

УДК 669.715:669.884

В.В. Антипов<sup>1</sup>, Ю.Ю. Клочкова<sup>1</sup>, В.А. Романенко<sup>1</sup>

## СОВРЕМЕННЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ И АЛЮМИНИЙ-ЛИТИЕВЫЕ СПЛАВЫ

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-195-211

*Представлены основные направления развития в области перспективных алюминиевых деформируемых сплавов для авиационно-космической техники. Рассмотрены серийные сплавы и сплавы нового поколения с усовершенствованными химическим составом, технологиями изготовления и термомеханической обработки полуфабрикатов.*

**Ключевые слова:** стратегические направления, алюминиевые сплавы, структура, механические свойства, коррозионная стойкость, сварка трением с перемешиванием, панель крыла.

V.V. Antipov, Yu.Yu. Klochkova, V.A. Romanenko

### Modern aluminum and aluminum-lithium alloys

*The main directions of development in the area of promising aluminum alloys for aerospace engineering are presented in the article. Production alloys as well as alloys of new generation with improved chemical composition, manufacturing techniques and thermomechanical processing of semi-finished products are discussed.*

**Keywords:** strategic directions, aluminum alloys, structure, mechanical properties, corrosion resistance, friction stir welding, wing panel.

Алюминиевые деформируемые сплавы остаются базовыми конструкционными материалами для перспективных изделий авиационно-космической техники благодаря низкой плотности, комплексу эксплуатационных характеристик, хорошей технологичности, свариваемости и освоенности в металлургическом производстве. Их состав, структура, режимы изготовления, в том числе термомеханической обработки, продолжают постоянно совершенствоваться в соответствии с возрастающими требованиями к конструкции [1–3].

В соответствии со «Стратегическими направлениями развития материалов и технологий их переработки до 2030 г.» по направлениям 8.1. «Высокопрочные свариваемые алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы пониженной плотности с повышенной вязкостью разрушения» и 10.10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные технологии изготовления деформированных полуфабрикатов и фасонных

---

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

отливок из магниевых и алюминиевых сплавов» ведутся работы по разработке новых и освоению существующих материалов [4].

Высокопрочные и сверхпрочные алюминиевые сплавы на базе традиционной системы Al–Zn–Mg–Cu являются одними из основных конструкционных материалов современной авиационно-космической техники благодаря их достаточной технологичности при изготовлении и высоким удельным прочностным показателям для повышения весовой эффективности. Проведенные совместно с Институтом физики металлов УрО РАН работы позволили разработать атлас тонких структур при старении этих сплавов. На основании полученных данных разработан сверхпрочный сплав В-1977 с повышенной вязкостью разрушения, рекомендованный в качестве перспективного конструкционного материала для основных силовых элементов (обшивки и стрингеры верха крыла, силовые стойки, балки и др.) изделий авиационной техники (табл. 1). Высокая прочность полуфабрикатов обеспечивается преимущественно нерекристаллизованной (полигонизованной) структурой (благодаря присутствию дисперсоидов  $ZrAl_3$  с мелким равноосным субзерном (размером  $\sim(2,5-3,5)$  мкм) и выделениями упрочняющей  $\eta'$ -фазы при старении (рис. 1). Высокая вязкость разрушения обеспечивается небольшой объемной долей интерметаллидных включений, ввиду ограничения содержания примесей (Fe и Si) и уменьшенного содержания Cu и Mg [5].

Таблица 1

Свойства высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu

Сплав	$\sigma_b$	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	$K_{Ic}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$
	МПа			
В-1977-Т1	660–680	640–650	8,0–10,5	30,0–31,5
В96ЦЗп.ч.-Т12	$\geq 615$	$\geq 595$	$\geq 8$	$\geq 25$

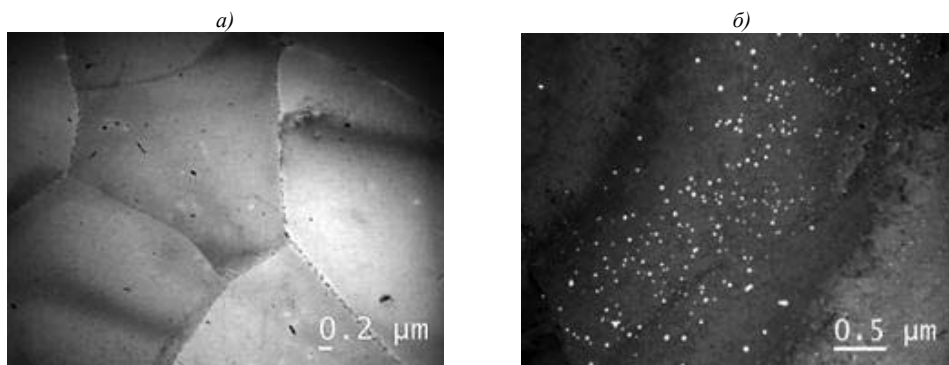


Рис. 1. Тонкая структура полуфабрикатов из сплава В-1977-Т1:  
а – субзерна; б – дисперсоиды

Одним из основных сплавов для деталей внутреннего силового набора современных изделий авиационной техники является высокопрочный сплав 1933. Он освоен в промышленном производстве в виде штамповок и поковок, массивных пресованных полос толщиной до 250 мм, которые широко применяются для деталей новых серийных самолетов Як-130 и SSJ-100.

Детали внутреннего силового набора (шпангоуты, фитинги, кронштейны, нервюры и др.), как правило, изготавливают из поковок и штамповок. Кованые полуфабрикаты имеют сложную форму, массивные сечения, перепады жесткости, поэтому при их термической обработке возникают значительные закалочные остаточные напряжения, которые при последующей механической обработке приводят к недопустимым поводкам, короблению деталей и увеличению трудоемкости изготовления. Для снижения остаточных напряжений в кованых полуфабрикатах применяют их правку обжатием в свежезакаленном состоянии или уменьшают скорость охлаждения при закалке путем охлаждения в горячей воде или растворе полимеров.

Однако эти методы снижения остаточных напряжений имеют недостатки. Так, для правки обжатием требуется дополнительная штамповая оснастка, а замедление охлаждения при закалке может привести к снижению служебных характеристик сплава.

В зарубежной практике, наряду с коваными полуфабрикатами, часто для изготовления сложных по форме деталей используют заготовки в виде массивных плит (например, из сплавов 7085 и 7040), в которых снижение закалочных напряжений осуществляют хорошо освоенным и эффективным методом правки растяжением со степенью остаточной деформации 1–3%. Применение более совершенной технологии закалки плит с регулируемым спрейерным охлаждением также способствует снижению остаточных закалочных напряжений в плитах, что позволит избежать коробления при последующей механической обработке деталей из плит [6–9].

С этой целью проведена работа по разработке технологии изготовления массивных плит толщиной 100 мм из сплава 1933, предлагаемых для применения в качестве альтернативы поковкам (табл. 2) [10].

Более высокие значения прочностных характеристик и пониженная склонность к межкристаллитной коррозии плит толщиной 100 мм из сплава 1933-T22 наблюдаются в средних слоях плиты, имеющих преимущественно нерекристаллизованную, текстурованную структуру по сравнению с поверхностными слоями, в которых преобладает рекристаллизованная структура (рис. 2).

Таблица 2

**Свойства плит толщиной 100 мм из сплава 1933-T22**

Место вырезки образца	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$ , %	КСУ, МДж/м <sup>2</sup> (ПД)	$\gamma$ , МСм/м	РСК, балл	МКК, мм
	МПа						
Поверхность	525	500	16,0	1,27	21,7	4	0,08
1/4 толщины плиты	520	500	16,0	–	21,5	3	–
Середина	540	510	15,0	1,52	22,0	3	Отсутствует

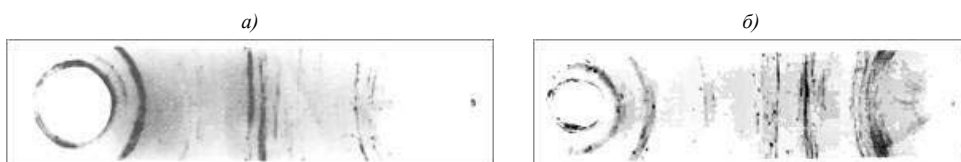


Рис. 2. Рентгенограммы плиты из сплава 1933-T22 по толщине в центре (а) и на периферии (б)

На базе той же системы во ФГУП «ВИАМ» разработан высокопрочный сплав В-1963. Легирование малыми добавками серебра и скандия позволило одновременно повысить прочностные характеристики на 10–20% и сопротивление усталости в 2 раза по сравнению с серийными отечественными и зарубежными сплавами. В отличие от других высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu сплав В-1963 обладает улучшенными характеристиками свариваемости по сравнению с аналогичными сплавами без серебра, а также имеет приемлемый уровень характеристик коррозионной стойкости. Сплав также рекомендован для массивных сильно нагруженных деталей (типа шпангоутов, фитингов, балок и др.) внутреннего набора изделий современной авиационно-космической техники. Для него освоены промышленные технологии изготовления поковок, штамповок, пресованных полос и плит (табл. 3–5) [11].

Таблица 3

**Механические свойства при растяжении и вязкость разрушения полуфабрикатов из сплава В-1963**

Полуфабрикат (термообработка)	Толщина полуфабриката, мм	Направление вырезки образца	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$ , %
			МПа		
Поковки (Т2)	До 100	Д	580	540	12
		В	550	520	5
Штамповки (Т12)	До 100	Д	590	560	15
		В	530	510	4
Пресованные полосы (Т12)	40–70	Д	620	590	11
		В	600	570	4
Катаные плиты (Т2)	100	Д	580	550	9
		В	540	520	3,5

Таблица 4

**Характеристики трещиностойкости и усталости полуфабрикатов из сплава В-1963**

Полуфабрикат (термообработка)	Направление вырезки образца	$K_{Ics}$ , МПа $\sqrt{м}$	СРТУ: $d//dN$ , мм/цикл (при $\Delta K=18,8/31$ МПа $\sqrt{м}$ )	МЦУ: $N_{ср}$ , кцикл (при $K_f=2,6$ ; $R=0,1$ ; $\sigma_{max}=157$ МПа)
Поковки (Т2)	Д	34	0,98*/3,3	250
	В	22	–	–
Штамповки (Т12)	Д	37	0,6/2,3	255
	В	26	–	–
Прессованные полосы (Т12)	Д	38	0,8/2,5	260
Катаные плиты (Т2)	Д	37	0,85/3,46	237
	В	22	–	–

\* При  $\Delta K=21$  МПа $\sqrt{м}$ .

Таблица 5

**Коррозионные свойства полуфабрикатов из сплава В-1963**

Полуфабрикат (термообработка)	Склонность к межкристаллитной коррозии, мм	Склонность к расслаивающей коррозии, балл (не более)	Склонность к коррозии под напряжением $\sigma$ при испытании >90 сут, МПа (не менее)
Поковки (Т2)	0,20	1–2	120
Штамповки (Т12)	0,14	3	120
Прессованные полосы (Т12)	Отсутствует	3	120
Катаные плиты (Т2)	0,10	3	150

На АО «Московский вертолетный завод им. М.Л. Миля» проведено технологическое опробование изготовления деталей из массивных плит толщиной 100–150 мм из сплавов 1933 и В-1963 по серийной технологии путем механической обработки, показавшее хорошую обрабатываемость резанием и полное отсутствие коробления и поволоков в полученных деталях (рис. 3).

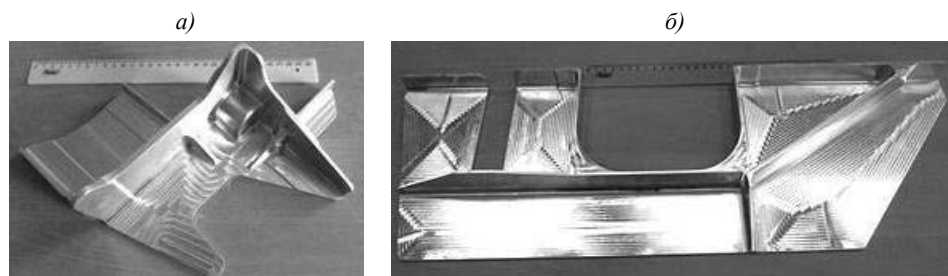


Рис. 3. Детали, изготовленные из плит сплавов 1933 (а) и В-1963 (б)

В зарубежных самолетных конструкциях в последнее время все большее распространение получили сплавы системы Al–Mg–Si. При низком или среднем уровне прочности они обладают высокой коррозионной стойкостью, хорошей пластичностью в горячем и холодном состоянии, свариваемостью; легко поддаются холодной гибке, штамповке и глубокой вытяжке, цветному анодированию, эмалированию. В зарубежной промышленности они применяются в автомобилестроении и авиационно-космической технике. В самолетах различных модификаций из сплавов серии бxxx выполняются сварные панели фюзеляжа, подвесные топливные баки, трубопроводы и другие детали бортовых систем.

В ВИАМ разработан среднепрочный высокотехнологичный коррозионно-стойкий свариваемый сплав В-1341 системы Al–Mg–Si (типа АВ), дополнительно легированный модифицирующими добавками кальция, который измельчает зерно и снижает склонность к образованию горячих трещин [12]. В виде листов толщиной 0,6–3,0 мм сплав В-1341 применен в конструкции российского самолета SSJ-100 для изготовления трубопроводов, в том числе сварных, и патрубков сложной конфигурации элементов системы кондиционирования воздуха; элементов законцовки и лобовика крыла.

С целью расширения применения сплава разработана технология изготовления холоднодеформированных тонкостенных труб диаметром 10–50 мм с толщиной стенки 1,0–1,5 мм для гидравлических систем и систем кондиционирования воздуха взамен сплавов группы АМг (рис. 4, а). Структура труб рекристаллизованная, мелкозернистая с равномерно распределенными мелкодисперсными фазовыми выделениями, со средним размером зерна 20–40 мкм (рис. 4, б).



Рис. 4. Холоднодеформированные тонкостенные трубы: общий вид (а) и микроструктура (б –  $\times 50$ )

Трубы обладают высокой пластичностью, что позволяет изготавливать из них элементы конструкции методами холодной деформации, при этом материал не нагартовывается, тогда как при изготовлении деталей

из сплавов группы АМг, как правило, необходимо проводить межоперационные отжиги из-за наклепа материала (табл. 6).

Таблица 6

**Механические свойства холоднодеформированных тонкостенных труб из сплава В-1341 в сравнении со сплавами группы АМг**

Сплав	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
В-1341-Т	280–285	150–170	20,0–23,0
В-1341-Т1	355–370	310–330	13,0–15,5
АМг2М	155	60	10
АМг3М	180	70	15

Перспективной группой являются алюминий-литиевые сплавы, которые отличаются пониженной плотностью в сравнении с традиционными алюминиевыми сплавами, при этом обладают повышенной жесткостью и прочностью, хорошей свариваемостью.

К настоящему времени создан целый класс алюминий-литиевых сплавов различного назначения, полный технологический цикл изготовления которых – начиная от плавки и литья и заканчивая термической обработкой деформированных полуфабрикатов – освоен на Каменск-Уральском металлургическом заводе (ОАО «КУМЗ») – единственном производителе и поставщике алюминий-литиевых сплавов в России, способном производить до 1000 тонн этих сплавов в год [13].

Высокотехнологичный среднепрочный высокомодульный алюминий-литиевый сплав 1441 системы Al–Cu–Mg–Li обладает высокой технологической пластичностью (холодной рулонной прокаткой получают тонкие листы толщиной до 0,3 мм), высокими ресурсными характеристиками (сопротивление усталости и трещиностойкость) и рекомендуется как альтернатива сплаву 1163-АТ для обшивки фюзеляжа центральной части изделия (листы), стрингерного набора (прессованные профили), а также для элементов внутреннего набора. Применение листов из сплава 1441 в планере самолетов Бе-200 и Бе-103 обеспечило повышение весовой эффективности конструкции на 10% [14].

Особый научно-практический интерес представляют сплавы системы Al–Cu–Li, которые обладают наилучшим среди алюминий-литиевых сплавов сочетанием прочности и пластичности [15]. Новые российские высокопрочные свариваемые сплавы третьего поколения В-1461 и В-1469 разработаны на базе этой системы в качестве альтернативы высокопрочному сплаву В95п.ч./о.ч. (табл. 7).

Сплав В-1461 применен в изделиях военной авиационной техники (ПАО «Компания «Сухой») в виде плит, из которых изготовлены детали силового набора (шпангоуты, лонжероны, стенки, нервюры и др.) [16].

Таблица 7

**Свойства высокопрочных алюминий-литиевых сплавов**

Сплав	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$d$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma_b/d$	РСК, балл	$K_{Ic}$ , МПа $\sqrt{м}$
В-1461	540	490	2,63	20,5	3–4	40
В-1469	580	560	2,67	21,7	3–4	30
В95п.ч./о.ч.	490	420	2,85	17,8	5–6	30

Высокопрочный высокомодульный ( $E=78$  ГПа) сплав В-1469 пониженной плотности ( $d=2,67$  г/см<sup>3</sup>) – первый в России алюминий-литиевый сплав, легированный серебром. По удельной прочности превосходит существующие алюминиевые деформируемые сплавы и обладает высокими характеристиками коррозионной стойкости, трещиностойкости и усталостной долговечности, сваривается всеми основными видами сварки [17].

Перспективно применение алюминий-литиевых сплавов в элементах конструкции, которые работают в условиях знакопеременных нагрузок, при которых характеристики надежности материала определяются условиями зарождения и распространения трещин.

Применение для сплава В-1461 разработанного ступенчатого режима старения, а для сплава В-1469 смягчающего одноступенчатого режима позволило повысить характеристики трещиностойкости листов (на ~30%) при сохранении высокого уровня прочности. В табл. 8 приведены свойства катаных полуфабрикатов из этих сплавов в сравнении с зарубежными сплавами 2060 и 2199, применяющимися для обшивки фюзеляжа [18, 19].

Таблица 8

**Сравнительные свойства листов из сплавов В-1461, В-1469, 2199 и 2060**

Сплав	Направление вырезки образца	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$K_I^y$ , МПа $\sqrt{м}$ (при $B=200$ мм)
В-1461-ТХ	Д	530	460	9	77
	П	520	450	11	79
В-1469-ТХ	Д	510	490	10,5	74
	П	550	510	–	85/120*
2199-Т8Е74	Д	415	355	8	100**
	П	430	345	6	–
2060-Т8Е30	Д	480	435	12	128**

\* Испытания во ФГУП «ЦАГИ» при ширине образца 750 мм.

\*\* Ширина образца 400 мм (зарубежные данные).

В настоящее время существуют два варианта исполнения металлических панелей крыла самолетов – это катаные плиты с механически прикрепленными к ним стрингерами и монолитные прессованные панели из высокопрочных алюминиевых сплавов. При этом наблюдается общемировая тенденция к применению в конструкции крыла монолитных



прессованных панелей из алюминий-литиевых сплавов. В СССР впервые длинномерные прессованные панели из сплавов 1161, 1163 и В95 были применены для крыльев самолетов ОКБ Антонова (Ан-124, Ан-225 и Ан-22) [20]. За рубежом применяются как катаные плиты с прикрепленными к ним стрингерами, так и монолитные прессованные панели из высокопрочных сплавов серии 7xxx системы Al–Zn–Mg (7055 – аналог сплава В96Ц3; 7475 – аналог сплава В95о.ч.; 7178 и др.) и алюминий-литиевого сплава 2099 [21].

В отечественной практике имеется положительный опыт изготовления совместно с компанией Airbus сварной ребристой панели фюзеляжа из среднепрочного сплава 1424 системы Al–Mg–Li с использованием лазерной сварки, которая при испытании выдержала 75 тыс. циклов без разрушения [22].

Основным материалом для верхней панели крыла отечественных самолетов является высокопрочный сплав В95о.ч.-Т2. Он относится к несвариваемым сплавам из-за высокой склонности к образованию горячих трещин. Поэтому при изготовлении из него конструкции панели крыла применяют болтовое и заклепочное соединение.

Как известно, замена механического (болтового и клепаного) соединения на сварное позволяет снизить массу конструкции. Однако изготовление сварных конструкций из высокопрочных алюминий-литиевых сплавов связано с большими сложностями вследствие их склонности к образованию горячих трещин, а также разупрочнению под воздействием термического цикла сварки плавлением. Повысить эксплуатационные характеристики сварных соединений возможно путем применения новых технологических процессов, таких как различные методы сварки давлением, в которых формирование шва происходит без расплавления металла. Именно таким процессом является сварка трением с перемешиванием (СТП), которая позволяет уменьшить зону термического влияния (ЗТВ), что обеспечивает такие преимущества, как меньшее структурно-фазовое изменение в этой зоне, меньшее разупрочнение термоупрочняемых алюминиевых сплавов, а также малые остаточные напряжения и деформации. Сварка трением с перемешиванием обладает рядом положительных свойств – так как она происходит в твердом состоянии без расплавления, то в зоне обработки образуются мелкая рекристаллизованная равномерная структура, небольшая зона термического влияния, отсутствие пористости и горячих трещин [23, 24].

С учетом вышесказанного и с целью реализации основополагающего принципа неразрывности материала, технологии и конструкции совместно с ПАО «Туполев» разработана концепция сварной панели верха крыла из сплава В-1469 (рис. 5). Для этого изготавливали промышленные прессованные панели, которые сваривали с использованием СТП, вследствие чего получили фрагменты панели крыла с высоким уровнем механических и коррозионных свойств (табл. 9).

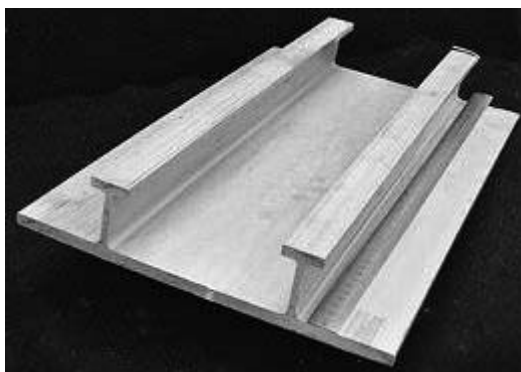


Рис. 5. Прессованная панель из сплава В-1469

Таблица 9

**Свойства прессованных панелей из сплава В-1469-Т1  
в сравнении со сплавами-аналогами**

Свойства	Значения свойств (не менее) для сплава		
	В-1469-Т1	В950.ч.-Т2	2099-Т83
$\sigma_B$ , МПа	630	500	560
$\sigma_{0,2}$ , МПа	600	430	525
$\delta$ , %	8,4	8,0	7,0
$E$ , ГПа	78	71	78
$\sigma_B/d$ , км (усл. ед.)	23,6	17,5	21,3
$\sigma_{кв}$ , МПа	450	170	—

Проведенные во ФГУП «ЦАГИ» испытания показали, что применение панелей из сплава В-1469-Т1 взамен сплава В950.ч.-Т2 позволит снизить массу крыла на ~15% за счет повышенной удельной прочности сплава, повысить устойчивость и несущую способность. Прочность сварного соединения при использовании сплава В-1469 составляет 0,7 от прочности основного материала при высоком уровне пластичности [25, 26].

С целью повышения материалоеффективности процессов изготовления деталей изделий авиационной техники во ФГУП «ВИАМ» также проводятся работы по разработке технологий изготовления высокоточных штамповок из сплава В-1469 методами изотермической деформации, позволяющие по сравнению с традиционными технологиями получения поковок и штамповок повысить КИМ в 2–3 раза и снизить трудоемкость при последующей механической обработке сложноконтурных деталей (рис. 6) [27].

Современные требования к материалам становятся все более жесткими. Несмотря на все преимущества разработанных алюминий-литиевых сплавов перед разработчиками стоит задача повышения характеристик трещиностойкости при сохранении высокого уровня прочности и коррозионной стойкости. В связи с этим актуальны начатые во ФГУП «ВИАМ»

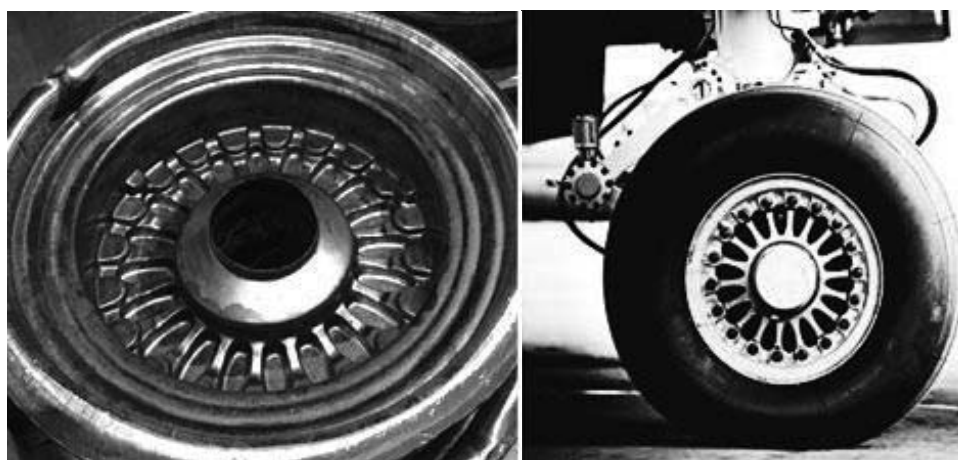


Рис. 6. Колесо шасси, выполненное изотермической штамповкой, из сплава В-1469

работы по разработке новых высокопрочного и высокоресурсного свариваемых сплавов системы Al–Cu–Li с повышенными характеристиками трещиностойкости.

Сочетание высоких характеристик прочности и вязкости разрушения в этих сплавах обеспечивается благодаря содержанию минимального количества примесей, введению небольшого количества редкоземельных элементов-модификаторов, добавке серебра, пониженному содержанию лития, разработке усовершенствованной технологии изготовления полуфабрикатов, в том числе режима термической обработки, выбранного на основе построенных диаграмм фазовых превращений при старении.

Совместно с ОАО «КУМЗ» разработаны опытно-промышленные технологии изготовления катаных, прессованных и кованных полуфабрикатов из новых высокопрочного (В-1480) и высокоресурсного (В-1481) сплавов. Применение полуфабрикатов для силового набора и обшивки фюзеляжа позволит снизить массу изделий за счет повышенной на 15–20% удельной прочности при сохранении высокого уровня трещиностойкости по сравнению с серийными сплавами-аналогами В950.ч.-Т2 и 1163-Т (табл. 10).

Таблица 10

**Свойства полуфабрикатов из сплавов В-1480 и В-1481**

Сплав	$d$ , г/см <sup>3</sup>	$E$ , ГПа	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B/d$	$K_{Ic}^Y / K_{Ic}^Y$ , МПа $\sqrt{м}$ (при $B=400$ мм)	КР, МПа
			МПа				
В-1480	2,69	78	600	570	22,3	40/-	250
В-1481	2,68	77	490	440	18,2	-/125	300

Перспективными легирующими элементами для алюминиевых сплавов являются редкоземельные металлы. Их малые добавки позволяют существенно трансформировать структуру деформированных полуфабрикатов, обеспечивая тем самым повышенные характеристики прочности и вязкости разрушения. Самым эффективным модификатором для алюминиевых сплавов является скандий. За счет формирования фазы типа  $Al_3Sc$ , обладающей достаточно высоким несоответствием параметров решетки с матрицей, образующиеся фазы эффективно блокируют движение дислокаций. Разработан свариваемый термически неупрочняемый сплав В-1579 на основе системы  $Al-Mg-Sc$ , прочностные характеристики которого до 2 раз выше, а уровни коррозионной стойкости и технологичности при сварке соответствуют сплаву-аналогу АМгб.

На ближайшую перспективу развития алюминиевых деформируемых сплавов планируется проведение исследований по изготовлению на базе этих сплавов прототипов конструктивно-подобных элементов с применением сварки для реализации концепции легких сварных конструкций авиационной техники.

В отечественном самолетостроении основным материалом для обшивки фюзеляжа являются листы из сплава 1163-АТВ типа «дуралюмин» на основе традиционной системы  $Al-Cu-Mg$ , а за рубежом – из сплава 2524-Т351. Однако в связи с постоянно возрастающими требованиями к ресурсу, весовой эффективности и надежности этого критического элемента планера самолета необходимо повышение уровня служебных характеристик, в том числе показателей вязкости разрушения ( $K_c^y$ ) и усталостной долговечности (МЦУ). В результате разработан сплав марки В-1167 с повышенными на 10–15% характеристиками выносливости, пластичности и трещиностойкости по сравнению со сплавом 1163.

Для уменьшения количества стыков по окружности фюзеляжа требуются листы больших габаритов (шириной – до 2500 мм), чем серийно выпускаемые (шириной – не более 2000 мм). В настоящее время на современном прокатном комплексе ОАО «КУМЗ» осваивается технология изготовления широких (до 3,2 м) обшивочных листов из перспективных алюминиевых и алюминий-литиевых сплавов [13].

Аддитивные технологии являются одними из самых перспективных способов получения деталей и заготовок из различных конструкционных материалов. Их внедрение в технологический процесс позволяет не только сократить затраты, связанные с низким КИМ при традиционном металлургическом переделе, но и существенно повысить выход годных изделий при изготовлении сложноконтурных элементов [1, 28]. Исследования материала, синтезированного из сплава АК9ч., показывают, что по уровню механических характеристик он не уступает материалу, полученному

литьем и последующей упрочняющей термической обработкой [29], что позволяет рассматривать данные технологии в качестве потенциальной замены технологий литья для ряда элементов. Мировые исследования показали принципиальную возможность изготовления различных деталей из металлических порошков различных сплавов [30–33], кроме того, некоторые двигателестроительные корпорации применяют в двигателях детали, полученные с использованием технологий 3D-печати.

Для ряда агрегатов требуется применение сложных разнотолщинных отливок из алюминиевых сплавов, которые затруднительно получить традиционными способами литья [34, 35]. В настоящее время производителями оборудования для технологии селективного лазерного синтеза (СЛС) предлагается ряд композиций алюминиевых сплавов на базе традиционных систем легирования. Большой популярностью пользуются порошки марки  $AlSi10Mg$ , представляющие собой классический силумин с малой добавкой магния [32, 36]. Имеющиеся технологии позволяют получать алюминиевые порошки для аддитивных технологий различными способами, при этом от качества исходных компонентов во многом зависят окончательные свойства деталей. Большинство алюминиевых сплавов являются термически упрочняемыми, т. е. для достижения определенного комплекса служебных характеристик необходимо проведение операции упрочняющей термической обработки, в процессе которой формируются ультрадисперсные частицы упрочняющих фаз. Отличительной особенностью технологии СЛС являются повышенные скорости охлаждения в сравнении с традиционным металлургическим переделом, что позволяет формировать неравновесную структуру, поэтому для понимания процессов фазовых превращений в синтезированном материале важно изучение эволюции структуры в ходе термической обработки. Сотрудники ФГУП «ВИАМ» готовы решать любые задачи, предъявляемые к конструкции современных изделий, и уделяют большое внимание аддитивным технологиям применительно к авиационно-космическому материаловедению. В настоящее время разрабатывается новый алюминиевый сплав на основе системы  $Al-Mg-(Si)$  для получения металлопорошковых композиций, применяющихся для получения деталей с использованием СЛС. Определены оптимальные режимы газовой атомизации, позволяющие получать порошок с высокой чистотой по газовым примесям (водород и кислород) и пригодный для применения в аддитивных технологиях. Применение металлопорошковой композиции из нового сплава при изготовлении элементов конструкции с использованием аддитивных технологий позволит повысить технологичность производства и КИМ на 10–15% за счет уменьшенных припусков и сокращения брака [37].

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.
2. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 5–20.
3. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 157–167.
4. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
5. Сенаторова О.Г., Антипов В.В., Бронз А.В., Сомов А.В., Серебренникова Н.Ю. Высокопрочные и сверхпрочные сплавы традиционной системы Al–Zn–Mg–Cu, их роль в технике и возможности развития // Технология легких сплавов. 2016. №2. С. 43–49.
6. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 238 с.
7. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А. Высокопрочные алюминиевые сплавы // Цветные металлы. 2013. №9. С. 63–65.
8. Daokui Xu, Paul A. Rometsch, Hua Chen et al. Effect of solution treatment on microstructure and mechanical properties of thick plate aluminum alloy 7150 // Proc. of ICAA-12. Yokohama. Japan. 2010. P. 1101–1106.
9. Li Jun-peng et al. Microstructure evolution of 7050 aluminum alloy during hot deformation // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2010. Vol. 20. P. 189–194.
10. Селиванов А.А., Вахромов Р.О., Сетюков О.А., Попова О.И. Структура и свойства катаных плит из высокопрочного алюминиевого сплава 1933 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. №6. С. 41–45.
11. Селиванов А.А., Ткаченко Е.А., Попова О.И., Бабанов В.В. Высокопрочный алюминиевый деформируемый свариваемый сплав В-1963 для деталей силового набора изделий современной авиационной техники // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-1-1.
12. Клочков Г.Г., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Влияние температуры деформации на структуру и свойства пресованных профилей сплава В-1341 системы Al–Mg–Si // Труды ВИАМ: электрон. науч.-

- технич. журн. 2016. №9. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-1-1.
13. Скорняков В.И., Антипов В.В. Инновационный характер сотрудничества ОАО «КУМЗ» и ФГУП «ВИАМ» // Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 11–14.
  14. Антипов В.В. Технологичный алюминий-литиевый сплав 1441 и слоистые гибридные композиты на его основе // Металлург. 2012. №5. С. 36–39.
  15. Prasad N.E., Gokhale A., Wanhill R.J.H. Aluminium-lithium alloys: processing, properties, and applications. 2013. 608 p.
  16. Оглодков М.С., Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И., Филатов А.А., Попова Ю.А. Перспектива применения плит из высокопрочного сплава В-1461 пониженной плотности в самолетных конструкциях // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2014. №2. С. 16–22.
  17. Клочков Г.Г., Грушко О.Е., Клочкова Ю.Ю., Романенко В.А. Промышленное освоение высокопрочного сплава В-1469 системы Al–Cu–Li–Mg // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №7. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-1-1.
  18. Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б., Оглодков М.С., Клочкова Ю.Ю. Высокопрочные сплавы системы Al–Cu–Li с повышенной вязкостью разрушения для самолетных конструкций // Цветные металлы. 2013. №9. С. 66–71.
  19. Шамрай В.Ф., Клочкова Ю.Ю., Лазарев Э.М., Гордеев А.С., Клочков Г.Г., Сиротинкин В.П. Структура листов сплава В-1469 с повышенными характеристиками вязкости разрушения // Металлы. 2015. №1. С. 76–82.
  20. Фридляндер И.Н. Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970–2000 и 2001–2015 гг. // Технология легких сплавов. 2002. №4. С. 12–17.
  21. Bois-Brochu A., Tchitembo Goma F.A., Blais C. et al. Al–Li alloy 2099-T83 extrusions: static mechanical properties, microstructure and texture // Advanced Materials Research. 2012. Vol. 409. P. 29–34.
  22. Хохлатова Л.Б., Лукин В.И., Колобнев Н.И., Иода Е.Н. и др. Перспективный алюминиево-литиевый сплав 1424 для сварных конструкций изделий авиакосмической техники // Сварочное производство. 2009. №3. С. 7–10.
  23. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Сварка и пайка в авиакосмической промышленности // Сварка и безопасность: матер. Всеросс. науч.-практич. конф., 2012. С. 21–30.
  24. Лукин В.И., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д., Скупов А.А. Влияние термической обработки на характеристики сварных соединений

- высокопрочных алюминийлитиевых сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №4. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-6-6.
25. Романенко В.А., Клочкова Ю.Ю., Клочков Г.Г., Бурляева И.П. Прессованная панель из алюминий-литиевого сплава В-1469 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №8. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-1-1.
26. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмокомпозиты на их основе // Цветные металлы. 2016. №8. С. 86–91.
27. Антипов В.В., Клочкова Ю.Ю. Перспективные свариваемые алюминий-литиевые сплавы третьего поколения // Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники: докл. II Междунар. науч.-технич. конф. М.: ВИАМ, 2015. С. 2.
28. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.03.2017).
29. Евгенов А.Г., Рогалев А.М., Неруш С.В., Мазалов И.С. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №2. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2.
30. Thijs L., Kempen K., Kruth J.-P., Humbeeck J. Van. Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder // Acta Mater. 2013. Vol. 61. P. 1809–1819.
31. Bremen S., Meiners W., Diatlov A. Selective Laser Melting // Laser Technik Journal. 2012. Vol. 9. No. 2. P. 33–38.
32. Sercombe T., Schaffer G. Rapid manufacturing of aluminum components // Science. 2003. Vol. 301 (5637). P. 1225–1227.
33. Guan K., Wang Z.M., Gao M. Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel // Materials & Design. 2013. Vol. 50. P. 581–586.
34. Илларионов Э.И., Колобнев Н.И., Горбунов П.З., Каблов Е.Н. Алюминиевые сплавы в авиакосмической технике. М.: Наука, 2001. 192 с.
35. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.



36. Read N., Wang W., Essa K. et al. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development // *Materials & Design*. 2015. Vol. 65. P. 417–424.
37. Рябов Д.К., Зайцев Д.В., Дынин Н.В., Иванова А.О. Изменение структуры сплава АК9ч., полученного селективным лазерным спеканием, в процессе термической обработки // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2016. №9. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 20.03.2017). DOI: 10.18557/2307-6046-2016-0-9-3-3.