ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

АЛЮМИНИЕВЫЕ, ТИТАНОВЫЕ, МАГНИЕВЫЕ И БЕРИЛЛИЕВЫЕ СПЛАВЫ

АЛЮМИНИЕВЫЕ ДЕФОРМИРУЕМЫЕ СПЛАВЫ

В 1932 году в ВИАМ организован отдел цветных металлов, включающий в себя группу алюминиевых сплавов.

С 1932 по 1945 год разработаны первые алюминиевые сплавы (дуралюмины, магналии, авиали), процессы непрерывного литья слитков, технологии прокатки, плакирования и термической обработки листов.

С 1945 по 1970 год разработан новый класс высокопрочных сплавов (В95, В93, В96Ц3) на основе системы Al–Zn–Mg–Cu. Эти сплавы явились основой конструкции истребителей КБ Микояна (начиная с МиГ-15), Яковлева, Сухого; бомбардировщиков Ту-16, Ту-95; пассажирских и транспортных самолетов Ту-134, Ту-154, Ил-76, Ил-86, «Антей», «Руслан».

В 1957 году для применения в атомной технике был создан и освоен самый прочный в мире сплав В96Ц ($\sigma_в$ – до 700 МПа), который использован в газовых центрифугах для получения обогащенного урана 235, было разработано и внедрено восемь поколений газовых центрифуг, производительность которых была увеличена более чем в 8 раз, а ресурсная надежность повышена с 3 до 30 лет.

В 1964 году открыт эффект упрочнения при термической обработке сплавов системы Al–Mg–Li. На основе этого открытия разработан самый легкий алюминиевый сплав 1420, который применен в конструкции клепаного фюзеляжа палубного штурмовика вертикального взлета Як-38 и в сварных конструкциях МиГ-29М. С 1965 по 1968 год освоено производство широкой

Сплав В95 в конструкции реактивного истребителя МиГ-15

Сплав АК4-1 в конструкции сверхзвукового пассажирского лайнера Ту-144

номенклатуры полуфабрикатов из жаропрочного сплава АК4-1 применительно к сверхзвуковому самолету Ту-144.

С 1970 по 1990 год проведены обширные исследования по ограничению содержания вредных примесей железа и кремния для обеспечения повышенного ресурса и надежности авиационной техники; созданы сплавы чистые, повышенной и особой чистоты — Д16ч., 1163, В95п.ч. и В95о.ч., которые нашли широкое применение в современных самолетах (Ил-76, Ил-96, Ту-204, Ан-148, SSJ-100 и др.). Разработан свариваемый криогенный сплав 1201, который применен в ракете «Энергия» и ОК «Буран».

Сплавы В95п.ч.-Т2, Д16ч.-Т в конструкции пассажирского самолета Ту-154

Сварные баки из сплава 1201 ракеты «Энергия»

Сплав 1933 в конструкции самолета Як-130

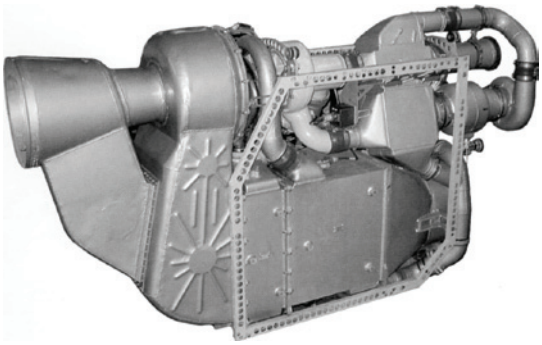
Создан высокотехнологичный Al–Li сплав 1441, который впоследствии применен в гидросамолетах Бе-103 и Бе-200 в виде обшивочных листов.

С 1990 по 2011 год создан высокопрочный ковочный сплав 1933, отличающийся высоким уровнем вязкости разрушения (K_{1c}=40–50 МПа√м при $\sigma_в$=500 МПа) и трещиностойкости. В настоящее время он является основным сплавом для изготовления массивных (толщиной до 250 мм) кованых и прессованных полуфабрикатов – для деталей внутреннего силового набора современных самолетов Як-130, Ан-148, SSJ-100 и др. Создан и освоен для военной авиации особопрочный сплав В96Ц3п.ч. ($\sigma_в$=620–660 МПа) в виде длинномерных катаных и прессованных полуфабрикатов. Разработаны и освоены высокопрочные, коррозионностойкие алюминийлитиевые сплавы В-1461 и В-1469, а также высокотехнологичные сплавы В-1341 и 1370, которые применены в конструкции самолетов SSJ-100 и Ан-148 соответственно. Разработан жаропрочный сплав 1151, который нашел широкое применение в изделиях военной и специальной техники. Создан слоистый алюмостеклопластик (СИАЛ) пониженной плотности, на базе тонких (0,3–0,5 мм) листов из алюминийлитиевого сплава 1441.

АЛЮМИНИЕВЫЕ ЛИТЕЙНЫЕ СПЛАВЫ

С 1950 по 1970 год созданы литейные алюминиевые сплавы АЛ19, АЦР1У, ВАЛ1.

С 1970 по 1990 год проведены исследования по многокомпонентному комплексному легированию, разработаны технологии рафинирования



Сплавы ВАЛ12 и АЦР1У в установке охлаждения воздуха для герметичной кабины пилота

легких сплавов. Созданы сплавы ВАЛ10, ВАЛ12, ВАЛ14, ВАЛ8, которые позднее внедрены в изделия авиационной (Ту-204, Ан-148) и ракетно-космической техники (системы жизнеобеспечения космонавтов).

С 1990 по 2012 год созданы жаропрочный сплав ВАЛ18 (рабочая температура 350°С), высокопрочный высокотехнологичный сплав АЛ4МС. Ведутся работы по созданию нового высокопрочного литейного алюминиевого сплава системы Al—Cu—Mg.

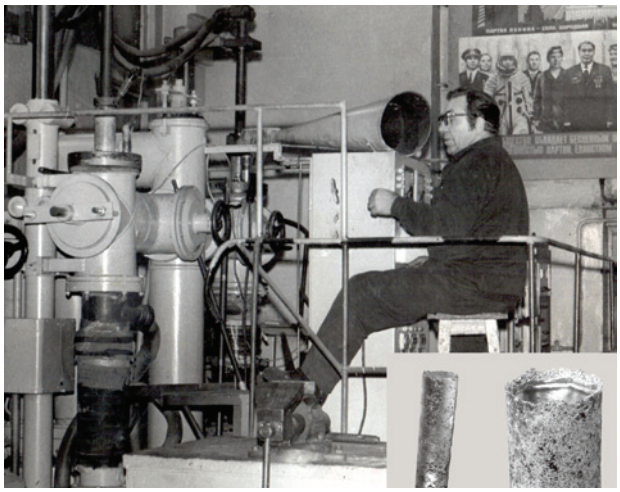
ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ

Сплав ВТ6ч. в конструкции самолета Ту-160

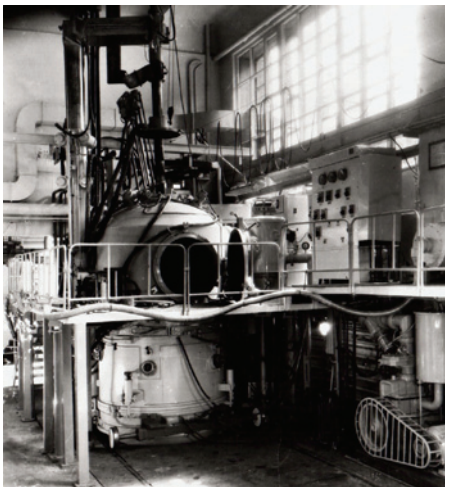
Высокопрочный титановый сплав ВТ22 в конструкции шасси и планера самолета Ил-86

В 1951 году в ВИАМ организована лаборатория титановых сплавов.

С 1951 по 1962 год — освоение титановых сплавов. На вакуумном плавильном оборудовании, спроектированном специалистами ВИАМ, был выплавлен первый лабораторный титановый слиток. Также под руководством научных сотрудников лаборатории титановых сплавов создано (1956—1957 гг.) отечественное производство титана на Ступинском металлургическом комбинате и ОАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА».



Первая печь ВД5 разработки ВИАМ (1951-1952 годы), прессуемый электрод и выплавленный вакуумно-дуговым методом титановый слиток



Серийная печь ВДЛ-4 разработки ВИАМ для литья титановых сплавов (1958 год, выпущено 32 печи)

Параллельно с разработкой технологии выплавки слитков проводятся исследования по созданию технологии фасонного литья титановых сплавов и соответствующего литейного оборудования (1958 г.). В этот период в ВИАМ технологами лаборатории титановых сплавов совместно с конструкторским отделом института была разработана документация на первую вакуумно-дуговую гарнисажную печь. На основе созданной документации печи были изготовлены и введены в эксплуатацию, в том числе на Запорожском моторостроительном заводе, Пермском моторном заводе и др. Также разработаны и внедрены в серийное производство первые титановые сплавы ВТ1, ВТ3-1, ОТ4, ОТ4-1, ВТ5, ВТ5-1, ВТ6, ВТ8. В 1961 году разработаны титановые сплавы ВТ9, ВТ14, ВТ15.

Самолет Т-4 («100»), на 40% состоящий из титановых сплавов

Шаровые баллоны космического корабля «Астрон», изготовленные из сплава ВТ23

С 1962 по 1975 год проведены работы по разработке и внедрению титановых сплавов нового поколения ВТ6С, ВТ16, ВТ20, ВТ22, ВТ23 в конструкции пассажирских, транспортных самолетов, изделий ракетной и космической техники; жаропрочных титановых сплавов ВТ3-1, ВТ8, ВТ9 – в конструкции компрессоров (диски, лопатки, валы) ряда газотурбинных двигателей.

С 1975 по 1988 год — активное внедрение титановых сплавов в конструкции широкофюзеляжных самолетов, в изделия сверхзвуковой авиации, ракетной и космической техники. Разработаны теории возгорания компактного титана и пожаробезопасные титановые сплавы серии ВТТ; жаропрочные титановые сплавы ВТ18У, ВТ25У и технологические процессы изготовления штамповок дисков компрессоров ГТД.

С 1988 по 1996 год — период разработки теоретических и технологических основ создания высокожаропрочных интерметаллидных сплавов на основе титана.

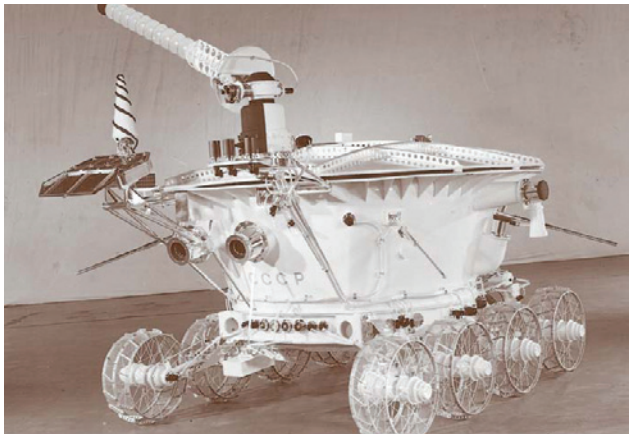
С 1996 по 2011 год разработаны новые конструкционные и жаропрочные титановые сплавы (ВТ38, ВТ41, ВТ43, сплавы на основе алюминидов титана) для перспективных изделий авиакосмической техники.

МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

В 1932 году в ВИАМ организован отдел цветных металлов, включающий в себя группу магниевых сплавов. Разработан способ получения магниевой проволоки и лент путем прессования.

С 1943 по 1944 год — создание первых отечественных высокопрочных магниевых сплавов МА5 и МЛ5 системы Mg—Al—Zn—Mn.

В 1952 году создана лаборатория магниевых сплавов.



Сплавы МА2-1 и МА15 в конструкции беспилотного лунохода

Сплавы МЛ5 и МЛ10 для крупногабаритных и корпусных деталей комплекса «С-300»

С 1952 по 1990 год разработаны и внедрены высокопрочные, жаропрочные, гранулированные деформируемые магниевые сплавы ВМД10, МА12, МА14гр. в изделия авиакосмической техники, ракетостроения, военной и специальной техники (Ту-134, Ил-76, Ту-204, Ил-96-300, «Ансат», Су-27, Су-30, МиГ-29, «Бриз-М», ракетоносители «Протон-М», «Ангара»). Созданы жаропрочные литейные магниевые сплавы МЛ9, МЛ10, МЛ19 для деталей ГТД; высокопрочные сплавы МЛ12, МЛ8 и технология термической обработки применительно к авиаколесам и нагруженным деталям самолетов и вертолетов (Ту-134, Ту-154, Ил-76, Ил-86, Ми-8, Ми-14 и др.).

Разработаны основы технологического процесса плавки и фасонного литья крупногабаритных и корпусных деталей для изделий

Для узлов трансмиссии вертолетов Ка-32, Ка-52 (редуктора, корпуса приводов, маслоагрегаты, рамы, барабаны колес) применены сплавы МЛ5, МЛ5п.ч., МЛ10, МЛ12

ракетной техники «С-300», «Тополь-М», «Куб», «Штиль» из магниевых сплавов МЛ5, МЛ5п.ч., МЛ10.

С 1990 по 2011 год разработаны: деформируемые сплавы с повышенными технологическими (МА20-СП) и прочностными (ВМД15) свойствами, эффективные защитные покрытия; составы и технология получения противопригарных присадочных материалов для производства магниевого литья применительно к изделиям авиакосмической техники. Разработана серия высокопрочных коррозионностойких литейных магниевых сплавов ВМЛ18, ВМЛ20, ВМЛ24.

БЕРИЛЛИЕВЫЕ СПЛАВЫ

С 1946 по 1960 год в ВИАМ разработаны алюминийбериллиевые сплавы и специальное плавильное оборудование.

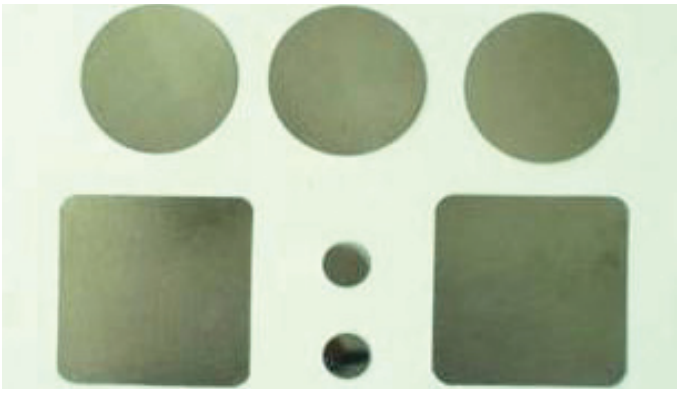
В 1958 году разработана технология отливки слитков из сплава АБМ1 в промышленных условиях.

С 1960 по 1975 год разработаны технологические основы сварки и пайки бериллия и его сплавов. Установлены закономерности влияния бериллия в качестве модифицирующей добавки на физико-механические свойства алюминиевых, магниевых и никелевых сплавов.

В 1975 году для разработки новых материалов на основе бериллия и технологий их обработки, изготовления опытных партий полуфабрикатов и изделий создан Воскресенский экспериментально-технологический центр ВИАМ по специальным материалам (ВЭТЦ – филиал ФГУП «ВИАМ»).

С 1975 по 1995 год проведены работы по получению бериллийсодержащих сталей, а также бериллиевых бронз; получена

Вакуум-плотные бериллиевые окна



Вакуум-плотные фольги, диски и пластины из бериллия толщиной от 10 мкм

Материалы на основе бериллия применены в орбитальном корабле «Буран» (тормозные диски, рамки остекления кабины фюзеляжа и др.)

промышленная партия слитков из сплава АБМ4. Материалы на основе бериллия применены в орбитальном корабле «Буран» в виде тормозных дисков, рамок остекления кабины фюзеляжа и др.

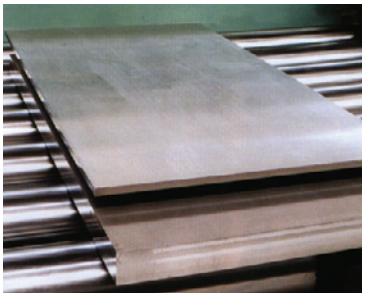
С 1995 по 2012 год изготовлена опытная партия проволоки из сплава БрБ2. Разработана технология изготовления бериллиевых фольг (толщина 0,01–0,15 мм, размер – до 100 мм), применяющихся в медицинских приборах (томографы), промышленности (приборы рентгенофазового анализа, контроль сварных швов), вакуум-плотных окон с защитным покрытием.

Рентгеновская аппаратура фирмы Heimann Systems (Германия) с бериллиевыми окнами, изготовляемыми на ВЭТЦ ВИАМ

АЛЮМИНИЕВЫЕ ДЕФОРМИРУЕМЫЕ СПЛАВЫ

СВЕРХПРОЧНЫЕ И ВЫСОКОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ СИСТЕМЫ Al–Zn–Mg–Cu

В96Ц3п.ч.–Т12 (1965–1) – сверхпрочный сплав ($\sigma_в \geq$ 600–645 МПа), рекомендуется вместо высокопрочных сплавов В95о.ч./п.ч. в виде катаных и прессованных полуфабрикатов для верхних обшивок крыла, балок, стоек и других элементов, особенно в сжатых зонах планера перспективных самолетных конструкций; сплав В96Ц3 (1965) – конструкционный материал для корпусов ракетной техники. Разработан специальный режим трехступенчатого старения (Т12), который обеспечивает высокий уровень прочности (Т1) и коррозионной стойкости, близкой к стойкости в состоянии Т2.



Длинномерные плиты из сплава В96Ц3п.ч.-Т12

Горизонтальный закалочный агрегат «Эбнер» (ОАО «КУМЗ»)

Листы из сплава В96Ц3п.ч. перспективны для создания высокопрочных слоистых металлополимерных, биметаллических и гибридных материалов.

1933 – современный ковочный сплав, применяется в термически обработанном состоянии по режимам Т2 и Т3 ($\sigma_в$>500/440 МПа), с повышенной трещиностойкостью (K_{1c}>39/43 МПа√м), используется для изготовления силовых деталей внутреннего набора планера самолета (шпангоутов,

Механические свойства сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	$\sigma_в/d$, км (усл. ед.)	K_{1c}, МПа$\sqrt{м}$	МЦУ*: $N_{ср}$, кцикл
		МПа					
В96Ц3п.ч.-Т12	Листы, плиты (2–60 мм); профили, полосы (5–60 мм)	≥600–645	≥580–620	≥8,0	21,4	≥25	240
В95о.ч.-Т2 (базовый)	Листы, плиты, профили, панели	≥500–540	≥420–460	≥7,0	17,9	≥34	150

*Малоцикловая усталость (при σ_{max}=157 МПа; f=5 Гц; R=0,1; K_t=2,6).

Агрегат для малодеформационной закалки в полимерной среде (ОАО «КУМЗ»)

фитингов, балок, лонжеронов) в самолетах ЗАО «ГСС», АНТК «Антонов», ОАО «ОКБ "Сухого"», ОАО «Корпорация "Иркут"». Сплав превосходит по вязкости разрушения на 20–30% другие высокопрочные ковочные сплавы, в том числе зарубежные.

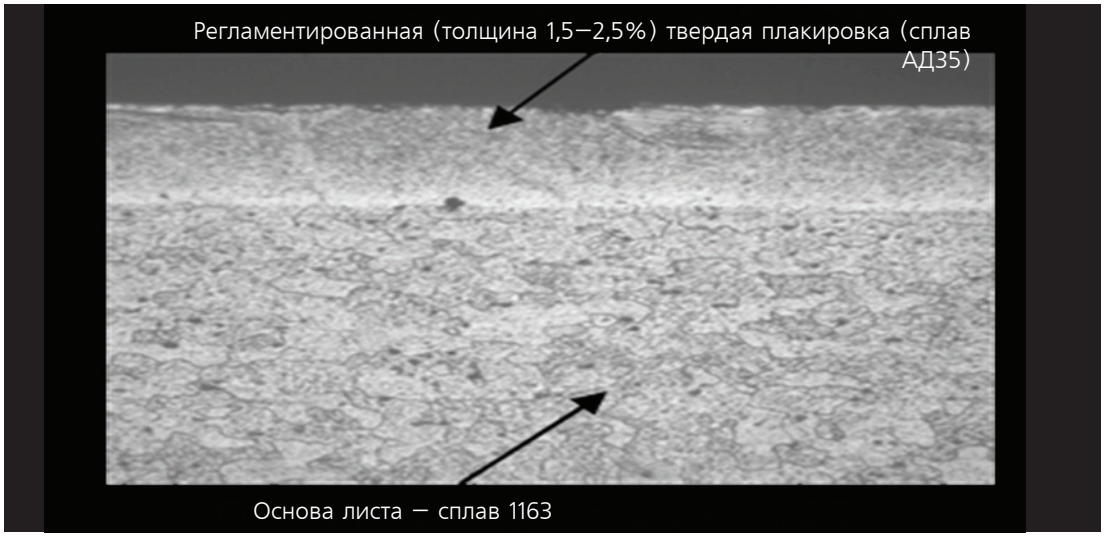
Разработаны режимы малодеформационной закалки и трехступенчатого старения Т123 и Т122 крупногабаритных полуфабрикатов из сплава 1933, обеспечивающие улучшенный комплекс прочностных и ресурсных характеристик в сочетании с пониженным в 1,5–3 раза уровнем закалочных напряжений, что позволяет уменьшить поводки и коробление сложных деталей при механической обработке.

В–1963 – перспективный высокопрочный ковочный сплав ($\sigma_в$>560 МПа) с повышенной вязкостью разрушения (K_{1c}>34 МПа√м), предназначен для массивных сильно нагруженных деталей внутреннего силового набора. Благодаря легированию малыми добавками серебра и скандия удалось одновременно повысить прочностные характеристики – на 10–20% и

Механические свойства ковочных сплавов

Сплав	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	K_{1c}, МПа$\sqrt{м}$	МЦУ*: $N_{ср}$, кцикл
	МПа			
1933-Т123	≥510	≥460	≥37	200
В-1963-Т12	≥560	≥ 510	≥34	250
В93п.ч.-Т2(базовый)	≥440	≥400	≥31	120
АК6п.ч.-Т1 (базовый)	≥380	≥275	≥34	120

*Малоцикловая усталость (при σ_{max}=157 МПа; f=5 Гц; R=0,1; K_t=2,6).



Микроструктура (x200) плакированного обшивного листа из сплава 1163-РДТ

усталостную долговечность – в 1,8–2,3 раза по сравнению с серийными отечественными и зарубежными сплавами аналогичного применения.

Сплавы 1933 и В-1963 перспективны при внедрении энергоэффективной, ресурсосберегающей технологии изотермической точной штамповки для изготовления массивных деталей.

В95о.ч., В95п.ч., 1973 ($\sigma_в$≥500–540 МПа) – современные базовые высокопрочные сплавы, применяются в виде широкой номенклатуры катаных (плит, листов) и прессованных (профили, полосы, панели) полуфабрикатов в различных состояниях (Т1, Т2, Т3) для обшивок крыла, стрингеров (гнутых листовых и прессованных) и других элементов планера самолетов.

ВЫСОКОРЕСУРСНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

1163 – среднепрочный ресурсный сплав серии дуралюмин ($\sigma_в$≥420–460 МПа) с высоким уровнем характеристик трещиностойкости (K_c^y>133 МПа√м при *B*=750 мм) и выносливости; базовый материал для обшивок фюзеляжа (в том числе с твердой плакировкой РД), низа крыла

Механические свойства листов из сплава 1163

Сплав	$\sigma_в$, МПа	δ, %	K_c^y, МПа$\sqrt{м}$ (при *B*=750 мм)	МЦУ*: $N_{ср}$, кцикл
1163-РДТ	≥430	≥15	145	160
1163-АТ (базовый)	≥425	≥11	133	110

*Малоцикловая усталость (при σ_{max}=157 МПа; *f*=5 Гц; *R*=0,1; K_t=2,6).

Самолет Ан-148

Самолет SSJ-100

Самолет Бе-200

и стрингерного набора. Сплав применяется прежде всего в естественно состаренном состоянии по режимам Т и Т7.

Применение твердой регламентированной плакировки (РД) из сплава АД35 толщиной 1,5–2,5% вместо 2,0–6,5% в серийных листах с плакировкой из мягких сплавов АД0 и АД1 в сочетании с повышенной в 1,5 раза чистотой по примесям (Fe и Si) позволило улучшить характеристики выносливости, вязкости разрушения и пластичности обшивочных листов из сплава 1163.

СВАРИВАЕМЫЕ КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

АМг2, АМг3, АМг6 – термически не упрочняемые сплавы (магналии) для ракет и деталей внутреннего набора самолетов, прочность сварных соединений составляет 0,9–0,95 от прочности основного материала. Сплавы, легированные скандием, имеют повышенную прочность ($\sigma_в$≥370 МПа, $\sigma_{0,2}$≥295 МПа) и обладают эффектом сверхпластичности (δ=500–1000%).

1370-Т1 – среднепрочный технологичный сплав системы Al–Mg–Si ($\sigma_в$≥400–420 МПа, $\sigma_{0,2}$≥360–390 МПа), обладает высокими прочностными характеристиками при температурах до 175°С ($\sigma^{150°}_{500}$=290 МПа, $\sigma^{175°}_{25}$=295 МПа); применяется в виде листов толщиной 0,5–1,2 мм в самолете Ан-148 (обшивка и гофры носовой части стабилизатора, гофры предкрылков и отклоняемого носка крыла), характеризуется высокой технологической пластичностью при

Механические свойства сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	МЦУ*: $N_{ср}$, кцикл	$\sigma^{150°}_{500}$, МПа
		МПа				
1370-Т1	Листы	≥400	≥360	≥8	140	290
	Плиты	≥400			150	325
АК4-1-Т1 (базовый)	Листы	≥385	≥315	≥6	75	245
	Плиты	≥400	≥325		95	315

*Малоцикловая усталость (при σ_{max}=157 МПа; f=5 Гц; R=0,1; K_t=2,6).

Механические свойства листов из сплава 1913

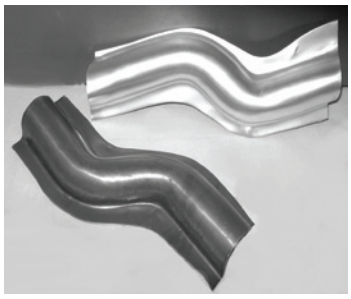
Сплав	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	$K_c^у$, МПа$\sqrt{м}$ (при *B*=400 мм)	КР: $\sigma_{кр}$, МПа	Коэффициент ослабления сварных соединений $\sigma_{в.св}/\sigma_в$ (ААрДЭС)
	МПа					
1913-Т11	≥460	≥405	≥12	105	350	≥0,8

холодной деформации. В виде листов и плит используется при изготовлении сварных герметичных корпусов для космических аппаратов.

1913–Т11 (В91ч.) – листы из сплава в состоянии Т11 имеют повышенные характеристики прочности ($\sigma_в$≥460 МПа, $\sigma_{0,2}$≥405 МПа) при сохранении высокой коррозионной стойкости, соответствующей состоянию Т3. Сплав обладает хорошей свариваемостью ($\sigma_{в.св}/\sigma_в$≥0,8) и рекомендуется для применения в коррозионноопасных зонах сварных и клепаных конструкций, в том числе для обшивки и внутреннего набора фюзеляжа гидросамолетов, экранопланов, дирижаблей и в нагруженных строительных конструкциях.

В–1341–Т1 – среднепрочный ($\sigma_в$≥330 МПа, $\sigma_{0,2}$≥260 МПа, δ≥10%) высокотехнологичный сплав системы Al–Mg–Si для изготовления деталей холодной листовой штамповкой, хорошо сваривается всеми видами сварки ($\sigma_{в.св}/\sigma_в$=0,9–0,95). Содержит модифицирующую добавку кальция, которая снижает склонность к образованию горячих трещин при литье и сварке плавлением, задерживает процессы рекристаллизации, способствует формированию регламентированной мелкозернистой структуры (размер зерна – менее 80 мкм), благоприятной для получения деталей холодной деформацией с большими степенями вытяжки ($K_{выт}$=1,9–1,95%, $K_{выд}$ – до 35%, $K_{отб}$=1,4%, r_{min}=(0,5–1)*s*, *s* – толщина листа). Применен в конструкции самолета SSJ-100 – детали внутреннего набора, перегородки, крепежные узлы, трубопроводы системы жизнеобеспечения и т. д.

Создание свариваемых самозакаливающихся сплавов с высокой коррозионной стойкостью и технологичностью на базе систем Al–Zn–Mg и Al–Si–Mg позволит увеличить долю сварных конструкций в транспортном машиностроении.



Детали из сплава В-1341, изготовленные холодной листовой штамповкой с высокими степенями вытяжки без промежуточных отжигов

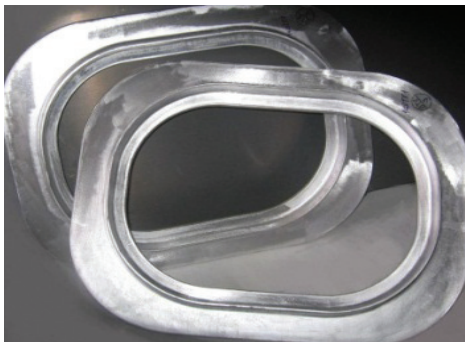
Механические свойства сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	КР: $\sigma_{кр}$, МПа
		МПа			
В-1341-Т1	Лист	≥330	≥260	≥10	250
АМг6 (базовый)	Лист	≥315	≥170	≥10	160

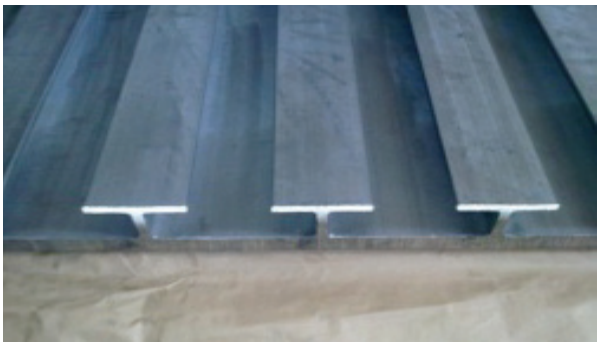
АЛЮМИНИЙЛИТИЕВЫЕ СПЛАВЫ ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТИ

1420–ТГ1 (ТВ1) – самый легкий (*d*=2,47 г/см^3) коррозионностойкий высокомодульный (*E*=78 ГПа) свариваемый сплав на базе системы Al–Mg–Li; применяется в виде штамповок ($\sigma_в$≥420 МПа, $\sigma_{0,2}$≥270 МПа, δ≥9%); предназначен для использования в конструкции самолетов (сварные герметичные отсеки, окантовки иллюминаторов, люки и лючки, компоненты кабины) и корпусах ракет. Применение сплава позволяет снизить массу клепаной конструкции до 12%, сварной – до 24%. Применен в конструкции самолетов Як-36, Як-38, МиГ-29М, Су-27, Як-42, Ту-204.

1424–ТГ1 – среднепрочный ($\sigma_в$≥430–460 МПа) свариваемый коррозионностойкий сплав (улучшенная модификация сплава 1420) пониженной плотности (*d*=2,54 г/см^2), термически стабильный, с повышенными характеристиками трещиностойкости (K_c^y=100 МПа при *B*=400 мм; СРТУ: d*l*/d*N*=1,6 мм/кцикл при Δ*K*=31 МПа√м) и малоцикловой усталости для сварных и клепаных конструкций авиакосмической техники. Листы из сплава 1424-БТ обладают эффектом сверхпластичности: δ=500–800%. Сплав отличается повышенной технологичностью при сварке различными методами: СТП (сварка трением с перемешиванием), ААрДЭС, ЭЛС ($\sigma_{в.св}/\sigma_в$=0,75–0,8 в зависимости от



Штамповка – окантовка иллюминатора из сплава 1420-ТГ1



Прессованная панель из сплавов 1424 и В-1461

Сварная ребристая панель фюзеляжа из сплава 1424

способа сварки). Освоено производство листов, тонких плит, прессованных профилей и панелей.

Для прессованных профилей и панелей из сплава 1424-ТГ2 применяется энергоэффективная, ресурсосберегающая технология закалки на желобе пресса.

В-1461-Т1 – высокопрочный ($\sigma_в$≥540–560 МПа) коррозионностойкий свариваемый сплав системы Al–Cu–Li–Mg–Zn пониженной плотности (***d***=2,63 г/см^3) с повышенными характеристиками вязкости разрушения: на плитах толщиной 40–80 мм – K_{1c}≥46 МПа√м, с температурой эксплуатации – до 150°С. Освоены производство листов, плит, прессованных профилей и панелей; технологии сварки – ААрДЭС, ЭЛС, ЛС, СТП. Рекомендуется для элементов обшивки и силового набора планера.

Сплавы этой системы и многоступенчатые режимы термомеханической обработки перспективны для создания высокопрочных ($\sigma_в$≥550 МПа) алюминийлитиевых сплавов с высокой вязкостью разрушения.

В-1469-Т1 – высокопрочный высокомодульный ($\sigma_в$≥580–600 МПа, $\sigma_{0,2}$≥540–560 МПа, δ≥8%, ***E***=78–80 ГПа) коррозионностойкий ($\sigma_{кр}$=400 МПа) свариваемый ($\sigma_{в.св}/\sigma_в$>0,7) сплав пониженной плотности (***d***=2,67 г/см^3) системы Al–Cu–Li–Mg с добавками Sc и Ag. Технологичен при литье и обработке давлением, что позволяет получать из него все виды полуфабрикатов, в том числе листы холодной рулонной прокаткой. Освоено промышленное производство листов, плит, прессованных профилей. Рекомендуется для элементов планера, работающих на сжатие длительно во всеклиматических условиях до температур 150°С (лонжероны, балки и другие детали фюзеляжа).

Свойства алюминийлитиевых высокопрочных сплавов пониженной плотности

Сплав	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	d, г/см^3	СРТУ*: dl/dN, мм/кцикл	K_{1c}, МПа$\sqrt{м}$	РСК, балл	КР: $\sigma_{кр}$, МПа
	МПа						
В-1461-Т1	>540–560	>490–510	2,63	1,67	>46	2–4	350
В-1469-Т1	≥580 600	≥540 560	2,67	2,5	≥30		
В95о.ч.-Т2 (базовый)	≥500–540	≥420–460	2,81	3,00	≥34	2–4	170

*Скорость роста трещины усталости (при ΔK=31 МПа√м; f=10 Гц).

Тонкие листы толщиной 0,3–0,4 мм из сплавов В-1469 и В-1461 перспективны для создания высокопрочных слоистых металлополимерных материалов.

1441–Т1 – среднепрочный высокоресурсный алюминийлитиевый сплав системы Al–Li–Mg–Cu ($\sigma_в$≥410 МПа, d=2,59 г/см^3, СРТУ: dl/dN=1,4 мм/кцикл при ΔK=31 МПа√м). Технологичен при обработке давлением, что позволяет получать из него холодной рулонной прокаткой плакированные и неплакированные листы толщиной до 0,3 мм. Освоено производство листов, плит, прессованных профилей и панелей. Рекомендуется для обшивки фюзеляжа и внутреннего силового набора. Применен в качестве обшивочных листов для самолетов Бе-200, Бе-103.

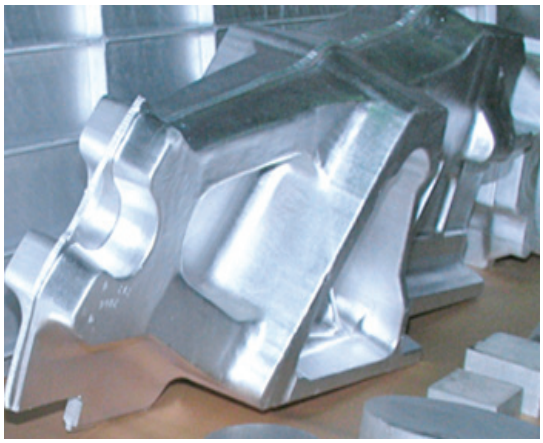
Катаные полуфабрикаты из высокоресурсного сплава 1441 перспективны для создания биметаллических материалов с повышенной трещиностойкостью.

Свойства среднепрочных высокоресурсных сплавов

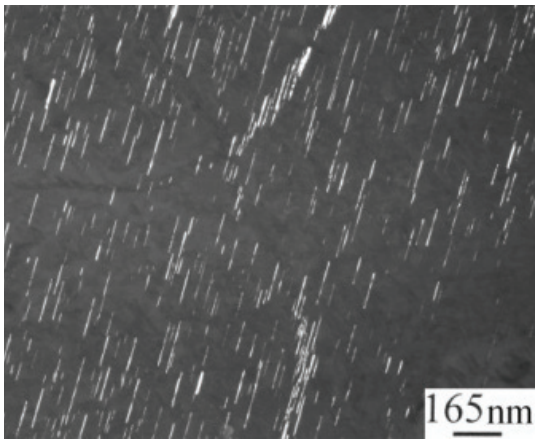
Сплав	Вид полуфабриката	d, г/см^3	E, ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	МЦУ*: $N_{ср}$, кцикл	СРТУ**: dl/dN, мм/кцикл
1441-Т1	Лист	2,59	79,5	≥305	170	1,2–1,4
	Плита			≥355	300	
1163-Т/Т7 (базовый)	Лист	2,78	72,0	≥270	140	1,7–1,8
	Плита			≥315/340	220	

*Малоцикловая усталость (при σ_{max}=157 МПа; f=5 Гц; R=0,1; K_t=2,6).

**Скорость роста трещины усталости (при ΔK=31 МПа√м; f=10 Гц).



Штамповка из сплава В-1213



Темнопольное изображение
пластин Ω'-фазы

ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ

АК4–1ч.–Т1 – современный основной жаропрочный сплав ($\sigma_в \geq 400$ МПа, $\sigma_{0,2} \geq 325$ МПа) для греющихся элементов авиационных конструкций, в том числе для двигателей.

1215 – перспективный сплав повышенной прочности и жаропрочности ($\sigma_в \geq 460$ МПа, $\sigma_{100}^{150°} = 300$ МПа).

1151 – свариваемый коррозионностойкий сплав с повышенными характеристиками длительной прочности и сопротивления ползучести при температурах до 175°С, применяется в ракетно-космических изделиях, работающих кратковременно при температурах до 350°С.

В–1213 – перспективный сплав, легированный серебром, обладающий повышенными прочностью, жаропрочностью ($\sigma_в \geq 490$ МПа, $\sigma_{100}^{150°} = 340$ МПа), вязкостью разрушения (K_{1c}=31–36 МПа√м) и сопротивлением малоцикловой усталости. В процессе искусственного старения закаленного материала дополнительно образуются пластинчатые выделения Ω'-фазы, которые медленно коагулируют в процессе нагрева при температурах до 200°С, что обеспечивает повышение характеристик жаропрочности.

Свойства жаропрочных сплавов

Сплав	$\sigma_в$	$\sigma_{100}^{150°}$	$\sigma_{0,2/100}^{150°}$	K_{1c}, МПа $\sqrt{м}$	$K_c^у$, МПа $\sqrt{м}$ (при B=100 мм)
	МПа				
В-1213-Т1	450–500	390–420	325–335	31–36	69
АК4-1ч.-Т1	400–420	350–380	210–250	26–28	43

Катаные полуфабрикаты из жаропрочных сплавов В-1213 и 1151 перспективны для создания биметаллических материалов с повышенной температурой эксплуатации.

СЛОИСТЫЕ АЛЮМОСТЕКЛОПЛАСТИКИ КЛАССА СИАЛ

СИАЛ-1-1, СИАЛ-2-1, СИАЛ-3-1 и др. – перспективный конструкционный слоистый гибридный материал, состоящий из тонких листов алюминиевых сплавов (Al–Li сплава пониженной плотности 1441 и др.) и прослоек стеклопластика.

Прослойки пластика состоят, как правило, из нескольких монослоев однонаправленного клеевого препрега, армированного высо-

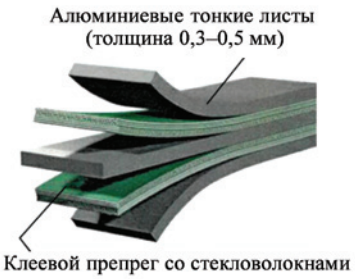


Схема укладки слоев материала СИАЛ

Сплав 1441 и СИАЛ на базе листов сплава Д16ч. применены в конструкции легкого самолета-амфибии Бе-103

копрочными стеклонаполнителями; расположение и количество монослоев определяется назначением и габаритом детали.

Слоистые материалы обладают уникальным комплексом свойств по сравнению с монолитными алюминиевыми листами: высокой трещиностойкостью (на порядок выше сопротивление росту трещины усталости: $dl/dN \leq 0{,}15$ мм/кцикл при $\Delta K = 31$ МПа$\sqrt{м}$), пониженной плотностью – на 10–15%, высокой прочностью ($\sigma_в \geq 600$ МПа), а также

Сравнительные свойства СИАЛа и алюминиевого сплава

Материал	$\sigma_в$, МПа	МЦУ*: $N_{ср}$, кцикл	СРТУ**: dl/dN, мм/кцикл	$K_c^у$, МПа$\sqrt{м}$ (при B=140 мм)	d, г/см^3
СИАЛ-3-1 (на базе сплава1441)	≥600	140	0,15	80	2,36
Базовый монолитный лист из сплава 1163-АТ	≥430	110	1,8	66	2,78

*Малоцикловая усталость (при σ_{max}=157 МПа; f=5 Гц; R=0,1; K_t=2,6).

**Скорость роста трещины усталости (при ΔK=31 МПа$\sqrt{м}$; f=10 Гц).

повышенными пожаростойкостью (1000°С, 15 мин без прогорания), ударостойкостью и достаточной коррозионной стойкостью.

СИАЛ на базе листов из алюминийлитиевого сплава 1441 используется для молниезащитных элементов обшивки крыла самолета Бе-103. Рекомендуется к применению в качестве обшивок, противопожарных перегородок, облицовок багажно-грузовых отсеков, соединительных лент, поясов безопасности (стопперов), обеспечивающих повышенный ресурс и снижение массы конструкции перспективной авиационной техники.

ЛИТЕЙНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ЛИТЕЙНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

ВАЛ12 – высокопрочный сплав системы Al–Zn–Mg–Cu, литье в кокиль и жидкая штамповка, рабочая температура 250°С (длительно), 300°С (кратковременно), $\sigma_в \geq 550$ МПа, $\delta \geq 3\%$.

АЛ4МС – высокопрочный высокотехнологичный сплав системы Al–Si–Cu–Mg обеспечивает при литье в кокиль $\sigma_в = 360–400$ МПа, $\delta \geq 4\%$,

Корпус агрегата

Свойства высокопрочных литейных алюминиевых сплавов

Сплав	Способ литья	Рабочая температура $T_{раб}$, °С	$\sigma_в$, МПа	δ, %	σ_{100}, МПа (при $T_{раб}$)	Жидкотекучесть, мм
ВАЛ12	Кокиль, жидкая штамповка	200	≥540	≥3	118	300
АЛ4МС	Все виды литья	250	330–400	3,0–4,0	53,9	370
АЛ9 (базовый)	Кокиль	200	≥215	4,0	–	350

не склонен к трещинообразованию, рабочая температура 250°С, можно отливать детали любыми способами, в том числе прогрессивным способом литья по газифицируемым и выжигаемым моделям.

ЖАРОПРОЧНЫЕ ЛИТЕЙНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

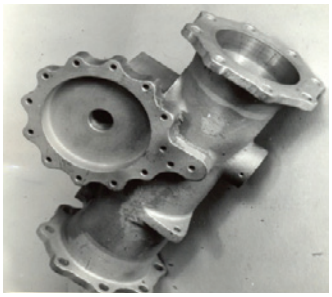
ВАЛ14 и ВАЛ18 – жаропрочные сплавы системы Al–Cu–Mn, литье в песчаные формы, применяются для высоконагруженных деталей, работающих при температурах 300–350°С ($\sigma_в$=380–500 МПа, δ=7,5–10%, $\sigma_{100}^{300°}$=60 МПа, $\sigma_{100}^{350°}$=34 МПа).

СВАРИВАЕМЫЕ КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ ЛИТЕЙНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

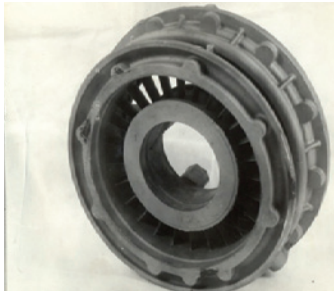
ВАЛ16 – свариваемый коррозионностойкий литейный алюминиевый сплав системы Al–Mg, эксплуатирующийся при температурах от -70 до +140°С (длительно) и до +150°С (кратковременно).

Свойства жаропрочных литейных алюминиевых сплавов

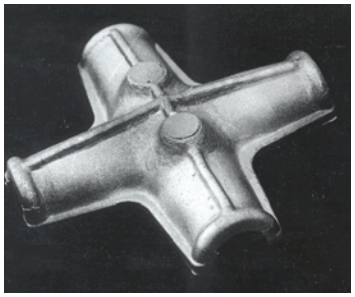
Сплав	Способ литья	Рабочая температура $T_{раб}$, °С	$\sigma_в$, МПа	δ, %	σ_{100}, МПа (при $T_{раб}$)	Жидкотекучесть, мм
ВАЛ14 ВАЛ18 АЛ5 (базовый)	Песчаная форма	300 400 250	500 350 245	10,0 7,5 1,0	58,8 24,5 53,9	250 250 344



Патрубок



Крыльчатка



Крестовина

Свойства коррозионностойких литейных алюминиевых сплавов

Сплав	Способ литья	$\sigma_в$, МПа	δ, %	$\sigma_{в.св}$, МПа	Жидкотекучесть, мм
ВАЛ16	Кокиль	255–275	6,0–8,0	240	315
АЛ8 (базовый)	Песчаная форма	284	9,0		318

ДЕФОРМИРУЕМЫЕ ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ

ЖАРОПРОЧНЫЕ ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД

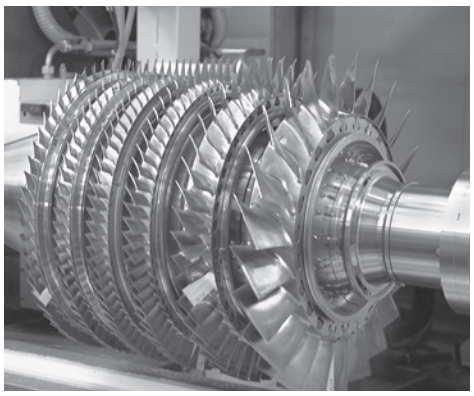
ВТ6 – универсальный титановый сплав, рекомендуется для деталей и узлов вентилятора и компрессора низкого (среднего) давления (диски, лопатки, детали статора, кольца, корпусные детали), работающих при температуре до 350°С неограниченно. Сплав отличается высокой технологичностью, однородностью химического состава, пониженной чувствительностью к концентраторам напряжений, возможностью многоцелевого применения. Металлургические предприятия поставляют полуфабрикаты из сплава ВТ6 в виде катаных прутков, штамповок дисков, раскатных колец, штамповок лопаток. Применяется в двигателе АН222-25.

Свойства сплавов для дисков вентилятора КНД и КВД

Сплав	Рабочая температура $T_{раб}$,°С	$\sigma_в$	$\sigma_в^t$	МЦУ$^{20°}$/ МЦУ^t: σ_{max}, МПа*	σ_{100}^t, МПа (при $T_{раб}$)
		МПа			
ВТ6	350	960	720	900/700	665
ВТ8-1	450	1050	750	900/530	725
ВТ25У	500	1180	850	980/620**	700

*Малоцикловая усталость (при N=10^4 цикл; f=50 Гц; R=0,1).
**При температуре 550°С.

ВТ8–1, ВТ8М–1, ВТ25У – жаропрочные (α+β)-сплавы для дисков и лопаток компрессора авиационных двигателей. Рекомендуются взамен сплавов ВТ3-1, ВТ8, ВТ9, ВТ25 для высокоресурсных силовых установок гражданской и военной авиации. Обладают высоким уровнем жаропрочности, термической стабильности при температурах 450–550°С и



Ротор компрессора

Ракетно-космический комплекс «Энергия-Буран». Общая масса деталей, изготовленных из сплава ВТ23 после ВТМО, 6 тонн («Буран») и 14 тонн («Энергия»): шпангоуты, балки, лонжероны и стыковочные узлы

Свойства сплавов для лопаток вентилятора КНД и КВД

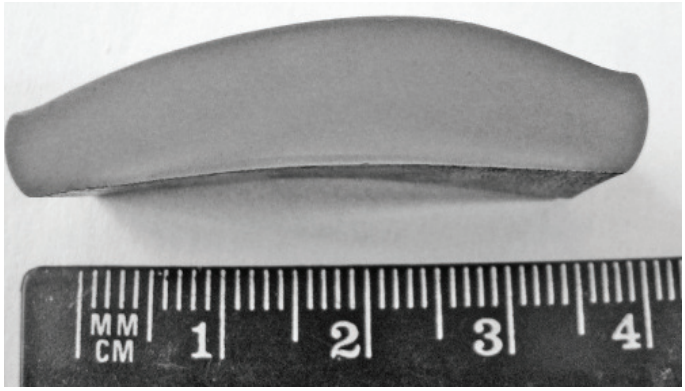
Сплав	Вид полуфабриката	Рабочая температура $T_{раб}$,°С	$\sigma_в$	$\sigma_в^t$	МнЦУ$^{20°}$/ МнЦУ^t: σ_{max}, МПа*	σ_{100}^t, МПа (при $T_{раб}$)
			МПа			
ВТ6	Пруток	300	980	700	480/440	665
ВТ8М-1		450	1000	690	540/450	665

*Многоцикловая усталость (при N =2•10^7 цикл; f=50 Гц; R=0,1).

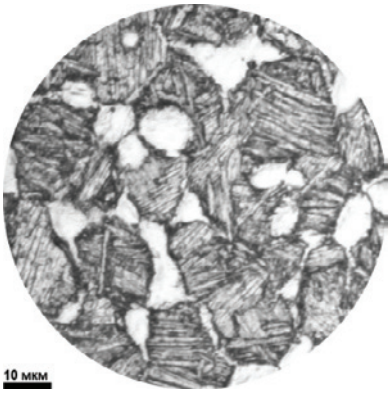
низкой чувствительностью к концентраторам напряжений. Сплав ВТ8М-1 предназначен для изготовления лопаток ГТД, в том числе с применением технологии холодного вальцевания, что обеспечивает степень деформации – до 45%. Сплавы ВТ8-1 и ВТ25У предназначены для дисков КНД и КВД, способны к термическому упрочнению. После закалки и старения прочность сплавов повышается до уровня $\sigma_в$=1100–1350 МПа при относительном удлинении δ=6–12%. Применяются в двигателях АИ222-25, ПС-90, НК-83 (самолет Ту-154).

ВТ41 – новый жаропрочный псевдо-α-сплав для дисков и лопаток компрессора высокого давления с рабочей температурой – до 600°С. Сплав паспортизован на штамповках дисков с пластинчатой микроструктурой и прутковой лопаточной заготовке с регламентированной глобулярно-пластинчатой микроструктурой, рекомендуется взамен сплава ВТ18У. По сравнению со сплавом ВТ18У, сплав ВТ41 обладает повышенной прочностью, жаропрочностью и усталостной прочностью в интервале рабочих температур. Свойства полуфабрикатов из сплава ВТ41 в отожженном состоянии:

- штамповки дисков – $\sigma_в^{20°}$=1030–1050 МПа; МЦУ (гладкие образцы): σ=930 МПа (при N=10^4 цикл; f=50 Гц; R=0,1); $\sigma_в^{600°}$ =720–750 МПа; $\sigma_{100}^{600°}$ =335 МПа;



Макроструктура штамповки лопатки из сплава ВТ41



Микроструктура штамповки лопатки из сплава ВТ41

Штамповки лопаток из сплава ВТ41

- пруток – $\sigma_{в}^{20°}$=1015–1030 МПа; МнЦУ (гладкие образцы): σ=510 МПа (при N=2·10^7 цикл; f=50 Гц; R=-1); $\sigma_{в}^{600°}$ =635–665 МПа; $\sigma_{100}^{600°}$ =265 МПа.

Сплав ВТ41 технологичен в кузнечно-прессовом производстве, что позволяет получать штамповки дисков конструкции «блиск» и штамповки лопаток с регламентированной глобулярно-пластинчатой микроструктурой. Сплав ВТ41 с глобулярно-

Свойства сплавов для деталей КВД с рабочей температурой до 600°С

Сплав (полуфабрикат)	Тип микроструктуры	$\sigma_{в}^{20°}$	$\sigma_{в}^{t}$	МЦУ$^{20°}$/МЦУ$^{600°}$: σ_{max}, МПа*	МнЦУ$^{20°}$/МнЦУ$^{600°}$: σ_{max}, МПа**	$\sigma_{100}^{600°}$, МПа
		МПа				
ВТ18У (штамповка)	Пластинчатая	940	600	840/540***	375/285	275
ВТ41 (штамповка)	Пластинчатая	1050	720	930/630	410/–	335
	Глобулярно-пластинчатая	1100	690	–	–	295
ВТ18У (пруток)	Пластинчатая	960	575	–	410/–	265
ВТ41 (пруток)	Глобулярно-пластинчатая	1000	640	960/550	510/370	275
	Глобулярно пластинчатая (после закалки и старения)	1100	700	1020/590	560/410	265

*Малоцикловая усталость (при N=10^4 цикл; f=50 Гц; R=0,1).
**Многоцикловая усталость (при N=2·10^7 цикл; f=50 Гц; R=-1).
***При температуре 550°С.

пластинчатой микроструктурой способен к термическому упрочнению при сохранении удовлетворительных пластических свойств: $\sigma_в^{20°} \geq 1100$ МПа при δ=7,5–11%, $\sigma_в^{600°} \geq 700$ МПа, $\sigma_{100}^{600°}$ =265 МПа.

КОНСТРУКЦИОННЫЕ ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ

ВТ16 – позволил создать высокопроизводительный и эффективный технологический процесс изготовления деталей крепления путем холодной высадки. Обеспечивает в 1,5 раза более высокий удельный предел выносливости (по сравнению со сталью 16ХСН) и обладает высокой коррозионной стойкостью.

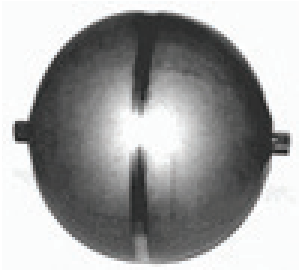
ВТ20 – в настоящее время является наиболее широко применяемым конструкционным листовым свариваемым титановым сплавом. Его используют в конструкциях планера, а также для изготовления деталей ГТД. Свариваемый титановый сплав ВТ20 широко применен в конструкции планера самолета Су-35 для изготовления деталей и сварных узлов фюзеляжа, центроплана, крыла и киля этого самолета. Для изготовления деталей и узлов используются полуфабрикаты в виде штамповок, прутков, профилей, плит и листов. В самолете Су-35 из сплава ВТ20 применены силовые монолитные и сварные детали и узлы: балки, лонжероны, стрингеры, стыковочные пояса, стенки, кронштейны, фитинги.

Свойства высокопрочных свариваемых титановых сплавов

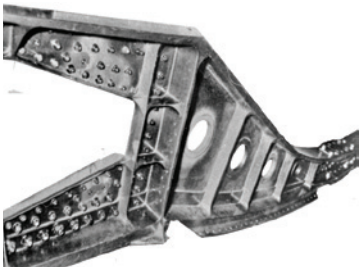
Сплав	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	МЦУ*: N, кцикл	K_{1c}, МПа$\sqrt{м}$ (толщина образца=40 мм)	СРТУ**: dl/dN, мм/кцикл (при ΔK=31 МПа$\sqrt{м}$)
	МПа				
ВТ23	≥1080	≥1010	≥150	≥70	≤0,8
ВТ23М	≥1150	≥1060	≥240	≥92,3	≤0,55
Ti–10V–2Fe–3Al (США)	≥1100	≥1000	≥100***	≥60	≤1,0

*Малоцикловая усталость (при $\sigma_{нетто}$=290 МПа; f= 5 Гц, R = 0,1; K_t=2,6).
**Скорость роста трещины усталости.
***При K_t=3,1.

Детали крепежа



Шаровой баллон



Шпангоут

Самолет Су-35

Силовой набор фюзеляжа

ВТ23 – высокопрочный свариваемый сплав широкого применения; используется в монолитных, сварных и паяных конструкциях самолетов, ракет и космических аппаратов. Разработаны технология изготовления полуфабрикатов (листов, фольги, ленты, штамповок и поковок) массой до 3,5 т; процессы ВТМО и текстурного упрочнения для изготовления лонжеронов, шпангоутов, балок, силового набора с $\sigma_в \geq 1100$ МПа (в зависимости от типа деталей и их ресурса), шаровых баллонов с конструкционой прочностью $\sigma_{в.к} \geq 1300$ МПа. Применяется в конструкции самолетов Ан-158, Су-31М, Су-29 (рессорные шасси и пружины) и др.

ВТ23М – высокопрочный свариваемый сплав с более узким диапазоном легирования, чем у сплава ВТ23, отличается высокой стабильностью и повышенным уровнем механических свойств ($\sigma_в \geq 1150$ МПа). Применяется в монолитных, сварных и паяных конструкциях самолетов, ракет и космических аппаратов.

ВТ43 – высокопрочный свариваемый сплав широкого применения; используется в монолитных, сварных и паяных конструкциях самолетов, ракет и космических аппаратов, изготовленных с

Сравнительные свойства конструкционных титановых сплавов

Сплав	$\sigma_в$	$\sigma_{в.св}$	$K_{1c\ св}$, МПа$\sqrt{м}$	$\sigma_в / d$	$\sigma_{в.св} / d$
	МПа			км (усл. ед.)	
ВТ43	1200	1150	70	26,4	25,3
ВТ6	900	810	60	20,3	18,3
Ti–10V–2Fe–3Al (США)	1150	940	50	24,7	20,2

Сравнительные свойства титановых сплавов

Сплав	$\sigma_в^{20°}$	$\sigma_{100}^{500°}$	$\sigma_{100}^{600°}$	$\sigma_{0,2/100}^{500°}$	$\sigma_{0,2/100}^{600°}$
	МПа				
ВТ38	971	600	240	290	60
ВТ18У	971	580	190	270	40
ВТ20	932	480	–	160	–

использованием различных типов полуфабрикатов, в том числе крупногабаритных (сечением до 250 мм) с прочностью $\sigma_в \geq 1200$–1300 МПа.

ВТ18У (листы) – листовой конструкционный сплав высокотемпературного (до 600°С) применения ($\sigma_в \geq 960$ МПа, $\sigma_{100}^{600°} = 190$ МПа). Предназначен для изготовления обшивки самолетов, ракет и двигателей.

ВТ38 – новый жаропрочный, жаростойкий, пониженной окисляемости сплав с рабочей температурой до 650°С ($\sigma_в \geq 970$ МПа, $\sigma_в^{600°} \geq 630$ МПа, $\sigma_в^{650°} \geq 530$ МПа, $\sigma_{100}^{600°} = 240$ МПа); предназначен для изготовления обшивки самолетов, ракет и двигателей. Сплав ВТ38 – псевдо-α-сплав системы Ti–Zr–Mo–Sn–Nb, легированный редкоземельным элементом – гадолинием, повышающим жаропрочность.

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ

ВТ22 – высокопрочный свариваемый титановый сплав с высокой прокаливаемостью широко применен в изделиях авиационной техники: Ил-76, Ил-86, Ил-96-300, Ан-72, Ан-74, Ан-124, Ан-224, Ан-148, Як-42, Бе-200, Ту-204, МиГ-29, Т-50 и др. Сплав предназначен и применяется для изготовления крупногабаритных деталей внутреннего силового набора (балок, лонжеронов, шпангоутов, нер-вюр, рельсов закрылков и предкрылков), а также крупногабаритных силовых деталей и узлов шасси, в том числе сварных (траверс, балок тележек основных шасси, шлиц-шарниров, тормозных рычагов). Из сплава ВТ22 изготовляют следующие виды полуфабрикатов: поковки, штамповки, прутки, плиты, прессованные профили.

ВТ22М – усовершенствованный высокопрочный свариваемый титановый сплав перспективен для изготовления крупногабаритных деталей внутреннего силового набора (балок, лонжеронов, шпангоутов, нервюр, рельсов закрылков и предкрылков), а также

Сварное коромысло тележки шасси

Сварная траверса шасси

Свойства высокопрочных титановых сплавов

Сплав	d, г/см³	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	МЦУ*: $N_{ср}$, кцикл
		МПа		%		
ВТ22И	4,62	≥1150	≥1020	≥8	≥30	≥200
ВТ22 (базовый)	4,62	≥1030	≥950	≥6	≥16	≥150

*Малоцикловая усталость (при σ_{max}=290 МПа; f=5 Гц; R=0,1; K_t=2,6).

Свойства высокопрочных свариваемых титановых сплавов

Сплав	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	d, г/см³	K_{1c}, МПа$\sqrt{м}$	МЦУ*: $N_{ср}$, кцикл	СРТУ**: dl/dN, мм/кцикл
	МПа					
ВТ22М	≥1100	≥1020	4,62	≥68	≥200	≤0,8
ВТ22 (базовый)	≥1030	≥950	4,62	≥58	≥150	≤1,0

*Малоцикловая усталость (при σ_{max}=290 МПа; f=5 Гц; R=0,1; K_t=2,6).
**Скорость роста трещины усталости (при ΔK=31 МПа$\sqrt{м}$).

крупногабаритных силовых деталей и узлов шасси, в том числе сварных (траверс, балок тележек основных шасси, шлиц-шарниров, тормозных рычагов). Из сплава изготовляют следующие виды полуфабрикатов: поковки, штамповки, прутки, плиты, прессованные профили.

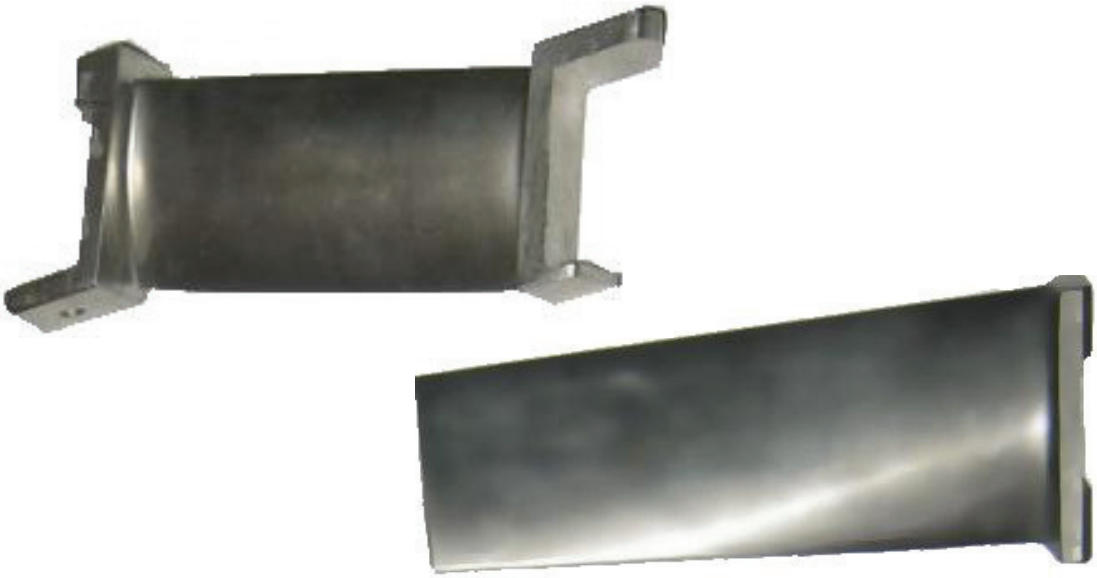
ВТ22И – высокотехнологичный высокопрочный титановый сплав. Предназначен для изготовления точных штамповок методом изотермического деформирования в условиях сверхпластичности. Обеспечивает возможность изготовления тонкостенных деталей сложной конфигурации (панелей, крышек люков, кронштейнов, рычагов, ушковых болтов) с однородной мелкозернистой структурой, с высоким и стабильным уровнем механических свойств. Достигнуто увеличение коэффициента использования металла (КИМ) в 2 раза и снижение трудоемкости механической обработки деталей на 30–40%.

Крышка люка и заготовка сварного баллона высокого давления

ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫЕ ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ

ВТИ–2 – α_2+орто+β деформируемый сплав для прутков и штамповок с пределом прочности $\sigma_в^{20°}$>1000 МПа, пластичностью δ>3–4%; $\sigma_{100}^{650°}$>380 МПа (прутки и штамповки толщиной 25 мм). Из сплава освоено опытное производство слитков, кованых и штампованных заготовок и прутков. Сплав рекомендован для изготовления деталей авиадвигателей (сопловые лопатки, корпуса) с рабочей температурой до 650°С (длительно) и до 700°С (кратковременно). Сплав пожаробезопасен до температуры 700°С.

ВТИ–4 – деформируемый орто+β-сплав с повышенной технологичностью для листов с пределом прочности $\sigma_в^{20°}$>1150 МПа, пластичностью δ>5%; $\sigma_{100}^{650°}$>350 МПа. Из сплава освоено производство слитков, кованых и штампованных заготовок, листов (ТУ 1-92-206–2003), а в опытном производстве – лент и фольги



Сопловая и поворотно-сопловая лопатки КВД

Механические свойства интерметиллидных титановых сплавов

Сплав	Значения свойств при температуре испытаний, °С									
	20							650		
	d, г/см³	*E*, ГПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	σ_{-1}*, МПа	*KCU*, Дж/см²	$\sigma_в$, МПа	δ, %	σ_{100}, МПа
ВТ41	4,6	120	1050	7	15	510	30	690	14	335
ВТИ-2	4,78	120	1050	3–4	4–5	470	27	830	12	380
ВТИ-4	5,15	130	1150	≥6	≥8	500	25	900	12	350

*При $N=2\cdot10^7$ цикл; f=50 Гц.

Механические свойства матричного сплава ВТИ–4 и перспективного КМ на его основе

Сплав, материалы	Значения свойств при температуре испытаний, °С									
	20							650		
	d, г/см³	*E*, ГПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	σ_{-1}*, МПа	*KCU* Дж/см²	$\sigma_в$, МПа	δ, %	σ_{100}, МПа
ВТИ-4 (лист толщиной 2 мм)	5,15	130	1150	≥ 6	≥ 8	500	25	900	12	350
Волокно β-SiC (∅140 мкм)	3,00	415	5860	–	–	–	–	–	–	–
Перспективный КМ (ВТИ-4+40% SiC)	4,35	170	2200	1,5	–	900	40	1800	8	1200

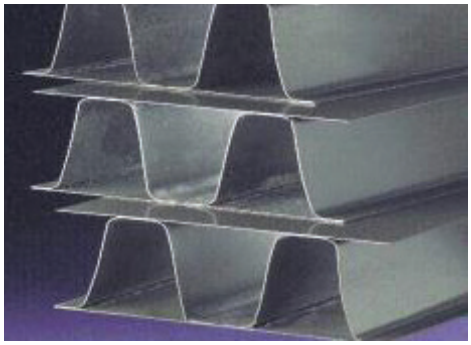
*При $N=2\cdot10^7$ цикл; f=50 Гц.

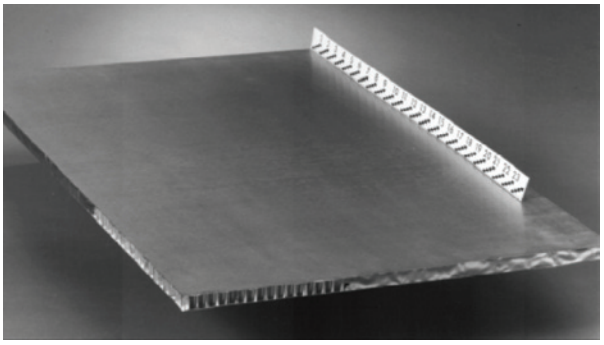
с гарантированным уровнем свойств. Сплав рекомендуется для изготовления корпусных, статорных деталей авиадвигателей, облегченных панелей и элементов аэрокосмических конструкций с рабочей температурой до 650°С (длительно) и до 700°С (кратковременно). Сплав пожаробезопасен до температуры 700°С.

Сплав перспективен для использования в качестве матричного материала для интерметаллидных композиционных материалов, упрочняемых волокном карбида кремния, обеспечивающих высокие удельные характеристики: σ^{20°/d>46 км (усл. ед.); $\sigma_{100}^{650^\circ}/\delta$>25 км (усл. ед.).

Использование сплава ВТИ-4 в монолитном варианте обеспечивает снижение массы конструкции до 20% и повышение рабочих температур до 150°С, а применение КМ в аналогичных конструкциях позволит снизит их массу на 45%.

ВИТ1 – наиболее жаропрочный среди деформируемых интерметаллидных сплавов для прутков с пределом прочности $\sigma_в^{20^\circ}$ >1250 МПа, пластичностью δ>6%; $\sigma_{100}^{650^\circ}$ >430 МПа (прутки ∅25 мм).





Сотовая панель

Механические свойства жаропрочных деформируемых интерметаллидных сплавов

Сплав	Значения свойств при температуре испытаний, °С									
	20							650		
	d, г/см³	*E*, ГПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %	σ_{-1}*, МПа	*KCU*, Дж/см²	$\sigma_в$, МПа	δ, %	σ_{100}, МПа
ВТИ-4	5,15	130	1150	≥6	≥8	500	25	900	12	350
ВИТ1	5,3	135	1250	≥6	≥8	600	27	1000	12	430

*При $N=2\cdot10^7$ цикл; $f=50$ Гц.

Из сплава освоено опытное производство слитков, кованых и штампованных заготовок и прутков. Сплав рекомендован для изготовления деталей авиадвигателей (сопловые лопатки) с рабочей температурой до 700°С (длительно). Сплав пожаробезопасен до температуры 700°С.

Использование сплава ВИТ1 в деталях КВД перспективного двигателя позволит снизить их массу на 30%, температуру эксплуатации – на 150–200°С.

Рабочие лопатки КВД

ЛИТЕЙНЫЕ ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ

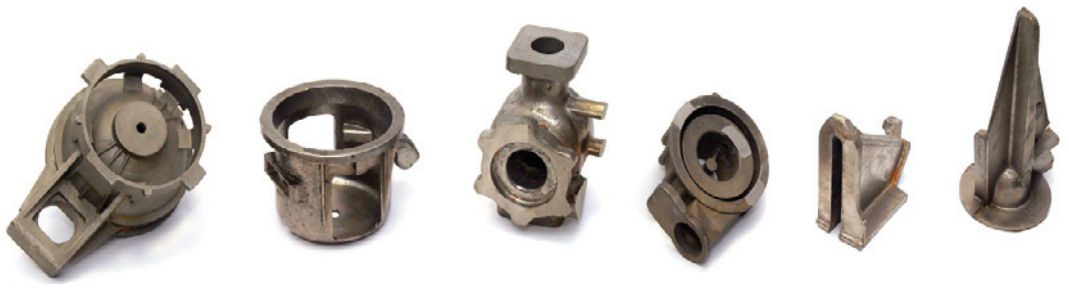
ВТ1Л, ВТ5Л, ВТ20Л – технологичные литейные титановые сплавы с прочностью от 350 до 920 МПа. Благодаря высокой технологичности широко используются в изделиях химического машиностроения, медицине, а также для изготовления высоконагруженных деталей ответственного назначения (литых корпусов двигателей, турбин, крыльчаток и т. д.).

ВТ6Л – относится к литейным титановым сплавам средней прочности ($\sigma_в \geq 900$ МПа). Сплав рекомендуется для литых деталей, длительно работающих при температурах до 400°С. Сплав ВТ6Л является термоупрочняемым, путем термообработки можно повысить прочность сплава до 1050–1100 МПа.

ВТ40Л – высокопрочный экономнолегированный литейный титановый сплав, обладающий повышенной прочностью ($\sigma_в \geq 1050$ МПа), высоким пределом выносливости ($\sigma_{-1} \geq 340$ МПа на базе 10^7 циклов при f=50 Гц) и рекомендуется для применения вместо серийных литейных титановых сплавов ВТ6Л и ВТ20Л в агрегатах и двигателях для изготовления турбинных колес, крыльчаток, корпусов, промежуточных опор, кронштейнов.

Механические свойства литейных титановых сплавов

Сплав	$\sigma_в$	$\sigma_{0.2}$	δ	ψ	*KCU*, кДж/см²
	МПа		%		
ВТ1Л	343	275	10	20	588
ВТ5Л	686	618	6	14	294
ВТ6Л	834	736	5	10	245
ВТ20Л	932	834	8	20	390
ВТ40Л	1030	900	5	12	294



Фасонные отливки

ДЕФОРМИРУЕМЫЕ МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

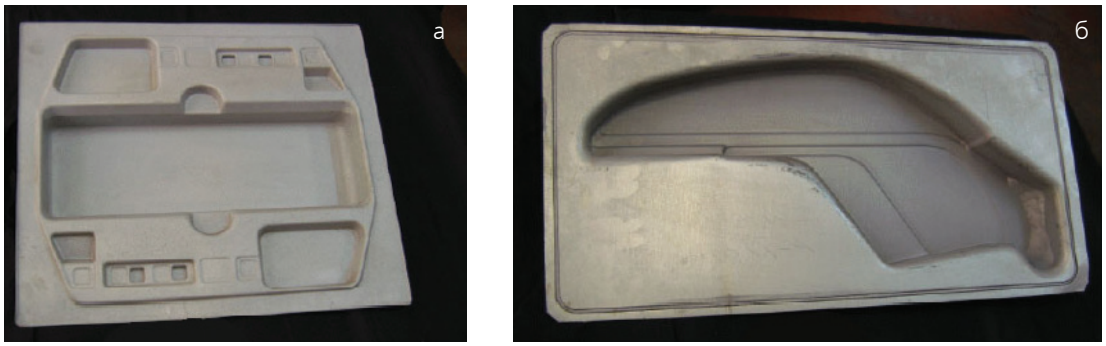
СПЛАВЫ СРЕДНЕЙ ПРОЧНОСТИ

МА20, МА20–СП – сплавы системы Mg–Zn–Zr–Ce ввиду малой степени легирования отличаются от остальных деформируемых магниевых сплавов повышенной пластичностью и технологичностью, характеризуются малой анизотропией свойств (не более 5–10%). Сплавы не склонны к коррозионному растрескиванию, обладают удовлетворительной коррозионной стойкостью.

Сплав МА20 применен для изготовления профилей и деталей приборной панели в самолете Ил-76

Механические свойства деформируемых магниевых сплавов средней прочности

Сплав	Вид полуфабриката	Состояние	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	$\sigma_{0,2сж}$, МПа
			МПа			
МА20-СП	Лист толщиной 0,6 3,0 мм	М	270	220	**14**	186
МА20			225	157	**18**	118
МА2-1			255	155	**10**	85



Детали пассажирских кресел, получаемые сверхпластическим формованием из сплава типа МА20: а – панель спинки кресла; б – декоративная накладка панели подлокотника пассажирского кресла

Сплавы хорошо свариваются АрДЭС и контактной электросваркой, причем возможна сварка деталей сложной конфигурации, предназначенных для эксплуатации при температуре 150°С (длительно) и до 200°С (кратковременно). Сплав МА20-СП предназначен также для изготовления деталей сложной конфигурации методом свехпластической деформации (СПД), в частности формовки (детали окантовки кабины, декоративные детали, детали приборного отсека и т. д.).

Сплав МА20 нашел применение в изделиях НИИ Космического приборостроения; сплав МА2-1 системы Mg—Al—Zn—Mn широко применяется как в пассажирских самолетах Ил-96-300 и Ту-204, так и в транспортных самолетах типа Ил-76, Ту-22 (штамповки, качалки, рычаги, приборные отсеки).

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ

Повышенная прочность сплавов достигается легированием сплавов алюминием, цинком, цирконием, а также введением редкоземельных металлов — иттрия, лантана, неодима.

МА14 – детали из сплава предназначены для длительной эксплуатации при температурах до 125°С. Сплав нашел применение в конструкциях изделий не только гражданской, но и военной авиации (Су-27, Су-30, МиГ-29 и др.) в качестве деталей силовой системы управления (кронштейны, качалки, рычаги и т. д.) и деталей внут-реннего набора (плиты, профили, штамповки и др.).

Механические свойства высокопрочных деформируемых магниевых сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	Состояние	*E*, ГПа	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	$\sigma_{в.св}$	$\sigma_{0,2сж}$
				МПа			МПа	
МА22 (ВМД10)	Поковка массой 50÷60 кг	М	46	335	240	8	–	220
	Прессованная полоса		45	345	255	8	305	260
МА14	Поковка массой 50–100 кг	Т1	42,3	274	175	7	Не свари-вается	–
МА15	Штамповка массой до 30 кг	Без термообра-ботки	41	294	245	5	230	140

Сплав МА14 применен в деталях системы управления в самолете Су-27

Применение режима объемной сверхпластической деформации для серийного высокопрочного сплава МА14 обеспечивает формирование равноосной и мелкозернистой структуры (размер зерна ~7÷10 мкм), повышает уровень механических свойств штамповок на 10–15% при двукратном снижении анизотропии свойств.

МА22 – высокопрочный и жаропрочный сплав, может длительно (до 100 ч) эксплуатироваться при 200°С, кратковременно – до 250°С, хорошо сваривается ААрДЭС ($\sigma_{в.св}/\sigma_в$=0,88), отличается малой анизотропией механических свойств ($K_{аниз}$=10–18%).

Сплав нашел применение в изделиях оборонной и космической техники предприятий ГРЦ «КБ им. В.П. Макеева», НПО им. С.А. Лавочкина (для головных частей разгонного блока, шпангоутов аппаратов «Венера», «Марс», «Фрегат» и др.), а также для изготовления свариваемого приборного контейнера космического аппарата «ОКО» космической системы предупреждения ракетного нападения (КСПРН).

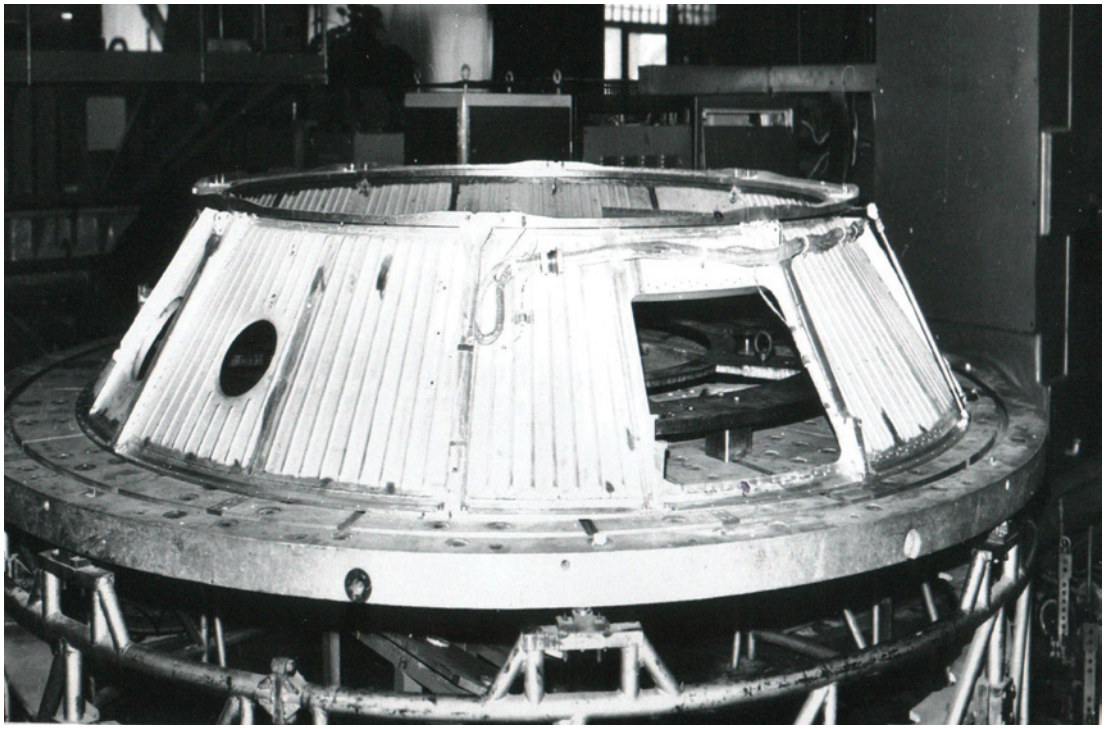
Сплав МА14 применен при изготовлении кронштейнов и качалок в самолете МиГ-29

ГРАНУЛИРОВАННЫЕ СПЛАВЫ

Активное воздействие процесса ускоренной кристаллизации гранул на их структурно-фазовое состояние позволяет получать материалы с новыми свойствами даже при стандартном составе сплава. К группе гранулированных сплавов относятся сплавы МА2-1гр. и МА14гр. Прочностные характеристики различных полуфабрикатов из гранулированных сплавов, полученных в промышленных условиях, в 1,3–1,5 раза выше, чем свойства полуфабрикатов из слитка, а значения ударной вязкости – в 2–5 раз превосходят аналогичные характеристики других магниевых сплавов. Эти сплавы рекомендуются для корпусных деталей изделий машиностроения и товаров широкого применения. Температура эксплуатации – от -70 до +60°С.

Свойства гранулированных сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	Состояние	*E*, ГПа	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$\sigma_{0,2сж}$, МПа	*KCU*, кДж/см²
				МПа		%			
МА14гр.	Пруток (Ø22–40 мм)	Горячепрессованное	42,1	333	265	13	20	265	294
МА2-1гр.			42,1	304	225	14	19	225	490



Конструкция непилотируемого летательного аппарата НПО им. С.А. Лавочкина

ЖАРОПРОЧНЫЙ СПЛАВ

МА12 – жаропрочный магниевый деформируемый сплав пригоден для производства всех видов полуфабрикатов, включая тонкие листы. Сваривается АрДЭС. Основное применение – в конструкциях космических летательных аппаратов.

Свойства жаропрочного сплава

Сплав	Вид полуфабриката	Состояние	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	$\sigma_{0,2/100}$, МПа, при температуре испытания, °С	
			МПа			150	200
МА12	Лист толщиной 1–3 мм	Т6 (закака+старение)	275	145	7	127	70

УЛЬТРАЛЕГКИЕ СПЛАВЫ (СПЛАВЫ ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТИ)

Магниевые сплавы пониженной плотности содержат наряду с другими легирующими элементами литий в количестве до 10,5% (по массе). С повышением содержания лития плотность сплавов снижается и составляет 1600–1500 кг/м^3 (вместо 1780–1820 кг/м^3 для обычных магниевых сплавов).

МА18 (ВМД5) – сплав относится к β-области, плотность 1500 кг/м^3. Сплав отличается высокой пластичностью при комнатной и криогенных температурах, повышенным модулем упругости (на 5–10%) и высокой удельной жесткостью. Из сплава МА18 могут быть изготовлены все виды полуфабрикатов. Сплав сваривается АрДЭС, обладает удовлетворительной коррозионной стойкостью.

МА21 – плотность 1580–1600 кг/м^3. По характеристикам прочности превосходит сплав МА18 на 25–30%.

Механические свойства ультралегких магниевых сплавов

Сплав	Вид полуфабриката	Состояние	*E*, ГПа	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ_{10}	ψ	$\sigma_{пц.\,сж}$	$\sigma_{0,2сж}$	*KCU*, кДж/м^2
				МПа		%		МПа		
МА21	Лист (толщина 2 мм)	Без термической обработки	46,1	225	196	14	–	108	196	41
	Пруток (∅20 мм)		46,1	225	176	14	18	108	186	49
МА18	Лист (толщина 2 мм)	М	44,1	167	127	30	–	98	137	–
	Пруток (∅20 мм)		47,0	176	137	30	56	–	–	245

Температурный интервал эксплуатации сплавов ±60°С; применены в оборонной промышленности.

ЛИТЕЙНЫЕ МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ СИСТЕМЫ Mg–Zn–Zr

ВМЛ20 – высокопрочный ($\sigma_в$=300 МПа) сплав с повышенной коррозионной стойкостью, рекомендуется вместо сплавов МЛ5, МЛ8, МЛ12 для деталей узлов агрегатов, двигателей летательных аппаратов, газоперекачивающих и энергетических установок (корпуса насосов, помп, картера, маслоагрегаты, редуктора, вентиляторы), ракетной и космической техники (отсеки рулевые, управления боевой части). Сплав применяется в термически обработанном состоянии по режимам Т6 и Т61.

ВМЛ24 – высокопрочный ($\sigma_в$=330 МПа) сплав предназначен для литых нагруженных деталей самолетов, вертолетов, космических аппаратов, двигателей (авиаколеса, кронштейны, фермы, рамы, коробки скоростей и др.). Сплав применяется в термически обработанном состоянии по режимам Т6 и Т61.

Барабан авиаколеса

Крышка агрегата двигателя

Авиаколесо самолета Ил-76М

Механические свойства высокопрочных литейных магниевых сплавов

Сплав	Способ литья	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	$\sigma_в/d$, км (усл. ед)
		МПа			
ВМЛ20-Т6	В кокиль, песчано-глинистые и холоднотвердеющие формы	300	200	4,5	16
ВМЛ24-Т61		330	245	5	17
МЛ5-Т4 (базовый)		235	90	5	13
МЛ12-Т1 (базовый)		230	130	5	12,7

КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ СПЛАВЫ СИСТЕМЫ Mg–Al–Zn

ВМЛ18–Т4 – коррозионностойкий сплав повышенной чистоты с прочностью 245–250 МПа для работы изделий во всеклиматических условиях. Рекомендуется для деталей внутреннего набора планера самолетов и вертолетов, приборных рам, кабины пилота, корпусного литья, деталей систем управления, трансмиссии взамен сплава МЛ5п.ч.

Сплав ВМЛ18 выплавляется по специальной технологии, разработанной в ВИАМ, превосходит по коррозионной стойкости и чистоте все существующие сплавы на основе магния, не содержит дефицитных и дорогостоящих элементов.

Приборная рама

Механические свойства коррозионностойких литейных магниевых сплавов

Сплав	Способ литья	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	$\sigma_в/d$, км (усл. ед.)	Коррозионная стойкость без защиты по водороду (за 48 ч), см³/см²
		МПа				
ВМЛ18-Т4	В кокиль, песчано-глинистые и холоднотвердеющие формы	245–250	100–110	5–8	13,5–13,8	≤2,5
МЛ5п.ч. (базовый)		235	90	5	13	≤8,0

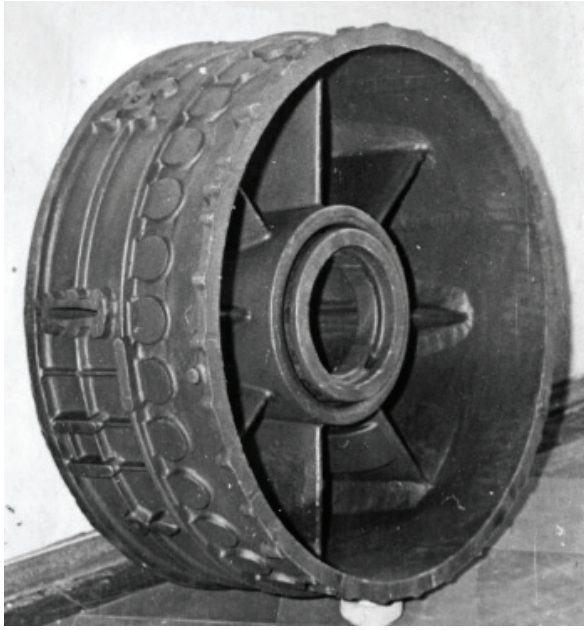
ЖАРОПРОЧНЫЕ СПЛАВЫ СИСТЕМЫ Mg–РЗМ–Zr

МЛ10, МЛ19 – жаропрочные сплавы предназначены для эксплуатации в условиях нагрева – длительно до 250–300°С. Жаропрочные литейные сплавы применяются для деталей самолетов, вертолетов, двигателей, приборов, маслоагрегатов, редукторов и других конструкций, работающих при повышенных температурах.

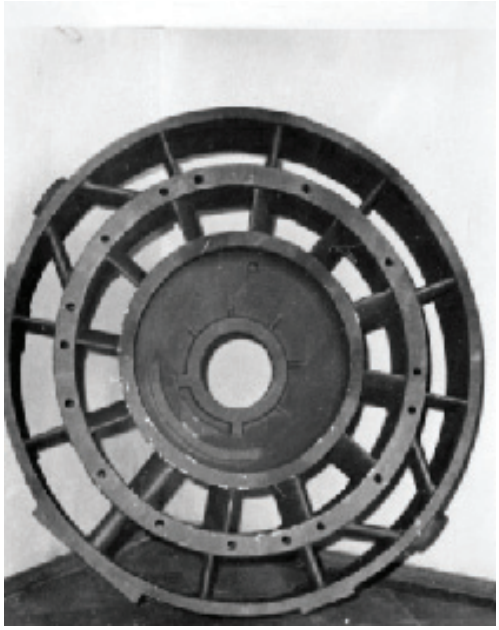
Наиболее широко применяется низколегированный жаропрочный сплав МЛ10, отличающийся высоким уровнем механических свойств.

Жаропрочные сплавы мало склонны к образованию микрорыхлоты в отливках и отличаются высокой герметичностью. Хорошие литейные свойства позволяют получать из них сложные крупногабаритные отливки.

Литые детали из жаропрочных сплавов (особенно из сплава МЛ10) отличаются высокой стабильностью размеров.



Корпус передней опоры двигателя из сплава МЛ19



Корпус компрессора двигателя из сплава МЛ10

Механические свойства жаропрочных магниевых сплавов с РЗМ

Сплав	Способ литья	Температура эксплуатации, °С	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	$\sigma_в/d$, км (усл. ед.)	$\sigma_{100}^{250°}$	$\sigma_{100}^{300°}$
			МПа				МПа	
МЛ10-Т6	В кокиль, песчано-глинистые и холоднотвердеющие формы	250	230	140	3	13	70	25
МЛ19-Т6		300	220	120	3	12,3	115	60

ПРОТИВОПРИГАРНЫЕ ПРИСАДОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Для защиты от окисления и обеспечения высокого качества магниевых сплавов при литье в песчано-глинистые формы разработаны составы и технология получения новых противопригарных присадочных материалов на отечественном сырье.

В ВИАМ организован участок по малотоннажному производству присадок марок ВМ-У, ВМ-У2, ВМ-У3 (объем – до 15 т).

Присадки поставляются ведущим предприятиям авиакосмической промышленности: ОАО «Роствертол», ОАО «ЗЭМ РКК "Энергия"», ОАО «КОМЗ», ОАО «НПО "Сатурн"», ОАО «ДМЗ», ОАО «МКБ "Факел"».

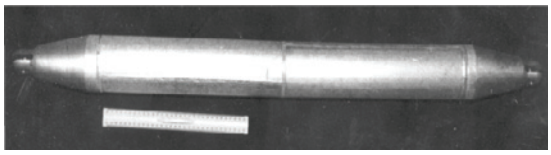
Участок по производству присадок марок ВМ-У, ВМ-У2, ВМ-У3

БЕРИЛЛИЕВЫЕ СПЛАВЫ

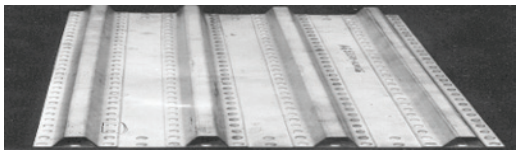
СВАРИВАЕМЫЕ ВЫСОКОПРОЧНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ ПОВЫШЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ И ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТИ СИСТЕМЫ Al–Be–Mg

АБМ1 – свариваемый высокопрочный алюминиевый сплав повышенной жесткости и пониженной плотности (основа – сплав типа АМг6, содержащий 30% бериллия). Технологичен при обработке давлением. Освоено производство листов (толщина – от 0,8 до 12 мм), полос, прутков, труб, прессованных профилей. Сплав обладает хорошей свариваемостью ($\sigma_{в.св}/\sigma_в$=0,75–0,9). Рекомендуется для применения в коррозионноопасных зонах, сварных и клепаных конструкциях, в том числе

для внутреннего набора фюзеляжа самолетов, экранопланов, дирижаблей и космических летательных аппаратов, в элементах конструкций, где определяющими критериями являются высокие жесткость и удельная прочность. Применялся в виде раскосов солнечных батарей на космических станциях «Венера-8», «Венера-9». Был опробован при изготовлении конструктивных элементов для ВКС «Буран».



Сварной раскос из сплава АБМ1 для космического корабля «Буран»



Сварная панель из сплава АБМ1 со стрингерами, полученными стесненным изгибом, для космического корабля «Буран»

Механические свойства высокомодульного сплава пониженной плотности

Сплав	Вид полуфабриката	d, г/см³	E, ГПа	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	$\sigma_в/d$, км (усл. ед.)	$\sigma_в^{250°}$	$\sigma_{0,2}^{250°}$	Коэффициент ослабления сварных соединений $\sigma_{в.св}/\sigma_в$ (ААрДЭС)
				МПа				МПа		
АБМ1	Лист (толщина 1,5 мм)	2,35	130	420	270	16	17,9	260	180	0,75–0,9
Д16ч.-Т (базовый)		2,78	72	≥425	≥275	≥11	14,9	–	–	Не сваривается

АБМ2 – среднепрочный алюминиевый сплав повышенной жесткости и пониженной плотности (основа – сплав типа АМг6, содержащий 20% бериллия). Технологичен при обработке давлением. Рекомендуется к применению в элементах конструкций, где определяющими критериями являются высокие жесткость и удельная прочность.

Механические свойства среднепрочного сплава

Сплав	Полуфабрикат	d, г/см³	E, ГПа	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	E/d	$\sigma_в/d$
				МПа			км (усл. ед.)	
АБМ2	Пруток (Ø30 мм)	2,42	115	435	285	28	4750	17,8
Д16ч.-Т (базовый)	Пруток (Ø22 мм)	2,78	72	460	320	10	2590	16,4

АБМ3 – высокомодульный сплав пониженной плотности (основа – сплав типа АМг6, содержащий 70% бериллия). Из всех алюминийсодержащих сплавов АБМ3 обладает наивысшей удельной жесткостью (E/d=10200 км (усл. ед.) и удельной прочностью ($\sigma_в/d$=27 км (усл. ед.)). Рекомендуется для элементов

конструкций, в которых определяющими критериями являются высокие жесткость и удельная прочность при температурах до 250°С.

Механические свойства высокомодульного сплава пониженной плотности

Сплав	Вид полуфабриката	d, г/см³	E, ГПа	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	E/d	$\sigma_в/d$	$\sigma_в^{300°}$	$\sigma_{0,2}^{300°}$
				МПа			км (усл. ед.)		МПа	
АБМ3	Пруток (∅30 мм)	2,06	210	560	410	12	10200	27,0	320	290
Д16ч.-Т (базовый)	Пруток (∅22 мм)	2,78	72	460	320	10	2590	16,4	–	–

АБМ4 – свариваемый высокопрочный алюминиевый сплав повышенной жесткости и пониженной плотности (основа – сплав типа АМг6, содержащий до 45% бериллия). Сплав обладает удовлетворительной свариваемостью ($\sigma_{в.св}/\sigma_в$= 0,7–0,8) и рекомендуется для элементов конструкций, в которых определяющими критериями являются высокие жесткость и удельная прочность при температурах до 250°С.

Механические свойства высокопрочного сплава повышенной жесткости

Сплав	Вид полуфабриката	d, г/см³	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	$\sigma_в/d$	E/d	$\sigma_в^{250°}$, МПа	$K_c^у$, МПа$\sqrt{м}$ (при B=400 мм)	Коэффициент ослабления сварных соединений $\sigma_{в.св}/\sigma_в$ (ААрДЭС)
			МПа			км (усл. ед.)				
АБМ4	Лист (толщина 1,5 мм)	2,18	520	420	12	23,8	7300	380	200	0,7–0,8
Д16ч.-Т (базовый)		2,78	≥425	≥275	≥11	14,9	2590	–	120	Не сваривается

ВАБ-1 – среднепрочный сплав системы Al–Li–Be повышенной жесткости (содержащий до 2,8% бериллия). Технологичен при обработке давлением, применяется плакированный алюминием. Освоено производство прутков, полос, прессованных профилей, листов. Рекомендуется для деталей внутрикорпусного силового набора.

Механические свойства среднепрочного сплава повышенной жесткости

Сплав	Вид полуфабриката	d, г/см³	E, ГПа	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	$\sigma_{0,2}/d$, км (усл. ед.)
				МПа			
ВАБ-1	Полоса	2,60	89	455	425	9,5	16,3
1441-Т1 (базовый)	Панель	2,59	80	460	350	6,8	13,5

БЕРИЛЛИЙ ДЕФОРМИРОВАННЫЙ

Заготовки для деформирования (блоки) изготовляются способом порошковой металлургии – горячим прессованием в вакууме порошка с дисперсностью частиц ≤56 мкм.

В отожженном состоянии в поперечном направлении свойства блоков: $\sigma_в$≥280 МПа, δ≥0,8–1,0%.

Применяются для деталей конструкций летательных аппаратов, работающих при температурах до 500–700°С, от которых требуется повышенная жесткость в сочетании с высокой удельной прочностью или определенные физические (в том числе ядерные) свойства.

Низкий температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) бериллия (близкий к ТКЛР стали) позволяет получать детали высокой точности с высоким качеством поверхности для использования этого металла в точных приборах.

Бериллиевая проволока диаметром 0,5–1,0 мм может применяться в качестве эффективного упрочнителя в композиционных материалах.

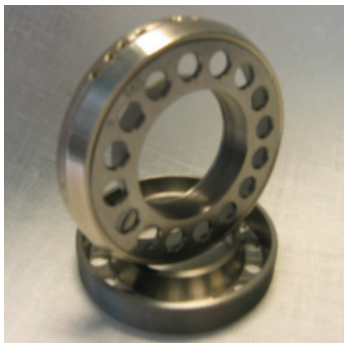
Механические свойства бериллия

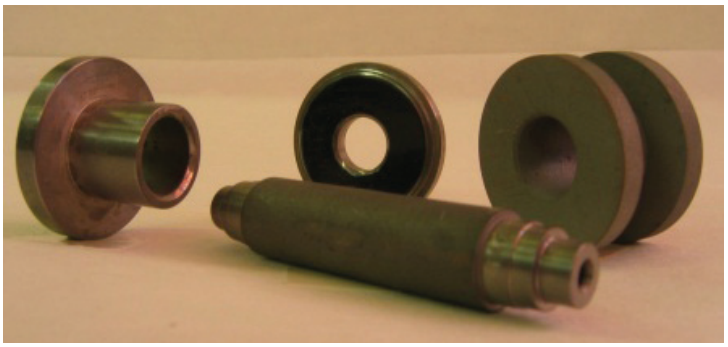
Материал	Вид полуфабриката	d, г/см³	E, ГПа	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	E/d	$\sigma_в/d$	$\sigma_в^{500°}$, МПа
				МПа			км (усл. ед.)		
Бериллий	Пруток	1,85	290	≥550	≥300	4–8	16200	29,5	300

Силовые каркасы тормозных дисков и рамки остекления из бериллия для космического корабля «Буран»

СТРАТЕГИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ В ОБЛАСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ, ТИТАНОВЫХ, МАГНИЕВЫХ И БЕРИЛЛИЕВЫХ СПЛАВОВ

Основываясь на приоритетных направлениях развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, стратегиях развития интегрированных





Детали гироскопических приборов

структур и государственных корпораций, а также на мировых тенденциях развития материалов и технологий, во ФГУП «ВИАМ» разработаны «Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» (включают 18 направлений, 71 комплексную проблему, 10 инновационных концептов), которые одобрены 114 экспертами от 80 организаций различных отраслей. По направлению «Алюминиевые, титановые, магниевые и бериллиевые сплавы» предусмотрены работы в рамках 6 направлений по 21 комплексной проблеме:

- Создание высокопрочных ($\sigma_в \geq 500$ МПа) биметаллов (алюминий/алюминий) с пониженной в 2–3 раза скоростью роста трещины усталости (СРТУ) – до 0,6 мм/кцикл; теплостойких биметаллов (алюминий/титан и алюминий/никель) с повышенной в 1,5 раза рабочей температурой (300–350°С); высокомодульных биметаллов (бериллий/титан и АБМ/титан) с повышенным в 1,5 раза модулем упругости (до 170 ГПа) и пониженной в 1,3 раза плотностью ($d \leq 3{,}2$ г/см^3).
- Создание СИАЛов на основе сверхпрочных алюминиевых сплавов с повышенной на 30% прочностью: $\sigma_{0,2} \geq 450$ МПа при $\sigma_в \geq 800$ МПа, СРТУ: $dl/dN \leq 0{,}2$ мм/кцикл; металлополимерных слоистых материалов на основе алюминиевых и титановых листов, армированных гибридными и гетероволокнистыми наполнителями, с повышенным модулем упругости – в 1,5 раза (до 90 ГПа).
- Разработка сплавов на основе интерметаллидов алюминия с прочностью $\sigma_в \geq 800$ МПа, повышенной рабочей температурой – до 450°С, с плотностью d=3,0–3,9 г/см^3; технологий получения и термической обработки.
- Разработка высокочистых алюминиевых сплавов с минимальным содержанием примесей: Fe+Si≤0,05% (по массе); самозакаливающихся алюминиевых сплавов для получения сварных соединений с высокой прочностью ($\sigma_{в.св}/\sigma_в \geq 0{,}95$); нового поколения свариваемых алюминийлитиевых

сплавов с повышенной в 1,5 раза вязкостью разрушения (K_{1c}=70 МПа√м); упрочненных керамическими наночастицами алюминиевых материалов с повышенной в 1,4 раза прочностью ($\sigma_в \geq$1000 МПа).

- Создание сверхлегких теплостойких пеноматериалов на основе алюминия (плотность 0,2–0,9 г/см^3) и композиционных материалов на их основе с высокой ударостойкостью для применения в качестве брони.
- Создание центра компетенции по интерметаллидным титановым сплавам на базе ФГУП «ВИАМ». Разработка сплавов на основе γ-фазы интерметаллида TiAl с прецизионной системой легирования и плотностью 3,5– 3,9 г/см^3. Создание технологий выплавки интерметаллидного γ-сплава с управлением структурой на стадии выплавки слитков и рабочей температурой до 800°С. Создание технологий моделирования процессов заполнения форм и затвердевания отливок; разработка конструкций литниково-питающих систем, в том числе для лопаток турбин; разработка составов и технологий изготовления керамических форм для литья лопаток турбин. Разработка технологий механической обработки деталей и лопаток.
- Разработка деформируемых сплавов, упрочненных нанодисперсными частицами металлидных тугоплавких соединений, и технологий их деформации, включая изотермическую штамповку на воздухе в условиях сверхпластичности.
- Создание естественных композиционных материалов на основе титана с регламентированной β-структурой путем выделений дисперсных частиц металлидных соединений (TiB, MoSi, TiC и др.), обладающих высокими прочностью при комнатной и рабочей температурах ($\sigma_в^{20°}$=1600 МПа, $\sigma_в^{350°}$ =1100 МПа) и технологичностью для изготовления сложнопрофильных полуфабрикатов.
- Создание технологичных высокопрочных ($\sigma_в$=1300 МПа) и жаропрочных (до 750°С) матричных материалов на основе интерметаллидных титановых сплавов, модифицированных нанодисперсными частицами металлидных тугоплавких соединений для перспективных композиционных материалов.
- Создание экономнолегированных титановых сплавов максимально совместимых с углепластиком, обеспечивающих предел прочности не менее 750 МПа. Разработка технологии изготовления листовых полуфабрикатов и технологий поверхностной обработки для создания МКМ системы «титан–углепластик».

- Создание новых принципов прецизионного легирования никелида титана Nb, Zr и другими элементами, обеспечивающих исключение «паразитных» фаз (типа Ti_2N), не обладающих эффектом памяти формы, максимальную степень «возврата» материала при обратном мартенситном превращении, а также максимальную биосовместимость с живыми организмами (для применения в медицине).
- Создание нового высокопрочного коррозионностойкого литейного сплава на основе системы «алюминий–магний» с пониженной плотностью (d<2500 кг/м^3), обеспечивающего повышение пластичности в 1,5–2 раза (от 6 до 10–12%).
- Создание принципиально новых технологий формообразования фасонных отливок тиксолитьем с использованием при плавке фильтрации, ультразвуковой и лазерной обработок расплава; автоматизации проектирования и изготовления оснастки.
- Разработка составов новых сплавов с применением комплексного микролегирования РЗМ, новых методов модифицирования и рафинирования; при использовании компьютерного моделирования фазового и химического составов путем построения математических моделей для оптимизации технологических параметров изготовления, что приведет к повышению эксплуатационных характеристик магниевых деформируемых сплавов ($\sigma_в$≥450 МПа при $\sigma_{0,2}$≥380 МПа).
- Разработка энергоэффективных, ресурсосберегающих и аддитивных технологий изготовления деформируемых полуфабрикатов (в частности, бесслитковая деформация) с целью достижения гарантируемого уровня свойств полуфабрикатов (не менее): $\sigma_в$≥500 МПа при $\sigma_{0,2}$ ≥420 МПа, что позволит повысить безопасность полетов и ресурс изделий.
- Изучение закономерностей взаимодействия разноименных металлических матричных (магниевые и алюминиевые сплавы) и армирующих компонентов, исследование и оптимизация технологических параметров изготовления полуфабрикатов из МКМ с целью разработки качественно нового класса высокопрочных и легких полиматричных композиционных материалов на магниево-алюминиевой основе; технологии изготовления из них деформируемых полуфабрикатов с $\sigma_в$=700–800 МПа, $\sigma_{0,2}$ =550–600 МПа, d≤2,2 г/см^3.

- Разработка нового поколения магниевых жаропрочных литейных сплавов с $\sigma_{100}^{350°}$=140 МПа и повышенной коррозионной стойкостью (8–10 г/м^2 в сутки).
- Разработка принципиально новых технологий формообразования фасонных отливок тиксолитьем; плавки и литья с использованием защитных сред (взамен флюсов), ультразвуковых методов обработки расплава, лигатур, модификаторов.
- Разработка режимов термической обработки, обеспечивающих создание ультрадисперсной регламентированной структуры.
- Создание новых бериллийсодержащих сплавов с уровнем свойств: d=2,5 г/см^3, E=88 ГПа, δ=16% – для усиливающих конструкций авиационно-космической техники: элеронов, интерцепторов, стабилизаторов, подкосов крыла, раскосов для ферменных конструкций, панелей со стрингерами, трансмиссионных валов.
- Разработка технологии соединения вакуум-плотных бериллиевых окон толщиной $\leq$ 150 мкм с рамками из нержавеющей стали, меди и монеля.

ВИАМ ПРЕДЛАГАЕТ СОТРУДНИЧЕСТВО:

- **по разработке новых и оптимизации существующих алюминиевых, магниевых, титановых и бериллиевых сплавов с требуемым комплексом служебных характеристик и технологий их изготовления;**
- **по разработке нормативной документации на изготовление, поставку и применение полуфабрикатов из легких сплавов;**
- **по научно-технологическому сопровождению при освоении технологий производства полуфабрикатов различной номенклатуры;**
- **по продаже лицензий на разработанные материалы и технологические процессы производства;**
- **по поставке противопригарных присадочных материалов с пониженной гигроскопичностью марок ВМ-У, ВМ-У2 и ВМ-У3 для литейных форм при производстве фасонного литья из магниевых сплавов;**
- **по поставке тормозных дисков, рамок остекления, рентгеновских окон, паяных оптических зеркал, деталей гироскопа из бериллия, лигатур типа АБ-1, медно-бериллиевой лигатуры, бериллиевой бронзы, сварочной проволоки, припоев.**

АЛЮМИНИЕВЫЕ, ТИТАНОВЫЕ, МАГНИЕВЫЕ И БЕРИЛЛИЕВЫЕ СПЛАВЫ

Под общей редакцией академика РАН Е.Н. Каблова

Ответственный за выпуск буклета к.т.н. В.В. Антипов

Составители:

Р.О. Вахромов
Е.Ф. Волкова
Е.С. Гончаренко
В.А. Дуюнова
В.С. Каськов
О.С. Кашапов
И.С. Корнышева
И.Ю. Мухина
Н.А. Ночовная
О.Г. Сенаторова

Редакционная группа:

Е.А. Аграфенина
М.С. Закржевская
Н.В. Савельева
И.С. Туманова
Т.Н. Юдина

Оформление:

А.В. Андросенко
Л.Б. Ковтун
А.К. Кривушин
Э.Х. Намазова
Д.С. Трушин
Е.А. Цилин

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»

105005, Москва, ул. Радио, 17
телефон: (499) 263-86-46, факс: (499) 267-86-09,
e-mail: admin@viam.ru