

АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ В СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ СОВРЕМЕННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

М. А. Гуреева, О. Е. Грушко



**ГУРЕЕВА
Марина
Алексеевна**

Кандидат технических наук, докторант Центрального научно-исследовательского института технологии машиностроения. Специализируется в области специальных алюминиевых сплавов, а также их металловедения и технологии сварки. Автор более 70 научных трудов и изобретений.

Введение

В авиакосмической промышленности накоплен большой опыт применения свариваемых алюминиевых сплавов. Большинство таких сплавов включены в государственные стандарты. Марки некоторых алюминиевых деформируемых сплавов России и США, их свариваемость и вид полуфабрикатов представлены в табл. 1 и 2 приложения.

В настоящее время алюминиевые сплавы широко применяются в авиастроении, судостроении, вагоностроении, химической, нефтяной промышленности и атомной энергетике.

Области применения алюминиевых сплавов

Авиакосмическая техника. На современном этапе развития дозвуковой и сверхзвуковой авиации алюминиевые сплавы являются основными конструкционными материалами в самолетостроении. Отдельные элементы конструкции выполняются из сталей, титановых сплавов или композиционных материалов, что повышает надежность и работоспособность конструкции в целом. Выбор сплава для конструкции осуществляется на основе дифференцированного подхода к работе каждого узла с учетом его ресурса, эксплуатационных нагрузок, возможности нагрева и других требований к деталям.



**ГРУШКО
Ольга
Евгеньевна**

Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГУП «Всероссийский институт авиационных материалов». Специалист в области разработки свариваемых алюминиевых сплавов, в том числе сплавов, легированных литием. Автор более 300 научных работ, более чем 70 изобретений и патентов в области алюминиевых сплавов.

В России при изготовлении авиационной техники успешно используются упрочняемые термической обработкой высокопрочные алюминиевые сплавы Al-Zn-Mg-Cu и сплавы средней и повышенной прочности Al-Mg-Cu. Они являются конструкционным материалом для обшивки и внутреннего силового набора элементов планера самолета (фюзеляж, крыло, киль и др.). Из свариваемых алюминиевых сплавов Al-Mn, Al-Mg, Al-Cu, Al-Mg-Li, Al-Mg-Si изготавливаются планеры, бортовые системы, шасси, лопасти воздушного винта, приборы и элементы внутренней отделки салона.

Для производства гидросамолетов применяются свариваемые коррозионностойкие магниевые сплавы (АМг5, АМг6) и сплавы Al-Zn-Mg (1915, В92). Планер легкого самолета (фюзеляж, крылья и хвостовое оперение), как правило, изготавливается из алюминиевого сплава Д16. Детали конструкции (стрингеры, лонжероны, шпангоуты и др.) делают из прессованных профилей Д16 и В95.

Развитие авиационной техники неразрывно связано с решением задачи по снижению массы летательного аппарата. Для этого применяются алюминиево-литиевые сплавы основных систем легирования Al-Mg-Li (1420, 1421, 1424) и Al-Cu-Li (1460, 1464, 1469). За рубежом для изготовления летательных аппаратов аналогичного назначения находят применение сплавы 2090 и 8090 и их модификации [1].

Несущие топливные баки собирают по каркасно-панельной схеме (МиГ-29) и по панельной схеме (Су-27). В первом случае топливный бак имеет силовой каркас, состоящий из поперечных силовых элементов (шпангоутов) и балок (продольные силовые элементы) (рис. 1).

Как правило, шпангоуты состоят из нескольких отдельных заготовок, которые соединяются электронно-лучевой сваркой. Единый силовой каркас из шпангоутов с балками получают при помощи ручной аргонодуговой сварки. Для создания герметичного объема топливного бака и его аэродинамической формы производят фрезеровку проемов каркаса и в варку в эти проемы панелей на установках с ЧПУ типа УПСФ. При применении панельной схемы сборки топливных баков в первую очередь изготавливаются панели, которые затем через стыковочные узлы объединяются в герметичную конструкцию.

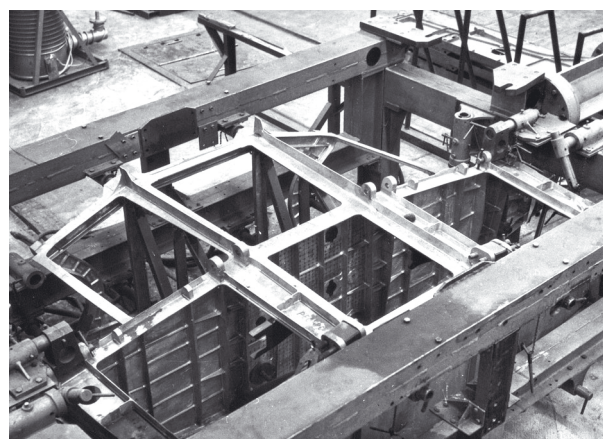
Использование высокопрочных алюминиево-литиевых сплавов в сварных герметичных конструкциях несущих топливных баков фюзеляжа позволяет снизить их собственную массу на 12–15%. Характеристика химического состава и механических свойств современных свариваемых алюминиево-литиевых сплавов, в искусственно состаренном состоянии, представлена в табл. 3 и 4 приложения.

Все сплавы этой группы (табл. 3 и 4 приложения) являются термически упрочняемыми и характеризуются сравнительно высоким уровнем механических свойств. Сплавы 1420, 1424, 1440, 1441, 1460, 1464 и 1469 отличаются от других алюминиево-литиевых сплавов возможностью удовлетворительной сварки.

В настоящее время как за рубежом, так и в России разрабатываются алюминий-литиевые сплавы нового поколения, дополнительно легированные серебром, скандием и другими микродобавками. Сплав 2195, содержащий серебро, применяется для изготовления топливных баков ТКА, снижая их массу примерно на 13% по сравнению с ранее применявшимся сплавом 2219.



а



б

Рис. 1. Шпангоут (а) из сплава 1420 и каркас топливного бака 1-2 (б) самолета МиГ-29К

В России в настоящее время разработан и проходит всесторонние испытания сплав В-1469 на основе системы Al-Cu-Li-Mg, легированный серебром, цирконием и скандием. Сплав защищен патентом [2] и имеет зарубежные аналоги (сплавы 2195 и 2098, химические составы которых внесены в международный стандарт). Средний состав сплава В-1469 в весовых процентах: 4,3 Cu; 0,35 Mg; 1,0 Li; 0,44 Ag; 0,12 Zr; 0,1 Sc.

Кроме несущих топливных баков, в конструкциях современных истребителей для увеличения времени и дальности полета используются подфюзеляжные и крыльевые подвесные топливные баки. Конструктивно подвесные топливные баки выполнены сварными, состоящими из набора диафрагм и обшивки. При изготовлении подвесных баков применяются сплавы системы Al-Mg (AMg2, AMg4, AMg6 и 1570) толщиной 3–5 мм.

Сплавы AMц, AMг3, AMг5 служат материалом для топливных и масляных баков, емкостей гидросистем, трубопроводов. В арматуре гидравлических систем используются сплавы AMц, АВ и АД33.

Наряду с крупными конструктивными элементами в современных летательных аппаратах в большом количестве применяются различные сосуды, емкости и баллоны, работающие под внутренним давлением. К таким изделиям, прежде всего, относятся топливные аккумуляторы, компенсаторы падения давления в топливной системе и системе кондиционирования (кабины пилота или салона), расширительные малогабаритные баки, накладные топливные баки и трубопроводы.

Конструктивно сосуды и баллоны из алюминиевых сплавов, работающие под внутренним давлением, можно разделить на сферические, цилиндрические и тороидальные. Для их изготовления применяются сплавы AMг2 и AMг4 толщиной 3–4 мм. Основными операциями при производстве баллонов являются холодное деформирование листовых заготовок и сварка плавлением (чаще ручная аргонодуговая сварка).

Похожие конструкции узлов из алюминиевых сплавов находят широкое применение при разработке и изготовлении пассажирских самолетов как широкофюзеляжных и дальнемагистральных, так и для внутренних линий (RRJ, Ил-114, Ту-330, С-80 и др.) [3–10]. При этом листы и панели из алюминиевых сплавов ис-

пользуют в системе кондиционирования салона, внутренней отделки интерьера, пассажирских кресел, элементов приборных досок и узлов крепления навигационного оборудования.

Сплавы Д16, Д19, В95, В96 являются основным материалом для фюзеляжа, крыла и киля в конструкциях самолетов гражданского флота. Обшивка верхней поверхности крыла выполняется из сплавов типа В95, хорошо работающих на сжатие. Детали растянутой зоны крыла и обшивка фюзеляжа, вспомогательные лонжероны и нервюры изготавливаются из высокопрочного сплава типа Д16 и его аналогов. Лонжероны и шпангоуты фюзеляжа выполняют из сплавов Д16, В95. Эти сплавы рекомендуются для силовых деталей, которые воспринимают большие эксплуатационные нагрузки. Прессованные полуфабрикаты из сплавов В95 и В96 поступают на изготовление киля крупногабаритных самолетов. Обшивка в зоне двигателя, подвергающаяся нагреву, в основном изготавливается из сплавов Д16, Д19.

В авиации США широко применяются сплавы серии 2xxx, 3xxx, 5xxx, 6xxx и 7xxx. Сплавы серии 2xxx рекомендованы для конструкций, работающих при высоких рабочих температурах и с повышенными значениями коэффициента вязкости разрушения; сплавы серии 7xxx — для работы при более низких температурах значительно нагруженных деталей и деталей с высокой сопротивляемостью к коррозии под напряжением. Для малонагруженных узлов применяются сплавы серии 3xxx, 5xxx и 6xxx.

В конструкциях транспортных самолетов США широко используются сплавы серии 2xxx, 1xxx (2024, 2014, 7075 и 7178) при изготовлении фюзеляжа, крыльев, киля и внутреннего силового набора (лонжероны, нервюры, шпангоуты и др.).

Сжатые зоны крыла, фюзеляжа, обшивка и силовые элементы выполняются из сплавов 7075, 7475 и 7178. Для деталей крыла, работающих на растяжение, отдают предпочтение сплавам 2014, 2024.

Анализ конструкций проектируемых самолетов на период до 2025 г. показывает, что объем применения алюминиевых сплавов не будет снижаться, несмотря на все большее использование композиционных материалов.

Алюминиевые сплавы имеют бесспорное преимущество при создании изделий космической техники. Достоинством алюминиевых

сплавов 2219 и др. является их работоспособность при криогенных температурах в контакте с жидким кислородом, водородом и гелием. У этих сплавов происходит так называемое криогенное упрочнение, т.е. прочность и пластичность растут с понижением температуры.

Судостроение. Алюминиевые сплавы находят все более широкое применение в судостроении. Из них изготавливают корпуса судов, палубные надстройки, коммуникацию и различного рода судовое оборудование.

Основное преимущество при внедрении алюминия и его сплавов по сравнению со сталью — снижение массы судов, которое может достигать 50–60%. В результате появляется возможность повысить грузоподъемность судна или улучшить его тактико-технические характеристики (маневренность, скорость и т.д.). Преимущества использования алюминиевых сплавов в сварных конструкциях в наибольшей мере раскрываются при изготовлении судов на подводных крыльях класса река–море (рис. 2).

Предпочтительность применения алюминия в судостроении объясняется его высокой коррозионной стойкостью и удовлетворительной сопротивляемостью к ударным нагрузкам. Первостепенное значение для судостроения имеет возможность изготовления конструкции из алюминиевых сплавов в сварном варианте. Для конструкций речного и морского флота более широко применяются сплавы АМг3, АМг5, АМг61, а также сплавы АМц и Д16. Корпус судна повышенной грузоподъемности выполняют из стали, тогда как надстройки и другое вспомогательное оборудование — из алюминиевых сплавов. Для

обшивки рыболовецких баркасов используют сплав АМг5.

Судостроение США ориентировано на использование свариваемых сплавов серий 5xxx и 6xxx. Там, где необходим высокий предел прочности (~500 МПа), используются полуфабрикаты из сплавов серии 2xxx и 1xxx. Для строительства корпусов небольших лодок обычно идут сплавы марок 5052 или 6061, для более крупных судов — сплав 5086. Из этого сплава изготавливают перегородки, топливные баки, кабины. Из сплавов 5052, 5086 и 6061 выполняют конструкции парусных судов (корпус, мачты и др.); основным материалом для изготовления рыболовных судов является сплав 5086.

Для судов военно-морского флота США используются коррозионностойкие деформируемые сплавы 5052, 5086, 6061. На конструкцию одного эскадренного миноносца затрачивается около 6000 т алюминиевого сплава 5456; при изготовлении отдельных сварных элементов в конструкции авианосца — около 2000 т.

Железнодорожный транспорт. Тяжелые условия эксплуатации подвижного состава железной дороги (длительный срок службы и способность выдерживать ударные нагрузки) выдвигают особые требования к его конструкционным материалам.

Основным конструкционным материалом для изготовления кузовов пассажирских вагонов в нашей стране и за рубежом является низкоуглеродистая сталь. Это обусловлено низкой стоимостью стальных полуфабрикатов и хорошей свариваемостью при дуговой и контактной сварке.

После заметного снижения цен на полуфабрикаты из алюминиевых сплавов в 1975—

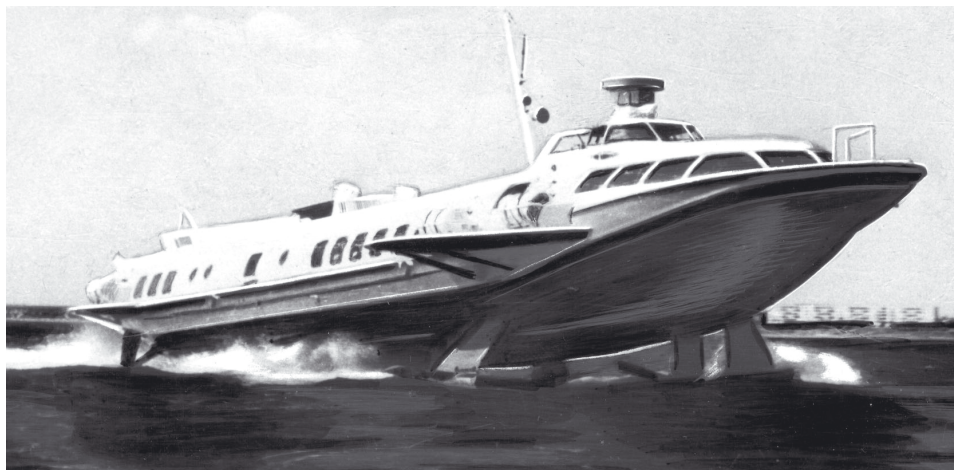


Рис. 2. Судно на подводных крыльях класса река–море

1985 гг. во многих странах мира (Швейцарии, ФРГ, Франции, Японии и др.) начались широкие исследования по их применению в конструкции кузовов пассажирских вагонов. Эти материалы позволяли решить задачи, связанные с производством и эксплуатацией вагонов метро и скоростных поездов: уменьшение массы, снижение стоимости изготовления и значительное повышение срока эксплуатации.

Наибольших успехов в конструировании и производстве сварных кузовов вагонов из алюминиевых сплавов добились фирмы Швейцарии, Японии и ФРГ. К настоящему времени достигнут существенный прогресс в производстве таких кузовов. Если в период 1960–1970 гг. доля пассажирских вагонов из алюминиевых сплавов составляла 1–2%, то в 1995 г. — 50%, а в 1999 г. — до 80% от всего объема выпуска вагонов. В настоящее время за рубежом успешно эксплуатируется более 20 тыс. пассажирских вагонов из алюминиевых сплавов [11].

В нашей стране работы по производству кузовов пассажирских вагонов из алюминиевых сплавов начались в период 1965–1970 гг. В 1985 г. был построен опытный электропоезд ЭР-200, который несколько лет эксплуатировался на магистрали Москва – С.-Петербург. В настоящее время заканчивается строительство экспериментального поезда с вагонами из алюминиевых сплавов под условным названием «Сокол». Однако на сегодня серийное производство сварных кузовов вагонов из алюминиевых сплавов в нашей стране отсутствует, а число построенных опытных вагонов не превышает 25–30 шт.

Значительный интерес представляет выбор марки алюминиевых сплавов для кузова пассажирских вагонов. За рубежом до начала 1980-х годов в основном применяли сплавы системы Al-Zn-Mg (например, 2020), а с середины 1980-х годов перешли на сплавы системы Al-Mg-Si (например, 6005, 6005A, 6013, 6061 и др.). Переход на эти сплавы был связан только с их отличной прессуемостью и высокой коррозионной стойкостью, несмотря на относительно низкую прочность. В нашей стране до настоящего времени в основном применяют сплавы системы Al-Zn-Mg (например, 1915) [12].

Для объективной оценки конструктивно-технологической схемы кузова пассажирского вагона из алюминиевых сплавов необходимо рассмотреть изменения в конструкции вагонов. За рубежом, как правило, применяли

каркасную конструкцию, т.е. набор продольных и поперечных силовых элементов, к которым крепили листовую обшивку в основном с помощью контактной и дуговой сварки (ручной и механизированной). В нашей стране до настоящего времени эта конструктивно-технологическая схема является единственной.

В последние годы в ряде зарубежных фирм разработали и внедрили в серийное производство технологию изготовления крупногабаритных прессованных полых панелей длиной до 24–26 м и шириной 0,55–0,75 м. Причем ширина прессованных панелей определяется только усилием и размерами рабочего пространства прессов. Предполагается, что при увеличении мощности прессов до 15000–30000 т принципиально возможно изготовление полых панелей шириной до 1,2–1,6 м.

На основе этих достижений [13] за рубежом разработана принципиально новая конструктивно-технологическая схема изготовления кузовов пассажирских вагонов из алюминиевых сплавов. Весь кузов вагона сварен из длинномерных полых панелей только продольными швами без поперечных стыков и каких-либо дополнительных продольных и поперечных жесткостей. Трудоемкость изготовления кузова вагона из таких панелей в 2–3 раза меньше, чем для традиционной каркасно-панельной схемы изготовления.

С учетом отечественного и зарубежного опыта наиболее оптимальны следующие геометрические размеры кузова вагона из алюминиевых сплавов: длина – 22–24 м, ширина – 3,4–3,6 м, расстояние между осями шкворней – 15–16 м. Для организации массового производства кузовов вагонов с такими геометрическими размерами наиболее рационально применение только панельной конструкции (без продольного и поперечного силового наборов). Принципиальное членение кузова приведено на рис. 3. Основными подборками являются левая и правая боковые стенки, нижняя рама с полом, крыша и торцовые стенки [11].

Боковые стенки кузова вагона рационально выполнять из трех-четырех прессованных полых панелей длиной 22–24 м, сборку-сварку всех продольных швов выполнять только в нижнем положении с применением мощной системы растяжителей вдоль стыка и подвижного локального прижима. Принципиально возможна сварка плавящимся электродом постоянным током обратной полярности и неплавящимся вольфра-

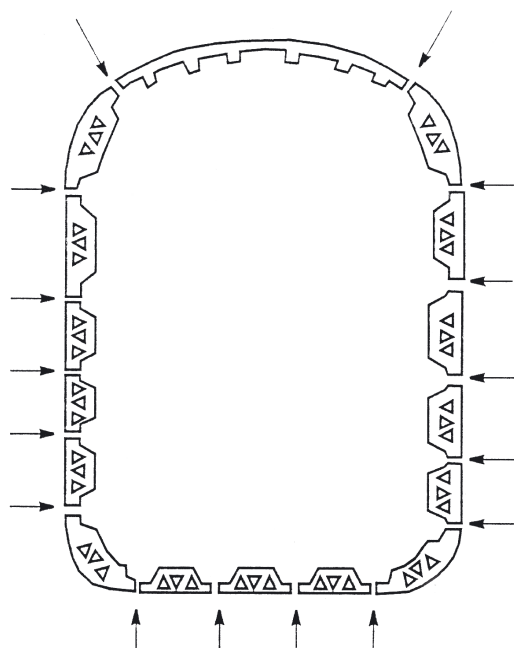


Рис. 3. Конструктивно-технологическое членение кузова вагона из прессованных полых панелей (стрелками отмечены места сварки продольных швов)

мовым электродом с присадочной проволокой или без нее переменным синусоидальным током или с прямоугольными разнополярными импульсами. Весьма перспективной является сварка без присадочной проволоки с использованием материала прессованной панели в зоне стыка в виде «домика». Этот способ сварки значительно облегчает и удешевляет производство. Скорость сварки для характерных толщин 2–3 мм может быть до 25–50 м/ч.

Из-за очень больших размеров прессованных панелей (до 26 м) проводить подготовку поверхности под сварку обычными способами (травлением, осветлением, пассивированием, шабрением) очень сложно, так как требуется комплект ванн химической подготовки с длиной каждой ванны до 28–30 м. Поэтому наиболее рационально применение механических способов подготовки поверхности, например, с помощью вращающейся металлической щетки. Однако такая простейшая подготовка поверхности под дуговую сварку алюминиевых сплавов приводит к необходимости детально исследовать возможность обеспечения качественной сварки в производственных условиях. При простейшей механической подготовке поверхности основными дефектами сварных соединений являются оксидные включения, пористость и плохое формирование шва. Они резко снижают статическую и циклическую

прочность, а в ряде случаев и герметичность конструкции.

Для изготовления кузова пассажирского вагона из алюминиевого сплава в большинстве случаев целесообразно применение импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом в аргоне или смеси с гелием. При импульсной сварке на постоянный (базовый) ток периодически накладываются импульсы тока с частотой 50, 100 или 200 Гц, что способствует управляемому струйному переносу металла. По сравнению со сваркой неплавящимся электродом импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом позволяет в 3–8 раз повысить производительность труда и значительно снизить сварочные деформации при практически одинаковом качестве сварных соединений.

За рубежом при сварке протяженных стыков конструкций вагонов предпочтение отдается сварке трением с перемешиванием [14].

В США из свариваемых сплавов серии 6xxx, 5xxx и сплава 7005 изготавливают конструкции состава с оптимальными прочностными характеристиками и высокой коррозионной стойкости сварных элементов. Конструкционным материалом для силовых элементов в вагоностроении являются сплавы 2024, 5083 и 6061; обшивка вагона и его внутренняя отделка выполняются из сплавов 3003 и 6063.

При изготовлении вагонов-цистерн для продуктов нефтехимической промышленности преобладают магниевые сплавы (5052, 5086 и 5454).

Автомобильный транспорт. Одним из основных требований к материалам, применяемым в автомобильном транспорте, является высокая удельная прочность. Принимаются во внимание также коррозионная стойкость и хорошая декоративная поверхность материала. Высокая коррозионная стойкость материала продлевает сроки эксплуатации, расширяет ассортимент перевозимых товаров, включая жидкости и газы с высокой агрессивной концентрацией.

Широкому применению алюминиевых сплавов в конструкции автомобилей взамен стали препятствуют два существенных фактора: первый – относительно высокая стоимость алюминиевых сплавов, которая в два раза выше стали, и второй – трудности, связанные с их использованием при изготовлении кузовов в условиях установившегося массового производства (холодная штамповка, сварка, окраска).

Вторичная переработка даст ощутимый положительный результат при тесном взаимодействии изготовителей автомобильной техники с изготовителями материалов для нее. Максимальный экономический эффект в результате вторичной переработки алюминия ожидается в том случае, если «алюминиевый» автомобиль будет специально сконструирован с учетом последующего быстрого демонтажа для переработки. Автомобильные фирмы обратились к концепции модульного принципа проектирования, принятой ранее авиа-космическим комплексом и позволившей ему добиться значительных успехов.

Применение алюминиевых сплавов позволяет выпускать автомобили с гибридной силовой установкой, сочетающей электрическую тягу с обычным двигателем, и электромобилей. В марте 2000 г. на автосалоне в Детройте фирма *General Motors* продемонстрировала концептуальную модель *GM Precept* с гибридным двигателем, имеющую расход топлива 2,6 л/100 км. Этот автомобиль — полноразмерный пятиместный седан длиной около пяти метров, кузов которого выполнен из алюминиевого сплава [15].

Фирмой *Nissan*, которая раньше других начала такие разработки еще в середине 1970-х годов, также создан перспективный электромобиль *FEV (Future Electric Vehicle)*. Кузов этого электромобиля имеет каркас, изготовленный из алюминиевого сплава вместо стали, что позволило снизить вес полностью оборудованного и заправленного горючим автомобиля до 900 кг, включая 200-килограммовую быстро перезаряжаемую никель-кадмиевую аккумуляторную батарею. При замене стальных деталей на алюминиевые вес электромобиля можно уменьшить на 20–25%, а полезную нагрузку увеличить на 30–33%.

Предполагается, что рост применения алюминиевых сплавов в грузовых и специальных автомобилях будет опережать рост его использования в легковых автомобилях. Это связано с тем, что использование алюминиевых сплавов в конструкции грузовых автомобилей значительно сократит производственные затраты и благоприятно скажется на сохранении окружающей среды. Кроме того, если применение алюминия в легковых автомобилях позволяет за счет снижения их веса уменьшить, в основном, расход топлива, то в грузовых и специ-

альных автомобилях это дает возможность увеличить полезную нагрузку (на 1–2 т) в пределах разрешенной максимальной массы [14].

Современный легковой автомобиль имеет массу от 600 кг до 1,5 т и содержит от 8 до 12 тыс. деталей. Эта особенность вносит определенную специфику в использование алюминиевых сплавов, так как можно уменьшить количество деталей, а, следовательно, и массу, что положительно влияет на характеристики автомобиля (работоспособность, длительность использования) и снижает трудоемкость изготовления.

Основными направлениями в развитии автомобилестроения в настоящее время являются: совершенствование конструкции формы, развитие двигателей, применение новых материалов, в том числе легких сплавов. В настоящее время создалась достаточно благоприятная ситуация, которая будет способствовать продвижению алюминиевых сплавов в этой отрасли.

Подходы к применению алюминиевых сплавов в автомобилестроении

Известны три подхода к применению алюминиевых сплавов в автомобилестроении. Первый подход состоит в том, что в традиционном автомобиле пытаются постепенно применять детали из алюминиевых сплавов вместо стальных, при этом используют те же оснастку и станочное оборудование. Это порочный и наиболее дорогой путь. Он связан с очень большими трудностями внедрения в действующее производство: отбором материалов в исходном состоянии и отходов; применением новых технологических смазочных материалов, новых способов и режимов нагрева. Например, в кузнечном производстве сразу возникает вопрос нагрева, потому что индукционный нагрев заготовок из стали и алюминиевых сплавов очень сильно отличается. То же следует сказать о режимах деформирования и термической обработки штамповок. В связи с этим данный подход приводит к значительному удорожанию деталей и, как правило, неоправдан в применении.

Второй подход заключается в том, что конструкцию узлов и технологию их изготовления изменяют в зависимости от особенностей легких сплавов. В этом случае автомобильные заводы часто отдают такие узлы для производ-

ства мелким фирмам, которые занимаются их доводкой, отладкой технологии изготовления и поставкой готовой продукции непосредственно на место сборки автомобиля. Совместное участие в небольших предприятиях обеспечивает существенный эффект от этого нововведения.

Третий подход состоит в запуске параллельного производства: на автомобильном заводе наряду с изготовлением стальных автомобилей налаживают производство автомобилей из легких сплавов. Этим путем идут японские фирмы. Такой подход позволяет осваивать новые технологии и виды оборудования, учиться работать с современными материалами, не мешая основному производству серийного автомобиля. В некоторых случаях на действующих заводах создают специализированные участки для сборки нового автомобиля, а комплектующие детали и узлы из алюминиевых сплавов заказывают на стороне.

Модульный принцип конструирования

Применение легких сплавов позволяет кардинально изменить конструкцию автомобиля, например, создавать сотовые или, как их называют, каркасные конструкции с остовом из стандартных прессованных профилей, который заполняют элементами из стали, алюминия, пластика, или даже дерева. Как и в самолетостроении, в конструкции автомобиля можно использовать цельноштампованные или прессованные элементы, которые можно получить лишь из алюминиевых сплавов. Речь идет об изготовлении крупногабаритных интегрированных элементов автомобиля (боковины, крыша, пол и т.п.) для последующей сборки согласно модульному принципу. Такая конструкция уменьшает число деталей более чем в два раза, и, следовательно, существенно снижается трудоемкость изготовления. На наш взгляд, это направление является очень перспективным.

Модульный принцип конструирования был использован фирмой *Daimler-Chrysler*, позволивший создать сварную раму из прессованного алюминиевого сплава для кабины в мусороуборочном автомобиле *Econic*. Большим достоинством алюминиевых сплавов является их высокая коррозионная стойкость, что обеспечивает сохранение корпуса автомобиля в рабочем состоянии в течение 20 лет при самых неблагоприятных погодных условиях. Это дополнительно

снижает затраты труда и экономит средства на их обслуживание.

Кузов нового поколения городских автобусов *Omni-City* шведская фирма *Scania* выполнила полностью из алюминиевого сплава. При этом каркасная конструкция из прессованного алюминиевого профиля напоминает концепцию *Space-Frame* у модели *Audi A8*. Применение алюминиевого сплава позволило снизить вес автобуса почти на 600 кг, что повысило пассажироместимость и снизило текущие затраты, связанные, в частности, с повышенным расходом топлива при частых разгонах и торможении на остановках и у светофоров.

Алюминиевые сплавы могут быть эффективно использованы для снижения веса сельскохозяйственной техники (например, путем изготовления из него кабин тракторов и комбайнов). Это особенно актуально в связи с принявшей широкие масштабы эрозией почвы в результате применения тяжелой техники.

В России работы по внедрению алюминиевых сплавов в автотранспорте проводятся фрагментарно и стихийно. Это определяется рядом факторов, среди которых немаловажным является отсутствие законов, вынуждающих автомобилестроителей, исходя из мирового опыта, расширять использование алюминиевых сплавов в новых моделях. В настоящее время вес алюминиевых деталей в автомобиле отечественного производства составляет ~15 кг.

Требования к листам из алюминиевых сплавов

В большинстве случаев для корпусов легковых автомобилей применяют детали из алюминиевых сплавов, полученные методом листовой штамповки из листов толщиной от 0,8 до 1,3 мм, от которых требуется хорошая штампуемость в сочетании с достаточными прочностными характеристиками в готовом изделии. Штампуемость листов зависит от химического состава, свойств и структуры сплава: размера и формы зерна, неоднородности зерен, количества, морфологии и размеров интерметаллических частиц, степени изотропности механических свойств, склонности сплава к деформационному упрочнению и старению [17, 18].

По данным различных авторов [19–21], для листов из алюминиевых сплавов размер зерна должен находиться в пределах 1,5–50 мкм. Крупное зерно является причиной появ-

ления на деформированных участках детали шероховатой поверхности (так называемой «апельсиновой корки»), которая портит внешний вид и может быть одной из причин разрывов при глубокой вытяжке. С уменьшением размера зерна (по сравнению с оптимальным) возрастает сопротивление деформированию, существенно влияющее на точность размеров штампуемого изделия, повышается износ рабочих поверхностей штампа.

Наряду с хорошей штампуемостью важное значение для листовых сплавов имеют прочность, характер дисперсионного упрочнения и сопротивление коррозии. Для оценки прочности используют условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, который должен быть как можно ниже перед операциями формообразования для обеспечения лучшей штампуемости. После формовки и горячей сушки лакокрасочного покрытия требуется высокий предел текучести для повышения жесткости деталей и устойчивости против вмятин.

Основные требования к алюминиевым сплавам для получения наружных деталей корпуса автомобилей холодной листовой штамповкой сформулированы ведущими зарубежными фирмами и в общем виде могут быть представлены следующим образом:

- размер зерна – 2 – 50 мкм;
- средний уровень $\sigma_{0,2}$ в закаленном и естественно состаренном состоянии (Т) – не выше 110–150 МПа;
- отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_B < 0,55$, где σ_B – предел прочности при растяжении;
- способность к повышению $\sigma_{0,2}$ до 250–300 МПа при искусственном старении (состояние Т1), что позволит получить за счет нагрева при окончательной покраске $\sigma_{0,2} = 180$ МПа;
- высокий уровень свойств листов в состоянии Т, определяющих хорошую формуемость;
- отсутствие склонности к образованию линий Чернова-Людерса на поверхности детали при деформировании для обеспечения ровной поверхности после покраски;
- высокая коррозионная стойкость, в том числе сопротивление нитевидной коррозии.

За рубежом в автомобильной промышленности для деталей корпуса применяются два типа алюминиевых сплавов [22] — термически неупрочняемые сплавы систем Al-Mn серии 3000, Al-Mg серии 5000 и термически упрочняемые сплавы систем Al-Cu, Al-Cu-Mg, Al-Mg-Si, Al-

Mg-Si-Cu серий 2000 и 6000.

Из термически неупрочняемых сплавов наиболее широко используют листы из сплава марки 5182, имеющие в отожженном состоянии мелкозернистую структуру и хорошую штампуемость. Отрицательным свойством данного сплава, равно как и сплавов серии 5000 при холодном формообразовании, является наклепываемость и формирование шероховатой поверхности деталей, что ограничивает их применение для изготовления внутренних деталей корпуса [23].

Эффект упрочнения алюминиевых сплавов при сушке окрашенных деталей (+170–200 °С) сильно зависит от типа сплава. В случае сплавов класса 5000 сушка практически не изменяет их свойства, но иногда может частично снижать. Термически упрочняемые сплавы, обеспечивающие хороший внешний вид изделия, упрочняются в процессе сушки лакокрасочного покрытия, поэтому они предпочтительнее для изготовления внешних деталей корпуса.

Сплавы серии 2000, такие как наиболее используемые 2008 и 2036, имеют низкий эффект старения при сушке краски и уступают по прочности сплавам серии 6000 (Al-Mg-Si и Al-Mg-Si-Cu).

Способность к формуемости при холодной штамповке, свариваемость и коррозионная стойкость листового материала из сплавов серии 6000 находится на уровне термически неупрочняемых сплавов системы Al-Mg. Однако при этом после нагрева в процессе сушки краски они обладают более высокой прочностью за счет подстаривания. Детали из сплавов серии 6000 имеют наиболее высокое качество поверхности, так как эти сплавы не склонны при деформации к образованию линий Чернова-Людерса.

В Европе в качестве основного сплава для наружных деталей корпуса используют хорошо штампуемый сплав 6016 [24]. В Северной Америке преобладают сплавы 6111 и 6061 с более высокой прочностью, что обеспечивает им более высокую устойчивость против вмятин.

Из отечественных сплавов системы Al-Mg-Si наиболее близким к зарубежным сплавам по характеристикам прочности и пластичности является сплав АВ. Из него изготавливают листы толщиной от 0,3 до 10,5 мм по ГОСТ

21631 [25] и поставляют в трех состояниях: отожженном (сплав АВМ); закаленном и естественно состаренном (сплав АВТ); закаленном и искусственно состаренном (сплав АВТ1). Сдаточными параметрами листов сплава АВ являются: качество поверхности, габариты, временное сопротивление разрыву и относительное удлинение в поперечном направлении. При этом размер зерна и предел текучести $\sigma_{0,2}$ не регламентируются, хотя $\sigma_{0,2}$ является важной характеристикой для оценки технологичности на стадии производства детали, а также ее работоспособности. Однако из практики известно, что полуфабрикаты из сплавов системы Al-Mg-Si, в том числе и листы из сплава АВ, склонны к разнотекстурности с выраженной текстурой рекристаллизации. Это резко снижает их способность к формовке и ухудшает внешний вид детали, получаемой при холодной штамповке. Таким образом, российская промышленность выпускает листы, не удовлетворяющие требованиям автомобилестроения.

В результате проведенного исследования в 2001 г. в ФГУП «ВИАМ» для листов сплава АВ был разработан режим термической обработки, который обеспечивает получение рекристаллизованной структуры с зерном регламентированного размера 20×40 мкм. Проведенные испытания показали, что такие листы имеют изотропные свойства и по технологическим характеристикам сравнимы с листами из сплавов 6016, АМг2 и АМг4.

Старение листов сплава АВ с рекристаллизованной структурой рекомендуется проводить при +170 °С в течение 14 ч для получения максимально удовлетворительных свойств: $\sigma_B = 350$ МПа; $\sigma_{0,2} = 300$ МПа; $\delta = 12\%$ [26].

Деформируемые алюминиевые сплавы применяются для изготовления рам, кабин, кузова, салона автобуса, а также всевозможных емкостей и цистерн. Детали двигателя (поршни, головки и блоки цилиндров) производят из алюминиевого литья с высокой теплопрочностью.

При изготовлении элементов каркаса, обшивки кузова полуприцепа автофургона, рефрижератора перспективными материалами являются алюминиевые сплавы АД31, 1915 (прессованные профили) и сплавы АМг2, АМг5 (лист).

Для изготовления отдельных узлов легкового автомобиля (навесные детали, бамперы,

радиаторы охлаждения, отопители) применяют алюминиевые сплавы АМц, АМг3 и 1915.

Заключение

Алюминиевые свариваемые сплавы в настоящее время являются широко применяемым конструкционным материалом как в традиционно ориентированных на них отраслях (авиационная промышленность, ракетостроение, космическая техника), так и в железнодорожном и автомобильном транспорте.

В качестве основного сплава для наружных деталей кузова легкового автомобиля и пассажирского вагона в Европе используют сплав 6016, в Северной Америке преобладают сплавы 6111 и 6061 более высокой прочности. Отечественным аналогом сплавов этой серии является серийный алюминиевый деформируемый сплав АВ. Листы из него выпускают по ГОСТ 21631, но в нем не регламентируются предел текучести, размер зерна и параметры, определяющие технологичность при холодной штамповке.

Чтобы нивелировать этот недостаток, в России разработан режим термической обработки, позволяющий получать листы сплава АВ с регламентированной рекристаллизованной структурой и параметрами технологичности, дающими возможность их использования для наружных панелей автомобилей. Упрочнение этого сплава за счет старения в процессе сушки лакокрасочного покрытия обеспечивает получение свойств на уровне стального листа.

Список литературы

1. Современные технологии авиастроения / Под ред. А.Г. Братухина, Ю.Л. Иванова. – М.: Машиностроение, 1999. – 832 с.
2. Патент 2237098 РФ, МКИ С22С 21/08. Сплав на основе алюминия, способ получения полуфабрикатов и изделие из этого сплава // БИ. 2003. № 6.
3. Шалин Р.Е., Ефремов И.С., Яровинский Ю.Л., Лукин В.И. Опыт проектирования и изготовления крупногабаритных конструкций из алюминиево-литиевых сплавов изделий ракетно-космической техники // Сварочное производство. 1996. № 11. С. 14–18.
4. Братухин А.Г., Редчиц В.В., Лукин В.И. Перспективы использования алюминиево-литиевых сплавов для штампосварных конструкций летательных аппаратов // Сварочное производство. 1996. № 7. С. 18–21.
5. Бецофен С.Я., Мацнев В.Н., Костыкова О.С.,

- Масюков С.А. Текстура и анизотропия механических свойств титановых и алюминиевых сплавов // *Авиационная промышленность*. 2004. № 4. С. 31–35.
6. Захаров В.В. Некоторые проблемы использования алюминиево-литиевых сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2003. № 2. С. 8–14.
7. Сироткин О.С., Мацнев В.Н., Рязанцев В.И. Конструктивно-технологические проблемы производства топливных баков для многоцелевой авиационно-космической системы // *Авиационная промышленность*. 2001. № 3. С. 5–12.
8. Мацнев В.Н., Рязанцев В.И., Данилов С.Ф. Исследование технологических возможностей алюминиево-литиевого сплава 01421 для штамповарных интегральных конструкций // *Авиационная промышленность*. 2004. № 4. С. 36–40.
9. Na J., Jin-feng L., Ziquao Z., Xiu-yu W., Yan-fen L. Effect of aging on mechanical properties and localized corrosion behaviors of Al-Cu-Li alloy // *Trans. Nonferrous Metal. Soc. China*. 2005. V. 15. № 1. P. 23–29.
10. Дриц А.М., Овчинников В.В. Сравнительные исследования свойств сварных соединений российских и американских алюминиево-литиевых сплавов // *Цветные металлы*. 2003. № 12. С. 71–77.
11. Использование алюминия в вагоностроении // *Железные дороги мира*. 1995. № 11. С. 16–19.
12. Рязанцев В.И., Мацнев В.Н., Бардин В.В., Черкашин А.В. Конструктивно-технологическая схема цельносварного кузова пассажирского вагона из алюминиевых сплавов // *Сварочное производство*. 2001. № 3. С. 31–37.
13. Гуреева М.А., Грушко О.Е., Овчинников В.В. и др. Структура, технологические свойства и свариваемость листов из сплавов системы Al-Mg-Si, содержащих легирующие добавки кальция // *Сварка в Сибири*. 2005. № 2. С. 66–71.
14. Ищенко А.Я., Подбельников С.В., Покляцкий А.Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (обзор) // *Автоматическая сварка*. 2007. № 11. С. 32–38.
15. Триндюк Л.М., Петров Р.Л. Материалы в автомобиле // *Автомобильная промышленность*. 1998. № 6. С. 30–33.
16. Алюминий в производстве грузовых и специальных автомобилей // *Технология машиностроения*. 2001. № 1. С. 73–74.
17. Цепов С.И. и др. Алюминиевые сплавы как альтернатива стали для нагружения деталей легкового автомобиля // *Новые направления развития производства и потребления алюминия и его сплавов: Сборник*. – Самара, 2000. С. 54–56.
18. Фридляндер И.Н., Сандлер В.Г., Грушко О.Е., Берсенов В.В. и др. Алюминиевые сплавы – перспективный материал в автомобилестроении // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2002. № 9. С. 3–9.
19. Фридляндер И.Н., Грушко О.Е., Шевелева Л.М., Данилов С.В. Свойства листов из высокопрочного сплава В1341 // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2004. № 12. С. 3–6.
20. Фридляндер И.Н., Берстенов В.В., Ткаченко Е.А. и др. Влияние термической обработки и деформации на величину зерна и механические свойства сплавов типа дуралюмин // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2003. № 7. С. 3–6.
21. Елагин В.И. Состояние и пути повышения трещиностойкости высокопрочных алюминиевых сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2002. № 9. С. 10–19.
22. Патент Франции № 2316347. МКИ C22 C 21/00, опубл. в 1977 г.
23. Hirotsuke Inagaki, Toshio Komatsubara. Yield Point Elongation in Al-Mg Alloys // *Aluminium Alloys: ICAA-7, Apr. 9–14. 2000. Virginia. USA. P. 1303–1308*.
24. Kumar P., Martin C.L., Brown S. Age-hardening of a 6000-series (Al-Mg-Si) alloy // *Furukawa Rev.* 1995. № 14. P. 157–162.
25. ГОСТ 21631-76. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов.
26. Овчинников В.В., Грушко О.Е. Высокотехнологичный свариваемый алюминиевый сплав В1341 системы Al-Mg-Si // *Машиностроение и инженерное образование*. 2005. № 3. С. 2–11.

Приложение

Таблица 1

Марки алюминиевых деформируемых термически неупрочняемых сплавов России и США

Система	Страна	Марка	Оптимальный состав по основным компонентам, %	Свариваемость		Предел прочности, МПа	Вид полуфабрикат						
				дуговая сварка	контактная сварка		лист	плита	поковка	пруток	профиль	труба	проволока
Al	РФ	АД1	99,3 Al	A	A	80	+	+	-	+	+	+	+
1xxx	США	1145	99,45 Al	A	B	75	+	-	-	-	-	-	-
		1060	99,6 Al	A	B	70	+	+	-	-	+	+	+
		1100	99,0 Al	A	A	90	+	+	+	+	+	+	+
Al-Mn	РФ	АМц	Al 1,3Mn	A	A	120	+	+	-	+	+	+	+
3xxx	США	3003	Al 1,2Mn, 12Mg	A	A	110	+	+	+	+	+	+	+
		3004	Al 1,2Mn 1,0Mg	A	A	180	+	+	+	-	-	+	-
Al-Mg	РФ	АМг1	Al 1,1Mg	Б	A	120	+	-	-	-	+	-	-
		АМг2	Al 2,2Mg 0,4Mn	Б	A	190	+	+	+	+	+	+	+
		АМг3	Al 3,5Mg 0,6Mn 0,6Si	A	A	220	+	+	+	+	+	+	-
		АМг4	Al 4,3Mg 0,6Mn	A	A	280	+	-	-	+	-	-	-
		АМг5	Al 5,3Mg 0,6Mn	A	A	300	+	+	+	+	+	+	-
		АМг6	Al 6,3Mg 0,6Mn	A	A	340	+	+	+	+	+	+	-
5xxx	США	5005	Al 0,8Mg	A	A	125	+	+	-	+	-	-	+
		5050	Al 1,4Mg	A	A	145	+	+	-	-	-	+	-
		5052	Al 2,5Mg 0,25Cr	A	A	195	+	+	-	+	-	+	+
		5083	Al 4,4Mg 0,7Mn 0,15Cr	A	A	290	+	+	-	-	+	+	-
		5086	Al 4,0Mg 0,45Mn 0,1Cr	A	A	260	+	+	+	-	+	+	-
		5154	Al 3,5Mg 0,25Cr	A	A	240	+	+	-	+	+	+	+
		5252	Al 2,5Mg	A	A	180	+	+	-	-	-	-	-
		5454	Al 2,8Mg 0,80Mn 0,1Cr	A	A	250	+	+	-	-	+	+	-
		5456	Al 5,2Mg 0,80Mn 0,1Cr	A	A	310	+	+	-	-	+	-	-
		5457	Al 1,0Mg 0,30Mn	A	A	130	+	+	-	-	-	-	-
		5657	Al 0,8Mg 0,30Mn	A	A	110	+	-	-	-	-	-	-

Примечание: А – хорошая свариваемость; Б – удовлетворительная свариваемость, требуется разработка специальной технологии; В – свариваемый сплав во многих случаях, однако требуется специальная технология; С – ограниченная свариваемость.

Таблица 2

Марки алюминиевых деформируемых термически упрочняемых сплавов России и США

Система	Страна	Марка	Оптимальный состав по основным компонентам, %	Свариваемость		Предел прочности, МПа	Вид полуфабрикат						
				дуговая сварка	контактная сварка		лист	плита	поковка	пруток	профиль	труба	проволока
Al-Cu, Al-Mg-Cu	РФ	Д20	Al 6,5Cu 0,6Mn	Б	Б	400	+	+	+	+	+	-	-
		1201	Al 6,3Cu 0,3Mn	А	Б	430	+	+	+	+	+	+	+
		ВАД1	Al 4,1Cu 2,5Mg 0,6Mn	Б	А	430	-	-	+	+	-	-	-
		Д1	Al 4,1Cu 0,6Mg 0,6Mn	Д	А	370	+	+	+	+	+	+	-
		Д16	Al 4,3Cu 1,0Mg 0,6Mn	Д	А	465	+	+	-	+	+	+	-
		Д19	Al 4,0Cu 2,0Mg 0,75Mn	Д	А	430	+	+	-	+	+	-	-
2xxx	США	2014	Al 4,4Cu 0,5Mg 0,8Mn 0,8Si	С	А	485	+	+	+	+	+	+	+
		2017	Al 4,0Cu 0,6Mg 0,7Mn 0,5Si	С	А	425	-	-	-	+	-	-	+
		2024	Al 4,5Cu 1,5Mg 0,6Mn	С	А	485	+	+	+	+	+	+	+
		2218	Al 4,0Cu 1,5Mg 2,0Ni	С	А	330	-	-	+	-	-	-	-
		2219	Al 6,2Cu 0,3Mn	А	А	420	+	+	-	+	+	+	+
		2618	Al 2,3Cu 1,6Mg 1,1Ni 1,1Fe	С	А	430	-	-	+	-	-	-	-
Al-Mg-Si	РФ	АД31	Al 0,6Mg 0,5Si	Б	Б	240	-	-	-	+	+	-	-
		АД33	Al 1,1Mg 1,0Si 0,25Cu	Б	Б	310	-	-	-	+	+	-	-
		АД35	Al 1,1Mg 1,0Si 0,7Mn	Б	Б	320	+	+	+	+	+	-	-
		АВ	Al 1,0Mg 0,85Si 0,25Mn	А	А	320	+	+	+	+	+	+	-
6xxx	США	6061	Al 1,0Mg 0,6Si 0,2Cr 0,25Mn	А	А	310	+	+	+	+	+	+	+
		6063	Al 0,7Mg 0,4Si	А	А	240	-	-	+	-	+	+	-
		6070	Al 0,80Mg 1,35Si 0,7Mn 0,27Cu	А	А	380	-	-	-	-	+	+	-
		6101	Al 0,6Mg 0,5Si	А	А	220	-	-	-	+	+	+	-
		6201	Al 0,8Mg 0,7Si	А	А	330	-	-	-	+	-	-	+
		6951	Al 0,6Mg 0,35Si 0,25Cu	А	А	270	+	+	-	+	-	+	+

Al-Zn-Mg, Al-Zn-Mg-Cu	РФ	B92	Al 3,2Zn 4,4Mg 0,8Mn	Б	Б	420	+	+	+	-	-	-	-
		1915	Al 3,7Zn 1,1Mg 0,4Mn	Б	Б	380	+	-	-	-	+	+	-
		B95	Al 6,0Zn 4,3Mg 1,7Cu	Д	А	520	+	+	+	+	+	+	-
		B96ц	Al 8,5Zn 2,6Mg 2,3Cu	Д	А	600	-	-	+	-	-	-	-
7xxx	США	7005	Al 4,5Zn 1,4Mg 0,45Mn 0,13Cr	А	А	350	+	-	-	-	-	-	-
		7075	Al 5,6Zn 2,5Mg 1,6Cu 0,2Cr	С	А	570	+	+	+	+	+	+	+
		7475	Al 5,7Zn 2,2Mg 1,6Cu 0,2Cr	-	-	505	+	+	-	-	-	-	-
		7178	Al 6,8Zn 2,7Mg 2,0Cu 0,2Cr	С	А	605	+	+	+	+	+	+	+
Al-Mg- Si-Cu	РФ	AK6	Al 0,6Mg 0,9Si 2,2Cu 0,6Mn	Д	-	420	-	-	+	+	-	+	-
		AK8	Al 0,6Mg 0,9Si 4,3Cu 0,7Mn	Д	-	460	-	-	+	+	-	-	-
Al-Cu- Mg-Fe-Ni	РФ	AK4	Al 2,2Cu 1,6Mg 1,2Fe 1,3Ni	Д	-	400	-	-	+	+	-	-	-
		AK4-1	Al 2,2Cu 1,6Mg 1,2Fe 1,2Ni	Д	-	400	+	+	+	+	+	+	-

Примечание: А – хорошая свариваемость; Б – удовлетворительная свариваемость, требуется разработка специальной технологии; В – свариваемый сплав во многих случаях, однако требуется специальная технология; С – ограниченная свариваемость; Д – сварка не рекомендуется. Состояние после закалки и искусственного старения.

Таблица 3

Современные алюминий-литиевые сплавы

Марка сплава	Содержание элементов в масс. %								
	Li	Cu	Mn	Mg	Sc	Ag	Cr	Zr	Ti
1420	1,8-2,2	-	0,1-0,25	5,8-6,2	-	-	-	0,1	-
1421	1,7-2,2	-	0,1-0,2	5,6-6,1	0,15-0,35	-	-	0,1	-
1423	1,7-2,0	-	0,1-0,2	3,5-4,4	0,08-0,12	-	-	0,1	-
1424	1,5-1,8	-	0,1-0,25	4,7-5,1	0,05-0,08	-	-	0,05-0,10	0,005-0,20
5091	1,2-1,4	-	-	3,7-4,2	-	-	-	-	-
1440	1,6-2,3	1,2-1,9	0,05-0,08	0,60-1,10	-	-	-	0,10-0,20	0,02-0,10
1441	1,7-2,0	1,6-1,9	0,01-0,40	0,7-1,1	-	-	-	0,04-0,16	0,01-0,07
1450	1,8-2,0	2,8-3,2	0,05-0,08	0,05-0,10	-	-	-	0,10-0,20	0,10-0,15
1460	1,9-2,3	2,6-3,3	0,05-0,10	0,05-0,10	-	-	-	0,08-0,12	0,10-0,15
1460-1	1,0-1,3	5,0-5,5	0,08-0,10	0,02-0,07	-	-	-	0,08-0,10	0,02-0,10
1460-2	1,0-1,2	4,0-4,3	0,20-0,30	0,02-0,07	-	-	-	0,10-0,16	0,04-0,06
1460-3	1,2-1,4	5,0-6,0	0,08-0,12	0,05-0,08	-	-	-	0,10-0,12	0,05-0,10
1461	1,5-1,8	2,8-3,5	0,1-0,5	0,1-0,6	Zn 0,4-0,8	-	0,02-0,05	0,05-0,12	0,02-0,05
1464	1,6-1,8	3,0-3,2	0,2-0,4	0,4-0,7	0,05-0,09	-	-	0,08-0,11	-
1469	1,0-1,7	3,2-4,5	0,003-0,5	0,01-0,5	0,02-0,28	0,15-1,5	-	0,02-0,25	-
2090	1,9-2,6	2,4-3,0	0,05-0,07	0,20-0,30	-	-	0,05	0,10	0,15
2091	1,7-2,3	1,8-2,5	0,1-0,15	1,1-1,9	-	-	0,10-0,12	0,10	0,10
2094	0,7-1,4	4,4-5,2	0,25	0,25-0,80	-	0,25-0,60	-	0,12	0,10

Таблица 4

*Типичные механические свойства алюминиево-литиевых сплавов.**Температура испытаний +20 °С*

Марка сплава	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, E, МПа	Предел прочности, σ_B , МПа	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение, δ , %
1420	2470	–	445	240	11,0
1421	2460	–	465	335	11,0
1423	2480	–	420	245	12,0
1440	2550	7300	450	340	8
1450	2600	7550	550	470	6
1460	2600	7550	560	480	6
1460-1	2700	7600	600	530	5
1460-2	2665	7500	580	500	5,5
1460-3	2700	7550	610	540	5,3
2090	2590	7600	580	515	6
8090	2560	7700	440	340	10
Weldalite 049	2710	7790	590	540	6

Уважаемые читатели!

Журнал «Машиностроение и инженерное образование» входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора или кандидата наук.