

Уроки истории
Lessons from History

DOI: 10.31857/S020596060008100-2

ИСТОРИЯ ПОЛУЧЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ

ВАСИНА Мария Анатольевна — Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»; Россия, 119049, Москва, Ленинский проспект, д. 4;
E-mail: mariavasina90@gmail.com

© М. А. Васина

В статье рассматривается история получения и применения алюминия и его сплавов в различных отраслях экономики начиная с момента открытия этого элемента и до сегодняшнего дня. Человек начал использовать алюминий позднее, чем многие другие металлы — он был выделен в чистом виде лишь в первой половине XIX в. Однако благодаря своим свойствам он довольно быстро нашел применение в хозяйстве. В настоящее время алюминий востребован практически во всех сферах человеческой деятельности: этот металл широко используется в транспортной, электротехнической, пищевой промышленности и других областях. Большое распространение получили алюминиевые сплавы, характеризующиеся сочетанием особых физических и механических свойств, а именно невысокой плотности с отличной теплопроводностью и высокой коррозионной стойкостью. К тому же они могут быть переработаны и повторно использованы, что, несомненно, является большим экологическим и экономическим преимуществом. Автором проведены анализ и обобщение материалов по истории алюминия и его сплавов, в том числе зарубежных, и выделены наиболее важные события в этой сфере.

Ключевые слова: алюминий, алюминиевые сплавы, история алюминия, история алюминиевой промышленности, история открытия алюминия, история техники, история материаловедения, история химии, история металлов.

Статья поступила в редакцию 2 февраля 2020 г.

THE HISTORY OF PRODUCTION AND USE OF ALUMINUM AND ITS ALLOYS

VASINA Marina Anatolievna – National University of Science and Technology “MISIS”; Leninsky prospekt, 4, Moscow, 119049, Russia; E-mail: mariavasina90@gmail.com

© М. А. Vasina

Abstract: This paper reviews the history of producing and using aluminum and its alloys in various spheres of economy from the discovery of this element to this day. Humans began to use aluminum later than many other metals: it was first obtained in pure form in the first half of the 19th century. However, its properties determined its extensive use in human life and various industries. Presently this metal is widely used in practically all spheres of human activities, in the transport, electrotechnical, food, and other industries. Aluminum alloys, characterized by the combination of particular physical and mechanical properties, i. e. low density and high thermal conductivity and resistance to corrosion, became widely used. Moreover, the fact that aluminum alloys are easily recyclable and reusable is their huge environmental and economic advantage. The author has analyzed and integrated the materials on the history of aluminum and its alloys, including the international sources, and highlighted the most important events in this field.

Keywords: aluminum, aluminum alloys, history of aluminum, history of aluminum industry, history of aluminum discovery, history of technology, history of materials science, history of chemistry, history of metals.

For citation: Vasina, M. A. (2020) Istoriiia polucheniia i primeneniia aliuminiia i ego splavov [The History of Production and Use of Aluminum and Its Alloys], *Voprosy istorii estestvoznaniia i tekhniki*, vol. 41, no. 3, pp. 560–575, DOI: 10.31857/S020596060008100-2.

История использования и изучения соединений алюминия

В отличие от других распространенных металлов, таких как золото, серебро, медь, свинец и железо, которые уже применялись в Древнем мире, алюминий был открыт только в XIX в. Тем не менее соединения этого металла начали использоваться человеком намного раньше. В частности, упоминание о них можно найти в книге греческого историка Геродота, жившего в V в. до н. э. Он пишет о минеральной породе, которую называет *στυπτηρία*. Предположительно, Геродот имеет в виду квасцы ¹. Также сведения об использовании квасцов (*alumen*) можно найти в книге «Естественная история» римского ученого Плиния Старшего ².

¹ The Egypt of Herodotus: Being the Second and Part of the Third Books of His History. With Notes and Preliminary Dissertations, by John Kenrick. London: B. Fellowes, 1841. P. 222–223.

² Плиний Старший. Естествознание. Об искусстве / Пер. Г. А. Тароняна. М.: Ладомир, 1994. С. 44–46.

Квасцы — гидратированная двойная сульфатная соль алюминия и щелочного металла — химическое соединение, встречающееся в природе ³. Уже в Античности они использовались как вяжущее и красящее средство ⁴, а в медицинской книге Древнего Египта (около 1550 г. до н. э.) описываются различные заболевания и их лечение с помощью квасцов ⁵.

Лишь в XVI в. немецкий врач и естествоиспытатель Парацельс (Филипп Ауреол Теофраст Бомбаст фон Гогенгейм), исследуя различные вещества и минералы, в том числе квасцы, установил, что они «есть соль некоторой квасцовой земли», в состав которой входит окись неизвестного металла, впоследствии названная глиноземом ⁶.

Примерно к VIII–IX вв. относятся первые упоминания об изготовлении квасцов в Древней Руси, где их также использовали для окраски тканей и приготовления сафьяновых кож. В Средние века в Европе уже действовало несколько заводов по производству квасцов ⁷.

В труде «О горном деле и металлургии в двенадцати книгах» (*De re metallica*), опубликованном в 1556 г., немецкий ученый Георгий Агрикола описывает процессы добычи квасцов из минералов ⁸. Стоит отметить, что до XVIII в. соединения алюминия (квасцы и окись) не умели отличать от других, похожих по внешнему виду соединений ⁹.

Глинозем (Al_2O_3) был получен в 1754 г. из раствора квасцов (действием щелочи) немецким химиком Сигизмундом Маргграфом и получил название «квасцовая земля» ¹⁰. Немного позднее это название трансформировалось в «алюмина» (*alumina*) ¹¹.

В 1783 г. французский химик Антуан Лоран Лавуазье предложил новую кислородную теорию горения, которая заменила господствующую тогда теорию флогистона. В рамках этой теории он выдвинул свою идею о том, что оксид алюминия является оксидом металла с сильным сродством к кислороду ¹². В 1789 г. в «Таблице простых тел» Лавуазье

³ Например, квасцы алюмокалиевые ($\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) или алюмонатриевые ($\text{NaAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$).

⁴ *Rabinovich, D.* The Allure of Aluminium // *Nature Chemistry*. 2013. Vol. 5. No. 1. P. 76.

⁵ *Osborn, E. L.* From Bauxite to Cooking Pots: Aluminum, Chemistry, and West African Artisanal Production // *History of Science*. 2016. Vol. 54. No. 4. P. 429.

⁶ *Maxwell-Stuart, P. G.* Alchemy // *Encyclopedia of Toxicology*. 3rd ed. / Ph. Wexler (ed.). Amsterdam: Elsevier, 2014. P. 118.

⁷ *Lopez, R., Raymond, I.* Medieval Trade in the Mediterranean World: Illustrative Documents Translated with Introductions and Notes. New York: Columbia University Press, 2001. P. 355.

⁸ *Агрикола Г.* О горном деле и металлургии в двенадцати книгах. 2-е изд. / Ред. С. В. Шухардин. М.: Недра, 1986. С. 252–255.

⁹ *Фигуровский Н. А.* Открытие элементов и происхождение их названий. М.: Наука, 1970. С. 51.

¹⁰ *Ashkenazi.* How Aluminum Changed the World... P. 102.

¹¹ *Фигуровский.* Открытие элементов... С. 51.

¹² *Rabinovich.* The Allure of Aluminium... P. 76.

поместил «алюмину» (*alumine*) среди «простых тел, солеобразующих, землистых». Здесь же приведены синонимы названия «алюмина»: ар-гила, квасцовая земля, основание квасцов ¹³.

Алюминиевая революция XIX в.

Хотя доля алюминия в земной коре составляет около 8 %, высокое сродство этого металла к кислороду, а также стабильность оксидов и силикатов алюминия препятствовали его выделению в течение длительного времени. По этой причине алюминий стал широко использоваться только в конце XIX в. ¹⁴

В 1800 г. итальянский физик и химик Алессандро Вольта обнаружил возникновение электрического тока между парой разнородных металлических электродов, разделенных электролитом. Наполеон был так впечатлен достижением Вольты, что приказал Политехническому институту в Париже построить большую батарею для исследовательских целей ¹⁵. Также мощная батарея была построена в Королевском институте в Лондоне. В 1807 г. английский химик Гемфри Дэви, используя эту батарею, смог выделить как калий, так и натрий, но металлический алюминий из глинозема ему получить не удалось ¹⁶. Год спустя Дэви объявил, что глинозем, вероятно, является оксидом земли необнаруженного металла, и дал ему название «алюмиум» (*alumium*) или «алюминум» (*aluminum*). С тех пор последнее название используется в США, а в Англии и других странах принято использовать предложенное им же позднее название «алюминий» (*aluminium*) ¹⁷. Впоследствии многие исследователи приложили большие усилия для получения металлического алюминия.

В 1825 г. датским химиком Хансом Кристианом Эрстедом в процессе восстановления хлорида алюминия амальгамой калия было впервые получено небольшое количество чистого алюминия. Эрстед производил хлорид алюминия несколькими годами ранее, нагревая вместе глинозем и древесный уголь в потоке хлора ¹⁸.

В 1827 г. немецкий химик Фридрих Велер повторил эксперименты Эрстеда и успешно изготовил алюминиевый порошок. И Эрстед, и Велер отделили металлический алюминий от его хлорида, однако использование дорогостоящего калия в этом процессе не позволяло

¹³ *Фигуровский*. Открытие элементов... С. 51.

¹⁴ *Ashkenazi*. How Aluminum Changed the World... P. 102.

¹⁵ *Habashi, F.* The Beginnings of the Aluminum Industry // *Nano Studies*. 2013. Vol. 8. P. 333.

¹⁶ *Ibid.*

¹⁷ *Фигуровский*. Открытие элементов... С. 52.

¹⁸ *Habashi*. The Beginnings of the Aluminum Industry... P. 333.

развернуть промышленное производство алюминия, поэтому цены на него превышали цены на золото ¹⁹.

В 1854 г. французский химик Анри Сент-Клер Девиля сообщил о начале промышленного производства алюминия с использованием натрия в качестве восстановителя. Ученый получил глинозем из бокситовой руды (глинистый минерал, богатый оксидом алюминия) и использовал натрий вместо калия в качестве восстановителя для производства металлического алюминия. Полученный металл имел чистоту менее 95 %. Хотя процесс Девиля значительно снизил стоимость производства алюминия (с 500 до 40 долларов за килограмм), все же этот металл оставался очень дорогим ²⁰.

Благодаря открытию Девиля алюминий был впервые представлен широкой публике на Всемирной выставке в Париже в 1855 г. и вызвал большой интерес: алюминиевый слиток с названием «серебро из глины» был показан в стеклянном футляре, лежащем поверх темной бархатной ткани. В том же году Наполеон III, чтобы произвести впечатление на своих самых выдающихся гостей, на государственных обедах использовал алюминиевую посуду. Уже к парижской Всемирной выставке 1867 г. французские ученые смогли изготовить из алюминия листы, фольгу и проволоку, а также полноценные товары — шлемы и телескопы ²¹. К этому времени для многих ученых стало ясно, что метод Девиля не имеет перспектив, и основной задачей была разработка экономически выгодного метода получения алюминия.

В 1865 г. известный русский ученый Николай Николаевич Бекетов предложил интересный способ, который быстро нашел применение на алюминиевых заводах Франции и Германии. Он проводил реакцию взаимодействия между криолитом (Na_3AlF_6) и магнием. Способ Бекетова не сильно отличался от метода Девиля, но был проще. В немецком городе Гемелингене в 1885 г. был построен завод, использующий способ Бекетова, и за пять лет здесь было получено 58 т алюминия ²².

Наконец, в 1886 г. американским инженером Чарльзом Мартинном Холлом и французским инженером Полем Эру независимо друг от друга был разработан современный способ производства чистого алюминия, известный как процесс Холла — Эру ²³. Он был основан на электролизе глинозема, растворенного в криолите (Na_3AlF_6), и полностью заменил метод Девиля. Открытие этого процесса можно по праву считать одним из ключевых событий, сделавших алюминий доступнее.

¹⁹ Eskin, D. G. Physical Metallurgy of Direct Chill Casting of Aluminum Alloys. New York: CRC Press, P. 1–2.

²⁰ Ibid.

²¹ Ashkenazi. How Aluminum Changed the World... P. 102.

²² Беляев А. И. Николай Николаевич Бекетов — выдающийся русский физико-химик и металлург. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1953. С. 101–103.

²³ Ashkenazi. How Aluminum Changed the World... P. 105.

В 1888 г. Холл основал завод по производству алюминия в Кенсингтоне (США). В том же году американский химик Гамильтон Янг Кастнер разработал процесс производства металлического натрия, который снизил цену на него и, соответственно, стоимость производства алюминия с помощью натрия, но этот метод все равно уже не мог конкурировать с методом Холла — Эру²⁴.

В 1887–1892 гг. работавший в России австрийский химик Карл Йозеф Байер нашел способ получения металлического алюминия путем очистки боксита — наиболее распространенной алюминиевой руды, состоящей в основном из $\text{AlO}(\text{OH})$ или $\text{Al}(\text{OH})_3$. Суть процесса Байера состоит в выщелачивании предварительно измельченного боксита щелочно-алюминатным раствором и дальнейшем выделении из раствора гидроксида алюминия. Данный способ был открыт Байером в 1887 г., когда химик работал на Тентелевском химическом заводе в Санкт-Петербурге. Дальнейшие исследования, проведенные им в 1892 г. на Бондюжском химическом заводе недалеко от Елабуги, помогли усовершенствовать метод путем создания циклического процесса и использования автоклава. Метод Байера быстро получил признание во всем мире и наравне с процессом Холла — Эру до сих пор используется для производства алюминия²⁵.

В 1895 г. Дмитрий Александрович Пеняков разработал способ производства глинозема из бокситов путем их спекания с сульфатом натрия в присутствии угля. В отличие от процесса Байера, в котором использовалась щелочь, Пеняков предложил более дешевое сырье — сульфат натрия. Этот сульфатный метод успешно конкурировал с методом Байера: во Франции и в Бельгии работали два глиноземных завода²⁶.

Хотелось бы отметить, что искусство всегда было неразрывно связано с наукой. Бурное развитие алюминиевой промышленности вдохновило многих творческих людей: так, например, в 1893 г. сэр Альфред Гилберт создал алюминиевую скульптуру Антероса, древнегреческого бога бескорыстной любви²⁷.

Открытия XIX в. стали отправной точкой для дальнейшего развития алюминиевых сплавов: с каждым годом производство алюминия росло, а его стоимость падала. Например, в 1860 г. стоимость 1 кг

²⁴ *Habashi*. The Beginnings of the Aluminum Industry... P. 334.

²⁵ *Ruys, A.* Alumina Ceramics: Biomedical and Clinical Applications. Duxford: Woodhead Publishing, 2019. P. 19–20.

²⁶ *Соколов Р. С.* Химическая технология: учебное пособие для студентов высших учебных заведений: в 2 т. М.: Гуманитарный издательский центр ВЛАДОС, 2000. Т. 2: Металлургические процессы. Переработка химического топлива. Производство органических веществ и полимерных материалов. С. 17.

²⁷ *Martini, C., Ballarin, B., Chiavari, C., Roversi, A.* The Aluminum-Cast Madonna Statue of “Tempio Votivo”, Lido di Venezia (Italy): Identification of Degradation Factors and Assessment of a Cleaning Procedure // *Materials Chemistry and Physics*. 2012. Vol. 137. No. 1. P. 405.

этого металла составляла 40 долларов, а в 1914 г. цена на него упала до 40 центов и он перестал считаться драгоценным металлом ²⁸.

Алюминий и его сплавы в XX в.

В 1903 г. американские инженеры и авиаторы Уилбур и Орвилл Райт построили самолет «Флайер-1» и совершили на нем полет. Особенностью этого летательного аппарата был новый двигатель, который включал в себя компоненты из алюминия. Это событие стало первой попыткой использования данного металла в авиации (до этого самолеты строили из легкого дерева, шелка и стальной проволоки) ²⁹.

В 1915 г. в Российской империи профессор Александр Назарович Кузнецов и инженер Евгений Иванович Жуковский разработали способ получения глинозема из низкокачественных бокситов посредством их электротермической плавки с баритом и углем. Позднее этот способ был положен в основу технологии довоенного производства глинозема в СССР на Днепровском алюминиевом заводе ³⁰.

В 1918 г. норвежский химик Карл Вильгельм Седерберг усовершенствовал процесс Холла – Эрру, что значительно увеличило производство алюминия в мире. Суть его изобретения состояла в следующем: в электролизере Холла – Эрру угольные аноды расходовались со скоростью 2,5 см в сутки, и для их замены на новые часто требовалось вмешательство человека в процесс. Седерберг разработал способ, который использует возобновляемый электрод, непрерывно образующийся и спекающийся в восстановительной камере из пасты – смеси 70 % молотого кокса и 30 % смоляной связки. Эта смесь закладывается в прямоугольную стальную оболочку, расположенную вертикально над ванной с расплавом внутри печи и открытую сверху и снизу. По мере того как анод расходуется, в верхнее отверстие оболочки добавляется коксосоляная смесь. Когда паста опускается вниз и нагревается, она спекается в твердый углеродистый брусок прежде, чем достигает рабочей зоны ³¹.

Новые способы получения алюминия, его дешевизна и особые свойства подтолкнули изобретателей всего мира к его активному использованию. Но свойства чистого металла уже не в полной мере удовлетворяли растущие потребности человечества. Исследователям было известно, что прочность многих сплавов зачастую гораздо выше, чем чистых металлов, входящих в их состав. И к началу XX в. перед учеными-металлургами встала важная задача поиска тех элементов, которые, вступив в соединение с алюминием, придали бы ему прочность.

²⁸ Eskin. Physical Metallurgy of Direct Chill Casting... P. 2.

²⁹ Ashkenazi. How Aluminum Changed the World... P. 107.

³⁰ Николаев И. В., Москвитин В. И., Фомин Б. А. Металлургия легких металлов. М.: Металлургия, 1997. С. 16.

³¹ Сандлер Р. А., Ратнер А. Х. Электрометаллургия алюминия и магния. Л.: ЛГИ, 1983. С. 34.

В 1903 г. немецкий химик Альфред Вильм изготовил алюминиевый сплав, содержащий добавки меди, магния и марганца. Его прочность была выше, чем у чистого алюминия, но ученый предполагал упрочнить его еще больше с помощью закалки. Вильм нагрел несколько образцов сплава примерно до 600 °С, а затем опустил их в воду. Такая термообработка заметно повысила прочность сплава, но, поскольку результаты испытаний различных образцов оказались неоднородными, химик усомнился в точности измерений и несколько дней выверял прибор, а образцы лежали на столе. Когда Вильм продолжил испытания, то результаты его удивили: прочность образцов возросла практически в два раза. После многократного повторения опытов ученый убедился, что его сплав после закалки продолжает в течение 5–7 дней становиться прочнее, а пластичность не изменяется. Так было открыто явление естественного старения алюминиевых сплавов после закалки ³².

На тот момент Вильм до конца не знал, что происходит с металлом в процессе старения, но, опытным путем подобрав оптимальный состав сплава и режим термической обработки, получил патент и продал его немецкой фирме, которая в 1911 г. выпустила первую партию нового алюминиевого сплава, названного дюралюминием (дюралем) ³³.

В 1917 г. немецкий авиаконструктор Гуго Юнкерс разработал первый цельнометаллический самолет, в конструкции которого использовался дюраль. С тех пор алюминий стал прочно связан с авиацией. Но в те годы все равно существовал дефицит этого металла, и многие самолеты, главным образом легких типов, продолжали изготавливать из дерева ³⁴.

В 1920 г. в России был принят план электрификации ГОЭЛРО, что в конечном итоге позволило нашей стране стать ведущим игроком на мировом рынке алюминия. В это время в России производством алюминиевых сплавов занимался только Кольчугинский завод по обработке цветных металлов, который выпускал в небольших количествах кольчугалюминий — сплав, по составу и свойствам сходный с дюралюминием. Но для успешного развития отрасли одного завода было мало. Поэтому в начале 1929 г. в Ленинграде на заводе «Красный выборжец» под руководством Павла Павловича Федотьева были проведены опыты по получению алюминия из отечественного сырья. Их успех позволил приступить к сооружению Волховского и Днепровского алюминиевых заводов. В эти же годы на Урале были обнаружены значительные природные запасы алюминиевых руд. В 1932 г. был создан Всесоюзный научно-исследовательский институт авиационных

³² *Wilm, A.* Physikalisch-metallurgische Untersuchungen über magnesiumhaltige Aluminiumlegierungen // *Metallurgie. Zeitschrift für die gesamte Hüttenkunde.* 1911. Bd. 8. Nr. 8. S. 225–227.

³³ *Physical Metallurgy.* 5th ed. / D. Laughlin, K. Hono (eds.). Amsterdam: Elsevier, 2014. Vol. 1. P. 971.

³⁴ *Ashkenazi.* How Aluminum Changed the World... P. 107.

материалов (ВИАМ), который существует и по сей день. Здесь был организован отдел цветных металлов, включающий в себя группу алюминиевых сплавов. Все вышеописанные события по праву можно считать ключевыми для дальнейшего развития материаловедения алюминиевых сплавов в России ³⁵.

Еще до 30-х гг. XX в. к исследователям постепенно приходило понимание, какие дополнительные легирующие элементы стоит добавлять в алюминий, чтобы придать ему требуемые свойства, например коррозионную стойкость и прочность. Первый промышленный алюминиевый сплав 51S с магнием и кремнием был разработан американской компанией «Алькоа» (*Alcoa*) в 1921 г., а уже к 1935 г. был представлен улучшенный алюминиевый сплав 61S (6061), способный к термообработке, со средней прочностью и хорошей коррозионной стойкостью. В то время он часто применялся в железнодорожной и морской промышленности, так как обладал коррозионной стойкостью даже после сварки. На сегодняшний день этот сплав все еще широко используется в различных областях, например в автомобилестроении (для колес и приводных валов) ³⁶.

К 1936 г. исследователями были выделены основные системы термообработываемых алюминиевых сплавов: алюминий — магний — кремний, алюминий — магний — медь и алюминий — магний — цинк ³⁷.

Алюминиевые сплавы (в основном, 2xxx, 7xxx и 6xxx серий) используются в авиационной промышленности с 1930-х гг. Самолет «Дуглас DC3» (*Douglas DC3*), который впервые совершил полет в декабре 1935 г., является примером перехода от деревянных и тканевых самолетов к самолетам металлическим. В те же годы в СССР ВИАМ создал первые алюминиевые сплавы типа дюралюминий и магнилий (алюминий — магний) для планера металлических самолетов. С тех пор алюминиевые сплавы оставались ведущим конструкционным материалом для гражданской авиации до конца XX в., пока их постепенно не стали вытеснять композитные материалы ³⁸.

В начале XX в. алюминий начал использоваться в строительстве, транспортной и пищевой промышленности. Например, в 1911 г. швейцарская компания «Тоблер» (*Tobler*) первой использовала алюминиевую фольгу для упаковки шоколада, включая шоколад «Тоблероне» (*Toblerone*). Построенный в 1931 г. Эмпайр-стейт-билдинг в Нью-Йорке — самый высокий небоскреб в мире в период с 1931 по 1971 г. — был первым зданием, в конструкции которого широко

³⁵ Волков Э. П., Костюк В. В. Новые технологии в электроэнергетике России // Вестник Российской академии наук. 2009. Т. 79. № 8. С. 675–686.

³⁶ Sanders, R. E. Technology Innovation in Aluminum Products // JOM. 2001. Vol. 53. No. 2. P. 22.

³⁷ Ibid.

³⁸ Santos, M. C., Machado, A. R., Sales, W. F., Barrozo, M. A., Ezugwu, E. O. Machining of Aluminum Alloys: A Review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2016. Vol. 86. No. 9–12. P. 3068.

использовались алюминиевые сплавы. А в 1934 г. американская железнодорожная компания «Юнион пасифик» (*Union Pacific*) выпустила первый алюминиевый поезд, названный М-10000 ³⁹.

В 1933 г. на Смитфилд-стрит в Питсбурге с целью увеличения грузоподъемности была построена первая алюминиевая мостовая палуба вместо используемой ранее стальной и деревянной. Компоненты палубы были изготовлены из катаного сплава Al-2014-T6 (алюминий — медь — кремний — марганец), который в то время был самым распространенным высокопрочным конструкционным алюминиевым сплавом. С того времени алюминиевые сплавы стали использовать в мостостроении для замены деревянных и стальных платформ для повышения несущей способности ⁴⁰.

Первый полностью алюминиевый железнодорожный мост был построен в 1946 г. через реку Грасс в США. Балки этого моста были сделаны из пластин сплава 2014-T6 с системой легирования алюминий — медь — кремний — марганец, заклепанной алюминиевыми заклепками из сплава 2117-T4 с той же системой легирования. В конце 1940-х и начале 1950-х гг. было построено несколько алюминиевых мостов в США, Великобритании, Канаде и Германии ⁴¹.

Уже с 1930-х гг. алюминий стал частью повседневной жизни, с 1940-х гг. его стоимость упала ниже стоимости меди, а в начале 1960-х гг. алюминий стал самым широко используемым цветным металлом в мире ⁴². Это произошло благодаря тому, что в середине прошлого века ученые стали уделять внимание не только изобретению новых сплавов, но и способам очищения алюминия от примесей и совершенствованию методов его получения и обработки.

Данная стратегия уже через несколько лет дала свои первые плоды. В 1957 г. в СССР из сплава алюминия с магнием АМг-6 была изготовлена оболочка первого искусственного спутника Земли ПС-1. В 50-х гг. прошлого века ученым удалось разработать из чистейшего алюминия очень тонкую фольгу, которая служила флуоресцирующим экраном, установленным на одном из спутников для исследования испускаемых Солнцем заряженных частиц. В 1960 г. в США запустили спутник «Эхо-1», предназначенный для отражения радиосигналов. Он представлял собой тридцатиметровый шар из пластичной пленки, покрытый тончайшим слоем алюминия. Оболочка корпусов американских ракет «Авангард» и «Титан», применявшихся для запуска на орбиту первых американских спутников, а позднее и космических кораблей, также была выполнена из сплавов алюминия. Эти удачные запуски открыли перед алюминиевыми сплавами дорогу в космос.

³⁹ Monetta, T., Acquesta, A., Bellucci, F. A Multifactor Approach to Evaluate the Sealing of “Smooth-Wall” Containers for Food Packaging // *Surface and Coatings Technology*. 2017. Vol. 310. P. 33.

⁴⁰ Rabinovich. The Allure of Aluminium... P. 76.

⁴¹ Ibid.

⁴² Ibid.

С тех пор из них делают различные детали для аэрокосмической промышленности — кронштейны, крепления, шасси, футляры и корпуса для многих инструментов и приборов ⁴³.

Область применения алюминиевых сплавов постоянно расширялась. В послевоенные годы в США был составлен список изготавливаемых из них изделий, и в нем оказалось примерно две тысячи наименований ⁴⁴.

В 1952 г. алюминиевые сплавы стали использовать при строительстве застекленных помещений для выращивания растений — в Королевском ботаническом саду в Лондоне была сооружена первая полностью алюминиевая теплица ⁴⁵. В 1959 г. в Ботаническом саду Миссури в США возвели первую климатическую оранжерею, покрытую геодезическим куполом из алюминиевого сплава.

В СССР также активно использовали алюминиевые сплавы во всех сферах, и чтобы это продемонстрировать остальным государствам, в 1958 г. на Всемирной выставке в Брюсселе из стекла и алюминия был построен павильон СССР, который бельгийские газеты называли «Дворцом социализма» ⁴⁶.

В это время огромный вклад в разработку новых алюминиевых сплавов внес академик Иосиф Наумович Фридляндер, трудившийся в ВИАМе. Он работал над созданием высокопрочных сплавов, в частности системы алюминий — цинк — магний — медь (В93, В95, В96ЦЗ), которые с 1940-х гг. становятся одними из основных материалов в силовых элементах самолетов, производимых в СССР. Из новых сплавов совместно с Всесоюзным институтом легких сплавов (ВИЛС) и металлургическими заводами были освоены все виды полуфабрикатов. Эти сплавы в дальнейшем явились основой конструкции истребителей конструкторских бюро (КБ) Микояна, Яковлева, Сухого, а также пассажирских и транспортных самолетов КБ Туполева, Ильюшина и Антонова. В 1964 г. Фридляндером был разработан самый легкий сплав 1420 из алюминия с литием, который также применялся в авиации ⁴⁷.

В 1957 г. под его руководством был создан самый прочный в мире алюминиевый сплав В96Ц для использования в газовых центрифугах для получения обогащенного урана-235. Использование данного сплава в атомной промышленности позволило в несколько десятков раз

⁴³ *Ashkenazi*. How Aluminum Changed the World... P. 108–110.

⁴⁴ *Byko, M.* Aluminum Exhibits Its Versatility in Art, Life // JOM. 2000. Vol. 52. No. 11. P. 11.

⁴⁵ *Habashi, F.* The Story of Aluminum // Metall. 2016. N. 9. S. 349.

⁴⁶ *Шеина Т. В., Иванов А. В.* Конструкции и строительные материалы в архитектуре отечественных выставочных павильонов всемирных универсальных выставок ЭКСПО // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2011. № 4. С. 38.

⁴⁷ *Фридляндер И. Н.* Создание, исследование и применение алюминиевых сплавов. Избранные труды. К 100-летию со дня рождения. М.: Наука, 2013. С. 10–12.

сократить расход электроэнергии, тем самым удешевив производство урана-235⁴⁸.

В 1959 г. произошло одно из самых значительных событий в сфере упаковки — Билл Курс изобрел бесшовную алюминиевую банку, которая используется и по сей день. Она не только способна сохранить качество и вкус напитка, но и позволяет решить проблему загрязнения окружающей среды: алюминиевые сплавы легко перерабатываются и могут быть повторно использованы⁴⁹.

В 1960-х гг. при использовании алюминия основной упор делался на получение все более прочных и легких сплавов и дальнейшее расширение области их применения. Так, в 1962 г. в гонке «Индианаполис-500» в США Марион Ли «Микки» Томпсон управлял первым гоночным автомобилем с алюминиевым двигателем. Первая экспериментальная алюминиевая подводная лодка «Алюминаут» была построена компанией «Рейнолдс металс компани» (*Reynolds Metals Company, RMC*) в 1964 г. для океанографических исследований. Основной задачей, которая стояла перед учеными, была возможность обеспечить работу подлодки на больших глубинах (до 4572 м) в течение длительного времени. Для этой цели они создали алюминиевый сплав 7079-T6 системы алюминий — магний — цинк с высоким отношением прочности к весу⁵⁰.

К 1970-м гг. алюминиевые сплавы заняли лидирующие позиции в авиастроении. В 1969 г. компания «Эрбас» (*Airbus*) использовала их в качестве основных конструкционных материалов. Первый коммерческий рейс пассажирского широкофюзеляжного самолета «Боинг-747», включавшего в себя детали из алюминиевых сплавов серий 2xxx и 7xxx, состоялся уже в январе 1970 г.⁵¹

В последние десятилетия XX в. основное внимание ученых было направлено на замещение традиционных стальных и медных сплавов алюминиевыми для облегчения конструкций машин и механизмов. Первый алюминиевый скоростной электропоезд *TGV* был запущен в 1981 г. во Франции⁵². Уже с 1970-х гг. в конструкции американских ракет «Сатурн» использовался алюминиевый сплав 2219, легированный медью. В 1998 г. была выведена на орбиту Международная космическая станция. Большая ее часть была выполнена из алюминиевых сплавов, в том числе из сплава 2219-T6 и его российского аналога 1201⁵³.

Изобретение более совершенного исследовательского оборудования для изучения микроструктуры сплавов позволило в 1982 г.

⁴⁸ Там же.

⁴⁹ *Ashkenazi*. How Aluminum Changed the World... P. 108.

⁵⁰ *Ibid*.

⁵¹ *Starke, E. A., Staley, J. T.* Application of Modern Aluminum Alloys to Aircraft // *Progress in Aerospace Sciences*. 1996. Vol. 32. No. 2–3. P. 137–138.

⁵² *Skillingberg, M., Green, J.* Aluminum Applications in the Rail Industry // *Light Metal Age*. 2007. No. 5. P. 9.

⁵³ *Сетюков О. А.* Алюминиевый сплав 1201 в конструкции космического корабля «Буран» // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № S1. С. 15–18.

Дану Шехтману открыть первый икосаэдрический квазикристалл в быстроохлажденном двойном сплаве системы алюминий — марганец. Это сенсационное открытие противоречило тому, что было известно ранее о кристаллах. Работу Шехтмана не хотели публиковать. И только после привлечения им сторонних специалистов удалось выпустить короткую заметку об этом событии. За открытие квазикристаллов Дан Шехтман был удостоен Нобелевской премии по химии 2011 г. Первый стабильный тройной квазикристалл был обнаружен Ань Пан Цаем и его коллегами в системе алюминий — медь — железо. Тем не менее пока что объемные квазикристаллы на основе алюминия редко используются из-за своей хрупкости, однако они имеют низкую смачиваемость водой и могут применяться в качестве тонких пленок и покрытий ⁵⁴.

Современные тенденции применения алюминиевых сплавов

На сегодняшний день основными областями применения алюминиевых сплавов являются:

- автомобилестроение (конструктивные элементы, панели и колеса из сплава 6061);
- авиастроение (конструкционные элементы самолетов из сплава 7050-T7451, обшивка из сплава 2024-T3, отсеки для ракет из сплава 2014);
- аэрокосмическая промышленность (сплав 2024-T3);
- электротехника (сплав с редкоземельными металлами 01417);
- упаковочная промышленность (сплавы 8006, 8011, 1145);
- строительство (сплав 5086).

В последние годы наметилась тенденция к росту применения алюминиевых сплавов для морских перевозок и судостроения. Например, в 2007 г. «Остел компани» (*Austal Company*) построила в Австралии крупнейший в мире алюминиевый корабль. Наиболее часто используемые в агрессивных морских средах алюминиевые сплавы — это сплавы групп 5xxx и 6xxx, обеспечивающие удовлетворительную прочность в сочетании с отличной коррозионной стойкостью ⁵⁵.

Благодаря легкому весу, хорошей коррозионной стойкости и механическим свойствам алюминиевые сплавы 2139-T8, 5083-H131, 6061-T651 и 7075-T651 широко используются в военных целях, в том числе в броневых пластинах ⁵⁶.

На данный момент одной из основных проблем для ученых в области материаловедения является достижение алюминиевыми сплавами предела прочности около 600 МПа, который необходим для дальнейшего снижения веса конструкций. Одним из возможных вариантов ее решения

⁵⁴ *Ashkenazi*. How Aluminum Changed the World... P. 109.

⁵⁵ *Ibid*. P. 111.

⁵⁶ *Scott, G.* Value Chain Voice: The Aluminum Association Today // *Aluminum International Today*. 2017. Vol. 30. No. 2. P. 17.

может стать разработка новых высокопрочных сплавов системы 7xxx⁵⁷. Также многие ученые рассматривают новые системы легирования алюминиевых сплавов, в том числе и редкоземельными металлами⁵⁸.

В последующие годы также становится актуальной задача минимизировать негативные побочные эффекты для окружающей среды, но в то же время и далее создавать технологические инновации.

Стоит отметить существенный рост научных исследований в области композитных материалов с металлической матрицей, упрочненной армированными волокнами, а также изобретение пористых алюминиевых композитов. Гибридные композиты с алюминиевой матрицей — это новое поколение материалов для использования в авиа- и автомобилестроении, космической отрасли, морских сооружениях и оборонной промышленности⁵⁹.

За последние несколько лет в энергетической отрасли были проведены исследования по поиску альтернативных источников питания взамен литий-ионных батарей. Было разработано лишь ограниченное число потенциальных электродных материалов, и исследования еще находятся на ранних стадиях, но уже сейчас можно говорить о том, что аккумуляторы на основе алюминия считаются наиболее перспективными из-за их высокой объемной емкости⁶⁰.

Также быстрыми темпами развиваются технологии 3D-печати. Современные ученые пришли к выводу, что алюминиевые сплавы являются наиболее подходящим материалом для применения в этой области благодаря своим превосходным свойствам: высокому соотношению прочности и веса, высокой усталостной прочностью, хорошей коррозионной стойкости и пригодности для переработки. В то же время в таком применении алюминиевых сплавов есть свои сложности, такие как проблемы окисления и огромные затраты энергии, необходимой для плавления алюминия. Сегодня хорошие результаты достигаются только на силуминах — сплавах системы алюминий — кремний, а деформируемые алюминиевые сплавы серий 6xxx и 7xxx для 3D-печати не годятся, поскольку при их использовании в изделиях образуются трещины. Однако недавно, в 2017–2018 гг., с помощью аддитивных технологий исследователям удалось изготовить образцы алюминиевых сплавов 6061 и 7075 со свойствами, аналогичными свойствам алюминиевых деформируемых сплавов, приготовленных традиционным способом. В долгосрочной перспективе ожидается, что

⁵⁷ Long, R. S., Boettcher, E., Crawford, D. Current and Future Uses of Aluminum in the Automotive Industry // JOM. 2017. Vol. 69. No. 12. P. 2635–2636.

⁵⁸ Белов Н. А., Наумова Е. А., Аюбян Т. К. Эвтектические сплавы на основе алюминия: новые системы легирования. М.: Руда и металлы, 2016. С. 94.

⁵⁹ Attar, S., Nagaral, M., Reddappa, H. N., Auradi, V. A Review on Particulate Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites // Journal of Emerging Technologies and Innovative Research. 2015. Vol. 2. No. 2. P. 225.

⁶⁰ Elia, G. A., Marquardt, K., Hoepfner, K., Fantini, S., Lin, R., Knipping, E., Peters, W., Drillet, J. F., Passerini, S., Hahn, R. An Overview and Future Perspectives of Aluminum Batteries. Advanced Materials. 2016. Vol. 28. No. 35. P. 7576.

с развитием новых 3D-принтеров, способных производить более крупные детали с более высоким уровнем точности, объем промышленного применения 3D-печати будет стремительно расти и данные сплавы смогут быть использованы во многих отраслях, включая аэрокосмическую, автомобильную и биомедицинскую⁶¹.

Что станет следующим значительным открытием в области исследования и применения алюминиевых сплавов, покажет время. Но на сегодняшний день эти сплавы остаются лидерами по потреблению среди цветных металлов и вторыми (после стали) наиболее используемыми техническими сплавами.

References

- Agricola, G. (1986) *O gornom dele i metallurgii v dvenadtsati knigakh. 2-e izd. [On Mining and Metallurgy in Twelve Books. 2nd ed.]*. Moskva: Nedra.
- Ashkenazi, D. (2019) How Aluminum Changed the World: A Metallurgical Revolution through Technological and Cultural Perspectives, *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 143, pp. 101–113.
- Attar, S., Nagaral, M., Reddappa, H. N., and Auradi, V. (2015) Review on Particulate Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites, *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, vol. 2, no. 2, pp. 225–229.
- Beliaev, A. I. (1953) *Nikolai Nikolaevich Beketov — vydaiuschiisia russkii fiziko-khimik i metallurg [Nikolai Nikolaevich Beketov, an Outstanding Russian Physial Chemist and Metallurgist]*. Moskva: Gosudarstvennoe nauchno-tekhicheskoe izdatel'stvo literatury po cherno i tsvetnoi metallurgii.
- Belov, N. A., Naumova, E. A., and Akopian, T. K. (2016) *Evtecticheskie splavy na osnove aliuminiia: novye sistemy legirovaniia [Eutectic Aluminium Alloys: New Alloying Systems]*. Moskva: Ruda i metally.
- Byko, M. (2000). Aluminum Exhibits Its Versatility in Art, Life, *JOM*, vol. 52, no. 11, pp. 9–12.
- Elia, G. A., Marquardt, K., Hoepfner, K., Fantini, S., Lin, R., Knipping, E., Peters, W., Drillet, J. F., Passerini, S., and Hahn, R. (2016) An Overview and Future Perspectives of Aluminum Batteries, *Advanced Materials*, vol. 28, no. 35, pp. 7564–7579.
- Eskin, D. G. (2008) *Physical Metallurgy of Direct Chill Casting of Aluminum Alloys*. New York: CRC Press.
- Figurovskii, N. A. (1970) *Otkrytie elementov i proiskhozhdenie ikh nazvanii [The Discovery of Elements and the Origin of Their Names]*. Moskva: Nauka.
- Fridliander, I. N. (2013) *Sozдание, issledovanie i primenenie aliuminievykh splavov. Izbrannye trudy. K 100-letiiu so dnia rozhdeniia [Creation, Studies, and Use of Aluminum Alloys. Selected Works. In Commemoration of the Centenary of His Birth]*. Moskva: Nauka.
- Habashi, F. (2013) The Beginnings of the Aluminum Industry, *Nano Studies*, vol. 8, pp. 333–344.
- Habashi, F. (2016) The Story of Aluminum, *Metal*, no. 9, pp. 343–350.
- Laughlin, D., and Hono, K. (eds.) (2014) *Physical Metallurgy. 5th ed.* Amsterdam: Elsevier.
- Long, R. S., Boettcher, E., and Crawford, D. (2017) Current and Future Uses of Aluminum in the Automotive Industry, *JOM*, vol. 69, no. 12, pp. 2635–2639.
- Lopez, R., and Raymond, I. (2001) *Medieval Trade in the Mediterranean World: Illustrative Documents Translated with Introductions and Notes*. New York: Columbia University Press.

⁶¹ Murr, L. E. A Metallographic Review of 3D Printing / Additive Manufacturing of Metal and Alloy Products and Components // *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 2018. Vol. 7. No. 2. P. 119.

- Martini, C., Ballarin, B., Chiavari, C., and Roversi, A. (2012) The Aluminum-Cast Madonna Statue of “Tempio Votivo”, Lido di Venezia (Italy): Identification of Degradation Factors and Assessment of a Cleaning Procedure, *Materials Chemistry and Physics*, vol. 137, no. 1, pp. 404–413.
- Maxwell-Stuart, P. G. (2014) Alchemy, in: Wexler, Ph. (ed.) *Encyclopedia of Toxicology*. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, pp. 116–119.
- Monetta, T., Acquesta, A., and Bellucci, F. (2017) Multifactor Approach to Evaluate the Sealing of “Smooth-Wall” Containers for Food Packaging, *Surface and Coatings Technology*, vol. 310, pp. 33–37.
- Murr, L. E. (2018) Metallographic Review of 3D Printing / Additive Manufacturing of Metal and Alloy Products and Components, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, vol. 7, no. 2, pp. 103–132.
- Nikolaev, I. V., Moskvitin, V. I., and Fomin, B. A. (1997) *Metallurgiiia legkikh metallov [Metallurgy of Light Metals]*. Moskva: Metallurgiiia.
- Osborn, E. L. (2016) From Bauxite to Cooking Pots: Aluminum, Chemistry, and West African Artisanal Production, *History of Science*, vol. 54, no. 4, pp. 425–442.
- Plinii Starshii (1994) *Estestvoznanie. Ob iskusstve [The Natural History. On Art]*. Moskva: Ladomir.
- Rabinovich, D. (2013) The Allure of Aluminium, *Nature Chemistry*, vol. 5, no. 1, p. 76.
- Ruys, A. (2019) *Alumina Ceramics: Biomedical and Clinical Applications*. Duxford: Woodhead Publishing.
- Sanders, R. E. (2001) Technology Innovation in Aluminum Products, *JOM*, vol. 53, no. 2, pp. 21–25.
- Sandler, R. A., and Ratner, A. Kh. (1983) *Elektrometallurgiiia aliuminiia i magniia [Electrometallurgy of Aluminum and Magnesium]*. Leningrad: LGI.
- Santos, M. C., Machado, A. R., Sales, W. F., Barrozo, M. A., and Ezugwu, E. O. (2016) Machining of Aluminum Alloys: A Review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 86, no. 9–12, pp. 3067–3080.
- Scott, G. (2017) Value Chain Voice: The Aluminum Association Today, *Aluminum International Today*, vol. 30, no. 2, pp. 17–18.
- Setiukov, O. A. (2013) Aluminievyi splav 1201 v konstruksii kosmicheskogo korablia “Buran” [Aluminum Alloy 1201 in the Design of the “Buran” Spacecraft], *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, no. S1, pp. 15–18.
- Sheina, T. V., and Ivanov, A. V. (2011) Konstruktsii i stroitel’nye materialy v arkhitekture otechestvennykh vystavochnykh pavil’onov vseмирnykh universalnykh vystavok EKSP0 [Designs and Building Materials in the Architecture of National Exhibition Pavilions at the World Universal Expositions, EXPO], *Vestnik SGASU, Gradostroitelstvo i arkhitektura*, no. 4, pp. 38–44.
- Skillingberg, M., and Green, J. (2007) Aluminum Applications in the Rail Industry, *Light Metal Age*, no. 5, pp. 8–13.
- Sokolov, R. S. (2000) *Khimicheskaiia tekhnologiiia: uchebnoe posobie dlia studentov vysshikh uchebnykh zavedenii: v 2 t. [Chemical Technology: Textbook for Students of Higher Education Institutions. In 2 vols.]*. Moskva: Gumanitarnyi izdatel’skii tsentr VLADOS, vol. 2: Metallurgicheskie protsessy. Pererabotka khimicheskogo topliva. Proizvodstvo organicheskikh veshchestv i polimernykh materialov [Metallurgical Processes. Chemical Fuel Recycling. Production of Organic Substances and Polymeric Materials].
- Starke, E. A., and Staley, J. T. (1996). Application of Modern Aluminum Alloys to Aircraft, *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 32, no. 2–3, pp. 131–172.
- The Egypt of Herodotus: Being the Second and Part of the Third Books of His History. With Notes and Preliminary Dissertations*, by John Kenrick (1841). London: B. Fellowes.
- Volkov, E. P., and Kostiuik, V. V. (2009) Novye tekhnologii v elektroenergetike Rossii [New Technologies in Russia’s Electric Power Industry], *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*, vol. 79, no. 8, pp. 675–686.
- Wilm, A. (1911) Physikalisch-metallurgische Untersuchungen über magnesiumhaltige Aluminiumlegierungen, *Metallurgie. Zeitschrift für die gesamte Hüttenkunde*, vol. 8, no. 8, pp. 225–227.

Received: February 2, 2020.