

УДК 699.715

А.А. Селиванов<sup>1</sup>, Е.А. Ткаченко<sup>1</sup>, О.И. Попова<sup>1</sup>, В.В. Бабанов<sup>1</sup>**ВЫСОКОПРОЧНЫЙ АЛЮМИНИЕВЫЙ ДЕФОРМИРУЕМЫЙ  
СВАРИВАЕМЫЙ СПЛАВ В-1963 ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ СИЛОВОГО НАБОРА  
ИЗДЕЛИЙ СОВРЕМЕННОЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-1-1

Высокопрочный сплав В-1963 системы Al–Zn–Mg–Cu с малыми добавками циркония, скандия и серебра, разработанный во ФГУП «ВИАМ», предназначен для массивных сильно нагруженных деталей (типа шпангоутов, фитингов, балок и др.) внутреннего набора планера изделий современной авиакосмической техники. Легирование сплава В-1963 серебром и скандием позволило одновременно повысить прочностные характеристики (на 10–20%) и сопротивление усталости (в 1,8–2,3 раза) по сравнению с серийными отечественными и зарубежными сплавами. В отличие от других высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu сплав В-1963 обладает улучшенными характеристиками свариваемости по сравнению с аналогичными сплавами без серебра, а также имеет приемлемый уровень характеристик коррозионной стойкости.

В рамках федеральных целевых программ во ФГУП «ВИАМ» и реализации комплексного научного направления 8.1. «Высокопрочные свариваемые алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы пониженной плотности с повышенной вязкостью разрушения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1, 2], при участии специалистов ОАО «КУМЗ» разработаны опытно-промышленные технологии изготовления (плавки и литья слитков, деформации и термической обработки) кованных, прессованных и катаных полуфабрикатов, проведены исследования комплекса свойств полуфабрикатов, выпущена нормативная документация на поковки, штамповки, прессованные полосы, плиты и сварные соединения из сплава В-1963.

**Ключевые слова:** сплав В-1963, высокопрочный деформируемый алюминиевый сплав системы Al–Zn–Mg–Cu, микродобавки серебра, скандия и циркония, сварка алюминиевых сплавов.

High-strength V-1963 alloy of Al–Zn–Mg–Cu system with small additions of zirconium, scandium and silver, developed by FSUE «VIAM», made for massive highly stressed parts (such as frames, fittings, beams, etc.) of primary structure of modern aviation engineering. Alloying with small additions of silver and scandium allowed to simultaneously increase the strength characteristics (by 10–20%), and fatigue resistance (1,8–2,3 times) in comparison with serial domestic and foreign alloys. Unlike the other high strength alloys of Al–Zn–Mg–Cu system, weldability characteristics of V-1963 were improved as compared to similar alloys without silver, and V-1963 also has an acceptable level of corrosion resistance characteristics.

Within the terms of the federal target programs at FSUE «VIAM» and the implementation of an integrated scientific direction 8.1. «High-strength welded aluminum and aluminum-lithium alloys of low density with high fracture toughness» («Strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period up to 2030») [1, 2], with the participation of specialists of JSC «KUMZ» pilot-scale manufacturing technologies (melting technology and ingot casting, deformation and heat treatment) of forged, extruded and rolled semi-finished products were developed, the complex properties of semi-finished products were studied, regulatory documents on hand-forgings, die-forgings, extruded profile, plate and welded interconnections from V-1963 alloy were issued.

**Keywords:** V-1963 alloy, high strength wrought aluminum alloy of Al–Zn–Mg–Cu system, microaddition of silver, scandium and zirconium, welding of aluminum alloys.

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

### Введение

Одним из перспективных направлений, ориентированных на улучшение комплекса свойств алюминиевых сплавов, является разработка новых систем легирования с использованием микродобавок переходных и редкоземельных металлов. Немаловажную роль также играет изыскание способов получения регламентированной структуры сплавов для достижения требуемого комплекса свойств.

В настоящее время с целью получения высокого уровня прочностных свойств и сопротивления усталости, повышения температуры рекристаллизации и измельчения зеренной структуры алюминиевых сплавов широко используется легирование комплексной добавкой скандия и циркония, которая (в отличие от циркония) обладает более сильным модифицирующим и антирекристаллизационным эффектами. Цирконий в этом случае позволяет значительно снизить концентрацию скандия в сплаве (менее 0,2% (по массе)) при сохранении высокого модифицирующего воздействия последнего [3–6].

Роль серебра в алюминиевых сплавах изучена в меньшей степени по сравнению с добавками скандия и циркония, однако известно, что введение серебра в количестве 0,1–0,2% (по массе) оказывает заметное влияние на кинетику распада алюминиевого твердого раствора, повышая критическую температуру устойчивости упрочняющих выделений и, таким образом, может способствовать одновременному повышению прочности и коррозионной стойкости сплава [7–10].

При разработке композиции сплава проведено всестороннее исследование формирования тонкой структуры полуфабрикатов в зависимости от содержания микродобавок скандия, циркония и серебра, а также изучено влияние режимов термической обработки (особенно – старения) на комплекс механических и коррозионных свойств, характеристик трещиностойкости и усталостной долговечности. Учитывая достаточно высокую стоимость скандия и серебра, большое внимание уделено поиску экономного варианта легирования этими микродобавками, обеспечивающего эффективное улучшение требуемого комплекса свойств. В результате исследований во ФГУП «ВИАМ» разработан высокопрочный сплав В-1963 [11–13] на основе системы Al–Zn–Mg–Cu с микродобавками серебра, скандия и циркония.

### Материалы и методы

Исследованы опытно-промышленные полуфабрикаты, изготовленные на серийном оборудовании ОАО «КУМЗ», а также сварные соединения плит толщиной 100 мм из сплава В-1963.

Металлографический анализ исследуемых образцов проводили на микроскопе Olympus GX51, исследование остаточных напряжений на поверхности плит – на анализаторе остаточных напряжений PSF-3M фирмы Rigaku рентгеновским методом в  $Cr K_{\alpha}$ -излучении, механических свойств и усталостных характеристик – на оборудовании фирмы Zwick/Roell (модели машин: Z100 и Z400 соответственно).

Определение механических свойств, усталостных характеристик, коррозионных свойств полуфабрикатов из сплава В-1963, а также оценку их свариваемости проводили в соответствии с действующими стандартами и методиками РФ.

### Результаты и обсуждение

В данной работе приведены сравнительные данные по свойствам различных деформированных полуфабрикатов, предназначенных для изготовления ответственных высоконагруженных деталей внутреннего набора планера (шпангоутов, фитингов,

кронштейнов) из высокопрочного алюминиевого сплава В-1963 системы Al–Zn–Mg–Cu с легирующими микродобавками скандия, циркония и серебра (табл. 1).

Таблица 1

**Химический состав сплава В-1963**

Содержание элементов, % (по массе)					
Al	Zn+Mg+Cu	Zr+Sc	Ag	Fe	Si
Основа	11,8	0,25	0,1	<0,05	<0,05

Типичная микроструктура сплава В-1963 представлена на рис. 1 (а, б). Деформированные полуфабрикаты из этого сплава имеют субзеренную структуру со средним размером субзерен 2–4 мкм (рис. 1, в). Особенностью структуры исследованных образцов является образование в них дисперсоидов – вторичных частиц  $\beta'$ -фазы ( $\text{Al}_3\text{Sc}_x\text{Zr}_{1-x}$ ), когерентно связанных с матрицей (рис. 1, г). Хотя на границах субзерен дисперсоиды не были обнаружены, присутствие этих частиц в сплаве обеспечивает сильный антирекристаллизационный эффект в полуфабрикатах из сплава В-1963 [14, 15].

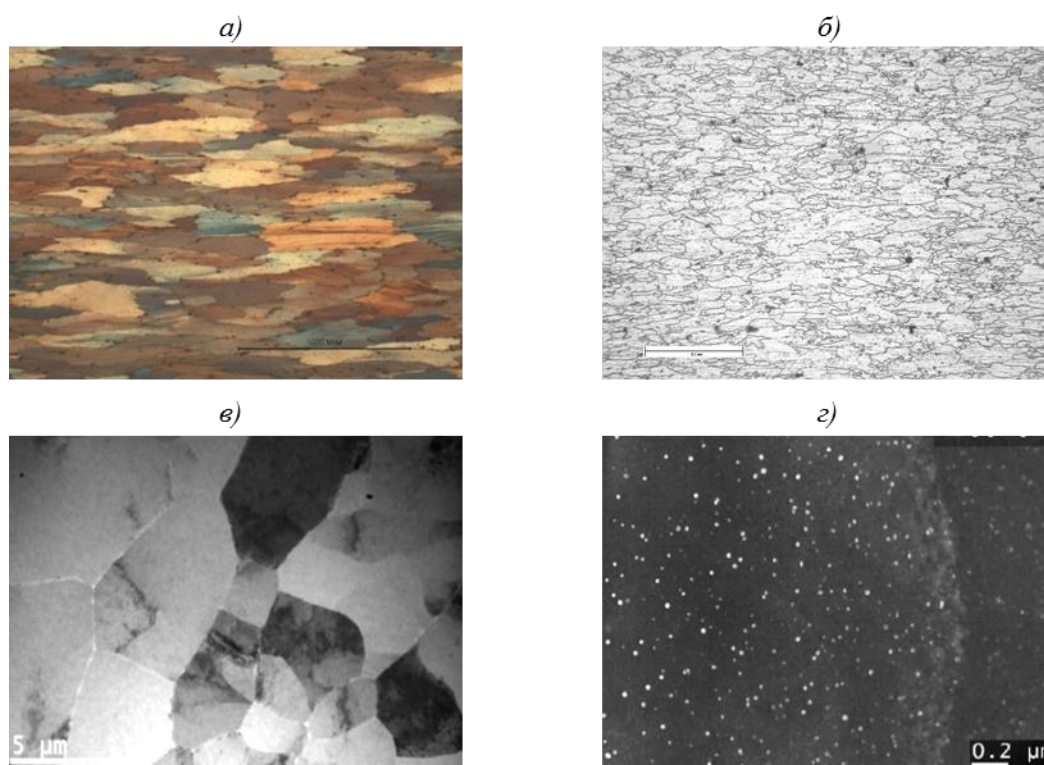


Рис. 1. Типичная структура сплава В-1963:

а – микроструктуры плиты в поляризованном свете; б – микроструктура прессованной полосы; в – светлопольное изображение зеренной структуры штамповки; г – выделения дисперсоида  $\beta'$ -фазы в структуре поковки

При разработке режимов термической обработки опробованы двух- и трехступенчатые режимы старения. Исследования тонкой структуры показали, что фазовый состав сплава, состаренного по различным режимам, одинаков, однако после старения по трехступенчатому режиму наблюдается бóльшая объемная плотность частиц упрочняющей  $\eta'$ -фазы ( $\text{MgZn}_2$ ), чем после двухступенчатого старения, также как и при увеличении содержания серебра в сплаве. Ширина зоны, свободной от выделений у границ зерен и субзерен состаренного сплава, содержащего серебро, почти в 2 раза уже, чем в

сплавах без серебра (далее будет показано, что установленные структурные особенности сплава с микродобавками скандия и серебра приводят к одновременному повышению прочностных характеристик, вязкости разрушения и сопротивления усталости, а также к улучшению свариваемости сплава по сравнению со свойствами серийных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu).

В качестве заготовок для получения сложнопрофильных деталей (шпангоутов, фитингов и т. п.) используют поковки, штамповки, прессованные полосы и катаные плиты. Производство этих полуфабрикатов из высокопрочного сплава В-1963 освоено в условиях ОАО «КУМЗ» [16].

В процессе освоения производства опытно-промышленных полуфабрикатов из сплава В-1963 в условиях металлургического завода, разработаны технологии получения слитков: цилиндрических (диаметром до 390 мм) и плоских (размером 300×1100 мм), а также изготовления поковок и штамповок (толщиной до 100 мм), прессованных полос (толщиной 40–70 мм) и катаных плит (толщиной 100 мм).

Свойства опытно-промышленных полуфабрикатов из сплава В-1963 приведены в табл. 2–4. Видно, что наиболее высоким уровнем прочностных характеристик ( $\sigma_b=590\text{--}620$  МПа) обладают прессованные полосы и штамповки, состаренные по трехступенчатому режиму T12. После старения по этому режиму получены также и более высокие показатели трещиностойкости (СРТУ) и усталостной долговечности (МЦУ). Коррозионные свойства всех видов полуфабрикатов близки между собой.

Таблица 2

**Механические свойства при растяжении и вязкость разрушения полуфабрикатов из сплава В-1963 (типичные значения)**

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

Таблица 3

**Характеристики трещиностойкости и усталости полуфабрикатов из сплава В-1963 (средние значения)**

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

\*  $\Delta K=21$  МПа $\sqrt{м}$ .

Таблица 4

## Коррозионные свойства полуфабрикатов из сплава В-1963

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

Следует отметить, что массивные плиты (толщиной 100 мм, рис. 2) предложены как альтернатива поковкам, но с тем преимуществом, что, благодаря общепринятой серийной технологии правки плит в свежезакаленном состоянии путем растяжения с остаточной деформацией 1,5–3%, в них снимаются остаточные (закалочные) напряжения. Это позволяет избежать поворотов и коробления при последующем изготовлении из плит (путем механической обработки) сложноконтурных деталей и приводит к снижению общей трудоемкости процесса. Устранение остаточных (закалочных) напряжений в поковках путем обжатия со степенью деформации 1,5–5% технологически более сложная операция.



Рис. 2. Плиты из сплава В-1963

Свойства штамповок из сплава В-1963 в состоянии Т12 в сравнении с полуфабрикатами из других высокопрочных отечественных и зарубежных сплавов (аналоги по применению) приведены на рис. 3. Видно, что по характеристикам штамповки из сплава В-1963 в состоянии Т12 превосходят уровень свойств аналогичных полуфабрикатов:

– из отечественного сплава В93п.ч. в состоянии Т2: по прочностным характеристикам – на 22–24%, по вязкости разрушения ( $K_{Ic}$ ) – на 10–15%, по малоциклового усталости (МЦУ) – в ~2 раза;

– из зарубежного сплава 7050-Т7452: по прочностным свойствам – на 15–20%, по вязкости разрушения ( $K_{Ic}$ ) – на 10–15%; по МЦУ – более чем в 2 раза.

Деформированные полуфабрикаты, используемые для изготовления сварных конструкций различными способами сварки, эффективно применяются в изделиях авиационной техники [16, 17]. Для этой цели разработаны и успешно применяются в производстве новые технологические процессы и аппаратура. Одним из достоинств сплава В-1963 является то, что он обладает высоким уровнем технологичности при сварке и прочности сварных соединений благодаря легированию его микродобавками циркония, скандия и серебра.

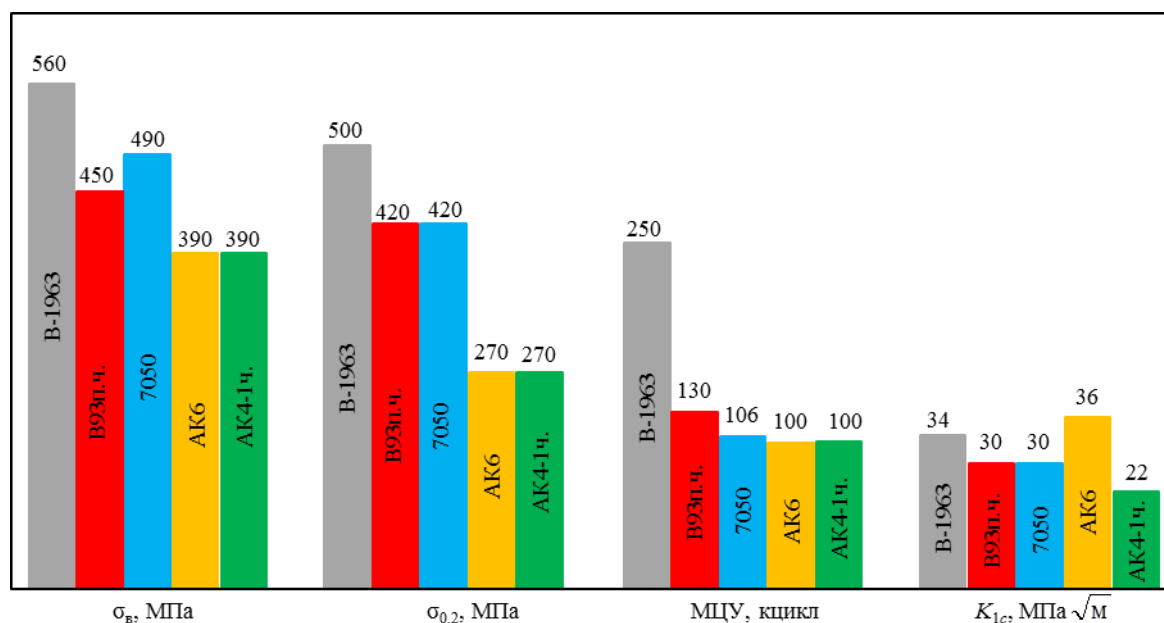


Рис. 3. Свойства опытно-промышленных штамповок толщиной до 100 мм из сплава В-1963 и из серийных сплавов-аналогов

При исследовании микроструктуры сварных образцов из сплава В-1963, полученных с использованием различных режимов сварки трением с перемешиванием (СТП), установлено, что изменение режима сварки в выбранном диапазоне скоростей существенного влияния на структуру сварного шва не оказывает. Ввиду отсутствия расплавления и интенсивного перемешивания металла, находящегося в состоянии пластического течения, ядро сварного шва имеет мелкозернистую равноосную структуру (рис. 4) с размером зерна 5–10 мкм. В переходной зоне наблюдается увеличение размера зерна до 300–400 мкм.

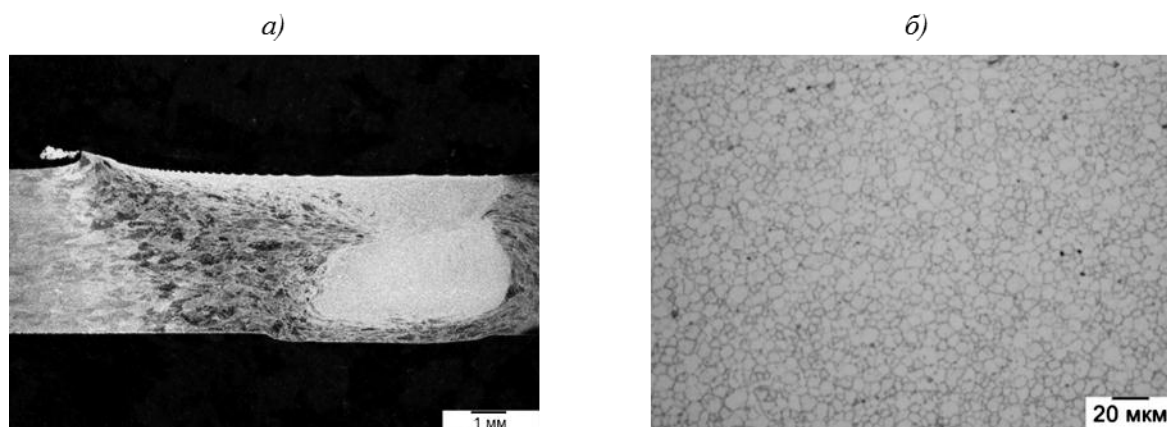


Рис. 4. Типичная микроструктура сварных соединений опытно-промышленных плит толщиной 100 мм из сплава В-1963:

*а* – общий вид; *б* – ядро сварного шва

Определены механические и коррозионные свойства сварных соединений из плит из сплава В-1963 в зависимости от режима СТП. Выбран режим СТП, обеспечивающий наиболее оптимальный уровень прочностных и коррозионных свойств сварного соедине-

ния:  $\sigma_{в.св}/\sigma_{в} \geq 0,83$ ; угол изгиба 86 град; склонность к МКК: 0,06–0,16 мм (основной металл и околошовная зона); в сварном шве МКК отсутствует; склонность к РСК: 3–6 балла.

В условиях АО «Московский вертолетный завод им. М.Л. Миля» выполнено технологическое опробование процесса механической обработки изготовления деталей из массивных плит толщиной до 100 мм из сплава В-1963. По серийной технологии путем механической обработки из плит изготовлены детали, одна из которых показана на рис. 5. Опробование показало хорошую обрабатываемость резанием сплава и полное отсутствие коробления и поволоков в полученных деталях.

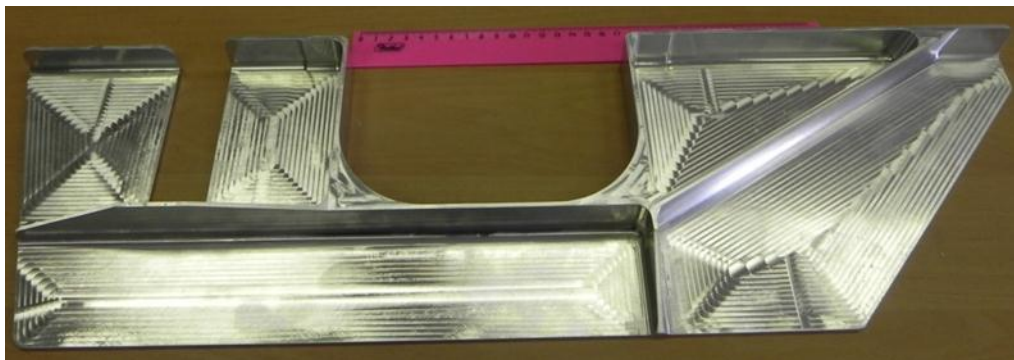


Рис. 5. Деталь из плиты толщиной 100 мм из сплава В-1963

На изготовление и поставку полуфабрикатов (штамповок, поковок, прессованных полос и массивных плит) из сплава В-1963 разработана необходимая документация: технические условия, технологические рекомендации на все этапы технологического цикла (плавку и литье, деформацию, термическую обработку), паспорта, а также получены расчетные значения характеристик прочности, вязкости разрушения, усталостной долговечности для плит [18].

### Заключения

Благодаря легированию сплава системы Al–Zn–Mg–Cu серебром и скандием совместно с цирконием одновременно повышаются прочностные характеристики (на 15–20%) и сопротивление усталости (в 1,8–2,3 раза) по сравнению со свойствами серийных отечественных и зарубежных сплавов-аналогов по применению при сохранении на высоком уровне показателей вязкости разрушения и коррозионной стойкости.

Сплав В-1963 обладает улучшенными характеристиками свариваемости по сравнению с аналогичными свойствами сплавов без серебра и скандия ( $\sigma_{в.св} \geq 0,8\sigma_{в}$ ).

Сплав В-1963 в виде массивных кованных, прессованных и катаных полуфабрикатов рекомендуется для изготовления элементов силовых конструкций (типа шпангоутов, фитингов, балок и др.), применяемых в изделиях современной авиационной техники, а также в изделиях космической техники и транспорта с целью обеспечения всесовершенства конструкций, их повышенных надежности и ресурса.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
3. Авиационные материалы: справочник в 13 т.; 7-е изд., перераб. и доп. /под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2008. Т. 4, кн. 1. 263 с.

4. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
5. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 167–182.
6. Алюминиевые сплавы в авиакосмической технике / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2001. 192 с.
7. Давыдов В.Г., Елагин В.И., Захаров В.В., Ростова Т.Д. О легировании алюминиевых сплавов добавками скандия и циркония // МитОМ. 1996. №8. С. 25–30.
8. Tkachenko E.A., Fridlyander I.N., Matveyets E.N., Kaigorodova L.I. The effect of rare earth metal minor addition on structure and properties of Al–Zn–Mg–Cu alloy // Proceed. ICAA6. Toyohashi, Japan. 1998. Vol. 3. P. 2049–2054.
9. Кайгородова Л.И., Сельнихина Е.И., Ткаченко Е.А., Сенаторова О.Г. Влияние малых добавок скандия и циркония на структуру и механические свойства сплава Al–Zn–Mg–Cu // ФММ. 1996. Т. 81. Вып. 5. С. 78–86.
10. Polmer I.J. Nucleation from Supersaturated Solid Solution // The Journal of the Australian Institute of Metals. 1966. Vol. 11. No. 14. P. 246.
11. Фридляндер И.Н., Добромислов А.В., Ткаченко Е.А., Сенаторова О.Г. Перспективные высокопрочные материалы на алюминиевой основе // МитОМ. 2005. №7. С. 17–23.
12. Высокопрочный сплав на основе алюминия и изделие, выполненное из этого сплава: пат. 2233902 Рос. Федерация; опубл. 10.08.04.
13. Высокопрочный сплав на основе алюминия и способ получения изделия из него: пат. 2443793 Рос. Федерация; опубл. 08.10.10.
14. Ogura T., Hirose S., Sato T. Quantitative Analysis of the Vicinity of Grain Boundaries with Precipitate Free Zones in Al–Zn–Mg(–Ag) Alloys // Proceed. ICAA9. Australia. 2004. P. 1061–1066.
15. Vakhromov R.O., Antipov V.V., Tkachenko E.A. Research and Development of High-strength of Al–Zn–Mg–Cu Alloys // Proc. of ICAA-13. Pittsburg. USA. 2012. P. 1515–1520.
16. Скорняков В.И., Антипов В.В. Инновационный характер сотрудничества ОАО «КУМЗ» и ФГУП «ВИАМ» // Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 11–14.
17. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Жегина И.П., Иода Е.Н., Лоскутов В.М. Особенности и перспективы сварки алюминийлитиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2002. №4. С. 3–12.
18. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 440–448.