



Свариваемые алюминиевые сплавы в конструкциях транспортных средств

М.А. Гуреева

кандидат технических наук

О.Е. Грушко

доктор технических наук

В.В. Овчинников

доктор технических наук

Октябрь 2008

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

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

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

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

Статья подготовлена для опубликования в журнале *«Заготовительные производства в машиностроении»*, № 3, 2009 г.

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

Свариваемые алюминиевые сплавы в конструкциях транспортных средств

М.А. Гуреева¹, О.Е. Грушко², В.В. Овчинников³

¹ ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», г. Москва

² ФГУП «ВИАМ», г. Москва

³ ОАО «Российская самолетостроительная корпорация «МиГ», г. Москва

Приведен аналитический обзор по вопросу эффективности применения алюминиевых сплавов в конструкции современных транспортных средств в России и за рубежом. Сформулированы требования к структуре и свойствам полуфабрикатов алюминиевых сплавов. Представлены результаты исследований по получению листов из сплава АВ с мелкозернистой рекристаллизованной структурой для наружных панелей автомобилей, параметрами технологичности и механическими свойствами на уровне стального листа, получаемыми при старении в процессе сушки лакокрасочного покрытия.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы; системы легирования; механические свойства; штампуемость; свариваемость; сварные узлы из алюминиевых сплавов.

Is given instant analysis regarding the effectiveness of the application of aluminum alloys in the construction of contemporary transportation means in Russia and abroad. Requirements for the structure and the properties of the semifinished products of aluminum alloys are formulated. Are represented the results of studies on obtaining of sheets from the alloy AV with the fine-grained recrystallized structure for the external panels of automobiles, the parameters of technological effectiveness and the mechanical properties at the level of steel plate, obtained during the aging in the process of the drying of paint and varnish coat.

Keywords: aluminum alloys, the system of alloying, mechanical properties, stampability, weldability, weldments from the aluminum alloys.

Многолетняя практика применения свариваемых сплавов в авиакосмической технике является практической основой по применению их в других отраслях народного хозяйства. Большинство свариваемых алюминиевых сплавов включены в государственные стандарты. Марки алюминиевых деформируемых сплавов России и США, их свариваемость и вид полуфабрикатов приведены в табл. 1.

Авиакосмическая техника. На современном этапе развития дозвуковой и сверхзвуковой авиации алюминиевые сплавы являются основными конструкционными материалами в самолетостроении. Отдельные элементы конструкции изготавливаются из стали, титана или композиционного материала, 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.

Современная авиационная техника – это техника с многократной и длительной эксплуатацией (30000–60000 летных часов). Ее изделия находятся под воздействием циклических нагрузок, температуры и атмосферной среды.

В России при изготовлении авиационной техники успешно используются упрочняемые термической обработкой высокопрочные алюминиевые сплавы системы Al–Zn–Mg–Cu и сплавы средней и повышенной прочности системы Al–Mg–Cu. Они являются конструкционным материалом для обшивки и внутреннего силового набора элементов планера самолета (фюзеляж, крыло, киль и др.). Свариваемые алюминиевые сплавы систем Al–Mn, Al–Mg, Al–Cu, Al–Mg–Li, Al–Mg–Si применяют для изготовления планера, бортовых систем, шасси, лопастей воздушного винта, приборов и элементов внутренней отделки салона.

Таблица 1.

Марки алюминиевых деформируемых сплавов России и США, их свариваемость и вид полуфабрикатов

Система, серия	Страна	Марка сплава	Оптимальный состав по основным компонентам, %	Свариваемость		σ_b , МПа	Полуфабрикат						
				Дуговая сварка	Контактная сварка		лист	плита	поковка	пруток	профиль	труба	проволока
Сплавы термически неупрочняемые. Состояние отожженное													
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; 1,3 Mn	A	A	120	+	+	-	+	+	+	+
2xxx	США	2014	Al; 4,4 Cu; 0,5 Mg; 0,8 Mn; 0,8 Si	C	A	485	+	+	+	+	+	+	+
		2017	Al; 4,0 Cu; 0,6 Mg; 0,7 Mn; 0,5 Si	C	A	425	-	-	-	+	-	-	+
		2024	Al; 4,5 Cu; 1,5 Mg; 0,6 Mn	C	A	485	+	+	+	+	+	+	+
		2218	Al; 4,0 Cu; 1,5 Mg; 2,0 Ni	C	A	330	-	-	+	-	-	-	-
		2219	Al; 6,2 Cu; 0,3 Mn	A	A	420	+	+	-	+	+	+	+
		2618	Al; 2,3 Cu; 1,6 Mg; 1,1 Ni; 1,1 Fe	C	A	430	-	-	+	-	-	-	-
Al-Mg-Si	РФ	АД31	Al; 0,6 Mg; 0,5 Si	Б	Б	240	-	-	-	+	+	-	-

Система, серия	Страна	Марка сплава	Оптимальный состав по основным компонентам, %	Свариваемость		σ_b , МПа	Полуфабрикат						
				Дуговая сварка	Контактная сварка		лист	плита	поковка	пруток	профиль	труба	проволока
		АД33	Al; 1,1 Mg; 1,0 Si; 0,25 Cu	Б	Б	310	-	-	-	+	+	-	-
		АД35	Al; 1,1 Mg; 1,0 Si; 0,7 Mn	Б	Б	320	+	+	+	+	+	-	-
		АВ	Al; 1,0 Mg; 0,85 Si; 0,25 Mn	А	А	320	+	+	+	+	+	+	-
6xxx	США	6061	Al; 1,0 Mg; 0,6 Si; 0,2 Cr; 0,25 Mn	А	А	310	+	+	+	+	+	+	+
		6063	Al; 0,7 Mg; 0,4 Si	А	А	240	-	-	+	-	+	+	-
		6070	Al; 0,80 Mg; 1,35 Si; 0,7 Mn; 0,27 Cu	А	А	380	-	-	-	-	+	+	-
		6101	Al; 0,6 Mg; 0,5 Si	А	А	220	-	-	-	+	+	+	-
		6201	Al; 0,8 Mg; 0,7 Si	А	А	330	-	-	-	+	-	-	+
		6951	Al; 0,6 Mg; 0,35 Si; 0,25 Cu	А	А	270	+	+	-	+	-	+	+
Al-Zn- Mg-Cu; Al-Zn- Mg	РФ	В92	Al; 3,2 Zn; 4,4 Mg; 0,8 Mn	Б	Б	420	+	+	+	-	-	-	-
		1915	Al; 3,7 Zn; 1,1 Mg; 0,4 Mn	Б	Б	380	+	-	-	-	+	+	-
Al-Zn- Mg-Cu;	РФ	В95	Al; 6,0 Zn; 4,3 Mg; 1,7 Cu	Д	А	520	+	+	+	+	+	+	-

Система, серия	Страна	Марка сплава	Оптимальный состав по основным компонентам, %	Свариваемость		σ_b , МПа	Полуфабрикат						
				Дуговая сварка	Контактная сварка		лист	плита	поковка	пруток	профиль	труба	проволока
Al-Zn-Mg		B96ц	Al; 8,5 Zn; 2,6 Mg; 2,3 Cu	Д	А	600	-	-	+	-	-	-	-
7xxx	США	7005	Al; 4,5 Zn; 1,4 Mg; 0,45 Mn; 0,13 Cr	А	А	350	+	-	-	-	-	-	-
		7075	Al; 5,6 Zn; 2,5 Mg; 1,6 Cu; 0,2 Cr	С	А	570	+	+	+	+	+	+	+
		7475	Al; 5,7 Zn; 2,2 Mg; 1,6 Cu	-	-	505	+	+	-	-	-	-	-
		7178	Al; 6,8 Zn; 2,7 Mg; 2,0 Cu; 0,2 Cr	С	А	605	+	+	+	+	+	+	+
3xxx	США	3003	Al; 1,2 Mn; 0,12 Mg	А	А	110	+	+	+	+	+	+	+
		3004	Al; 1,2 Mn; 1,0 Mg	А	А	180	+	+	+	-	-	+	-
Al-Mg	РФ	AMr1	Al; 1,1 Mg	Б	А	120	+	-	-	-	+	-	-
		AMr2	Al; 2,2 Mg; 0,4 Mn	Б	А	190	+	+	+	+	+	+	+
		AMr3	Al; 3,5 Mg; 0,6 Mn; 0,6 Si	А	А	220	+	+	+	+	+	+	-
		AMr4	Al; 4,3 Mg; 0,6 Mn	А	А	280	+	-	-	+	-	-	-
		AMr5	Al; 5,3 Mg; 0,6 Mn	А	А.	300	+	+	+	+	+	+	-

Система, серия	Страна	Марка сплава	Оптимальный состав по основным компонентам, %	Свариваемость		σ_b , МПа	Полуфабрикат						
				Дуговая сварка	Контактная сварка		лист	плита	поковка	пруток	профиль	труба	проволока
		AMg6	Al; 6,3 Mg; 0,6 Mn	A	A	340	+	+	+	+	+	+	-
5xxx	США	5005	Al; 0,8 Mg	A	A	125	+	+	-	+	-	-	+
		5050	Al; 1,4 Mg	A	A	145	+	+	-	-	-	+	-
		5052	Al; 2,5 Mg; 0,25 Cr	A	A	195	+	+	-	+	-	+	+
		5083	Al; 4,4 Mg; 0,7 Mn; 0,15 Cr	A	A	290	+	+	-	-	+	+	-
		5086	Al; 4,0 Mg; 0,45 Mn; 0,1 Cr	A	A	260	+	+	+	-	+	+	-
		5154	Al; 3,5 Mg; 0,25 Cr	A	A	240	+	+	-	+	+	+	+
		5252	Al; 2,5 Mg	A	A	180	+	+	-	-	-	-	-
		5454	Al; 2,8 Mg; 0,80 Mn; 0,1 Cr	A	A	250	+	+	-	-	+	+	-
		5456	Al; 5,2 Mg; 0,80 Mn; 0,1 Cr	A	A	310	+	+	-	-	+	-	-
		5457	Al; 1,0 Mg; 0,30 Mn	A	A	130	+	+	-	-	-	-	-
		5657	Al; 0,8 Mg; 0,30 Mn	A	A	110	+	-	-	-	-	-	-
Сплавы термически упрочняемые. Состояние: закалка + старение													
Al-Mg- Cu, Al- Cu-Mn	РФ	Д20	Al; 6,5 Cu; 0,6 Mn	Б	Б	400	+	+	+	+	+	-	-
		1201	Al; 6,3 Cu; 0,3 Mn	A	Б	430	+	+	+	+	+	+	+

Система, серия	Страна	Марка сплава	Оптимальный состав по основным компонентам, %	Свариваемость		σ_b , МПа	Полуфабрикат						
				Дуговая сварка	Контактная сварка		лист	плита	поковка	пруток	профиль	труба	проволока
		ВАД1	Al; 4,1 Cu; 2,5 Mg; 0,6 Mn	Б	А	430	-	-	+	+	-	-	-
		Д1	Al; 4,1 Cu; 0,6 Mg; 0,6 Mn	Д	А	370	+	+	+	+	+	+	-
		Д16	Al; 4,3 Cu; 1,0 Mg; 0,6 Mn	Д	А	465	+	+	-	+	+	+	-
		Д19	Al; 4,0 Cu; 2,0 Mg; 0,75 Mn	Д	А	430	+	+	-	+	+	-	-
Al-Mg-Si-Cu	РФ	АК6	Al; 0,6 Mg; 0,9 Si; 2,2 Cu; 0,6 Mn	Д	-	420	-	-	+	+	-	+	-
		АК8	Al; 0,6 Mg; 0,9 Si; 4,3 Cu; 0,7 Mn	Д	-	460	-	-	+	+	-	-	-
Al-Cu-Mg-Fe-Ni	РФ	АК4	Al; 2,2 Cu; 1,6 Mg; 1,2 Fe; 1,3 Ni	Д	-	400	-	-	+	+	-	-	-
		АК4-1	Al; 2,2 Cu; 1,6 Mg; 1,2 Fe; 1,2 Ni	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.

При изготовлении гидросамолетов предусмотрено использование свариваемых коррозионностойких магниевых сплавов (АМг5, АМг6) и сплавов системы 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.) – из прессованных профилей Д16 и В95.

Развитие авиационной техники неразрывно связано с решением задачи по снижению массы летательного аппарата. Для снижения собственной массы летательных аппаратов 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 применяют сплавы 2090 и 8090 и их модификации [1].

Несущие топливные баки собирают по каркасно-панельной схеме (МиГ-29) и 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 свариваются электронно-лучевой сваркой. Шпангоуты с балками соединяют в единый силовой каркас ручной аргонодуговой сваркой. Для создания герметичного объема топливного бака и его аэродинамической формы проемы каркаса фрезеруют и приваривают к ним панели на установках с ЧПУ типа УПСФ. При панельной схеме сборки топливных баков в первую очередь изготавливают панели, которые затем через стыковочные узлы объединяются в герметичную конструкцию.

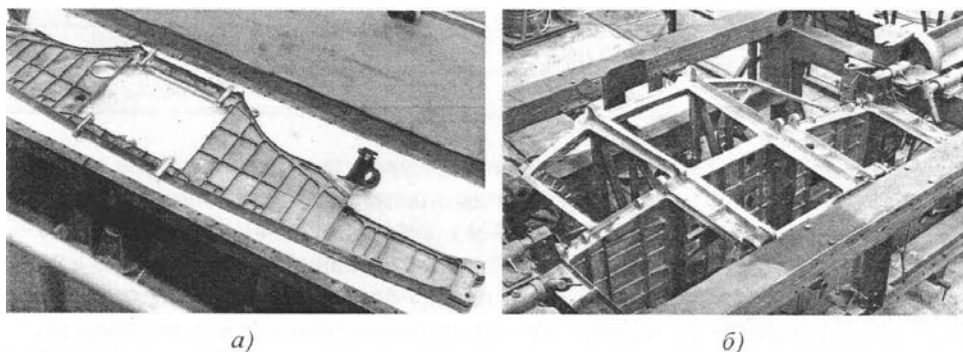


Рисунок 1. Шпангоут (а) из сплава 1420 и каркас топливного бака № 1-2 (б) самолета МиГ-29К

Применение высокопрочных алюминиево-литиевых сплавов в сварных герметичных конструкциях несущих топливных баков фюзеляжа позволяет снизить их собственную массу на 12–15%. Химический состав и механические свойства современных свариваемых алюминиево-литиевых сплавов в искусственно состаренном состоянии приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2.

Современные алюминиево-литиевые сплавы [2–10]

Марка сплава	Содержание элементов, % мас.								
	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	0,4–0,8 Zn	–	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 3.

Типичные механические свойства алюминиево-литиевых сплавов при температуре испытаний 20°C [2–10]

Марка сплава	Плотность, кг/м ³	E , МПа	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	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

Все сплавы этой группы (см. табл. 2 и 3) 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.

За рубежом и в России разрабатываются алюминийлитиевые сплавы нового поколения, дополнительно легированные серебром, скандием и другими микродобавками. Сплав 2195, содержащий серебро, применяется для изготовления топливных баков ТКА, обеспечивая около 13% снижения массы по сравнению с ранее применявшимся сплавом 2219. Существуют предположительные сведения об использовании сплавов 2096, 2097 в конструкции военных самолетов вместо сплава 2124.

В России разработан и проходит всесторонние испытания сплав В-1469 на основе системы Al–Cu–Li–Mg, легированный серебром, цирконием и скандием. Сплав защищен патентом и имеет зарубежные аналоги-сплавы 2195 и 2098, химические составы которых внесены в международный стандарт. Средний состав сплава В-1469, % мас.: 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 (AMг2, AMг4, AMг6 и 1570) толщиной 3–5 мм.

Сплавы AMц, AMг3, AMг5 служат материалом для топливных и масляных баков, бачков 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, бачки и баллоны, работающие под внутренним давлением. К таким изделиям можно отнести топливные аккумуляторы, компенсаторы падения давления в топливной системе и системе кондиционирования (кабины пилота или салона), расширительные бачки, накладные топливные баки и трубопроводы.

По типу конструктивного оформления сосуды и баллоны из алюминиевых сплавов, работающие под внутренним давлением, можно разделить на сферические, цилиндрические и тороидальные. При изготовлении баллонов и сосудов из алюминиевых сплавов применяются сплавы AMг2 и AMг4 толщиной 3–4 мм. Основными операциями при изготовлении 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.). В пассажирских самолетах листы и панели из алюминиевых сплавов применяют в системе кондиционирования салона, внутренней отделки интерьера, пассажирских кресел, элементов приборных досок и узлов крепления навигационного оборудования.

В конструкции самолетов гражданского флота используют в основном сплавы Д16, Д19, В95, В96 в качестве материалов для фюзеляжа, крыла и киля. 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 серий 2xxx, 3xxx, 5xxx, 6xxx и 7xxx. Серия 2xxx рекомендована для работы при высоких рабочих температурах и с повышенными значениями коэффициента вязкости разрушения. Сплавы серии 7xxx – для работы при более низких температурах значительно нагруженных деталей и для деталей с высокой сопротивляемостью к коррозии под напряжением. Для малонагруженных узлов, в гидро-, масло- и топливных системах применяются сплавы серий 3xxx, 5xxx и 6xxx.

В конструкциях транспортных самолетов США широко применяют сплавы серий 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 проявляет

тенденции к заметному снижению, несмотря на рост использования композиционных материалов.

При создании объектов космической техники бесспорное преимущество имеют алюминиевые сплавы. Высокие значения удельной прочности, удельной жесткости материала позволили обеспечить изготовление баков, межбаковых и носовых частей ракеты с высокой продольной устойчивостью. К преимуществам алюминиевых сплавов (2219 и др.) следует отнести 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 параллельно растут с понижением температуры.

Судостроение. Алюминий и сплавы на его основе находят все более широкое применение в судостроении. Из алюминиевых сплавов 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, которая может достигать 50–60%. В результате представляется возможность повысить грузоподъемность судна или улучшить его тактико-технические характеристики (маневренность, скорость и т.д.).

Предпочтительность применения алюминия в судостроении подтверждается его высокой коррозионной стойкостью и удовлетворительной сопротивляемостью к ударным нагрузкам. Первостепенное значение для судостроения приобретает возможность изготовления конструкции из алюминиевых сплавов в сварном варианте.

Для изготовления конструкций речного и морского флота наиболее широко применяют магниевые сплавы АМг3, АМг5, АМг61, а также сплавы АМц и Д16. Корпус судна повышенной грузоподъемности изготавливают из стали, а надстройки и другое вспомогательное оборудование

– из алюминиевых сплавов. Рыболовецкие баркасы изготовляют из сплава АМг5 (обшивка).

В судостроении США широко используют свариваемые сплавы серий 5xxx и 6xxx. Там, где необходима высокая прочность (~500 МПа), применяются полуфабрикаты из сплавов серий 2xxx и 1xxx. Для корпусов небольших лодок обычно используют 5052 или 6061, для более крупных судов – из сплава 5086. Изданного сплава изготовляют перегородки, топливные баки, кабины. Находят применение сплавы 5052, 5086 и 6061 в конструкциях парусных судов (корпус, мачты и др.); основным материалом при изготовлении рыболовных судов является сплав 5086.

При изготовлении судов военно-морского флота США используются коррозионностойкие деформируемые сплавы 5052, 5086, 6061. В конструкциях эскадренных миноносцев 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) предъявляют особые требования к конструкционным материалам.

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

Однако, начиная с 1975–1985 гг. цены на полуфабрикаты из алюминиевых сплавов были заметно снижены, и алюминиевые полуфабрикаты перестали быть дефицитными. Во многих странах мира (Швейцарии, ФРГ, Франции, Японии и др.) начались широкие исследования по применению алюминиевых сплавов в конструкции кузовов пассажирских вагонов (включая вагоны метро и

скоростные поезда) в целях уменьшения массы, снижения стоимости изготовления и значительного повышения срока эксплуатации.

Наибольших успехов в конструировании и производстве сварных кузовов вагонов из алюминиевых сплавов добились в Швейцарии, Японии и ФРГ. К настоящему времени достигнут гигантский 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 эксплуатируются более 20 тыс. пассажирских вагонов из алюминиевых сплавов [11].

В России работы по производству кузовов пассажирских вагонов из алюминиевых сплавов начались в период 1965–1970 гг. Был построен опытный электропоезд ЭР-200, который несколько лет эксплуатировался на магистрали Москва–Санкт-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.

Значительный интерес представляет выбор марки алюминиевых сплавов для кузова пассажирских вагонов. За рубежом в период до 1980–1985 гг. в основном применяли сплавы системы Al–Zn–Mg (например, 2020), а с 1985–1995 гг. – сплавы системы Al–Mg–Si (например, 6005, 6005А, 6013, 6061 и др.). Переход на эти сплавы был связан только с их отличной прессуемостью и высокой коррозионной стойкостью, несмотря на определенное снижение прочности. В России 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 жесткостей, к

которым крепили листовую обшивку в основном с помощью контактной и дуговой сварки (ручной и механизированной). В нашей стране эта конструктивно-технологическая схема является основной и единственной.

В последние годы за рубежом ряд фирм разработали и освоили в серийном производстве технологию изготовления крупногабаритных прессованных полых панелей длиной до 24–26 м и шириной 0,55–0,75 м. Ширина прессованных панелей определяется только силой и размерами рабочего пространства прессов. Предполагается, что при увеличении силы прессов до 150–300 МН принципиально возможно изготовление полых панелей шириной до 1,2–1,6 м.

На основе достижений в области производства полых панелей за рубежом разработана принципиально новая конструктивно-технологическая схема изготовления кузовов пассажирских вагонов из алюминиевых сплавов. Весь кузов вагона сварен из длиномерных полых панелей только продольными швами без поперечных стыков и каких-либо дополнительных продольных и поперечных жесткостей. По данным зарубежных источников, 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. 2. Основными подборками являются левая и правая боковые стенки, нижняя рама с полом, крыша и торцовые стенки [11].

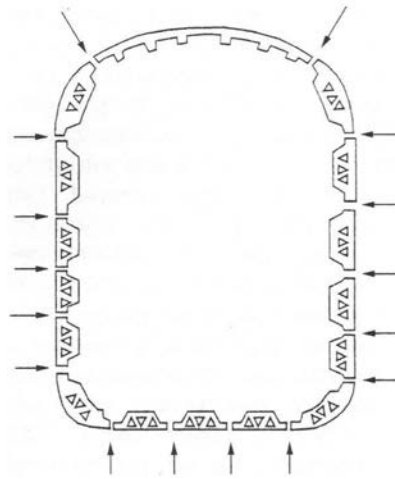


Рисунок 2. Конструктивно-технологическое членение кузова вагона из прессованных полых панелей (стрелками отмечены места сварки продольных швов)

Боковые стенки кузова вагона рационально изготавливать 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 вольфрамовым электродом с присадочной проволокой или без нее переменным синусоидальным током или с прямоугольными разнополярными импульсами. 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.

В связи с очень большими размерами прессованных панелей (до 26 м) проводить подготовку поверхности под сварку обычными способами (травлением, осветлением, пассивированием, шабрением) практически 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, вращающейся металлической щеткой. Такая простейшая подготовка поверхности под дуговую сварку алюминиевых сплавов вызывает необходимость 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. Эти дефекты 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 [13].

В США из свариваемых сплавов серий 6xxx, 5xxx и сплава 7005 изготавливают подвижной состав с получением оптимальных прочностных характеристик и высокой коррозионной стойкости сварных элементов. Конструкционным материалом для силовых элементов в вагостроении являются сплавы 2024, 5083 и 6061, обшивка вагона и его внутренняя отделка выполняются из сплавов 3003 и 6063.

Незаменимым материалом являются алюминиевые свариваемые сплавы марок 5083, 5454 и 6061 в конструкциях грузовых вагонов с различными вариантами их исполнения. При изготовлении вагонов-цистерн для продуктов нефтехимической промышленности преобладают магналиевые сплавы (5052, 5086 и 5454).

Автомобильный транспорт. Одним из основных требований к материалам, применяемым в автомобильном транспорте, является малая

масса и достаточно высокие показатели прочности. Учитывают также коррозионную стойкость и хорошую декоративную поверхность материала.

Высокая удельная прочность алюминиевых сплавов увеличивает грузоподъемность и уменьшает эксплуатационные расходы передвижного транспорта. Высокая коррозионная стойкость материала продляет сроки эксплуатации, расширяет ассортимент перевозимых товаров, включая жидкости и газы с высокой агрессивной концентрацией.

Широкому применению алюминия в конструкции автомобилей взамен стали препятствуют два существенных фактора: стоимость алюминиевых сплавов, которая в 2 раза выше стали; трудности, связанные с использованием его в кузовах в условиях установившегося массового производства (холодная штамповка, сварка, окраска).

Вопросы стоимости могут быть решены в пользу алюминия при больших объемах производства. 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 авиакосмическим комплексом и позволившим ему добиться значительных успехов.

В дальнейшем применение алюминиевых сплавов позволит разрабатывать 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 5 м, кузов которого выполнен из алюминиевого сплава [14].

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

Предполагается, что рост применения алюминия в грузовых и специальных автомобилях будет опережать рост его применения 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 в результате снижения их массы уменьшить, в основном, расход топлива, то в грузовых и специальных автомобилях это дает возможность увеличить полезную нагрузку (на 1–2 т) в пределах разрешенной максимальной массы [15].

Модульный принцип конструирования был использован фирмой Daimler-Chrysler, позволивший создать сварную раму из прессованного алюминиевого сплава для кабины в мусороуборочном автомобиле Esonic. Большим достоинством алюминиевых сплавов является их высокая коррозионная стойкость, что обеспечивает сохранение корпуса автомобиля в рабочем состоянии даже после эксплуатации в течение 20 лет при самых неблагоприятных погодных условиях. Это дополнительно снижает затраты труда и средств на обслуживание.

Шведская фирма Scania выполнила полностью из алюминиевого сплава кузов нового поколения городских автобусов Omni-City. При этом каркасная конструкция из прессованного алюминиевого профиля напоминает концепцию Space-Frame у модели Audi A8. Применение алюминиевого

сплава позволило снизить массу 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 можно эффективно использовать для снижения массы сельскохозяйственной техники (например, путем изготовления из них кабин тракторов и комбайнов). Это актуально в связи с принявшей широкие масштабы эрозией почвы в результате применения тяжелой техники.

В России работы по внедрению алюминия в автотранспорте проводятся фрагментарно и стихийно без правового и финансового участия государственных органов. Это определяется различными факторами, среди которых немаловажным является отсутствие законов, вынуждающих автомобилестроителей, исходя из мирового опыта, расширять использование алюминия в новых моделях. Масса алюминиевых деталей в автомобиле отечественного производства составляет ~15 кг.

В большинстве случаев для корпусов легковых автомобилей алюминиевые сплавы применяют в виде деталей, полученных методом листовой штамповки из листов толщиной от 0,8 до 1,3 мм, для 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 [16, 17].

По данным различных авторов, для листов из алюминиевых сплавов размер зерна должен составлять 1,5–50 мкм. Крупное зерно является причиной появления на деформированных участках детали шероховатой поверхности («апельсиновая корка»), которая портит внешний вид и может быть одной из причин разрывов при глубокой вытяжке. С уменьшением величины зерна (по сравнению с оптимальным размером) возрастает

сопротивление деформированию, увеличивается «пружинение» металла, 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 их прочности выбрали условный предел текучести, который должен быть как можно ниже перед операциями формообразования для обеспечения лучшей штампуемости и уменьшения пружинения при штамповке. После формовки и горячей сушки лакокрасочного покрытия требуется высокий предел текучести для достижения хорошей жесткости деталей и устойчивости против вмятин.

Основные требования к алюминиевым листам для получения наружных деталей корпуса автомобилей холодной 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 $\sigma_{0,2}/\sigma_B < 0,55$;
- способность к повышению $\sigma_{0,2}$ до 250–300 МПа при искусственном старении (состояние Т1), что позволит получить в результате нагрева при окончательной покраске $\sigma_{0,2} = 180$ МПа;
- высокий уровень параметров листов в состоянии Т, определяющих хорошую формуемость: общее относительное удлинение $\delta_{\text{общ}} > 30\%$; равномерное относительное удлинение $\delta_{\text{равн}} > 25\%$; коэффициент вытяжки $n > 0,25$; минимальный радиусгиба $r > 0,7$;
- отсутствие склонности к образованию линий Чернова–Людерса для обеспечения зеркальной поверхности после покраски;

- высокая коррозионная стойкость, в том числе сопротивление нитевидной коррозии.

Анализ патентов и технической литературы показал, что за рубежом в автомобильной промышленности для деталей корпуса применяются два типа алюминиевых сплавов – термически неупрочняемые сплавы систем Al–Mn серии 3xxx, Al–Mg серии 5xxx и термически упрочняемые сплавы систем Al–Cu, Al–Cu–Mg, Al–Mg–Si, Al–Mg–Si–Cu серий 2xxx и 6xxx.

Из термически неупрочняемых сплавов наиболее широко используют листы из сплава марки 5182-0, имеющие в отожженном состоянии мелкозернистую структуру и хорошую штампуемость. Отрицательным свойством сплавов серии 5xxx при холодном формообразовании является быстрая наклепываемость и склонность к образованию линий Чернова–Людерса, что ограничивает их применение для изготовления внутренних деталей корпуса [18].

Эффект упрочнения алюминиевых сплавов при сушке окрашенных деталей (170–200°C) сильно зависит от типа сплава. Для сплавов серии 5xxx сушка практически не изменяет их свойства, а иногда может частично снижать. Термически упрочняемые сплавы, обеспечивающие хороший внешний вид, упрочняются в процессе сушки лакокрасочного покрытия, поэтому они более предпочтительны в качестве материала для внешних деталей корпуса.

Сплавы серии 2xxx (2008 и 2036) имеют низкий эффект старения при сушке краски и уступают по прочности сплавам серии 6xxx (системы Al–Mg–Si и Al–Mg–Si–Cu).

Способность к формуемости при холодной штамповке, свариваемость и коррозионная стойкость листового материала из сплавов серии 6xxx находятся на уровне термически неупрочняемых сплавов системы Al–Mg. Однако при этом после нагрева в процессе сушки краски они обладают более высокой прочностью в результате подстаривания. Детали из сплавов серии 6xxx 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. 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 уровню прочности и пластичности является сплав АВ. Из этого сплава изготавливают листы толщиной 0,3–10,5 мм и поставляют по ГОСТ 21631 [19] 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; габаритные размеры; временное сопротивление разрыву и относительное удлинение в поперечном направлении. При этом размер зерна и предел текучести не регламентируются, хотя $\sigma_{0,2}$ является важной характеристикой для оценки технологичности на стадии получения детали, а также 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, наша промышленность не выпускает листы, удовлетворяющие требованиям автомобилестроения.

Работа, направленная на разработку режима термомеханической обработки листов из серийного сплава АВ для получения листов с регламентированным размером зерна 20–40 мкм и высокими показателями формовки, проведена в ФГУП «ВИАМ» в 2001 г.

В результате проведенного исследования для листов сплава АВ был разработан режим термической обработки, который обеспечивает получение рекристаллизованной структуры с зерном размером 20×40 мкм. 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°C, 14 ч, для получения максимальных свойств: $\sigma_B=350$ МПа; $\sigma_{0,2}=300$ МПа; $\delta=12\%$.

Деформируемые алюминиевые сплавы применяются при изготовлении рам, кабин, кузова, салона автобуса, а также всевозможных емкостей и цистерн. Детали двигателя (поршни, головки и блоки цилиндров) изготавливают из алюминиевого литья, которое имеет высокую теплопрочность.

При изготовлении элементов каркаса, обшивки кузова полуприцепа автофургона, рефрижератора, скотовоза и т.п. перспективным материалом являются алюминиевые сплавы АД31, 1915 (прессованные профили) и сплавы АМг2, АМг5 (лист).

Находят применение алюминиевые сплавы АМц, АМг3 и 1915 при изготовлении отдельных узлов легкового автомобиля (навесные детали, бамперы, радиаторы охлаждения, отопители).

Из прессованных полуфабрикатов сплавов 2014 и 6061 изготавливают балки, рамы тяжелых грузовых автомобилей. Панели и отдельные элементы из сплава 5052 поступают на изготовление кабины. В качестве обшивочного материала кузова грузовика используют лист из сплавов 5052, 6061, 2024, 3003 и 5154. Стойки кузова выполняются из прессованных полуфабрикатов сплавов 6061 и 6063. Магналиевые сплавы серии 5xxx (5052, 5086, 5154 и 5454) являются основным материалом при изготовлении автоцистерн.

Выводы

Алюминиевые свариваемые сплавы являются широко применяемым конструкционным материалом, как в традиционно ориентированных на них отраслях (авиационная промышленность и ракетостроение), 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 – сплавы 6111 и 6061 более высокой прочности. Отечественным аналогом сплавов этой серии является серийный алюминиевый деформируемый сплав АВ. Листы из этого сплава выпускают по ГОСТ 21631, но в нем не регламентируются предел текучести, размер зерна и параметры, определяющие технологичность при холодной штамповке.

В России разработан режим термической обработки, позволяющий получать листы сплава АВ с регламентированной рекристаллизованной структурой и параметрами технологичности, обеспечивающими возможность использования листов для наружных панелей автомобилей. Упрочнение сплава АВ в результате старения в процессе сушки лакокрасочного покрытия обеспечивает получение свойств на уровне стального листа.

Список литературы:

1. Современные технологии авиастроения / Коллектив авторов: под ред. А.Г. Братухина, Ю.Л. Иванова. М.: Машиностроение, 1999. 832 с.
2. Шалин Р.Е., Ефремов И.С., Яровинский Ю.Л., Лукин В.И. Опыт проектирования и изготовления крупногабаритных конструкций из алюминий-литиевых сплавов изделий ракетно-космической техники // Сварочное производство. 1996. № 11. С. 14–18.
3. Братухин А.Г., Редчиц В.В., Лукин В.И. Перспективы использования алюминий-литиевых сплавов для штампованных конструкций летательных аппаратов // Сварочное производство. 1996. № 7. С. 18–21.
4. 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.
5. Захаров В.В. Некоторые проблемы использования алюминий-литиевых сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2003. № 2. С.8–14.
6. 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.

7. 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.
8. Lanping H., Kanghua C., Zigiao Z., Yongping H. Влияние серебра и марганца на характеристики старения и микроструктуру сплава Al–Cu–Li // *Rare Metal Mater. and Eng.* 2005. 34. № 8. P. 1322–1325.
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. 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. Ищенко А.Я., Подбельников С.В., Покляцкий А.Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (обзор) // *Автоматическая сварка*. 2007. № 11. С. 32–38.
14. Триндюк Л.М., Петров Р.Л. Материалы в автомобиле // *Автомобильная промышленность*. 1998. № 6. С. 30–33.
15. Алюминий в производстве грузовых и специальных автомобилей // *Технология машиностроения*. 2001. № 1. С. 73–74.
16. 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.
17. 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.
18. Hirotsuke Inagaki, Toshio Komatsubara. Yield Point Elongation in Al–Mg Alloys // *Aluminium Alloys: ICAA-7*. Apr. 9–14. 2000. Virginia. USA. P. 1303–1308.
19. ГОСТ 21631–76. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов.