



Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970–2000 и 2001–2015 гг.

И.Н. Фридляндер

Октябрь 2001

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем 30 научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в 4 филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

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

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

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

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Технология
легких сплавов», № 4, 2002 г.

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

Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970–2000 и 2001–2015 гг.

И.Н. Фридляндер

Всероссийский институт авиационных материалов

Алюминиевые сплавы остаются основным конструкционным материалом авиакосмической техники. Объем их применения в настоящее время составляет около 70% от общего количества конструкционных материалов в планере самолетов. Эти сплавы также широко применяются во многих типах ракет, морских и речных судов, автомобилей, вагонов скоростных поездов. Для получения хорошей весовой эффективности в сочетании с длительным ресурсом работы и надежностью в эксплуатации алюминиевые сплавы должны обладать комплексом необходимых характеристик: высокой прочностью, хорошей коррозионной стойкостью, высоким сопротивлением повторным нагрузкам и малой скоростью развития трещины усталости.

За последние годы созданы значительно улучшенные алюминиевые сплавы и композиционные материалы на основе алюминия, и в новых поколениях авиационной техники и ракет будут применяться усовершенствованные варианты сплавов и материалов.

Крылья самолетов

В 1970–1999 гг. крылья пассажирских и транспортных самолетов изготавливались из сплава В95п.ч. (7475) – верхняя часть, и сплавов 1163 или 1161 (типа 2524) – нижняя часть (табл. 1). При этом в качестве заготовки в КБ Туполева и Ильюшина использовались плиты из сплавов В95п.ч. и 1163, а в КБ Антонова – прессованные панели из сплавов 1161 и В95п.ч. Шли длительные дискуссии о преимуществах и недостатках этих двух видов заготовок, но каждое КБ осталось верно своим привязанностям.

Таблица 1.

Свойства сплавов В96ЦЗ-Т12, В95о.ч.-Т2, 7055 (плиты, США)

Сплав, состояние	σ_B	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{0,2}^{сж}$	E , ГПа	δ , %	$K_{1с}$, МПа·м ^{1/2}	$\sigma_{кр}$, МПа	РСК, балл
	МПа							
В96ЦЗ-Т12 (7055)	650	625	630	70,5	7	26,5	110	<5
7055-Т77 (плиты; США)	630	610	610	70,0–73,0	7	24	110	<5
В95о.ч.-Т2(7475)	510	430	640	70,0	7	34	165	<5

Примечание: $\sigma_{кр}$ – напряжение коррозионного растрескивания; РСК – расслаивающая коррозия.

Верх и низ крыльев истребителей делали из сплава В95п.ч.-Т2. В качестве заготовок применяли прессованные панели, вафельные штампованные панели или плиты. В настоящее время взамен сплава В95п.ч. в распоряжение конструкторов может быть представлен сплав В96ЦЗ (1965). Этот сплав существенно превосходит сплав В95п.ч. по прочностным характеристикам (см. табл. 1) [1], а также по малоцикловой усталости, при сохранении достаточно высоких значений вязкости разрушения, коррозионной стойкости и пластичности.

В нашей стране этот сплав был разработан в 1970 г. Он широко используется для изготовления корпусов твердотопливных ракет диаметром около 1 м и высотой 6 м. Сплав характеризуется большой технологичностью – корпуса ракет получают на вертикальном прессе за один проход. Однако в отечественных самолетах этот сплав не применялся из-за отрицательного отношения части руководства ЦАГИ к высокопрочным сплавам.

Следует отметить, что в течение последних пяти лет фирма «Боинг» изготавливает верх крыльев самолета «Боинг-777» из плит сплава 7055 фирмы «Алька» (см. табл. 1), который представляет собой точную копию сплава В96ЦЗ. Лишь по содержанию меди в сплаве 7055 фирма «Алька» отошла (по патентным соображениям) от точного состава сплава В96ЦЗ. Кстати, состав сплава В96ЦЗ был давно опубликован мною в журнале «Металловедение и термическая обработка металлов», который переводится в США. Этот журнал на английском языке был обнаружен мною в библиотеке фирмы «Алька». Эксплуатация самолета «Боинг-777» происходит без всяких неприятностей. Это дает лишние основания для того,

чтобы в будущем полностью перейти от сплава В95п.ч.-Т2 к сплаву В96Ц3 при изготовлении верха крыльев больших самолетов, а также верха и низа крыла истребителей.

Однако, если изготовление из этого сплава прессованных панелей и заготовок не вызывает больших трудностей у металлургических заводов, то с изготовлением плит (а это важнейший полуфабрикат) дело обстоит иначе. Для решения этой проблемы на Самарском металлургическом заводе (СМЗ) должно быть освоено изготовление плоских слитков больших габаритов.

В настоящее время на ВСМПО (г. Верхняя Салда) освоена отливка круглого слитка из сплава В96Ц3 $\varnothing 680$ мм. По заказу фирмы «Эрбас-Бритиш азроспейс» из этого слитка изготовлены катаные плиты толщиной 15 и 30 мм и прессованные панели длиной 12 м с законцовкой. Проводится оптимизация их термической обработки, исследования структуры и свойств совместно с ВИАМ. Альтернативой сплаву В96Ц3 могут быть алюминиево-литиевые сплавы типа 1464 или 1468, которые могут быть использованы для верха и низа крыла самолетов. Для прессованных панелей низа крыла может быть применен улучшенный вариант сплава 1161, а именно сплав 1165.

Таким образом, в 2003–2015 гг. для крыльев самолетов взамен сплавов В95, 1163, 1161 придут существенно более перспективные сплавы В96Ц3 и типа 1464, 1468.

Фюзеляжи самолетов

Фюзеляжи самолетов в 1970–2000 гг. изготавливали в виде клепаной конструкции: листовая обшивка из сплава 1163 – аналог современного американского сплава 2524 (табл. 2), или из сплава Д19 для греющихся машин. Для стрингеров в разных машинах использовались сплавы 1163, В95п.ч.-Т2 и алюминиево-литиевый 1420. Фюзеляжи самолетов вертикального взлета Як-36 и Як-38 целиком изготавливали из сплава 1420, что дало большой выигрыш в весе. Еще больший выигрыш в весе (24%) был достигнут при изготовлении сварного фюзеляжа самолета МиГ-29 из алюминиево-литиевого сплава 1420 (рис. 1).

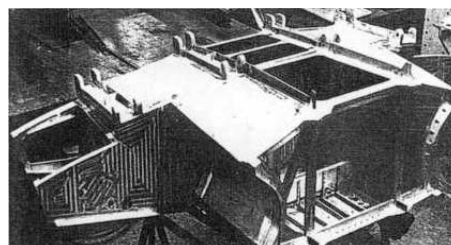
Таблица 2.
Свойства листов из сплавов 1163 и 2524

Характеристики	Направление	1163		2524
		0,5–1,9 мм	2,0–10,0 мм	1,6<a<8,0 мм
Толщина плакировки, %		4,5–6,0	2,0–4,5	2
σ_B , МПа	Д	–	–	420
	П	405	425	420
δ , %	Д	–	–	–
	П	13	11	15
E , ГПа	Д, П	66,6–71,0	67,0–71,0	
K_c^y , МПа·м ^{1/2}	Д–П	–	130	130
СРТУ, мм/цикл	Д, П	–	2,2	3
N_p , кцикл	Д	–	100	100
$\sigma_{кр}$, МПа	П–Д	–	≥250 в течение суток	≥250 в течение 30– 90 суток

Примечание: Д – продольное направление, П – поперечное, K_c^y – вязкость разрушения; СРТУ – скорость роста усталостной трещины при $\Delta K=30$ МПа·м^{1/2}; N_p – число циклов до разрушения при испытаниях на малоцикловую усталость образцов с концентратором ($K_t=2,6$) при $\sigma=160$ МПа; $\sigma_{кр}$ – напряжение коррозионного растрескивания.



а)



б)

Рисунок 1. Применение сплава 1420 в сварной конструкции МиГ-29М (а), сварной топливный бак (б)

Эффективность:

Снижение массы конструктивных элементов на 24%:

- 12% за счет меньшей плотности сплава;
- 12 % за счет устранения болтов, заклепок и герметика.

Свойства штамповок

Свойства	Напр. (Д)	Напр. (В)
σ_B , МПа	412	333
$\sigma_{0,2}$, МПа	255	245
δ , %	7	3
МЦУ, кцикл при $K_t=2,6$; $R=0$; $\nu=3$ Гц, $\sigma_{max}=98$ МПа	145	–

K_{1c} , МПа $\sqrt{м}$	38	19
$d(2l)/dN$, мм/цикл при ($R=0$; $\nu=3$ Гц) $\Delta K=19,0$ МПа $\sqrt{м}$	0,85	–

Фирма «Даймлер-Крайслер» вместе с ВИАМ, Каменск-Уральским металлургическим заводом (КУМЗ) и немецким металлургическим заводом «Хуговенс» в Германии ведет работы по опробованию сплава 1424 и 1468 для изготовления фюзеляжей большого европейского пассажирского самолета А-380 (сплав 1424 – дальнейшая модификация сплава 1420) (табл. 3) [2] с использованием лазерной сварки для приварки стрингеров. На заводе «Хуговенс» из слитков КУМЗ изготовлены листы для обшивки фюзеляжа толщиной 4,5 мм и шириной 2600 мм. Эти листы проходят сертификацию в Германии и в ВИАМ. Широкое применение для изготовления фюзеляжей самолетов российской фирмы Бериева нашел высокоресурсный и высокотехнологичный алюминиево-литиевый сплав 1441. Это единственный алюминиево-литиевый сплав, который не вызывает никаких трудностей при прокатке листов вплоть до толщины 0,4–0,5 мм.

Таблица 3.
Свойства листов из алюминиевых сплавов

и композиционного материала СИАЛ (материалы обшивки)

Сплав	h , мм	d , г/см ³	Состояние	E	$E_{сж}$	σ_b	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{0,2}^{сж}$	δ , %	K_c^y , МПа $\cdot м^{1/2}$	СРТУ, мм/цикл	$\sigma_{кр}$, МПа	МКК*, мм
				ГПа		МПа							
1163-АТ	1,5	2,78	Т, Д П	70	–	<u>435</u>	<u>310</u>	–	<u>22</u>	<u>104</u>	1,6	–	нет
						435	300		21	–			
АД37 (6013)	1,6	2,71	Т6, Д	70	74	<u>400</u>	<u>365</u>	<u>400</u>	<u>15,0</u>	<u>120</u>	2,6	–	120
						395	345	390	15,5	102			
1424	4,8	2,52	ТХ, Д П	77	–	<u>475</u>	<u>350</u>	–	<u>6,8</u>	<u>91</u>	2,0	–	нет
						480	310		11,8	93			
			ТХ+95°С, Д 300 ч, П			<u>490</u>	<u>365</u>	–	<u>6,8</u>	–			140
					495	335		9,9	–	–	–	–	нет
СИАЛ-2	1,5–2,0	2,45	Д П	55	57	<u>830</u>	<u>300</u>	<u>320</u>	<u>4,5</u>	99	0,2	не склонен	–
						530	240	250	4,5	53			
СИАЛ-3	1,5–2,0	2,5	Д П	55	–	<u>630</u>	<u>280</u>	<u>280</u>	<u>5,0</u>	–	0,4	не склонен	–
						600	260	–	4,5				

* Глубина межкристаллитной коррозии.

Примечание: СИАЛ-2 – стеклоармирование 70:30% в направлениях Д и П соответственно; СИАЛ-3 – армирование 50:50%; K_c^y материала СИАЛ-2 определяли при $B=140$ мм, а алюминиевых сплавов – при $B=400$ мм.

Вариант сплава типа 1370 (6013) системы Al–Mg–Si (см. табл. 3) опробуется параллельно с 1424 и 1468 на «Даймлер-Крайслер» совместно с ВИАМ и ВИЛС. Сплавы этого типа в течение длительного времени используются в отечественной промышленности для лопастей вертолетов. Их важное преимущество – высокое сопротивление коррозионной усталости. Однако в сплаве 6013 типа 1370 возможно развитие межкристаллитной коррозии при длительной эксплуатации, что сейчас устраняется, при этом имеется хорошая перспектива на использование этого сплава в морских самолетах фирмы Бериева.

Еще одним, очень перспективным, вариантом для обшивки фюзеляжа является слоистый композиционный материал, который состоит из чередующихся тонких алюминиевых листов и прослоек клеевого препрега со стеклянными волокнами, – СИАЛ (С – стекло и АЛ – алюминий) (см. табл. 3) [3]. Аналогичный материал за рубежом имеет марку «Глер» (GLARE). СИАЛ характеризуется высокой удельной прочностью и жесткостью, удовлетворительной коррозионной стойкостью. Этот материал технологически достаточно освоен, в отечественной промышленности имеются возможности изготавливать из СИАЛа листы для отсеков фюзеляжа любых необходимых размеров.

В тоже время может рассматриваться вариант изготовления фюзеляжей из широких тонких панелей, свариваемых между собой лазерной сваркой. В этом случае котируются сплавы 1464, 1468, 1370 (6013) и Al–Mg–Sc 1570. Следует отметить, что у сплава 1424 резко увеличивается скорость развития усталостной трещины в сплаве, помещенном в коррозионную среду при малых частотах нагружения (порядка 0,03 Гц). Такие условия характерны для взлета и посадки самолетов в среде облаков. В связи с этим проводятся исследования причин этого явления и работы по подбору режимов термической обработки, стабилизирующей свойства сплава 1424.

Что касается шпангоутов, то они в большинстве отечественных машин изготавливаются из сплавов В93 и 1933. Лишь изредка из старинного сплава

АК6, который явно уступает по механическим свойствам и коррозионной стойкости сплавам В93 и 1933 (табл. 4) [4]. Сплав 1933 обладает высокой вязкостью разрушения и превосходит в этом отношении зарубежные серийные сплавы аналогичного назначения – 7050-Т74, 7175-Т73, а также новый французский сплав 7040 (табл. 5) [4, 5]. В 1998 г. Самарский металлургический завод в содружестве с ВИАМ, фирмой «Эрбас» изготовил из сплава 1933 очень сложный по форме крупногабаритный фитинг, соединяющий крыло самолета с центропланом.

Таблица 4.

Свойства штамповок из алюминиевых сплавов 1933, В93п.ч., АК6 (минимальные)

Сплав. состояние	Направление	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %	K_{1c} , МПа·м ^{1/2}	$\sigma_{кр}$, МПа
		МПа				
1933-Т2	Д	490	441	7	39	–
	В	461	432	3	24	171
1933-Т3	Д	441	383	8	43,5	–
	В	412	363	3	25	245
В93п.ч.-Т2	Д	440	400	8	30,1	–
	В	440	400	3	20,3	196
В93п.ч.-Т3	Д	410	333	9	34,5	–
	В	410	333	4	25	295
АК6п.ч.-Т1	Д	382	275	10	35,9	–
	В	345	245	5	25	98

Таблица 5.

Типичные свойства массивных полуфабрикатов ($t \sim 150$ мм) из высокопрочных сплавов, применяемых для деталей типа шпангоутов

Характеристики	Направление	1933-Т3	7040-ТХХ	7050-Т74	7175-Т73 ($t=100$ мм)
σ_B , МПа	Д	500	–	500	450
	В	470		470	430
$\sigma_{0,2}$, МПа	Д	450	450	450	370
	В	440	440	440	350
δ , %	Д	10	–	8	7
	В	5	–	5	5
K_{1c} , МПа·м ^{1/2}	Д-П	48	33,5	30	40
	В-Д	32	26,0	25	28

Фитинг успешно прошел сложные сертификационные испытания в ВИАМ. На фирме «Эрбас» в настоящее время идет подготовка к применению фитингов из сплава 1933 на серийных европейских самолетах А-340 и А-320 [6].

Активное сотрудничество с фирмой «Эрбас» ведется и по другим отечественным сплавам – В96Ц3, 1468 и 1424, перспектива применения которых в конструкции европейских аэробусов показана на рис. 2.

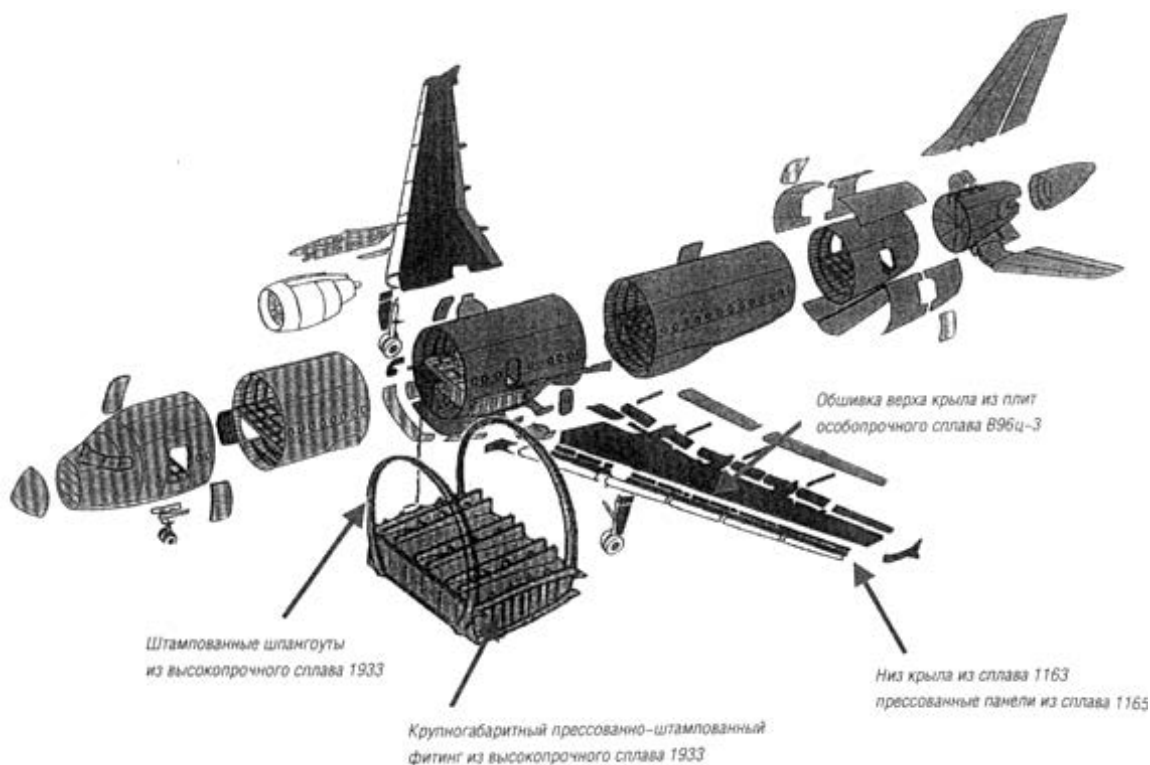


Рисунок 2. Перспективные алюминиевые сплавы для планера европейского аэробуса А-340/380

Таким образом, в 2003–2015 гг. будет происходить переход к изготовлению крыльев самолетов из сверхпрочного алюминиевого сплава В96Ц3, из сплавов 1163 и 1165 и сверхлегких алюминиево-литиевых сплавов, а фюзеляжей – из сплава 1163, композиционных материалов типа СИАЛ, а также из сварных тонких прессованных панелей из алюминиево-литиевых сплавов.

Баки жидкостных ракет

Баки больших ракет для жидкого кислорода и жидкого водорода изготавливаются из сплавов типа магналий (АМг6 – 5056) и сплава 1201 (2219)

системы Al–Cu–Mn. Однако за последние годы в мировой космонавтике совершен решительный переход к алюминиево-литиевым сплавам. По данным на 1998 г., из американского сплава 2219 (1201) был изготовлен 91 бак системы космических челноков «Шаттл» диаметром 8 м и высотой 40 м (рис. 3), дополнительно 29 баков получены из алюминиево-литиевых сплавов. В 1998 г. на фирме «Энергия» под руководством ВИАМ было изготовлено несколько баков для жидкого кислорода диаметром 4,5 м для ракеты «Дельта» американской фирмы «Макдональд Дуглас» из алюминиево-литиевого сплава типа 1460. Эти баки успешно прошли наземные испытания при комнатной температуре и температуре жидкого азота и в США – летные испытания. Применение алюминиево-литиевого сплава дало снижение веса бака на 37% (7500 килофунтов) [7]. Еще лучшие результаты получены при использовании сплавов 1464 и 1468. Из сравнения свойств сплавов АМг6, 1201 и типа 1464 (табл. 6) видно явное преимущество сплава 1464.

Будущее для баков больших ракет за алюминиево-литиевыми сплавами.

Таблица 6.

Сравнительные свойства алюминиевых сплавов для криогенных баков ракет

Сплав, состояние	$t_{\text{исп}}, ^\circ\text{C}$	Направление	$\sigma_{\text{в}}$	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$	$K_c^y, \text{МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$
			МПа			
АМг6 (М)	20	П	320	160	15	–
		Д, П	470	180	24	–
АМг6 (нагартованный с $\varepsilon=20\%$)	20	П	400	300	9,0	–
1201	20	Д	420	325	6,0	–
		П	420	325	6,0	40
	-196	Д, П	530	450	12	–
1464	20	Д	570	535	9,5	65
		П	530	495	10,0	
		45°	500	460	13,5	
	-196	Д, П	615	325	17,5	–

Примечание: Значения δ при -196°C определяли только в продольном направлении.

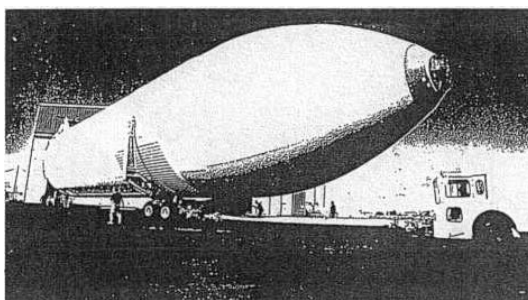


Рисунок 3. Топливные баки для «Шаттлов»

Вывод

Российские алюминиевые сплавы и полуфабрикаты не уступают по уровню свойств аналогичным зарубежным материалам, могут успешно и с определенной экономической выгодой применяться в разнообразных конструкциях. Однако требуется дальнейшее повышение качества полуфабрикатов по металлургическим дефектам, допускам, расширение их номенклатуры и размеров для обеспечения постоянно возрастающих требований к ресурсу, надежности, весовой эффективности авиационно-космической техники и транспортных средств.

Список литературы:

1. Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г. Труды 5-й Международной конференции по алюминиевым сплавам ICAA-5, 1996, т. 3, с. 1813–1818.
2. Фридляндер И.Н., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. и др. Труды 6-й Международной конференции по алюминиевым сплавам ICAA-6, 1998, т.3, с. 2055–2058.
3. Сенаторова О.Г., Аниховская Л.И., Сидельников В.В. и др. Сб. трудов Международной конференции «Слоистые композиционные материалы–98», с. 86–88, 131–133.
4. Ткаченко Е.А., Вальков В.Я., Баратов В.И., Фридляндер И.Н. Труды 5-й Международной конференции по алюминиевым сплавам ICAA-5, 1996, т. 3, с. 1819–1822.
5. Патент Франции PCT/FR 97/00144, 21.01.1996 г.
6. Аэрокосмос, 1999, № 16 (19–25 апреля), с. 79–80; электронный банк ИНФО-ТАСС, база (ВЕГА), 16.04.99.
7. Aviation Week & Space Technology, 1996, June 17.
8. Колобнев Н.И., Сенаторова О.Г., Хохлатова Л.Б. Сверхпластичные алюминиевые сплавы//Цветные металлы и сплавы. – М.: Машиностроение, 2000, с. 384–416.