



УДК 621.791

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-7-7

**АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ БОРСОДЕРЖАЩЕГО
СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЛИГАТУРЫ Al–В (обзор)**

Д.А. Попов

Д.В. Огородов

А.В. Трапезников

Октябрь 2015

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.

УДК 621.791

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-7-7

Д.А. Попов¹, Д.В. Огородов¹, А.В. Трапезников¹

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ БОРСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЛИГАТУРЫ АI–В (обзор)

Рассмотрены и проанализированы виды сырья и способы производства лигатуры алюминий–бор, такие как: прямое сплавление алюминия с чистым бором или боридами; алюмотермическое восстановление борсодержащих, кислородсодержащих и бескислородных соединений; внепечное получение чистых боридов с последующим растворением их в алюминии (самораспространяющийся высокотемпературный синтез, гальванический способ, карботермическое восстановление и др.).

Ключевые слова: *лигатура, алюминий, бор, сплав, модифицирование, структура, алюмотермия, усвоение.*

D.A. Popov, D.V. Ogorodov, A.V. Trapeznikov

ALTERNATIVE SOURCES OF BORON-CONTAINING RAW MATERIALS FOR THE AI–B LIGATURES PRODUCTION (review)

This article describes and analyzes raw materials and production methods of aluminum-boron ligatures such as: direct alloying aluminum with pure boron or borides; aluminothermic reduction of boron compounds, oxygen-containing and oxygen-free; receiving ladle clean boride followed by dissolving them in aluminum (SHS, electroplated carbothermic reduction, etc.).

Keywords: *ligature, aluminum, boron, alloy, modification, structure, aluminothermy, equation.*

¹Федеральное 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 измельчения первично кристаллизующихся фаз в алюминиевые сплавы рекомендуется вводить небольшое количество бора главным образом с помощью лигатуры [1]. Исключительно важное значение имеет качество модифицирующих лигатур, которое должно отвечать двум основным требованиям: как можно более высокая дисперсность кристаллов интерметаллидов и чистота по неметаллическим включениям.

Обеспечение точной дозировки металлов, оказывающих модифицирующее действие при их очень малой концентрации их и равномерно распределяющихся по объему расплава, возможно только при использовании лигатур [2]. Приготовить качественные лигатуры довольно трудно. Это связано с тем, что выплавка и разливка происходят при весьма высоких температурах. Кроме того, их производство считается второстепенной операцией в технологическом цикле получения отливок [3].

Наиболее острой остается проблема гарантированного измельчения структуры сплавов при литье слитков, так как уровень требований к деформируемым полуфабрикатам, особенно при производстве изделий ответственного назначения, значительно превышает уровень требований к фасонным отливкам [4]. Однако в последние годы и при фасонном литье, особенно из заэвтектических силуминов, вопросы модифицирования приобретают все большее значение, что связано с необходимостью повышения качества механической обработки, стойкости и уменьшения расхода режущего инструмента на обработку отливок, а также с тем, что образование задиров скользящих поверхностей твердыми включениями кремния недопустимо [5].

В попытках получения качественных лигатур исследователи и технологи постоянно сталкиваются с необходимостью принятия решений в условиях недостатка информации о физико-химической природе процессов [6]. Это связано с проблемами анализа явлений переноса (гидродинамики, теплопередачи, фазовых превращений), протекающих в условиях реального производства. Однако без таких знаний точно определить параметры технологического процесса получения высококачественной продукции удастся далеко не всегда. Очевидно, что для оптимизации плавильно-литейной технологии необходимо провести исследования, которые позволят визуализировать эти процессы с целью их понимания. Это, в свою очередь, позволит значительно усовершенствовать процесс получения модифицирующих лигатур, предложить новые эффективные позиции и сэкономить важнейшие ресурсы – металл, рабочее время, электроэнергию.

Материалы и методы

Основным природным сырьем для получения различных соединений бора являются борат кальция ($\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3$) и бура ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Физико-химические свойства наиболее распространенных борсодержащих соединений приведены в таблице.

Физико-химические свойства борсодержащих соединений

Свойства	Значения свойств борсодержащих соединений							
	BCl_3	KBF_4	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	CaB_4O_7	B_2O_3	CaB_6	B_4C	$\text{B}_{\text{кр}}^*$
Содержание В, % (по массе)	9,0	8,9	22	22,4	31	62	78	100
Плотность, г/см ³	1,43	2,58	2,37	–	1,84	–	2,51	2,35
Температура, °С:								
плавления	-107	530	741	1162	450	2225	2250	2075–2180
кипения	13	776	–	–	2100	–	3500	3707

* Бор кристаллический.

Поскольку основная информация по получению лигатуры Al–В до 1985 г. изложена в книге В.И. Напалкова и С.В. Махова [7], то в данном обзоре приведены более поздние публикации.

Условно все известные способы получения лигатуры Al–В можно разделить на три группы (рис. 1):

- прямое сплавление алюминия с чистым бором или боридами;
- алюминотермическое восстановление борсодержащих, кислородсодержащих и бескислородных соединений;
- внепечное получение чистых боридов с последующим растворением их в алюминии (самораспространяющийся высокотемпературный синтез, гальванический способ, карботермическое восстановление и др.).

Способ прямого сплавления бора с алюминием, точнее растворение в алюминии, был применен для построения диаграммы состояния системы Al–В А.В. Гофманом и А. Енихе, которые сплавляли алюминий и аморфный бор в высокочастотной печи при температуре 1450°С в вакууме и получали сплавы, содержащие до 4% (по массе) В.

В 1961–1962 гг. В.И. Серебрянский, В.И. Эпельбаум, Н.И. Жданова представили окончательный вариант диаграммы Al–В, для построения которой были проведены испытания с использованием спрессованных в таблетки порошков алюминия и бора. Хотя температура плавления бора очень высока особых затруднений его растворения в алюминии, по-видимому, не было.

В работе [8] предлагается изготавливать лигатуру, содержащую 2–4% (по массе) В, в электрической печи. Для этого под «зеркало» расплава вводили смесь порошков бора, алюминия и графита в соотношении 1:1:2, степень усвоения бора составила 90%.

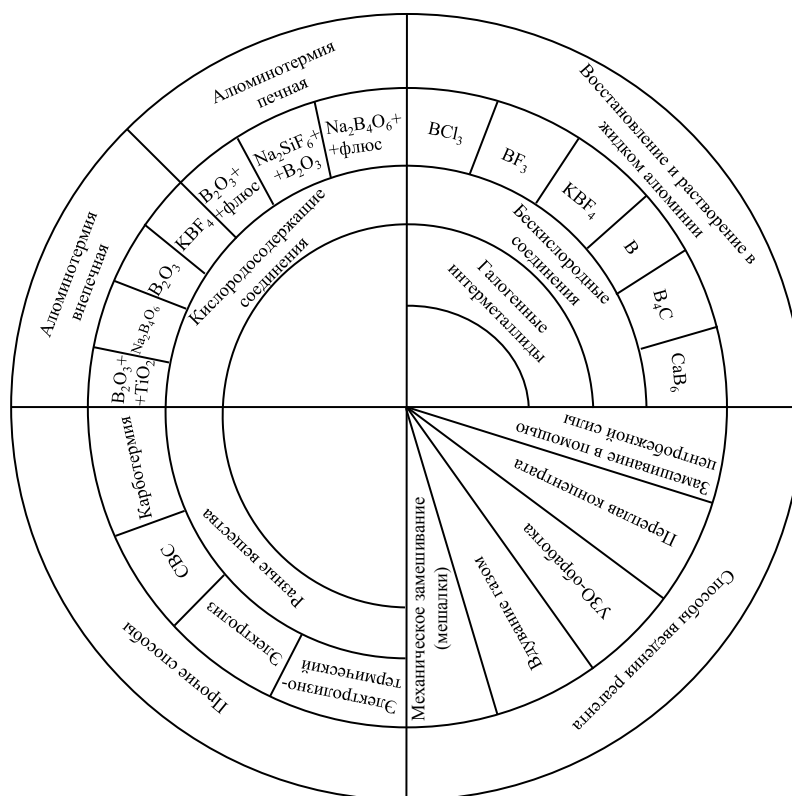


Рисунок 1. Способы получения лигатуры Al–B

В некоторых патентах предлагается вводить в расплав смесь тонкоизмельченных порошков бора и алюминия. Подробнее с ними можно ознакомиться в работе [7]. Отметим только, что мелкие порошки чрезвычайно взрывоопасны, поэтому необходимо соблюдать особые меры безопасности при работе с ними, в том числе требуются специально оборудованные помещения для получения смесей. Более подробно эту технологию авторы не рассматривают, считая ее бесперспективной.

Лигатуру Al–B можно получить прямым сплавлением AlB_2 и Al. Предварительно борид получают алюминотермическим восстановлением борного ангидрида по реакции: $B_2O_3 + 3Al \rightarrow AlB_2 + Al_2O_3$ с выделением тепла. Способ основан на большем сродстве алюминия к кислороду по сравнению с бором. Реакция начинается при температуре выше $900^\circ C$, но быстро затухает из-за образования в зоне контакта реагентов оксида алюминия. Попытки исследователей получить лигатуру путем введения в жидкий алюминий оксида бора или буры не привели к разработке даже опытной технологии, но существенно обогатили представления авторов о кинетике восстановительной реакции в системе «алюминий–борсодержащее соединение». Так, в 1953 г. Ф. Лиль [9] пытался получить сплавы путем введения в расплав алюминия буры и оксида бора. В своей работе он отметил, что при длительной выдержке (~6 ч) и при большой поверхности соприкосновения реакция проходит довольно полно, но образующийся оксид алюминия

вызывает затвердевание расплава и его сильное загрязнение. Изучая этот способ получения лигатуры, В.И. Напалков пришел к выводу, что в индукционной печи при 1500°C и выдержке не менее одного часа усвоение бора достигает 70% [7].

Более подробно эту технологию в 1995 г. изучал Т.Т. Кондратенко [10], которому удалось получить лигатуру с содержанием от 0,5 до 2,0% (по массе) В. Он использовал обезвоженный (переплавленный) борный ангидрид и мелкую алюминиевую шихту. При температуре 1250–1300°C в индукционной печи происходит усвоение бора до 70% от его количества в шихте. При использовании буры показатели усвоения бора оказались ниже на 10–15%. По мнению Т.Т. Кондратенко достоинством способа является простота и экологическая чистота технологии благодаря отсутствию вредных летучих веществ при плавке. Автор не оценивал выход годного литья, т. е. балансных плавок не проводил.

Достоверных сведений о технологии получения лигатуры способом внепечной алюминотермии в научно-технической литературе нет, но встречаются отдельные упоминания, свидетельствующие о проведенных исследованиях. Так, в книге «Рециклинг алюминия» сообщается: «Другими примерами получения высококонцентрированных лигатур алюминотермическим восстановлением является лигатура Al–(5–30% (по массе))В». Результаты внепечной алюминотермии оксида бора приводятся в книгах В.А. Неронова [11] и Г.В. Самсонова [12], но они касаются только лабораторных опытов по получению чистых боридов (алюминидов бора). Аналогичные эксперименты проводил Н.Н. Мурач [13] с использованием термитных добавок. Он получал разделение на слой шлака и сплава (до 40% В), что является самым трудным условием технологии, так как плотность шлака и сплава близки, а вязкость шлака выше вязкости расплава. Разделение фаз наблюдается только в таких системах, как Al–В–Mn, Al–В–Fe, Al–В–Ti, в которых бориды имеют высокую плотность.

В научно-технической литературе есть сведения, что лигатуру Al–В можно изготовить путем карботермического восстановления оксидов бора в электродуговой печи в присутствии алюминия. В патенте Японии предложено получать лигатуру восстановлением смеси борной кислоты (или борсодержащих минералов, например колеманита) с порошком углерода, взятым в необходимом для восстановления всех оксидов количестве.

Основываясь на приведенных данных В.И. Напалков в 1982–1983 гг. установил, что с увеличением соотношения $\text{Na}_3\text{AlF}_6/\text{B}_2\text{O}_3 \geq 12$ или $\text{K}_3\text{AlF}_6/\text{B}_2\text{O}_3 \geq 8$ повышается усвоение бора в алюминии до ~50% при температуре не ниже 900°C и интенсивном перемешивании. При введении этих смесей под зеркало расплава происходит алюмино-

термическая реакция восстановления бора. Аналогичные результаты получены при использовании переплавленной буры (рис. 2).

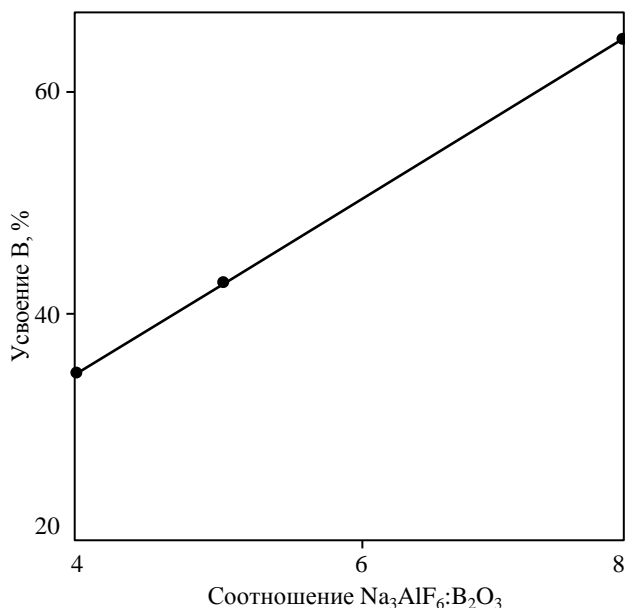


Рисунок 2. Усвоение бора в алюминии при температуре 1000°C в зависимости от соотношения $\text{Na}_3\text{AlF}_6:\text{B}_2\text{O}_3$

В направлении разработки технологии изготовления лигатуры Al–B заслуживает внимания работа [14], в которой в жидкий алюминий вводили смесь кремнефтористого натрия (Na_2SiF_6) и оксида бора. Автор считает, что при спекании этих веществ образуется тетрафторборат натрия (NaBF_4), из которого извлечение бора в расплав алюминия составляет в среднем 30%. Для сравнения он приводит значение усвоения бора из KBF_4 при тех же температурных условиях (до 45%). Недостатками способа следует считать высокую температуру процесса ($900\text{--}1000^\circ\text{C}$), приводящую к значительному газовыделению и высокому содержанию кремния в лигатуре, превосходящему в 3–7 раз содержание бора. Автор считает, что применение такой лигатуры ограничено содержанием кремния. С 1986 г. упоминаний об этом способе не встречается.

Наибольшее количество публикаций посвящено использованию фторбората калия (KBF_4) для получения лигатуры Al–B. Французскими учеными Велером и Сент-Клер Девилле в 1857 г. из этого соединения впервые был получен чистый аморфный бор, и тогда же они добавляли к фторборату калия флюсы (KCl , NaCl) для создания более подвижных шлаков. В 1974 г. В.И. Напалков разработал опытную технологию получения лигатуры Al–5Ti–1B из фторбората калия в индукционной печи ИАТ-1. Он вводил соль под слой жидкого флюса KCl , наплавленного на поверхность жидкого алюминия. Предполагалось, что эти две соли образуют слой, препятствующий испарению фторбора-

та калия и снижающий потери бора. Слой жидкого KCl составлял 60–100 мм, при этом условии за 1,0–1,5 ч работы печи усвоение бора в расплаве алюминия достигало 90%. Фторборат калия вводят порционно по 10–15 кг с помощью стального колокольчика при температуре 850–900°C, после этого печь периодически включают на максимальную мощность для перемешивания компонентов расплава. Непрерывный режим работы приводит к сильному перегреву расплава и, как следствие, к опасному нагреву воды в индукторе. Кинетика усвоения бора в расплаве при нагреве в индукционной печи [15] показана на рис. 3.

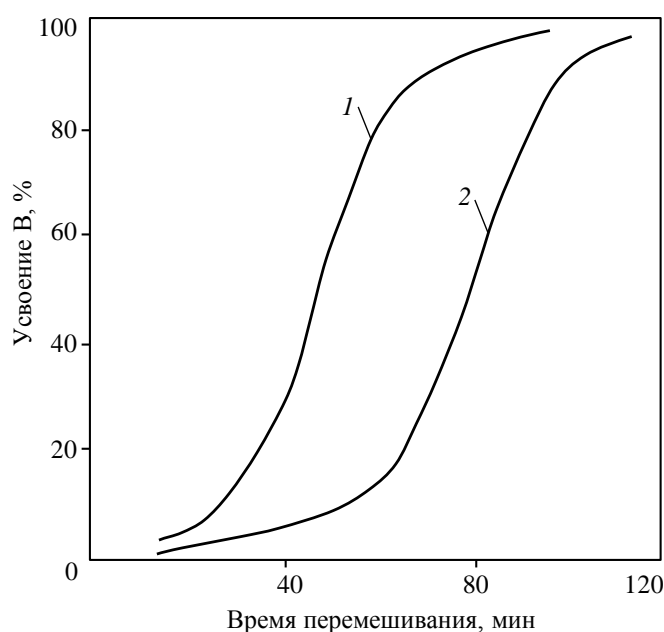


Рисунок 3. Зависимость усвоения бора в алюминии от времени перемешивания при приготовлении сплава системы Al–B в печи: 1 – ИАТ; 2 – лабораторной

Имеется много работ, в которых предлагается добавлять к фторборату калия компоненты Na, C_2Cl_6 , NaF, Na_3AlF_6 , Al_2O_3 , B_2O_3 , AlF_3 и другие. Предположительно введение указанных добавок увеличивает усвоение бора. Авторы считают, что нет смысла серьезно рассматривать эти предложения в качестве изобретений в связи с большими сомнениями в целесообразности их применения.

В технологическом плане интересна работа В.Г. Кокоулина и М.П. Богоякова [16], которые разработали способ непрерывного введения фторбората калия в расплав с помощью аргона. Они создали специальную установку, в которой регулируемые параметрами были приняты давление газа и число оборотов дозатора. Фторборат калия вдували под слой KCl толщиной ~60 мм и при расходе порошка 14–20 г/с и аргона ~0,5 л/с. Предложенный способ обеспечивает усвоение бора 83–92%, тогда как ранее применяемая технология – порционное введение KBF_4 в расплав под слой KCl и интенсивное

перемешивание расплава вследствие возникновения электромагнитных сил, т. е. индуктором печи – обеспечивает усвоение бора не более 50%, причем в атмосферу выделяется до 48% (по массе) В в виде ядовитого соединения BF_3 .

Подавить летучесть фторида бора (BF_3) пытались путем введения соли KBF_4 под слой жидкого флюса KCl (технология 2), а также добавлением криолита Na_3AlF_6 . Авторы не сообщают, удалось ли снизить выделение дыма.

Весьма интересным является способ [17] получения лигатуры Al-B с использованием BCl_3 . Это газообразное соединение вводили в расплав хлоридно-фторидных солей и в результате соответствующих реакций получали расплав KBF_4+KCl . По мнению исследователей, процесс восстановления бора является гетерогенным и протекает на поверхности раздела фаз «флюс–алюминий». Недостатком способа является невысокое содержание бора во флюсе (~35% KBF_4), что ограничивает масштаб использования, кроме того, требуются специальные меры предосторожности при работе с треххлористым бором.

Позже В.И. Напалков [7] изучал возможность введения BCl_3 непосредственно в жидкий алюминий. Были получены неплохие результаты, однако на этом этапе исследования прекратились вследствие трудностей, возникающих при работе с этим веществом в условиях цеха. Спустя 25 лет после первой публикации В.И. Напалков предложил вернуться к рассмотрению этой технологии [18] как перспективной, но никаких способов усовершенствования данной технологии не приводит.

По использованию бескислородного соединения бора (B_4C) известны только две публикации. В первой описано получение специального материала Бораль, а во второй – предложен способ введения карбида бора в расплавы. Высокочастотную печь заполняют шихтой примерно до половины объема, чтобы зеркало расплава располагалось в зоне максимальной напряженности магнитного поля. При работе на максимальной мощности перемешивание расплава будет весьма интенсивным, вводимый порошок карбида бора перейдет в расплав, а после этого загружают шихту до полного объема печи. По мнению авторов, основное условие успешного введения порошка в расплав – хорошее смачивание. Известно, что смачивание порошков карбида бора алюминием происходит при температуре выше 1300°C .

В работах [16, 17] сделаны попытки получить двойную лигатуру электролизом растворов. В алюминиевую ванну электролизера через отверстие, пробиваемое в корке, вводили навесками по 0,5–2,5 кг борный ангидрид. При концентрации бора в алюминии 0,08–0,1% (по массе) ванна электролизера работает стабильно, однако при увеличении

концентрации бора до 0,15–0,18% (по массе) процесс электролиза нарушается. Попытки получить лигатуру на промышленном электролизере Красноярского алюминиевого завода также не увенчались успехом: концентрация бора колебалась в пределах 0,01–0,15% (по массе).

Необходимо отметить предложенный в 1965 г. способ получения боридов металлов путем электролиза борсодержащего расплава с графитовым анодом и металлическим катодом при температуре $\sim 1000^\circ\text{C}$. В качестве борсодержащего расплава предложена смесь хлорида бария, оксида бария и бора. Процесс проводят при силе тока, при которой величина обратной ЭДС не превышает 0,8–1,0 А. Оксиды бария и бора берут в соотношении 1:0,55, при этом содержание оксида бария на 30% меньше содержания хлорида бария. Примерно в то же время изучен процесс получения элементарного бора путем электролиза из расплавленной смеси криолита и оксида бора, состоящий из двух стадий: сначала оксид бора диссоциирует до BO_2 , а затем происходит реакция разложения BO_2 на бор и кислород.

Выводы

Обобщая данные научно-технической литературы, необходимо отметить, что из предложенных на сегодняшний день многочисленных способов получения лигатуры Al–B чаще всего используют введение в расплав алюминия фторбората калия в индукционной печи. Главный недостаток способа – многократное превышение предельно допустимой концентрации по выделению вредных газообразных продуктов. Получение лигатуры Al–(3–5)% B из фторбората калия с помощью предложенных технологий настолько проблематично, что на рынке сплавов такие лигатуры (отечественного производства) не появились ни разу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов Н.А. Экономнолегированные жаропрочные алюминиевые сплавы: принципы оптимизации фазового состава //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 6–11.
2. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники /В кн. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 20–26.
3. 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.
4. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 167–182.
 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. №5. С. 212–222.
 6. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники /В сб. Авиационные материалы и технологии. М.: ВИАМ. 2001. №1. С. 3–8.
 7. Напалков В.И., Махов С.В. Легирование и модифицирование алюминия и магния. М.: МИСиС. 2002. 376 с.
 8. Способ приготовления лигатуры алюминий–тугоплавкий металл: пат. 2232827 Рос. Федерация; опубл. 03.02.2003.
 9. Миронов В.М., Бышкварко Г.С., Китари Г.Г. Производство лигатур для алюминиевых и магниевых сплавов. Тула: Главная редакция цветной металлургии. 1963. 84 с.
 10. Лигатура: пат. 2026935 Рос. Федерация; опубл. 06.04.1995.
 11. Яценко С.П., Скачков В.М., Варченя П.А. Получение лигатур на основе алюминия методом высокотемпературных обменных реакций в расплавах солей //Расплавы. 2010. №2. С. 89–94.
 12. Яценко С.П., Овсянников Б.В., Ардашев М.А. Цементационное получение «мастер-сплава» из фторидно-хлоридных расплавов //Расплавы. 2006. №5. С. 29–36.
 13. Лякишев Н.П., Плинер Ю.Л., Игнатенко Г.Ф. Алюминотермия. М.: Металлургия. 1978. 424 с.
 14. Белов Н.А., Алабин А.Н. Сравнительный анализ легирующих добавок применительно к изготовлению термостойких проводов на основе алюминия //МиТОМ. 2011. №9. С. 54–58.
 15. Способ изготовления лигатур на основе алюминия: пат. 2190682 Рос. Федерация; опубл. 17.05.2001.
 16. Осинцев О. Диаграммы состояния двойных и тройных систем. Фазовые равновесия в сплавах. М.: Машиностроение. 2009. 352 с.
 17. Напалков В.И., Черепок Г.В., Махов С.В. Непрерывное литье алюминиевых сплавов. М.: Интермет Инжиниринг. 2005. 512 с.
 18. Трухов А.П., Маляров А.И. Литейные сплавы и плавка. М.: Академия. 2004. 377 с.

REFERENCES LIST

1. Belov N.A. Jekonomnolegirovannye zharoprochnye aljuminievye splavy: principy optimizacii fazovogo sostava [Ekonomnolegirovannye heat resisting aluminum alloys: principles of optimization of phase structure] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №2. S. 6–11.
2. Kablov E.N. Osnovnye itogi i napravlenija razvitija materialov dlja perspektivnoj aviacionnoj tehniki [The main results and the directions of development of materials for perspective aviation engineering] /V kn. 75 let. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007: Jubilejnyj nauch.-tehnič. sb. M.: VIAM. 2007. S. 20–26.
3. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategičeskikh napravlenij razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative development of VIAM Federal State Unitary Enterprise of GNTs Russian Federation on implementation «The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2015. №1 (34). S. 3–33.
4. Antipov V.V., Senatorova O.G., Tkachenko E.A., Vahromov R.O. Aljuminievye deformiruemye splavy [Aluminum deformable alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 167–182.
5. Kornysheva I.S., Volkova E.F., Goncharenko E.S., Muhina I.Ju. Perspektivy primenenija magnievyh i litejnyh aljuminievyh splavov [Perspectives of application of magnesium and cast aluminum alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 212–222.
6. Kablov E.N. Kontrol' kachestva materialov – garantija bezopasnosti jekspluatacii aviacionnoj tehniki [Quality control of materials – security accreditation of operation of aviation engineering] /V sb. Aviacionnye materialy i tehnologii. M.: VIAM. 2001. №1. S. 3–8.
7. Napalkov V.I., Mahov S.V. Legirovanie i modifirovanie aljuminija i magnija [Alloying and aluminum and magnesium modifying]. M.: MISiS. 2002. 376 s.
8. Sposob prigotovlenija ligatury aljuminij–tugoplavkij metal [Way of preparation of ligature aluminum-refractory metal]: pat. 2232827 Ros. Federacija; opubl. 03.02.2003.
9. Mironov V.M., Byshkvarko G.S., Kitari G.G. Proizvodstvo ligatur dlja aljuminievyh i magnievyh splavov [Production of ligatures for aluminum and magnesium alloys]. Tula: Glavnaja redakcija cvetnoj metallurgii. 1963. 84 s.
10. Ligatura [Ligature]: pat. 2026935 Ros. Federacija; opubl. 06.04.1995.
11. Jacenko S.P., Skachkov V.M., Varchenja P.A. Poluchenie ligatur na osnove aljuminija metodom vysokotemperaturnyh obmennyh reakcij v rasplavah solej [Receiving ligatures

- on the basis of aluminum method of high-temperature exchange reactions in rasplavakh salts] //Rasplavy. 2010. №2. S. 89–94.
12. Jacenko S.P., Ovsjannikov B.V., Ardashev M.A. Cementacionnoe poluchenie «master-splava» iz fluoridno-hloridnyh rasplavov [Tsementatsionnoye receiving «master-alloy» from fluoride hloridnykh rasplavov] //Rasplavy. 2006. №5. S. 29–36.
 13. Ljakishev N.P., Pliner Ju.L., Ignatenko G.F. Aljuminotermija [Aluminothermy]. M.: Metallurgija. 1978. 424 s.
 14. Belov N.A., Alabin A.N. Sravnitel'nyj analiz legirujushhih dobavok primenitel'no k izgotovleniju termostojkih provodov na osnove aljuminija [The comparative analysis of alloying additives with reference to manufacturing of heat-resistant wires on the basis of aluminum] //MiTOM. 2011. №9. S. 54–58.
 15. Sposob izgotovlenija ligatur na osnove aljuminija [Way of manufacturing of ligatures on the basis of aluminum]: pat. 2190682 Ros. Federacija; opubl. 17.05.2001.
 16. Osincev O. Diagrammy sostojanija dvojnyh i trojnyh sistem. Fazovye ravnovesija v splavah [Charts of condition of double and threefold systems. Phase balance in alloys]. M.: Mashinostroenie. 2009. 352 s.
 17. Napalkov V.I., Cherepok G.V., Mahov S.V. Nepreryvnoe lit'e aljuminievyh splavov [Continuous casting of aluminum alloys]. M.: Internet Inzhinirng. 2005. 512 s.
 18. Truhov A.P., Maljarov A.I. Litejnye splavy i plavka [Cast alloys and melting]. M.: Akademiya. 2004. 377 s.