



УДК 669.715:669.018.28

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-4-2-2

ЛИТЕЙНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ
(к 100-летию со дня рождения М.Б. Альтмана)

Е.С. Гончаренко

кандидат технических наук

А.В. Трапезников

Д.В. Огородов

Апрель 2014

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

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

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

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

Е.С. Гончаренко¹, А.В. Трапезников¹, Д.В. Огородов¹

ЛИТЕЙНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ (к 100-летию со дня рождения М.Б. Альтмана)

Изложены основные способы рафинирования и модифицирования литейных алюминиевых сплавов, предложенные М.Б. Альтманом. Приведены основные теоретические и научно-технические положения, систематизированные М.Б. Альтманом.

Рассмотрена классификация литейных алюминиевых сплавов по назначению, показана динамика их развития.

Приведены современные литейные алюминиевые сплавы с высокой технологичностью и повышенными механическими свойствами, а также перспективные направления развития литейных алюминиевых сплавов на ближайшие годы.

Ключевые слова: *алюминиевые сплавы, фасонные отливки, высокопрочные, жаропрочные, коррозионностойкие сплавы, технологические процессы.*

E.S. Goncharenko¹, A.V. Trapeznikov¹, D.V. Ogorodov¹

ALUMINIUM CASTING ALLOYS

(on the 100th anniversary of the birth of M.B. Altman)

The article describes the main methods of refining and modification of cast aluminum alloys proposed by M.B. Altman. The basic theoretical and scientific-technical provisions are quoted, systematized M.B. Altman.

The classification of casting aluminium alloys on purpose were considered, dynamics of their development were shown.

Modern casting aluminium alloys with high manufacturability and improved mechanical properties were presented, as well as perspective directions of development of foundry of aluminium alloys in the coming years.

Key words: *aluminum alloys, mold castings, high-strength, heat-resistant, corrosion-resistant alloys and manufacturing processes.*

¹ 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

Повышение качества и надежности деталей и конструкций относится к числу важнейших задач, стоящих перед металлургами и машиностроителями. Повышение свойств фасонных отливок из алюминиевых сплавов возможно при усовершенствовании стандартных сплавов и применении оптимальной технологии их производства. Особого внимания заслуживают вопросы технологии плавки и обработки сплавов, подготовки шихтовых материалов, защиты расплавов в процессе плавки, очистки расплавов от газообразных и твердых неметаллических включений.

Этим вопросам были посвящены теоретические и экспериментальные исследования М.Б. Альтмана в области металлургических процессов при плавке и литье, а также принципы металловедения литейных алюминиевых сплавов [1–3].

Основная причина попадания газовых включений в алюминиевые сплавы – это адсорбционные процессы на поверхности расплава. Поэтому М.Б. Альтман предложил предупредительные мероприятия против загрязнения сплавов неметаллическими включениями.

В основу исследований технологии рафинирования Мориц Борисович положил анализ протекающих при металлургических процессах химических реакций. Он предложил рассматривать систему «расплав – MeO – газ (водород)» исходя из того, что для расплава алюминия газы (последняя составляющая) можно трактовать как комплексные образования типа $xAl_2O_3 - yH_2$. Установлено, что сплавы содержат тем больше оксидов и водорода, чем больше их в исходных шихтовых материалах. Объем посторонних неметаллических примесей в расплавах складывается из содержания примесей в шихтовых материалах (чушковые металлы, переплав крупногабаритных отходов, переплав стружки, лигатуры и т. д.) и примесей, образующихся в процессе плавки. Поэтому алюминий, алюминиевые лигатуры и сплавы следует хранить в закрытых и сухих помещениях. Как показали исследования и производственный опыт, наименьшее содержание неметаллических включений наблюдается в сплавах, приготовленных в индукционных низкочастотных печах, основное преимущество которых – быстрота плавки.

М.Б. Альтманом была выдвинута фундаментальная идея разделения всех составов флюсов на защитные (покровные) и предназначенные для обработки объема расплава. Многообразие необходимых свойств может быть получено только в случае применения многокомпонентных флюсов. Для защиты поверхности расплава алюминиевых сплавов флюсы следует составлять из смесей хлоридов калия и натрия с низкой температурой плавления и малым краевым углом смачивания (<90 град). Важной добавкой для алюминиевых расплавов являются фториды, облегчающие отделение флюсов от расплава.

Была разработана группа универсальных флюсов, сочетающих защитные, рафинирующие и модифицирующие свойства. Применение таких флюсов дало возможность решить важнейшую производственную задачу – одновременно рафинировать и модифицировать расплав, что обеспечило исключение отдельной операции рафинирования. До разработки универсальных флюсов при плавке силуминов приходилось проводить модифицирование непосредственно перед разливкой, чтобы не потерять эффект воздействия на форму кремния в структуре эвтектики, что практически снижало влияние предыдущей операции рафинирования и вызывало дополнительное загрязнение расплава.

В качестве покровного флюса для всех литейных алюминиевых сплавов, кроме сплавов систем Al–Mg и Al–Mg–Si, было рекомендовано применять флюс следующего состава: 39% NaCl, 50% KCl, 6,6% Na₃AlF₆, 6,4% CaF₂. В качестве покровно-рафинирующего флюса для сплавов систем Al–Mg и Al–Mg–Si рекомендуется применять флюс следующего состава: 60% MgCl₂·KCl; 40% CaF₂.

Активные способы рафинирования расплава М.Б. Альтман разделил в зависимости от характера взаимодействия рафинирующих средств на адсорбционные и неадсорбционные (физические).

К *адсорбционным* относятся рафинирование инертными газами (азотом или аргонном), хлором и хлористыми солями. Методы адсорбционного рафинирования построены по одной принципиальной схеме: введение или образование в расплаве газа, всплытие пузырьков этого газа на поверхность, адсорбция других газов и твердых неметаллических частиц и удаление их из расплава. Помимо химического состава рафинирующего вещества, на эффект рафинирования оказывают влияние температура расплава, вязкость, размеры и скорость выделения рафинирующих газовых пузырьков. Чем выше вязкость расплавленного металла, тем труднее выделить из него неметаллические примеси, так как скорость их всплытия замедляется. Следует учитывать, что сплавы, близкие к эвтектическому составу (АЛ2, АЛ4), можно рафинировать при более низких температурах, чем сплавы с меньшим содержанием эвтектической составляющей или с повышенным содержанием магния.

К *неадсорбционным* относятся рафинирование ультразвуковыми колебаниями и в вакууме [4–6]. Отличие этих методов рафинирования от адсорбционных заключается в разрушении равновесия системы «металл–газ–оксид» во всем объеме расплава, а не в отдельных участках. Основываясь на идеях М.Б. Альтмана, в настоящее время ведутся работы по разработке новых рафинирующих флюсов с добавками экологически чистых

дисперсных тугоплавких частиц SiO_2 и метакаолинита $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2$ [7].

Алюминиевые сплавы с содержанием кремния от 6 до 13% (АЛ2, АЛ4, АЛ9, ВАЛ5) после рафинирования подвергают модифицированию металлическим натрием или смесью галоидных солей натрия и калия с целью измельчения структуры и повышения механических свойств. Модифицирование изменяет процесс эвтектической и первичной кристаллизации.

Модификаторы можно разделить на две основные группы. В *первую группу* входят модификаторы, которые в расплаве образуют высокодисперсную, коллоидно-дисперсную взвесь. Отдельные частицы этой взвеси служат зародышами, вокруг которых образуются и растут кристаллы. Модификаторы этой группы увеличивают число центров кристаллизации. Они не должны химически взаимодействовать с расплавом, должны быть тугоплавкими, чтобы обеспечить твердую фазу в модифицируемом расплаве, и быть изоморфными с кристаллами расплава. *Вторую группу* составляют модификаторы, действие которых на расплав сводится к тому, что поверхностно-активные молекулы этих модификаторов адсорбируются на границах зародившегося кристалла и понижают скорость его роста. Уменьшение скорости роста приводит к увеличению промежутка времени от начала появления зародыша до окончательного затвердевания расплава; увеличивается число центров кристаллизации, в результате чего получается более мелкозернистая структура.

Поверхностно-активными являются обычно вещества с низкой температурой плавления и малыми значениями поверхностной энергии в расплавленном состоянии на границе с воздухом. К таким веществам относятся щелочные и щелочноземельные металлы, действие которых обычно проявляется при концентрациях от 0,001 до 0,1%.

Теории и гипотезы, объясняющие модифицирование алюминиево-кремниевых сплавов натрием, можно условно разбить на две группы. Первая – теория переохлаждения, т. е. понижение температуры начала кристаллизации ряда металлов и сплавов ниже ее истинного значения. При медленном охлаждении кристаллизация происходит после образования в жидкости первых центров кристаллизации. Вторая – адсорбционно-коллоидная теория, сущность которой состоит в том, что натрий ограничивает рост кристаллов коллоидного кремния, выделяющегося из жидкости. Однако ни одна из этих теорий не в состоянии обобщить все обнаруженные факты или объяснить их.

Весьма сложно осуществить модифицирование заэвтектических силуминов, где необходимо создать условия для измельчения и равномерного распределения первичного кремния. С этой целью используют преимущественно модификаторы первой

группы: красный фосфор, титан, бор.

Малые добавки некоторых металлов оказывают существенное влияние на процесс первичной кристаллизации алюминиевых сплавов. Малые добавки титана, циркония и др. в значительной степени уменьшают размеры зерна и повышают свойства многих алюминиевых сплавов.

Таким образом, наибольший эффект дает комплексное модифицирование (особенно в сложнелегированных сплавах), т. е. одновременное введение в расплав элементов, влияющих на характер кристаллизации вторых фаз, эвтектики и твердого раствора.

Свойства стандартных литейных алюминиевых сплавов могут быть существенно повышены путем изменения в пределах, допускаемых ГОСТ, химического состава по основным компонентам и примесям. Большое влияние на прочностные характеристики оказывает содержание неметаллических включений. В процессе плавки в алюминиевые сплавы попадают различные металлические примеси (железо, цинк, бериллий, титан и др.), которые изменяют их структуру, а также механические, коррозионные, технологические, физические, химические и другие свойства. Для получения отливок с требуемыми свойствами содержание примесей в сплавах должно быть регламентировано.

Для повышения механических свойств алюминиевых сплавов используют шихтовые материалы повышенной чистоты [8–11].

За годы существования ВИАМ удалось добиться значительных успехов в области разработки литейных алюминиевых сплавов и производства из них фасонных отливок, отвечающих в первую очередь требованиям авиакосмической техники.

Это стало возможным благодаря изучению новых и систематизации известных научно-теоретических и технологических положений регламентированного формирования структурно-фазового состояния отливок, проведенного в работах М.Б. Альтмана (глубокие изыскания и разработки в области металлургии литейных алюминиевых сплавов), И.Ф. Колобнева (разработка теоретических основ металловедения, создание высокопрочных жаропрочных литейных алюминиевых сплавов), Н.А. Аристовой, А.В. Мельникова, Н.С. Постникова, В.В. Черкасова, В.М. Лебедева, Л.В. Швыревой, Л.Н. Мартыновой.

Сплав ВАЛ12, имея $\sigma_b=550$ МПа, способен успешно конкурировать не только с деформируемыми алюминиевыми сплавами, но по удельной прочности – и с литейными сталями. Он может применяться до 200°C.

Уровень свойств литейных алюминиевых сплавов таков, что эти материалы могут конкурировать с деформируемыми алюминиевыми сплавами, малоуглеродистыми сталями, латунями и бронзами. Эти сплавы имеют удовлетворительные литейные свойства,

коррозионную стойкость. Из них можно изготавливать фасонные отливки, к которым предъявляются повышенные требования по таким характеристикам надежности, как прочность, текучесть, усталость.

Отливки из жаропрочных литейных алюминиевых сплавов ВАЛ11 и ВАЛ18, эксплуатирующихся при температурах 250–400°C, применяются для изготовления деталей, работающих вблизи двигателя, в системах воздухоотбора. Эти специальные сплавы на основе системы Al–Cu–Ce и Al–Cu–Ni отличаются высокой степенью легированности. Жаропрочные литейные алюминиевые сплавы вне конкуренции при сравнении с алюминиевыми ковочными сплавами и в некоторых случаях могут заменять титановые сплавы.

Отливки из коррозионностойких сплавов системы Al–Mg (типа магналий) обладают малой плотностью и хорошо обрабатываются резанием. Получили распространение в авиационной, судостроительной и других отраслях промышленности после создания рациональных методов литья, предотвращающих их окисление в жидком состоянии (сплавы АЛ8, АЛ27, ВАЛ16).

Свариваемый коррозионностойкий сплав ВАЛ16 отличается от остальных магналиев более высоким и стабильным уровнем механических свойств отливок и сварных соединений. Эти сплавы имеют близкий к единице коэффициент ослабления сваркой ($K_{o,св}$). Поэтому сплавы предназначены для производства отливок и литодеформированных сварных соединений, эксплуатирующихся при длительных нагревах (до 150°C) во всеклиматических условиях.

Хорошие литейные свойства этих сплавов (жидкотекучесть составляет 315 мм) практически исключают образование горячих трещин при литье и сварке, поэтому возможно получение фасонных отливок в металлические формы с затрудненной усадкой.

Большую группу высокотехнологичных сплавов, предназначенных для изготовления отливок различными видами литья, составляют силумины (сплавы на основе систем Al–Si и Al–Si–Cu).

На рис. 1 представлены отливки высокого качества, изготовленные в соответствии с рекомендациями М.Б. Альтмана по плавке, рафинированию, модифицированию.

За последние годы [12–19] разработан медистый силумин АЛ4МС со скандием для агрегатного литья. В настоящее время этот сплав обладает самым высоким и оптимальным сочетанием значений механических свойств (предела прочности и относительного удлинения) из существующих медистых силуминов. Высокопрочный высокотехнологичный сплав АЛ4МС системы Al–Si–Cu–Mg обеспечивает при литье в кокиль $\sigma_B=360–400$ МПа и $\delta \geq 4\%$, не склонен к трещинообразованию, рабочая температура 250°C, из

него можно отливать детали любыми способами, в том числе прогрессивным способом литья по газифицируемым и выжигаемым моделям.

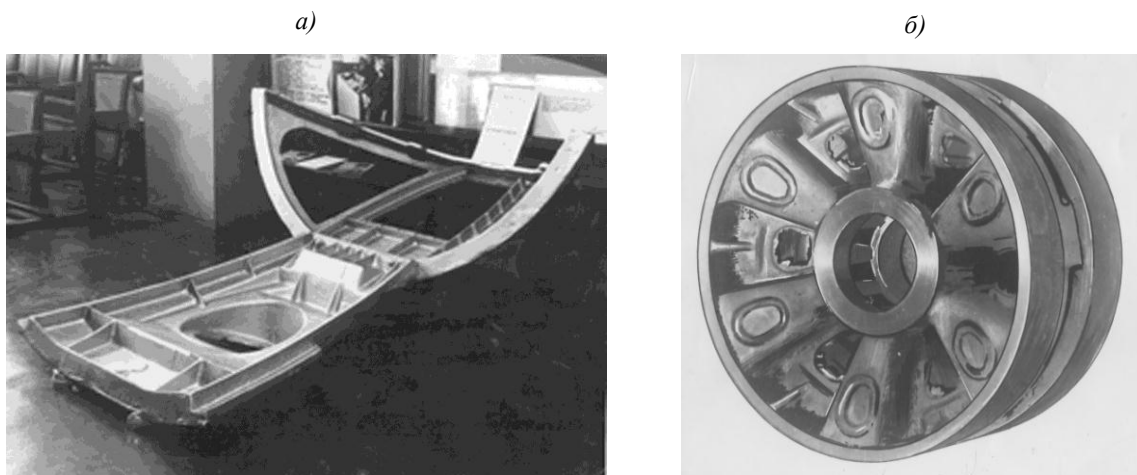


Рисунок 1. Фасонные отливки:
a – узел носовой части фюзеляжа тяжелого самолета из отливок «панель» и «каркас» (сплав ВАЛ15); *б* – каркас из сплава АЛ19

В настоящее время разрабатывается опытно-промышленная технология литья корпусных отливок из сплава АЛ4МС для вертолетов (рис. 2).



Рисунок 2. Корпус-кронштейн из сплава АЛ4МС

Высокопрочный технологичный сплав ВАЛ20 системы Al–Cu–Mg (типа твердого раствора) с оптимальным сочетанием свойств применяется для литья в песчаные формы отливок сложной конфигурации вместо серийного малотехнологичного сплава ВАЛ10.

Высокопрочный литейный сплав ВАЛ20 системы Al–Cu–Mg предназначен для литья в песчаные формы фасонных отливок сложной конфигурации деталей внутреннего набора (корпуса, качалки, кронштейны), рабочая температура: 200°С (длительно) и

250°C (кратковременно), $\sigma_b \geq 420$ МПа, $\delta \geq 7,0\%$, $\sigma_{100}^{200} = 120$ МПа, $\sigma_{100}^{250} = 100$ МПа, $\sigma_{100}^{300} = 60$ МПа, с жидкотекучестью 300 мм, повышенными прочностью и пластичностью по сравнению с применяемыми в промышленности серийными сплавами АЛ5 и АЛ9. В настоящее время разрабатывается опытно-промышленная технология литья деталей рулевого управления (рис. 3) из сплава ВАЛ20.

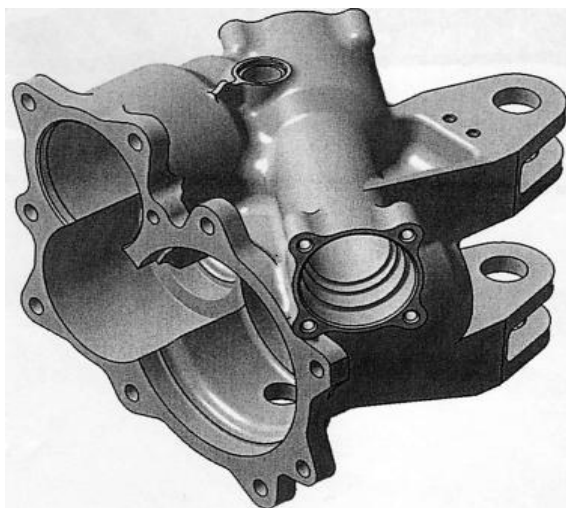


Рисунок 3. Оптимизированная модель корпуса из сплава ВАЛ20

Перспективными направлениями на ближайшие 10–20 лет являются следующие [20–25]:

- разработка высокопрочного коррозионностойкого литейного сплава на основе системы Al–Mg с пониженной плотностью – для литья самолетных деталей, в том числе деталей гидросамолетов, работающих во всеклиматических условиях, со свойствами: $\sigma_b \geq 380$ МПа, $\delta \geq 8\%$;

- применение высокопрочных, технологичных конструкционных литейных алюминиевых сплавов нового поколения с повышенным уровнем служебных характеристик позволит обеспечить изготовление различных фасонных отливок на уровне, соответствующем мировому;

- технология литья по газифицируемым и выжигаемым моделям перспективна при наличии хорошей производственной базы – современных компьютеризированных установок, печей и форм с вакуумированием расплава, линий для изготовления моделей методом стереолитографии;

- разработка технологии формообразования фасонных отливок тиксолитьем. Главная особенность такой технологии состоит в использовании новых качеств сплавов, ко-

торые они способны проявлять в твердожидком состоянии и позволяют при этом осуществлять сложное формообразование за одну операцию и при пониженном удельном энергосодержании металла. Применение такой технологии обеспечивает отсутствие газов и усадочных дефектов в отливках.

Перспективным является применение литейных алюминиевых сплавов не только в самолето- и ракетостроении, но и в автомобильной промышленности и других отраслях народного хозяйства. Возможно изготовление сложных тонкостенных отливок для деталей двигателей: головки блоков цилиндров, поршни; картеры рулевого управления и сцепления, корпуса карбюратора, дросселя распределителя, топливного и масляного насосов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колобнев И.Ф., Альтман М.Б. Газовая пористость и методы борьбы с ней в алюминиевых отливках. М.: ИТЭИН. 1948. 48 с.
2. Альтман М.Б., Лебедев А.А., Чухров М.В. Плавка и литье легких сплавов. М.: Металлургия. 1969. 680 с.
3. Альтман М.Б., Стромская Н.П. Повышение свойств стандартных литейных алюминиевых сплавов. М.: Металлургия. 1984. 128 с.
4. Эскин Г.И. Ультразвуковая обработка расплавленного алюминия. М.: Металлургия. 1965. 224 с.
5. Альтман М.Б. Неметаллические включения в алюминиевых сплавах. М.: Металлургия. 1965. 127 с.
6. Альтман М.Б. Металлургия литейных алюминиевых сплавов. М.: Металлургия. 1972. 153 с.
7. Бранчуков Д.Н., Панфилов А.В. Рафинирование алюминиевых сплавов новыми комбинированными флюсами //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2009. №3. С. 10–15.
8. Колобнев И.Ф. Термическая обработка алюминиевых сплавов. М.: Металлургия. 1966. 394 с.
9. Колобнев И.Ф. Жаропрочность литейных алюминиевых сплавов. М.: Металлургия. 1973. 320 с.
10. Лебедев В.М., Мельников А.В., Постников Н.С., Черкасов В.В. Высокоэффективные литейные алюминиевые сплавы /В сб.: Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков. М.: ВИАМ. 1994. С. 101–105.
11. Аристова Н.А., Колобнев И.Ф. Термическая обработка литейных алюминиевых

- сплавов. М.: Металлургия. 1977. 144 с.
12. Гончаренко Е.С., Корнышева И.С. Литейный алюминиевый сплав АЛ4МС для агрегатного литья //Технология легких сплавов. 2009. №3. С. 99–101.
 13. Гончаренко Е.С., Корнышева И.С. Авиационные отливки, полученные литьем по газифицируемым моделям //Литейное производство. 2011. №6. С. 21–23.
 14. Гао Ченгксун и др. Литье по газифицируемым моделям отливок из алюминиевых сплавов //Литье и цветные сплавы. 2010. Т. 30. №8. С. 746–747.
 15. Гончаренко Е.С., Корнышева И.С. Перспективы применения отливок из алюминиевых сплавов //Литейное производство. 2012. №1. С. 21–23.
 16. Гончаренко Е.С., Корнышева И.С. Отливки из алюминиевых сплавов. Исследования, материалы, технологии //Литейное производство. 2013. №2. С. 2–4.
 17. 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.
 18. Степанов А.В., Косарина Е.И., Саввина Н.А., Усачев В.Е. Макро- и микропористость в сплавах на основе алюминия и никеля, обнаружение ее рентгеноскопическими методами неразрушающего контроля //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 423–430.
 19. Чирков Е.Ф. Темп разупрочнения при нагревах – критерий оценки жаропрочности конструкционных сплавов систем Al–Cu–Mg и Al–Cu //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 11–19.
 20. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники /В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М. ВИАМ. 2007. С. 20–26.
 21. 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.
 22. 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.
 23. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 157–167.
 24. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и высоких технологий будущего //Труды

ВИАМ. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).

25. Семенов Б.И., Куштаров К.М. Производство изделий из металла в твердожидком состоянии. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. 223 с.

REFERENCES LIST

1. Kolobnev I.F., Al'tman M.B. Gazovaja poristost' i metody bor'by s nej v aljuminievyh otlivkah [Gas porosity and methods of combating it in aluminum castings]. М.: ITJeIN. 1948. 48 s.
2. Al'tman M.B., Lebedev A.A., Chuhrov M.V. Plavka i lit'e legkih splavov [Melting and casting of light alloys]. М.: Metallurgija. 1969. 680 s.
3. Al'tman M.B., Stromskaja N.P. Povyshenie svojstv standartnyh litejnyh aljuminievyh splavov [Raising the standard properties of cast aluminum alloys]. М.: Metallurgija. 1984. 128 s.
4. Jeskin G.I. Ul'trazvukovaja obrabotka rasplavlennogo aljuminija [Ultrasonic treatment of molten aluminum]. М.: Metallurgija. 1965. 224 s.
5. Al'tman M.B. Nemetallicheskie vkljuchenija v aljuminievyh splavah [Non-metallic inclusions in aluminum alloys]. М.: Metallurgija. 1965. 127 s.
6. Al'tman M.B. Metallurgija litejnyh aljuminievyh splavov [Metallurgy of cast aluminum alloys]. М.: Metallurgija. 1972. 153 s.
7. Branchukov D.N., Panfilov A.V. Rafinirovanie aljuminievyh splavov novymi kombinirovannymi fljusami [Refining aluminum alloys combined with new fluxes] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravochnik. 2009. №3. S. 10–15.
8. Kolobnev I.F. Termicheskaja obrabotka aljuminievyh splavov [Heat treatment of aluminum alloys]. М.: Metallurgija. 1966. 394 s.
9. Kolobnev I.F. Zharoprochnost' litejnyh aljuminievyh splavov [Heat resistance of cast aluminum alloys]. М.: Metallurgija. 1973. 320 s.
10. Lebedev V.M., Mel'nikov A.V., Postnikov N.S., Cherkasov V.V. Vysokoeffektivnye litejnye aljuminievyje splavy [High-performance aluminum casting alloys] /V sb.: Aviacionnye materialy na rubezhe XX–XXI vekov. М.: VIAM. 1994. S. 101–105.
11. Aristova N.A., Kolobnev I.F. Termicheskaja obrabotka litejnyh aljuminievyh splavov [Heat treatment of cast aluminum alloys]. М.: Metallurgija. 1977. 144 s.
12. Goncharenko E.S., Kornysheva I.S. Litejnyj aljuminievyj splav AL4MS dlja agregatnogo lit'ja [Foundry aluminum alloy casting for an aggregate AL4MS] //Tehnologija legkih splavov. 2009. №3. S. 99–101.

13. Goncharenko E.S., Kornysheva I.S. Aviacionnye otlivki, poluchennye lit'em po gazificiruemym modeljam [Aviation casting obtained by casting on gasified models] //Litejnoe proizvodstvo. 2011. №6. S. 21–23.
14. Gao Chengksun i dr. Lit'e po gazificiruemym modeljam otlivok iz aljuminievyh splavov [Lost foam casting of aluminum alloy castings] //Lit'e i cvetnye splavy. 2010. T. 30. №8. S. 746–747.
15. Goncharenko E.S., Kornysheva I.S. Perspektivy primeneniya otlivok iz aljuminievyh splavov [Prospects of application of aluminum alloy castings] //Litejnoe proizvodstvo. 2012. №1. S. 21–23.
16. Goncharenko E.S., Kornysheva I.S. Otlivki iz aljuminievyh splavov. Issledovanija, materialy, tehnologii [Casting of aluminum alloys. Research, materials, technology] //Litejnoe proizvodstvo. 2013. №2. S. 2–4.
17. Dujunova V.A., Goncharenko E.S., Muhina I.Ju., Uridija Z.P., Volkova E.F. Nauchnoe nasledie akademika I.N. Fridljandera. Sovremennye issledovanija magnievyh i litejnyh aljuminievyh splavov [Scientific Heritage of Academician IN Friedlander. Modern studies of magnesium and aluminum alloy casting] //Cvetnye metally. 2013. №9. S. 71–78.
18. Stepanov A.V., Kosarina E.I., Savvina N.A., Usachev V.E. Makro- i mikroporistost' v splavah na osnove aljuminija i nikelja, obnaruzhenie ee rentgenoskopichesкими metodami nerazrushajushhego kontrolja [Macro- and micro-porosity in alloys based on aluminum and nickel, her discovery of X-ray non-destructive testing] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 423–430.
19. Chirkov E.F. Temp razuprochneniya pri nagrevah – kriterij ocenki zharoprochnosti konstrukcionnyh splavov sistem Al–Cu–Mg i Al–Cu [Temp softening when heated – evaluation criterion resistance of building systems alloys Al–Cu–Mg and Al–Cu] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №S2. S. 11–19.
20. Kablov E.N. Osnovnye itogi i napravlenija razvitija materialov dlja perspektivnoj aviacionnoj tehniki [Main outcomes and directions of development of materials for advanced aircraft] /V sb. 75 let. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007: Jubilejnyj nauch.-tehnič. sb. M. VIAM. 2007. S. 20–26.
21. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
22. Kornysheva I.S., Volkova E.F., Goncharenko E.S., Muhina I.Ju. Perspektivy primeneniya

- magnievyh i litejnyh aljuminievyh splavov [Prospects of application of magnesium and aluminum alloy casting] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 212–222.
23. Antipov V.V. Strategija razvitija titanovyh, magnievyh, berillievyh i aljuminie-vyh splavov [The development strategy of titanium, magnesium, beryllium and aluminum alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 157–167.
24. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Vershkov A.V. Redkie metally i redkozemel'nye jelementy – materialy sovremennyh i vysokih tehnologij budushhego [Rare metals and rare earth elements – modern materials and high-tech future] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 01 (viam-works.ru).
25. Semenov B.I., Kushtarov K.M. Proizvodstvo izdelij iz metalla v tverdozhidkom sostojanii [Manufacture of metal in the solid-liquid state]. M.: Izd-vo MGTU im. N.Je. Baumana. 2010. 223 s.