

УДК 669.018.29

В.А. Дуюнова<sup>1</sup>, А.А. Леонов<sup>1</sup>, С.В. Молодцов<sup>1</sup>

## ВКЛАД ВИАМ В РАЗРАБОТКУ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ И БОРЬБУ С КОРРОЗИЕЙ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-22-30

*Приведены сведения об истории отечественного ракетостроения, показано применение конструкционных материалов в ракетной технике.*

*Продемонстрирован вклад сотрудников ВИАМ в разработку и внедрение легких сплавов в изделия ракетно-космической техники, а также показано ее развитие в период послевоенных исследований космоса и «холодной войны» между СССР и США. Представлены космические программы и ракетно-космические аппараты, в конструкции которых внедрены легкие сплавы, разработанные в институте.*

**Ключевые слова:** магниевые сплавы, ракетная техника, космические материалы, алюминиевые сплавы, бериллиевые сплавы, титановые сплавы, конструкционные материалы, авиакосмическая техника, коррозия.

V.A. Dyuunova<sup>1</sup>, A.A. Leonov<sup>1</sup>, S.V. Molodtsov<sup>1</sup>

## VIAM'S CONTRIBUTION TO THE DEVELOPMENT OF LIGHT ALLOYS AND THE CORROSION CONTROL OF ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY PRODUCTS

*Information is given on the history of Russian rocket science, and the use of structural materials in rocket technology is shown.*

*The contribution of VIAM employees to the development and implementation of light alloys in rocket and space technology products was demonstrated, as well as its development during the post-war space exploration and the «Cold War» between the USSR and the USA. Space programs and spacecraft are presented, in the construction of which light alloys developed at the institute are introduced.*

**Keywords:** magnesium alloys, rocket technology, space materials, aluminum alloys, beryllium alloys, titanium alloys, structural materials, aerospace technology, corrosion.

---

<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

Космос привлекал ученых, изобретателей и философов еще с древних времен. Но только в XX в. с развитием ракетной техники человечество открыло для себя космические полеты. Освоение космоса в прошлом столетии стало основой развития современной науки и техники, а также разработок и исследований во многих областях, таких как машиностроение, приборостроение, информационные технологии, материаловедение и др.

Основоположником мировой космонавтики был русский и советский ученый и изобретатель Константин Эдуардович Циолковский (1857–1935), изложивший в своих работах технические основы ракетной техники. Ученым была предложена идея многоступенчатых ракет, когда происходит отделение отработавшей части ракеты, что в результате позволяет достичь большей скорости, чем могла бы обеспечить одноступенчатая ракета при равных условиях.

Но первую ракету запустили отнюдь не соотечественники К.Э. Циолковского. Немецкий конструктор Вернер фон Браун в годы Второй мировой войны возглавлял ракетную программу Германии. Им была разработана первая баллистическая ракета дальнего действия Фау-2, которая была принята на вооружение вермахта.

После окончания войны между бывшими союзниками возникли противоречия. СССР и США вступили в противостояние, вылившееся в гонку вооружений. Главной целью военного соперничества стало развитие ядерного оружия, а средством его доставки – ракеты. Так началась охота за немецкой ракетой Фау-2.

После капитуляции Германии из ее столицы в США были вывезены ракеты Фау-2, чертежи и запчасти, а также главный конструктор Вернер фон Браун. Сам конструктор получил американское гражданство и продолжил свою работу в ракетной отрасли, но уже в интересах другого государства.

Советскому Союзу остались лишь некоторые части немецкой ракеты, без чертежей и документации. Для восстановления технологии производства ракеты Правительством СССР было дано распоряжение о создании опытно-конструкторского бюро ОКБ-1, а его начальником назначен Сергей Павлович Королев.

Немалую часть чертежей советским инженерам удалось восстановить по сохранившимся частям ракеты Фау-2. Но для создания аналога ракеты необходимо было решить достаточно сложные задачи со значительным объемом работ: 86 марок стали, 56 марок цветных металлов, 159 неметаллических материалов требовали создания отечественных аналогов. Принимая во внимание то, что в Германии ракета Фау-2 создавалась при ограниченном лимите времени и нехватке дефицитных материалов, прежде всего резинотехнических, а также цветных металлов и легирующих элементов для сталей, качество применяемых материалов было невысоким, что крайне негативно сказывалось на надежности всей ракеты.

При подготовке немецкой ракеты к летным испытаниям советские инженеры столкнулись с такими проблемами, как негерметичность, невысокое качество материалов и покрытий, различные технологические и конструктивные недоработки. Поэтому при разработке советской ракеты Р-1 (аналога немецкой ракеты Фау-2) перспективными направлениями стали: обеспечение продолжительного хранения конструкции, разработка методов защиты металлических конструкций от коррозии, исследования коррозионной стойкости конструкций [1–4].

Во Всесоюзном научно-исследовательском институте авиационных материалов (ВИАМ) сразу же приступили к выполнению поставленных задач по тематике ракеты Р-1, чему способствовала передача институту в 1946 г. нескольких производственных площадок для организации экспериментально-технологической базы.

В результате работ по созданию ракеты Р-1 (по подобию ракеты Фау-2) при участии ВИАМ был создан 21 отечественный аналог для 59 марок цветных металлов, заменены 86 немецких марок сталей на 32 отечественные, 87 типов неметаллических марок – на 48 отечественных. Проведенная работа обеспечила технологичность и надежность всего изделия [1–4].

«Холодная война» коснулась не только военной сферы. Противостояние СССР и США проявлялось и в ракетно-космической отрасли. Успех в этом направлении имел не только технологическое, но и идеологическое значение. Противоборствующие стороны стремились к первенству в покорении космического пространства.

Лидерство в разработках и испытаниях космической техники требовало новых решений. Дальность полета боевых ракет и масса полезной нагрузки космических аппаратов зависели от многих факторов – например, от стартовой массы ракеты. Для ее снижения необходимо было использовать металлы с небольшой массой, которые

в свою очередь должны были иметь достаточно хорошие прочностные характеристики, чтобы выдерживать заданную нагрузку. Таким образом, широкое применение в ракетной технике нашли легкие сплавы.

### **Применение легких сплавов в изделиях ракетно-космической техники**

В ВИАМ разрабатываются высокопрочные, жаропрочные, литейные и интерметаллидные титановые сплавы; магниевые и алюминиевые литейные и деформируемые сплавы, а также бериллиевые сплавы.

Алюминий – самый распространенный металл в авиастроении, не зря получивший название «крылатый металл» и нашедший широкое применение в авиастроении, а затем и в космической технике благодаря своим высоким конструкционным свойствам. Алюминий поддается штамповке, имеет хорошую удельную прочность, высокие антикоррозионные свойства.

Титановые сплавы широко используют в ракетостроении, так как они обладают прочностью, сопоставимой со стальными сплавами, но имеют более низкую массу. Титановые сплавы также обладают высокой коррозионной стойкостью.

Бериллий является абсолютным рекордсменом по удельной жесткости ( $E/d=16000$  км (усл. ед.)) среди других металлов. Сочетание высокого значения модуля упругости и минимальной массы дает бериллию выигрыш по удельной жесткости в ~6,5 раза по сравнению со сталью [5].

Магниевые сплавы – как наиболее легкие из конструкционных материалов на металлической основе – тоже получили широкое применение в авиакосмической технике. Использование магниевых сплавов в конструкциях летательных и космических аппаратов обеспечило снижение их массы, улучшив при этом их летные характеристики (увеличив дальность и скорость полета, массу полезной нагрузки и т. д.).

### **Легкие сплавы, применяемые в конструкциях летательных и космических аппаратов**

Первый искусственный спутник Земли был запущен в СССР 4 октября 1957 г. Конструкция его корпуса представляла собой две силовые полусферические оболочки из алюминиевого сплава АМг6. Алюминиевый деформируемый сплав, обладающий хорошей технологичностью, высоким уровнем пластичности и удельной прочности, был разработан под руководством академика Иосифа Наумовича Фридляндера (рис. 1).

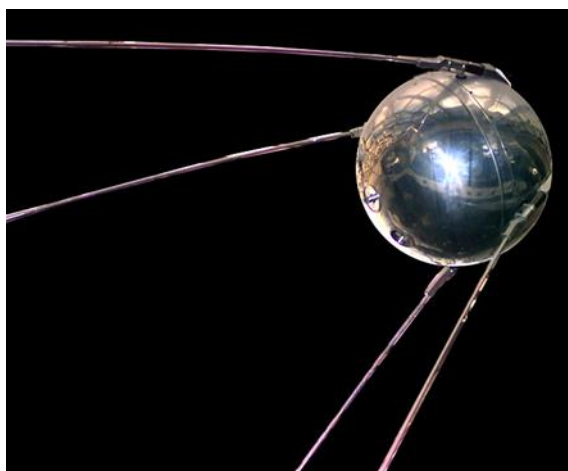


Рис. 1. Спутник №1

В космическом корабле «Восток» (рис. 2), на котором Юрий Алексеевич Гагарин совершил свой первый космический полет, использовались сплавы, разработанные в ВИАМ, а именно: из деформируемого сплава АМг6 были изготовлены корпус спускаемого аппарата и приборный отсек, алюминиевые сплавы АМг2 и АМг3 использовались в трубопроводах, сплавы Д16, Д19, АК6 и АК8 – в силовом наборе, титановые сплавы ВТ6 и ВТ14 – в шаровых баллонах высокого давления, магниевый деформируемый сплав МА8 применялся для изготовления фермы приборного отсека [5–7].

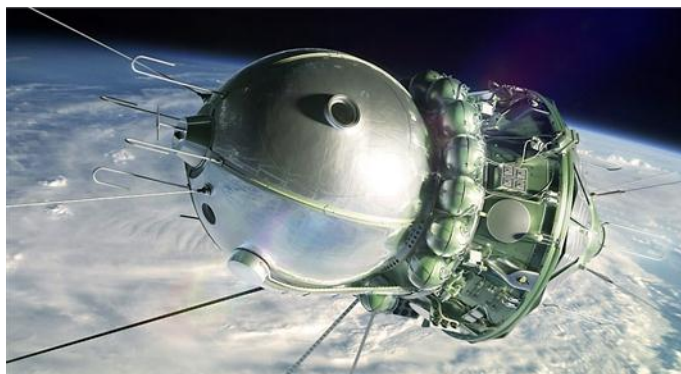


Рис. 2. Космический корабль «Восток-1»

Для системы жизнеобеспечения пилотируемых космических кораблей из алюминиевого сплава В124 центробежным способом литья изготавливались отливки для деталей типа «крыльчатка» (рис. 3).

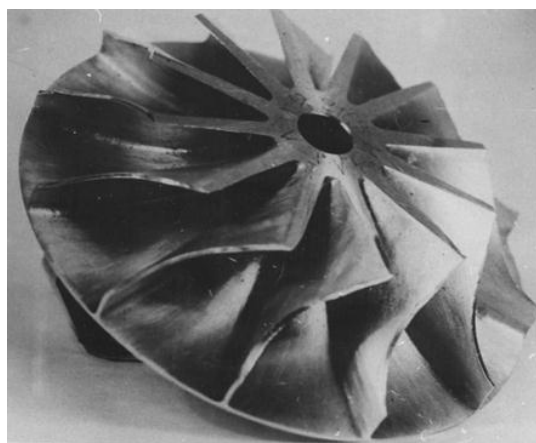


Рис. 3. Крыльчатка

В советских программах по освоению космического пространства и планет солнечной системы на таких аппаратах, как «Восход», «Венера», «Союз», «Луна» (рис. 4, *а, б, в, е*), использовались легкие металлы, применялись деформируемые магниевые сплавы МА12, МА14, МА15, МА2-1 для изготовления полуфабрикатов. Следует особо отметить жаропрочный магниевый сплав ВМД-10, который использовали для головных частей разгонного блока «Фрегат», силового набора аппаратов «Венера» и «Марс» (рис. 4, *б, г, д*), а также для изготовления свариваемого приборного контейнера космического аппарата «ОКО» космической системы предупреждения ракетного нападения (КСПРН) (рис. 4, *ж*) [8, 9].

В конструкциях космических аппаратов «Луна», «Венера» и «Марс» (рис. 4, *а, б, д*) широко применялись титановые сплавы ВТ14, ВТ6С, ВТ16 и ВТ2св, что позволило значительно снизить их массу.

На межпланетных станциях серии «Венера», начиная с модификации «Венера-9», широко использовался алюминий-бериллиевый сплав АБМ1, из которого изготавливались фермы крепления панелей солнечных батарей.

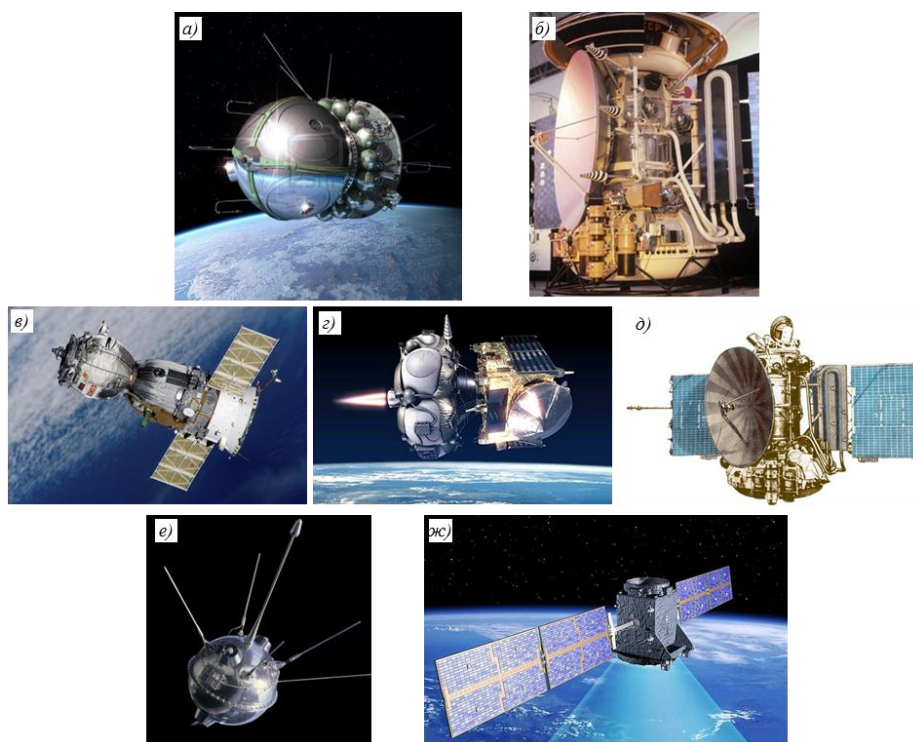


Рис. 4. Применение магниевых и титановых сплавов в конструкциях космических аппаратов: космический корабль «Восход» (а); космический аппарат «Венера» (б); космический корабль «Союз» (в); разгонный блок «Фрегат» (г); космический аппарат «Марс» (д); космический аппарат «Луна» (е); КСПРН «ОКО» (ж)

Космический корабль «Астрон» (рис. 5), созданный на базе космического аппарата «Венера», имел титановые шар-баллоны из сплава ВТ23, изготовленные способом сверхпластической деформации. Титановый сплав ВТ23 был выбран также в качестве материала для топливных баков ракеты-носителя проекта «Вега» [10, 11].

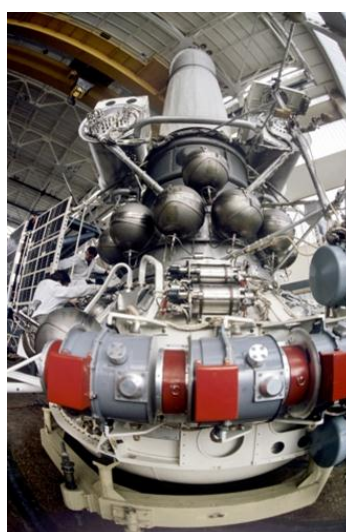


Рис. 5. Космический корабль «Астрон»

На НПО им. С.А. Лавочкина использовали сплав ВТ6С при изготовлении шаровых баллонов высокого давления.

Значение знаменитой «семерки» легендарного российского конструктора С.П. Королёва (рис. 6) – двухступенчатой межконтинентальной баллистической ракеты, на базе которой было создано семейство ракет-носителей, сложно переоценить. С помощью этого изделия в космос были выведены множество искусственных спутников Земли и все ракеты с советскими космонавтами. В конструкции ракеты Р-7 использовался магниевый сплав МА2-1. Из титанового сплава ОТ4 для двигателя ракеты РД-108 изготовлены сопловые насадки в камере сгорания, а также из него выполнена рубашка охлаждения. В рулевых двигателях использовались титановые гофрированные проставки из сплава ВТ1 [12–14].



Рис. 6. Ракета-носитель Р-7 с космическим кораблем «Восток»

Советская космическая программа «Энергия–Буран» (рис. 7) по разработке многоразовой транспортной космической системы, проводимая в качестве ответа на разработку США многоразового транспортного космического корабля Space Shuttle, заключалась в создании орбитального космического корабля и ракеты-носителя. Разработкой многоразового корабля занималось НПО «Молния» (главный конструктор Г.Е. Лозинский). В многоразовом планере были использованы следующие материалы:

- алюминиевый сплав Д16ч. – для шпангоутов и обшивки, носовой части фюзеляжа;
- титановый сплав ВТ23 – для частей крыла планера, рам остекления кабины, стыковочных узлов, шпангоутов;
- титановый сплав ОТ4 – для частей крыла планера;
- алюминий-бериллиевый сплав АБМ – для трубчатых тяг ферменных конструкций фюзеляжа, сварных раскосов, трансмиссионных валов, силового каркаса тормозных дисков.



Рис. 7. Программа «Энергия–Буран»

Государственный ракетный центр им. В.П. Макеева – один из крупнейших научно-конструкторских центров России по созданию ракетно-космической техники, в основе деятельности которого лежит разработка баллистических ракет морского базирования (рис. 8). В конструкторском бюро занимаются созданием баллистических ракет морского и подводного базирования на подводных лодках, обеспечивая сохранение стратегического ядерного паритета в противостоянии с США, а также применением алюминий-литиевого сплава 1421 в головной части ракеты для крепления боевых блоков [7]. Сплав имеет хорошую свариваемость всеми видами сварки и обладает высокой коррозионной стойкостью.



Рис. 8. Старт ракеты с подводной лодки

Преодоление космическими аппаратами земного тяготения, сопротивления плотных слоев атмосферы и достижение орбитальных скоростей – весьма энергозатратный процесс. Одной из определяющих летно-технических характеристик ракеты является тяговооруженность – отношение тяги к массе ракеты. Тяга в свою очередь зависит от конструкции ракетного двигателя и энергетических характеристик топлива. Разработка жидких ракетных топлив продолжалась в течение длительного периода, и в настоящее время известны топлива с наибольшим энергетическим потенциалом. Но энергетические показатели – не единственный критерий при выборе топлива. Важное значение (для различных задач) имеют также плотность его компонентов, возможность длительного хранения в баках ракеты, самовоспламеняемость компонентов при контакте друг с другом, устойчивость горения, стоимость, экологичность и т. д. Поэтому при решении задач проектирования ракеты часто выбирались не самые высокоэнергетические топлива, а топлива, обеспечивающие выполнение условий хранения и пр. Так было с несимметричным диметилгидразином (НДМГ) и азотным тетраоксидом (АТ) в качестве горючего и окислителя соответственно. Это ракетное топливо имеет хорошую плотность, возможность длительного хранения в заправленном виде, высокую устойчивость горения, а его компоненты самовоспламеняются при контакте. Но компоненты этого топлива чрезвычайно токсичны, а азотная кислота, помимо прочего, еще и крайне агрессивна к конструкционным материалам. Для АТ приходилось специально подбирать материалы для бака окислителя, труб пневмогидросистемы, камер жидкостных реактивных двигателей. Но даже самые стойкие сорта нержавеющей стали разрушались при длительном контакте с азотной кислотой.

Специалистами лаборатории коррозии и защиты металлических материалов ВИАМ был разработан ингибитор, вводимый в топливо, который снижал его коррозионную активность, что позволило широко применять пару НДМГ+АТ и обеспечило ресурс топливных баков не менее 25 лет [15].



Рис. 9. Памятник первому человеку в космосе – Ю.А. Гагарину (г. Москва)

В 1980 г. в Москве состоялось торжественное открытие монумента в честь первого летчика-космонавта Ю.А. Гагарина (рис. 9). В качестве материала был выбран титановый сплав ВТ5Л, изделия из которого имеют хорошую блестящую поверхность. Для листов, закрывающих постамент использовали сплав ОТ4-0, который имел схожую цветовую гамму со сплавом ВТ5Л [1].

### Результаты разработок

С конца 1950-х гг. и до настоящего времени в ВИАМ разработано и внедрено множество легких сплавов и систем антикоррозионной защиты, имеющих колоссальное значение в отечественном ракетостроении и позволивших на практике реализовать космические проекты.

Разработаны и успешно применены в конструкциях и узлах космической техники:

- магниевые сплавы – МА12, МА14, МА15, МА2-1, ВМД10 (МА22) и др.;
- титановые сплавы – ВТ14, ВТ6С, ВТ16, ВТ2св, ВТ22, ВТ23, ОТ4, ОТ4-1, ОТ4-0 и др.;
- алюминиевые сплавы – АМг2, АМг3, Д16, Д19, АК6, АК8,1201, Д16ч., В93п.ч., а также алюминий-бериллиевый сплав АБМ1;
- ингибиторы, уменьшающие коррозионную активность ракетных топлив.

### Обсуждение и заключения

Сотрудники ВИАМ, работавшие над созданием титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов, внесли огромный вклад в развитие ракетно-космической техники. Применение сплавов легких металлов позволило решить задачи повышения прочности и обеспечения наименьшей массы космических аппаратов, коррозионной стойкости и сопротивления металлов агрессивной среде ракетных топлив. Сотрудники института тесно сотрудничали с ведущими ракетно-космическими предприятиями страны: РКК «Энергия» им. С.П. Королева (ранее ОКБ-1), НПП «Звезда», ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, НПО им. С.А. Лавочкина, НПО «Молния», ГРЦ им. В.П. Макеева и др.

С самого основания института авиационных материалов и до наших дней специалисты ВИАМ решают вопросы уменьшения влияния коррозии изделий авиационно-космической техники, разрабатывают высокопрочные, жаропрочные, литейные

и конструкционные, интерметаллидные и специальные титановые сплавы, а также литейные и деформируемые магниевые, алюминиевые и бериллиевые сплавы.

Утверждение академика Евгения Николаевича Каблова о том, что ВИАМ открыл для страны космос, не является преувеличением. Колоссальный труд проектировщиков, конструкторов, исследователей, космонавтов и многих других работников ракетно-космической отрасли не имел бы практического применения без возможности осуществления своих смелых идей с помощью материалов, разработанных в институте.

### Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность за помощь в подготовке статьи и предоставление материалов сотрудникам НИО «Титановые, магниевые, бериллиевые и алюминиевые сплавы»: С.В. Путьрскому, Н.А. Ночовой, Е.Ф. Волковой, И.Ю. Мухиной, А.В. Трапезникову, В.В. Сидельникову, Н.Е. Блиновой, Н.В. Дынину.

### Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Становление отечественного космического материаловедения // Вестник РФФИ. 2017. №3. С. 97–105.
2. Каблов Е.Н. ВИАМ: продолжение пути // Наука в России. 2012. №3. С. 36–44.
3. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
4. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: юбил. науч.-техн. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
5. История авиационного материаловедения: ВИАМ – 75 лет поиска, творчества, открытий / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2007. 343 с.
6. Скляр Н.М. Путь длиной в 70 лет – от древесины до суперматериалов / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: МИСИС; ВИАМ, 2002. С. 301–307.
7. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ». 1932–2007: юбил. науч.-техн. сб. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2007. С. 254–260.
8. Фридляндер И.Н. Создание, исследование и применение алюминиевых сплавов: Избранные труды: К 100-летию со дня рождения / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2013. С. 123–237.
9. Фридляндер И.Н. Воспоминания о создании авиакосмической и атомной техники из алюминиевых сплавов. М.: Наука, 2005. С. 97–121.
10. Дуонова В.А., Волкова Е.Ф., Уридия З.П., Трапезников А.В. Динамика развития магниевых и литейных алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 225–241. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-225-241.
11. Трофимов Н.В., Леонов А.А., Дуонова В.А., Уридия З.П. Литейные магниевые сплавы (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2016. №12 (48). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.12.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-12-1-1.
12. Мухина И.Ю., Уридия З.П., Трофимов Н.В. Коррозионностойкие литейные магниевые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2017. №2 (47). С. 15–23. DOI: 10.18577/1071-9140-2017-0-2-15-23.
13. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
14. Черток Б.Е. Ракеты и люди. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1999. 416 с.
15. Афанасьев И.Б., Батурин Ю.М., Белозерский А.Г. и др. Мировая пилотируемая космонавтика. История. Техника. Люди. М.: РТСОфт, 2005. 752 с.