al-Zn-Mg и Al-Zn-Mg-Cu [Текст]/ О.Е. Осинцев, В.Ю. Конкевич/ Технол. легк. сплавов: науч.-техн. и произв. журн. 2010, N 1, с. 157-163.

51 Елагин, В.И. Пути улучшения комплекса свойств полуфабрикатов из высокопрочных алюминиевых сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu типа В96Ц-3 [Текст]/ В.И. Елагин, М.В. Самарина, В.В. Захаров. Металловедение и терм. обр-ка: науч.-техн. и произв. журн.;-№11,- 2009. С. 3-6.

52 Карааслан, А. Влияние температуры старения и времени обработки на возврат на микроструктуру и механические свойства сплава АА7075 [Текст]/ А. Карааслан, И. Кайя, Х. Атапек. Металловедение и терм. обр-ка: науч.-техн. и произв. журн.;-№9,- 2007. С. 20-23.

53 Пат. 2133295 Российская Федерация, МПК С 22 С 21/06, С 22 F 1/047. Сплав на основе алюминия и способ его термической обработки [Текст]/ Фридляндер И.Н.; заявитель и патентообладатель ФГУП «ВИАМ»; заявл. 06.03.1998; опубл. 20.07.1999.

54 Пат. 1487469, Российская Федерация, МПК С22С21/06. Сплав на основе алюминия [Текст]/ Фридляндер И.Н. Заявитель и патентообладатель ФГУП «ВИАМ»; заявл. 25.11.1987; опубл. 20.02.1996.

55 Тарасенко, Л.В. Фазовый состав и механические свойства сплавов Al-Mg-Li-Me [Текст]/ Л.В. Тарасенко, Н.И. Колобнев, Л.Б. Хохлатова. Металловедение и терм. обр-ка: науч.-техн. и произв. журн.;-№2,- 2008. С. 40.

56 Мышляев, М.М. Структурное состояние и поведение наноструктурного сплава системы Al-Li при высокоскоростном сверхпластичном течении [Текст]/ М.М. Мышляев. Материаловедение: науч.-техн. и произв. журн.;-№4,- 2007.

57 Кикин, П.И. Изменение микроструктуры ультрамелкозернистых алюминиевых сплавов 1420 и 1421 под действием импульсного и лазерного излучения [Текст]/ П.И. Кикин, А.И. Пчелинцев, Е.Е. Русин, Н.В. Землякова. Металловедение и терм. обр-ка: науч.-техн. и произв. журн.;-№7,- 2009.

58 Юнусова, Н.Ф. Микроструктура и механические свойства алюминиевого сплава 1421 после РКУП и теплой прокатки [Текст]/ Н.Ф. Юнусова, Р.К. Исламгалиев, М.А. Бардинова, А.Р. Кильмаметов. Металловедение и терм. обр-ка: науч.-техн. и произв. журн.;-№3,- 2007. С. 45.

59 Мацнев, В.Н. Штампуемость и свариваемость алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Li [Текст]/ В.Н. Мацнев, В.И. Рязанцев. Загот. пр-ва в машиностроении: науч.-техн. и произв. журн.;-№6,- 2005; http://www.mashin.ru/jurnal.

60 Пат. 94015255 Российская Федерация, МПК С22F1/10. Способ изготовления полуфабрикатов и/или изделий из алюминиево-литиевых сплавов [Текст]/ Шевелева

Л.М. Заявитель и патентообладатель ФГУП «ВИАМ»; заявл. 27.04.1994; опубл. 20.08.1996.

61 Пат. 2237098 Российская Федерация. Сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из него [Текст]/ И.Н. Фридляндер, Е.Н. Каблов, О.Е. Грушко и др. ; опубл. 24.07.2003.// Изобретения. Полезные модели.2004.№27.

62 Фридляндер, И.Н. Высокопрочный конструкционный Al-Cu-Li-Mg-сплав пониженной плотности, легированный серебром [Текст]/ И.Н. Фридляндер, О.Е. Грушко, В.Ф. Шамрай, Г.Г. Клочков. Металловедение и терм. обр-ка: науч.-техн. и произв. журн.;-№6,- 2007. С. 3-7.

63 Мельников, П.С. Оксидирование алюминия и его сплавов с одновременной защитой катода от растворения в кислой среде [Текст]/ Упрочн. техн-ии и покрытия: науч.-техн. и произв. журн..-№2, 2008. С.38/

64 Основные проблемы производства анодированных алюминиевых профилей [Текст]/ Металлоснабжение и сбыт: науч.-техн. и произв. журн..- №8-9, 2010. http://www.aluminiumleader.com/facts/.

65 Коленчин, Н.Ф. Применение озона при анодировании алюминиевых сплавов [Текст]/ Н.Ф. Коленчин / Успехи современ. естествознания: научн. журн.- № 3. – 2011.

66 Пат. 2395627, Российская Федерация, МПК C 23 G1/22, C 23 F1/36. Электролит для одновременного обезжиривания и травления алюминия и его сплавов перед анодированием [Текст]/ Кравцов Е.Е. (РФ); заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Астрах. гос. техн. ун-т; заявл. 18.11.2008; опубл. 27.07.2010.

67 Кусков, В.Н. Формирование структуры оксидного покрытия на алюминиевом сплаве катодно-анодными микроразрядами в электролите [Текст]/ В.Н. Кусков. Упрочн. техн-ии и покрытия: науч.-техн. и произв. журн.-№11, 2006. С.40.

68 Пат. 94023296, Российская Федерация, МПК C 25 D 11/02. Способ оксидирования изделий катодно-анодными микроразрядами [Текст]/ Кусков В.Н. (РФ); заявитель и патентообладатель Тюмен. индустр. ин-т; заявл. 17.06.1994; опубл. 10.04.1996.

69 Пат. 93035143, Российская Федерация, МПК С 25 D 11/08. Способ анодирования изделий из алюминиевых сплавов [Текст]/ Аверьянов Е.Е. и др. (РФ); заявитель и патентообладатель: Аверьянов Е.Е. и др.; заявл. 14.07.1993; опубл. 10.01.1997.

70 Пат. 94017967, Российская Федерация, МПК С 25 D 11/04. Способ получения твердых покрытий на алюминиевых сплавах [Текст]/ Кожаев В.А. (РФ); заявитель и патентообладатель Кожаев В.А.; заявл. 16.05.1994; опубл. 27.06.1996.

71 Пат. 2390588, Российская Федерация, МПК С 25 D 11/10. Способ твердого анодирования изделий из алюминиевых сплавов [Текст]/ Синявский В.С. (РФ); заявитель и патентообладатель ОАО «ВИЛС»; заявл. 25.12.2008; опубл. 27.05.2010.

72 Пат. 2007119381, Российская федерация, МПК C25D11/08. Изделие производства и способ анодного нанесения покрытия из оксидной керамики на алюминий и/или титан [Текст]/ ДОЛАН Шон Э. (US); заявитель и патентообладатель ХЕНКЕЛЬ КОММАНДИТГЕЗЕЛЛЬШАФТ АУФ АКЦИЕН (DE); заявл. 25.10.2005; опубл. 27.11.2008.

73 Пат. 2383663, Российская Федерация, МПК С 25 D 11/20. Способ уплотнения анодно-окисного покрытия детали из алюминия и его сплавов [Текст]/ Павловская Т.Г. (РФ); заявитель и патентообладатель Минпромторг России; заявл. 31.03.2009; опубл. 10.03.2010.

74 Блюменштейн, В.Ю. Исследование коррозионной стойкости МДО-покрытий [Текст]/ В.Ю. Блюменштейн, Е.П. Земскова/ Науч.-техн. и произв. журнал «Упрочн. технологии и покрытия».- №10, 2008. С.33-35.

75 Чуфистов, О.Е. Микродуговое осксидирование деталей из алюминиевых сплавов с генерацией синглетного кислорода вблизи оксидируемых поверхностей [Текст]/ О.Е. Чуфистов, Д.Е. Борисков, Е.А. Чуфистов/ Науч.-техн. и произв. журнал «Упрочн. технологии и покрытия».- №11, 2007. С.16.

76 Малышев, В.Н. Моделирование пробоя диэлектрического слоя при МДО [Текст]/ В.Н. Малышев/ Науч.-техн. и произв. журнал «Упрочн. технологии и покрытия».- №5, 2008.

77 Голенкова, А.А. Анализ эффективности технологии для формирования износостойких покрытий на алюминиевых сплавах микродуговым оксидированием [Текст]/ А.А. Голенкова, С.С. Ивасев, А.Е. Михеев, М.А. Овсянников/ Вестник Сибир. гос. аэрокосм. ун-та; с 108-111.

78 http://www.platings.ru/mdo.html.

79 Кузнецов, Ю.А. Особенности механической обработки деталей из алюминиевых сплавов, упрочненных микродуговым оксидированием [Текст]/ Ю.А. Кузнецов, Н.В. Митюрева/ Науч.-техн. и произв. журнал «Упрочн. технологии и покрытия».- №9, 2006.

80 Пат. 2009122113, Российская Федерация, МПК C25D11/08. Способ предварительной оценки пригодности алюминиевых сплавов к обработке микродуговым оксидированием, толщины, твердости и напряжения пробоя получаемых покрытий [Текст]/ Чуфистов О.Е. (РФ); заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Пенз. гос. технолог. академия; заявл. 09.06.2009; опубл. 20.12.2010.

81 Пат. 2390587, Российская Федерация, МПК C25D11/06. Способ упрочнения седел клапанов двигателей внутреннего сгорания из алюминиевого сплава [Текст]/ Дударева Н.Ю., Гайнатуллин И.И. (РФ); заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Уфим. гос. авиац. техн. ун-т; заявл. 16.06.2008; опубл. 27.05.2010.

82 Пат. 2402585, Российская Федерация, МПК C09D163/02. Состав для защитного покрытия [Текст]/ Кузнецова В.А., Кузнецов Г.В. и др. (РФ); заявитель и патентообладатель Минпромторг России, ФГУП «ВИАМ»; заявл. 31.03.2009; опубл. 27.10.2010.

83 Пат. 2394861, Российская Федерация, МПК C09D163/02. Состав для защитного покрытия [Текст]/ Кузнецова В.А., Кузнецов Г.В. и др. (РФ); заявитель и патентообладатель ФГУП «ВИАМ»; заявл. 25.12.23008; опубл. 20.07.2010.

84 Пат. 2378307, Российская Федерация, МПК C09D127/12. Состав для защитного покрытия [Текст]/ Кондрашов Э.К., Семенова Л.В; заявитель и патентообладатель ФГУП «ВИАМ»; заявл. 13.02.2008; опубл. 10.01.2010.

85 Пат. 2006145487, Российская Федерация, МПК C25D11/00. Износостойкое композиционное покрытие и способ его получения [Текст]/ Криштал М.М. и др.

(РФ); заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Тольят. гос. ун-т», ФГУП «Сплав»; заявл. 20.12.2006; опубл. 27.06.2008.

86 Пат. 2007110241, Российская Федерация, МПК C23C4/04. Способ получения композиционного покрытия на основе алюминиевых сплавов [Текст]/ Курганова Ю.А., Байкалов К.О. (РФ); заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Ульян. гос. техн. ун-т; заявл. 20.03.2007; опубл. 27.0.2008.

87 Пат. 2377341, Российская Федерация, МПК C23C28/00. Способ получения многослойного покрытия на изделии из алюминиевого сплава [Текст]/ Аршинов К.И и др. (BY); заявитель и патентообладатель ОАО «558 Авиац. ремонт. завод»; заявл. 13.07.2007; опубл. 27.12.2009.

88 Пат. 2007119941, Российская Федерация, МПК C23C24/04. Способ нанесения покрытий на изделия из алюминия и алюминиевых сплавов [Текст]/ ДАФФИ Тимоти и др. (US); заявитель и патентообладатель ХОНЕЙВЕЛЛ ИНТЕРНЭШНЛ ИНК. (US); заявл. 28.10.2005; опубл. 10.12.2008.

89 Пат. 95112175, Российская Федерация, МПК C23C4/12, C23C24/04. Способ нанесения упрочняющего покрытия на детали из алюминиевых деформируемых сплавов [Текст]/ Димитриенко Л.Н. и др. (РФ); заявитель и патентообладатель Димитриенко Л.Н. и др.; заявл. 13.07.1995; опубл. 27.06.1997.

90 Пат. 95101262, Российская Федерация, МПК C23C4/02, C23C10/02. Способ нанесения покрытий [Текст]/ Коробов Ю.С. и др. (РФ); заявитель и патентообладатель ГО «Урал. завод трансп. машиностр.»; заявл. 30.01.1995; опубл. 10.11.1996.

91 http://tompve.ru/nauka/mdo/

92 http://www.gubkin.ru/faculty/mechanical_engineering/chairs_and_departments/Uchebn_nauch_proizv_centr_po_remontu/chemie/chemie1.php

Учебное пособие

Составители
Алевтина Романовна Луц
Анастасия Алексеевна Суслина

АЛЮМИНИЙ И ЕГО СПЛАВЫ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Самарский государственный технический университет»

443100, г.Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус