

УДК 669.018.28:669.715

Д.В. Огородов<sup>1</sup>, А.В. Трапезников<sup>1</sup>, Д.А. Попов<sup>1</sup>, С.И. Пентюхин<sup>1</sup>

## РАЗВИТИЕ ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ВИАМ

(к 120-летию со дня рождения И.Ф. Колобнева)

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-2-12-12

*Приведены основные этапы трудовой деятельности Ивана Филипповича Колобнева, а также рассмотрены сплавы, которые разработаны под его руководством. Показаны перспективы развития жаропрочных, высокопрочных и коррозионностойких литейных алюминиевых сплавов.*

*Накопленный опыт в области создания литейных алюминиевых сплавов реализуется в настоящее время в рамках комплексного научного направления 8.4. «Высокопрочные коррозионностойкие свариваемые магниевые и литейные алюминиевые сплавы для изделий авиакосмической техники нового поколения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].*

**Ключевые слова:** литейные алюминиевые сплавы, силумины, жаропрочные алюминиевые сплавы, коррозионностойкие алюминиевые сплавы, высокопрочные алюминиевые сплавы.

*The article presents the main stages of work activities of Ivan Philippovich Kolobnev, as well as alloys developed under his leadership. The prospects of development of casting high-temperature, high-strength and corrosion-resistant aluminum alloys are shown.*

*Experience accumulated by Kolobnev in the development of high-temperature aluminum alloys is now being implemented in the framework of the complex research area 8.4. «High-strength corrosion-resistant weldable magnesium and cast aluminum alloys for the new generation aerospace technologies» («The strategic directions of development of materials and technologies of their reprocessing for the period till 2030») [1].*

**Keywords:** casting heat-resistant aluminum alloys, silumin, high-temperature aluminum alloys, high-strength aluminum alloys, corrosion-resistant 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

Для развития авиационной и космической техники необходимы разработка и создание новых материалов, в том числе литейных алюминиевых сплавов. В ВИАМ в этом направлении работал Иван Филиппович Колобнев, под руководством которого и при участии сотрудников института: Г.В. Захаровой, З.Н. Неугодской, Н.А. Аристовой, Г.Я. Мишина и других, были разработаны такие сплавы, как АЛ19, АЛ21, АЛ25, АЛ26, ВАЛ1, ВАЛ6, В2243, ВАЛ9, ВАЛ10, В124, АЦР1У. Эти сплавы в зависимости от их свойств нашли широкое применение в авиационной, ракетной и других областях техники [1–8].

### Трудовая деятельность

В начале своей трудовой деятельности И.Ф. Колобнев был одним из первых ученых, занимавшихся созданием сплавов отечественных марок. В результате совместных исследований И.Ф. Колобнева и Е.М. Ноткина разработаны сплавы систем

Al–Si–Mg–Mn–Cu и Al–Si–Mg–Mn. В 1939 г. эти сплавы были успешно внедрены в производство и получили марки АЛ3 и АЛ4. Сплав АЛ4 вследствие его технологичности и в настоящее время применяют при производстве широкого спектра деталей, работающих при невысоких температурах (до 200°C).

Параллельно с исследованиями влияния состава на жаропрочность алюминиевых сплавов И.Ф. Колобнев занимался проблемой газонасыщения расплавов на основе алюминия. Так, в 1948 г. вышла в свет книга «Газовая пористость и методы борьбы с ней в алюминиевых отливках» [8] – как результат совместной исследовательской деятельности И.Ф. Колобнева и М.Б. Альтмана. В книге описаны причины возникновения пор в отливках и способы борьбы с ними, а также предложена методика определения пористости сплавов в жидком состоянии.

Изучая структуру силуминов, И.Ф. Колобнев пришел к выводу, что благодаря добавкам меди, хрома, магния и марганца можно значительно повысить стабильность  $\alpha$ -твердого раствора и температуру его распада. Однако жаропрочность сплавов этого типа практически не повышается по причине содержания в их структуре кремния, находящегося в несвязанном (свободном) состоянии.

Для разработки новых сплавов, способных длительно работать при температурах выше 300°C, И.Ф. Колобнев взял за основу систему Al–Cu–Mn. В результате им совместно с Л.В. Швыревой, Н.А. Аристовой, Г.Я. Мишиным разработан сплав АЛ19 (1958 г.), а совместно с В.М. Лебедевым, Г.Б. Строгановым, Н.Р. Никитиной, Г.Х. Энтинским и другими – сплав ВАЛ10 (1969 г.). Впоследствии коллеги и ученики Ивана Филипповича (В.М. Лебедев, Л.В. Швырева, Н.Р. Никитина, А.И. Николаева и др.) объединили лучшие свойства этих сплавов, разработав не потерявший до настоящего времени своей актуальности сплав ВАЛ14. Вышеуказанные сплавы предназначены для литья в землю, так как они имеют высокую горячеломкость и низкую жидкотекучесть [9]. Известно, что добавка кремния повышает технологичность сплава. Таким образом, в середине 1980-х гг. был разработан (В.М. Лебедев, И.С. Гоцев, А.И. Николаева и др.) высокопрочный сплав ВАЛ15 системы Al–Cu–Mn–Si, применяемый для литья в кокиль [10].

Сплавы на основе алюминия целесообразно применять в поршнях двигателей ввиду их малой плотности. Однако разработанные и применяемые в то время сплавы не обладали необходимой жаропрочностью либо были нетехнологичными. Иван Филиппович Колобнев совместно с М.В. Бусаровым и Л.В. Швыревой разработали технологичные сплавы для поршней системы Al–Si–Cu–Ni, получившие марки АЛ25, АЛ26, ВАЛ6 [11], с рабочей температурой 300°C. Помимо разработки заэвтектических силуминов и режимов термической обработки алюминиевых сплавов И.Ф. Колобнев исследовал методы их модифицирования, так как традиционные модификаторы не позволяли получить необходимые свойства [12].

До 1950 г. самым жаропрочным литейным алюминиевым сплавом считался сплав АЛ1, однако для некоторых отраслей промышленности требовались сплавы с рабочей температурой, существенно превышающей 300°C. Исследования, проведенные И.Ф. Колобневым, показали, что сплавы с высоким содержанием меди и сплавы системы Al–Cu–Ni обладают наиболее высокой жаропрочностью. Разработанные им совместно со специалистами ВИАМ сплавы получили марки АЛ21 (Г.В. Захарова, З.Н. Неугодова и др.) и ВАЛ1 (Н.А. Аристова, Н.М. Филатова и др.). Рабочая температура этих сплавов составляет 350°C. Установлено также, что в повышении жаропрочности не последнюю роль играют редкоземельные элементы [13]. Таким образом, И.Ф. Колобнев совместно с Г.Я. Мишиным разработали жаропрочный литейный алюминиевый сплав АЦР1У системы Al–Ce–Cu с рабочей температурой до 400°C – самый жаропрочный в то время сплав в мире.

Механические свойства сплавов систем Al–Cu–Mn, Al–Cu–Ni и Al–Ce–Cu приведены на рис. 1 (сплавы расположены по дате разработки). Для сравнения на рис. 1 приведен также сплав АЛ1 системы Al–Cu–Mg–Ni – аналог «британского сплава», разработанный ровно 100 лет назад. Видно, что, сплавы практически не теряют прочности при повышении температуры. При температуре 250°C сплав ВАЛ10 уступает по жаропрочности остальным сплавам, а сплав АЦР1У по свойствам уже сравним с характеристиками сплава ВАЛ1. При температуре 350°C (на рис. 1 данные не приведены) сплав АЦР1У превышает по жаропрочности сплавы ВАЛ1 (на 10 МПа) и АЛ21 (на 20 МПа).



Рис. 1. Механические свойства высокопрочных и жаропрочных сплавов при комнатной и высоких температурах: а – жаропрочность при 250°C на базе 100 ч (■) и температура эксплуатации (—◆—); б – предел прочности при 20 (■) и 200°C (■)

Отдельно следует упомянуть о коррозионностойких сплавах систем Al–Mg и Al–Zn–Mg. Их основной недостаток – низкие рабочие температуры, не превышающие 80–150°C. Изучая возможности повышения рабочих температур данных сплавов, И.Ф. Колобнев разработал сплавы АЛ22 (система Al–Mg–Si) и АЛ24 (система Al–Zn–Mg). Однако значительно повысить жаропрочность этих сплавов технически невозможно [13].

В своих разработках Иван Филиппович уделял большое внимание унификации сплавов (для уменьшения их номенклатуры на производстве) и получению сложных

отливок (вместо поковок с последующей механической обработкой), что экономически более выгодно. Так, были разработаны медистые силумины АЛ4М и В124 [14], сохранившие положительные свойства обычных силуминов, но имеющие более высокую температуру эксплуатации (до 250°C), а также обеспечивающие герметичность свыше 300 ат. Типичная отливка из сплава В124 (получена центробежным способом литья) показана на рис. 2.

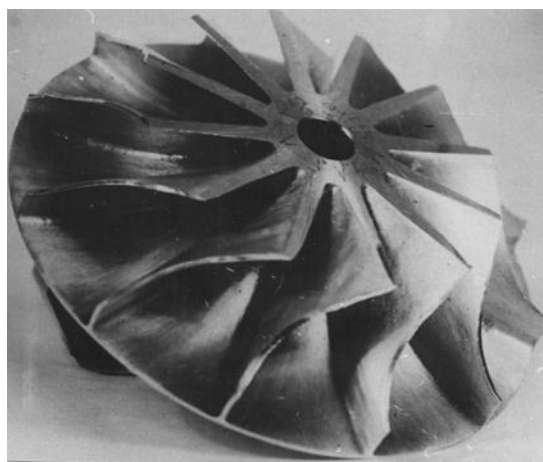


Рис. 2. Крыльчатка из сплава В124

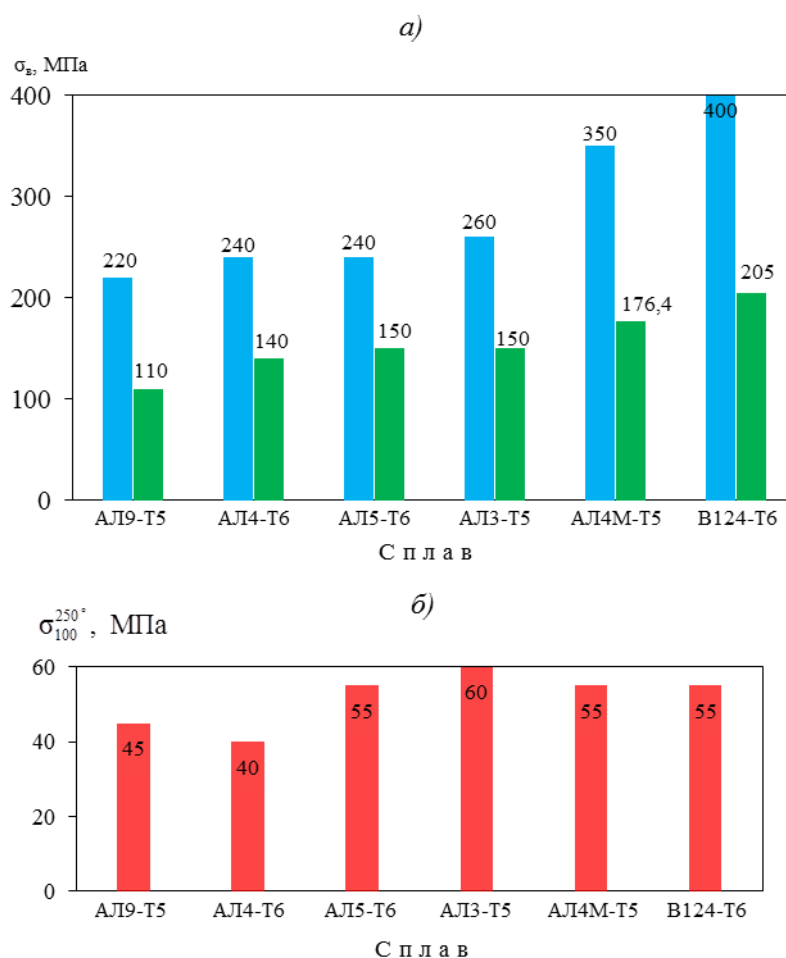


Рис. 3. Механические свойства силуминов и медистых силуминов: а – предел прочности при 20 (■) и 200°C (■); б – жаропрочность при 250°C на базе 100 ч (■)

Свойства сплавов типа силумин и медистый силумин приведены на рис. 3. Видно, что прочность сплавов значительно снижается с повышением температуры (рис. 3, *a*), а жаропрочность (рис. 3, *б*) для медистых силуминов несколько выше, чем для сплавов системы Al–Si–Mg. Сплавы АЛ5 и АЛ9 приведены для сравнения – это аналоги американских сплавов, разработанных фирмой Alcoa в 1925 и 1937 гг. соответственно.

Очевидно, что указанные в паспортах гарантированные свойства выше для тех сплавов, в составе которых содержится меньше вредных примесей. Например, относительное удлинение сплава АЛ9-1 в 2 раза выше, чем аналогичная характеристика сплава АЛ9 [15]. Однако получить сплав с узкими интервалами содержания легирующих элементов и низким содержанием примесей в производственных условиях сложнее, чем в лабораторных. Таким образом, И.Ф. Колобнев совместно с Е.М. Ноткиным разработали сплав АЛ10В, при изготовлении которого можно использовать вторсырье. Сплав АЛ10В внедрен в промышленное производство в 1941 г. – в экономически сложное для страны время. Эта работа получила третью премию МАП (Министерство авиационной промышленности). Другой сплав, при изготовлении которого можно использовать отходы производства, загрязненные железом, – жаропрочный сплав АЛ20 сложной системы Al–Cu–Mg–Si–Fe–Mn–Cr (И.Ф. Колобнев, Д.А. Петров, Г.В. Захарова и др.).

### Перспективы развития литейных сплавов

Работы по совершенствованию сплавов не прекращались. Помимо сплавов ВАЛ14 и ВАЛ15 разработаны: жаропрочный сплав ВАЛ18 (система Al–Cu–Ni), технологичный медистый силумин АЛ4МС, коррозионностойкие сплавы ВАЛ16 и ВАЛ19 (система Al–Mg), высокопрочные сплавы ВАЛ12 (система Al–Zn–Mg) и ВАЛ20 (система Al–Cu–Mg).

Е.С. Гончаренко усовершенствовала сплав АЛ4М, добавив в него скандий. Новый сплав получил марку АЛ4МС [16, 17]. В настоящее время этот сплав обладает самым высоким и оптимальным сочетанием механических свойств (предела прочности и относительного удлинения) из существующих медистых силуминов (рис. 4, *a*). Сплав АЛ4МС – высокопрочный высокотехнологичный материал системы Al–Si–Cu–Mg, обеспечивающий при литье в кокиль  $\sigma_b=360\text{--}400$  МПа и  $\delta\geq 4\%$ , не склонный к трещинообразованию, работоспособный при температуре 250°C, из которого можно отливать детали любыми способами, в том числе прогрессивными способами литья по газифицируемому и выжигаемому моделям.

Другая группа сплавов – коррозионностойкие (на рис. 4, *б* представлены сплавы разных составов: АЛ24 системы Al–Zn–Mg; АЛ13, АЛ22 – системы Al–Mg–Si, остальные – системы Al–Mg). Наличие кремния в составе сплавов способствует уменьшению чувствительности к образованию трещин, увеличению жидкотекучести и плотности литья, а также повышению жаропрочности, но вместе с тем – резко снижает их пластичность. Максимальная рабочая температура сплавов системы Al–Mn–Si составляет 150°C. Отличительная особенность сплава АЛ13 – возможность его использования в литом состоянии (без применения термообработки). Сплав АЛ24 (другие названия – ВАЛ4, В15), разработанный И.Ф. Колобневым, М.Б. Альтманом, О.Б. Лотаревой, благодаря оптимальному содержанию цинка и магния имеет еще более высокую температуру эксплуатации – до 200°C, самую высокую для коррозионностойких сплавов. Остальные сплавы этой группы называются магналиями, рабочая температура которых составляет всего 80°C (для сплавов АЛ8, АЛ23-1, АЛ27-1). Традиционные магналии подвержены естественному старению, которое невозможно зафиксировать, в результате чего резко снижается относительное удлинение этих сплавов [18]. С целью улучшения эксплуатационных характеристик разработаны сплавы ВАЛ16 и ВАЛ19 (содержащий скандий) со стабильными свойствами и температурой эксплуатации 140 и 125°C соответственно. Сплавы ВАЛ16 и ВАЛ19 также являются свариваемыми: коэффициент ослабления сваркой составляет 0,8–0,95.

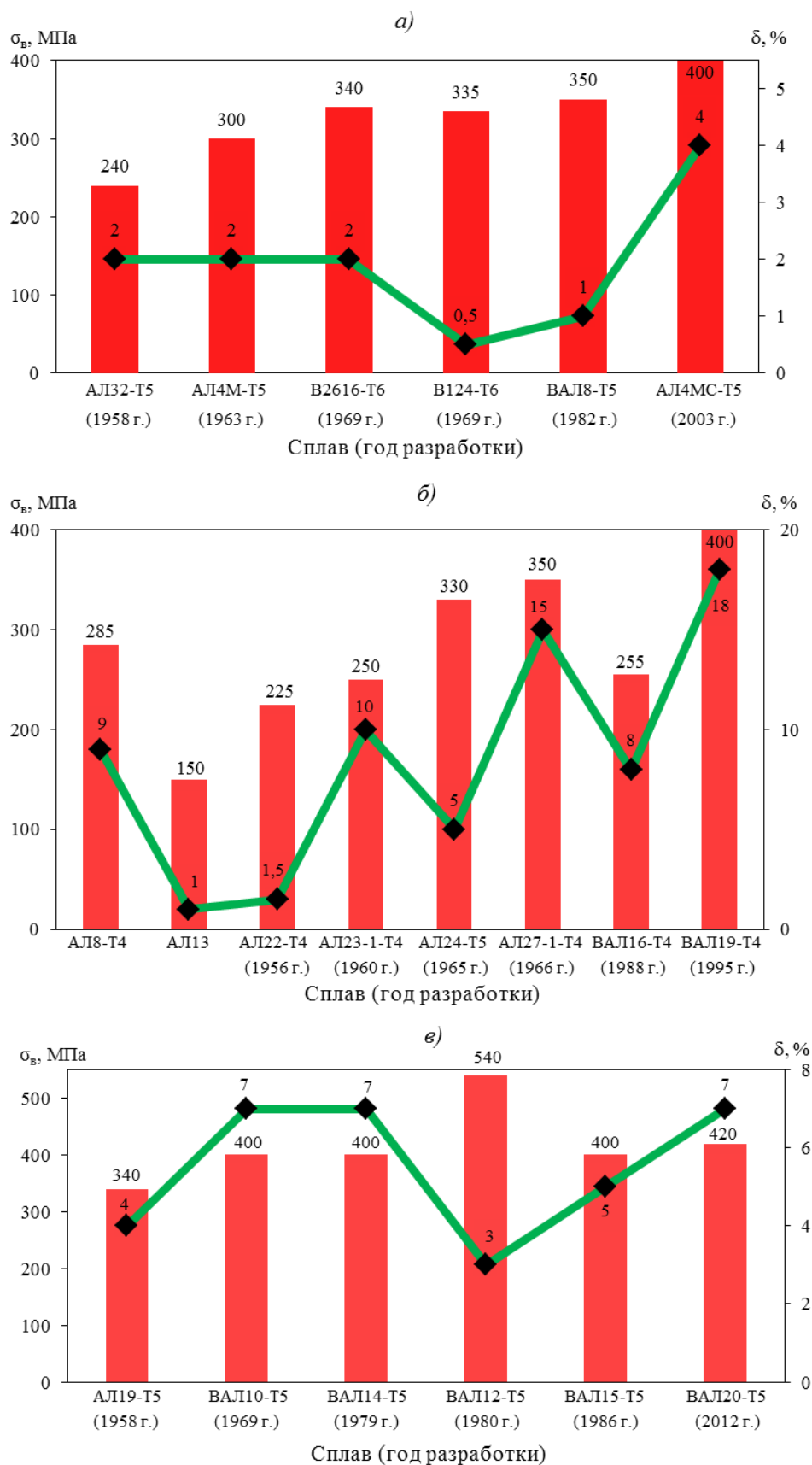


Рис. 4. Предел прочности (■) и относительное удлинение (—◆—) при 20°С медистых силуминов (а), коррозионностойких (б) и высокопрочных сплавов (в)

Следующая группа сплавов – высокопрочные. Сплавы данной группы обладают самыми высокими механическими свойствами при комнатной температуре, но не являются жаропрочными (рис. 4, в). В основном это сплавы системы Al–Cu–Mn. Наибольшей прочностью обладает сплав ВАЛ12 системы Al–Zn–Mg–Cu:  $\sigma_{\text{в}} > 540$  МПа при литье в кокиль, однако вследствие высокой склонности к насыщению водородом его не применяют для литья в песчаные формы.

Среди новых разработок – сплав ВАЛ20 системы Al–Cu–Mg типа твердого раствора – высокопрочный технологичный сплав с оптимальным сочетанием свойств [19, 20], предназначенный для литья в песчаные формы фасонных отливок сложной конфигурации деталей внутреннего набора (корпуса, качалки, кронштейна), работоспособный при температурах 200 (длительно) и 250°C (кратковременно), обладающий следующим уровнем механических свойств:  $\sigma_{\text{в}} \geq 420$  МПа,  $\delta \geq 7,0\%$ ,  $\sigma_{100}^{200} = 120$  МПа,  $\sigma_{100}^{250} = 100$  МПа,  $\sigma_{100}^{300} = 60$  МПа. По сравнению со сплавами-аналогами (ВАЛ10 и ВАЛ14) сплав ВАЛ20 с жидкотекучестью 300 мм является более технологичным, а также в его составе не содержится кадмий.

### Заключение

Под руководством и при непосредственном участии Ивана Филипповича Колобнева разработано большое количество сплавов, которые вследствие высоких технологических и экономических показателей востребованы в различных отраслях промышленности и в настоящее время. Впоследствии большее развитие получили высокопрочные, технологичные и коррозионностойкие сплавы, меньшее – жаропрочные и сплавы для поршней (АЦР1У, АЛ25, АЛ26, ВАЛ6) в связи с тем, что свойства этих сплавов, достигнутые И.Ф. Колобневым, повысить не удастся.

Результаты исследований по повышению жаропрочности алюминиевых сплавов, отраженные в книгах Ивана Филипповича Колобнева, можно использовать и в настоящее время для разработки новых и усовершенствования существующих алюминиевых сплавов.

### 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. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
3. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.
4. Гончаренко Е.С., Трапезников А.В., Огородов Д.В. Литейные алюминиевые сплавы (к 100-летию со дня рождения М.Б. Альтмана) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №4. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.01. 2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-4-2-2.
5. Корнышева И.С., Волкова Е.Ф., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю. Перспективы применения магниевых и литейных алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 212–222.
6. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 157–167.
7. Алюминиевые сплавы в авиакосмической технике / под общ. ред. Е.Н. Каблова М.: Наука, 2001. 192 с.
8. Колобнев И.Ф., Альтман М.Б. Газовая пористость и методы борьбы с ней в алюминиевых отливках. М.: ИТЭИН, 1948. 49 с.
9. Колобнев И.Ф. Фасонное литье алюминиевых сплавов. М.: Машгиз, 1953. 266 с.

10. Лебедев В.М., Мельников А.В., Постников Н.С., Черкасов В.В. Высокоэффективные литейные алюминиевые сплавы // *Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков: науч.-техн. сб.* М.: ВИАМ, 1994. С. 101–105.
11. Колобнев И.Ф. *Литейные алюминиевые сплавы.* М.: Оборонгиз, 1961. 112 с.
12. Альтман М.Б. *Металлургия литейных алюминиевых сплавов.* М.: Metallurgia, 1972. 153 с.
13. Колобнев И.Ф. *Жаропрочность литейных алюминиевых сплавов.* 2-е изд. М.: Metallurgia, 1973. 320 с.
14. Колобнев И.Ф. и др. *Высокопрочный герметичный сплав В124.* М.: ГОСНИТИ, 1969. 29 с.
15. Альтман М.Б., Стромская Н.П. *Повышение свойств стандартных литейных алюминиевых сплавов.* М.: Metallurgia, 1984. 128 с.
16. Гончаренко Е.С., Корнышева И.С. *Перспективы применения отливок из алюминиевых сплавов // Литейное производство.* 2012. №1. С. 21–23.
17. Гончаренко Е.С., Корнышева И.С. *Отливки из алюминиевых сплавов. Исследования, материалы, технологии // Литейное производство.* 2013. №2. С. 2–4.
18. Колобнев И.Ф. *Термическая обработка алюминиевых сплавов.* 2-е изд. М.: Metallurgia, 1966. 396 с.
19. Дуюнова В.А., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю., Уридия З.П., Волкова Е.Ф. *Научное наследие академика И.Н. Фридляндера. Современные исследования магниевых и литейных алюминиевых сплавов // Цветные металлы.* 2013. №9. С. 71–78.
20. Гончаренко Е.С., Алябьев И.П., Трапезников А.В., Огородов Д.В. *Получение отливок из сплава ВАЛ20 путем оптимизации конструкции деталей изделий ОАО «Туполев» // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №8. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.01. 2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-8-1-1.