

## Рафинирование первичного алюминия

© И. А. Другов<sup>1</sup>, Ю. В. Сокольникова<sup>1,2</sup>, К. Д. Скиба<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>1,2</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,  
г. Иркутск, Российская Федерация

**Аннотация.** Алюминий и сплавы на его основе находят широкое применение в различных отраслях. Основным сырьем служит первичный алюминий, получаемый электролизом криолит-глиноземных расплавов. Примеси в первичном алюминии-сырце делят на три группы: металлические, неметаллические и газы. Наличие таких примесных элементов, например, железа и кремния вызывает существенные изменения свойств алюминия: повышается вязкость металла в жидком состоянии, увеличивается электросопротивление, уменьшаются пластичность и коррозионная стойкость. Неметаллические примеси присутствуют в виде  $Al_2O_3$ , фтористых солей, углерода, карбида и нитрида алюминия и ухудшают механические, коррозионные и литейные свойства сплавов на основе алюминия. Примеси в виде газов в алюминии представлены преимущественно водородом. Также могут присутствовать диоксид углерода, сернистый газ, кислород и азот. Газы ухудшают физико-механические свойства, вызывают образование пор, раковин, пузырьков, что отрицательно влияет на изделия проката и литья. Основными способами рафинирования алюминия от примесей являются: метод трехслойного электролиза, отстаивание, с помощью алюмоорганических комплексных соединений, дистилляция, зонная перекристаллизация, обработка расплавов флюсами или инертными газами. Получаемый на российских предприятиях алюминий высокого качества и является конкурентноспособным на мировых рынках.

**Ключевые слова:** алюминиевая промышленность, первичный алюминий, рафинирование алюминия

## Refining of primary aluminum

© Igor A. Drugov<sup>1</sup>, Yulia V. Sokolnikova<sup>1,2</sup>, Kirill D. Skiba<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation

<sup>1,2</sup>Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,  
Irkutsk, Russian Federation

**Abstract.** Aluminum and alloys based on it are widely used in various industries. The main raw material is primary aluminum obtained by electrolysis of cryolite-alumina melts. Impurities in primary raw aluminum are divided into three groups: metallic, non-metallic and gases. The presence of such impurity elements, such as iron and silicon, causes a significant change in the properties of aluminum: the viscosity of the metal in the liquid state increases, the electrical resistance increases, and plasticity and corrosion resistance significantly decrease. Non-metallic impurities are present in the form of  $Al_2O_3$ , fluoride salts, carbon, aluminum carbide and nitride and degrade the mechanical, corrosion and casting properties of aluminum-based alloys. Impurities in the form of gases in aluminum are predominantly hydrogen; carbon dioxide, sulfur dioxide, oxygen and nitrogen may also be present. Gases worsen the physical and mechanical properties, cause the formation of pores, shells, bubbles, which negatively affects rolled and cast products. The main methods for refining aluminum from impurities are: the method of three-layer electrolysis, settling with the help of organoaluminum complex compounds, distillation, zone recrystallization, treatment of melts with fluxes or inert gases. The high quality aluminum produced at Russian enterprises is competitive in the world markets.

**Keywords:** aluminum industry, primary aluminum, aluminum refining

### Введение

Алюминий имеет малую плотность, является достаточно прочным и обладает хорошей пластичностью, не имеет магнитных свойств, хорошо проводит электрический ток [1]. Данный металл образует сплавы с большинством других [1–4]. Именно эти качества позволили ему стать одним из самых востребованных в наше время.

На рис. 1 представлена динамика выплавки алюминия за последние 120 лет. Первый всплеск его производства произошел во время Второй мировой войны. Он связан с использованием алюминия в авиационной промышленности. Дальнейший рост потребления – с глобальной урбанизацией и индустриализацией. Наибольшее количество алюминия применяется в транспортной и

строительной отраслях, в пищевой промышленности и энергетике. Алюминий незаменим при производстве линий электропередач и телефонных проводов, радиолокаторов, конденсаторов и т. д. Применяется он в современной электронной технике, в кораблестроении, авиационной, космической и других отраслях [5, 6].

Россия давно является вторым в мире производителем и первым нетто-экспортером алюминия. В числе наиболее крупных производителей многие годы остаются Канада, Австралия, Бразилия, Норвегия. Все более заметную роль на этом рынке начинают играть Китай, Индия, Южная Африка, страны Персидского залива (рис. 2).

### Влияние рыночных факторов на равновесную цену алюминия

На рис. 3 приведена динамика цен на

алюминий-сырец в XXI веке. Как видно из рисунка, наблюдается тесная зависимость цены алюминия с глобальным экономическим циклом. С начала XXI века насчитывается пять случаев резкого изменения цены металла на Лондонской бирже.

В 2001–2002 гг. произошел крах «доткомов» (от англ. *dot-com* («точка-ком») – домена верхнего уровня *.com*, в котором зарегистрированы преимущественно сайты коммерческих организаций в США, проявившиеся в череде банкротств Интернет-компаний). В результате – темп прироста мировой экономики замедлился с 4 % до 2 %, что на фоне роста производства алюминия в Китае спровоцировало затяжное снижение цен.

Росту цены в период с 2007–2008 гг. способствовало снижение его производства в Китае из-за проблем с поставками электроэнергии, в связи с разразившейся в конце

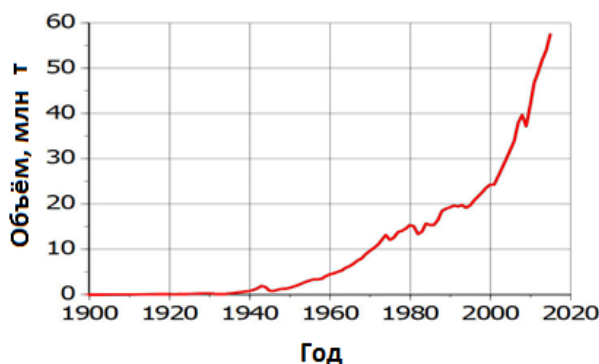


Рис. 1. Динамика объёма производства алюминия в мире



Рис. 2. Доли стран-производителей алюминия в 2021 году

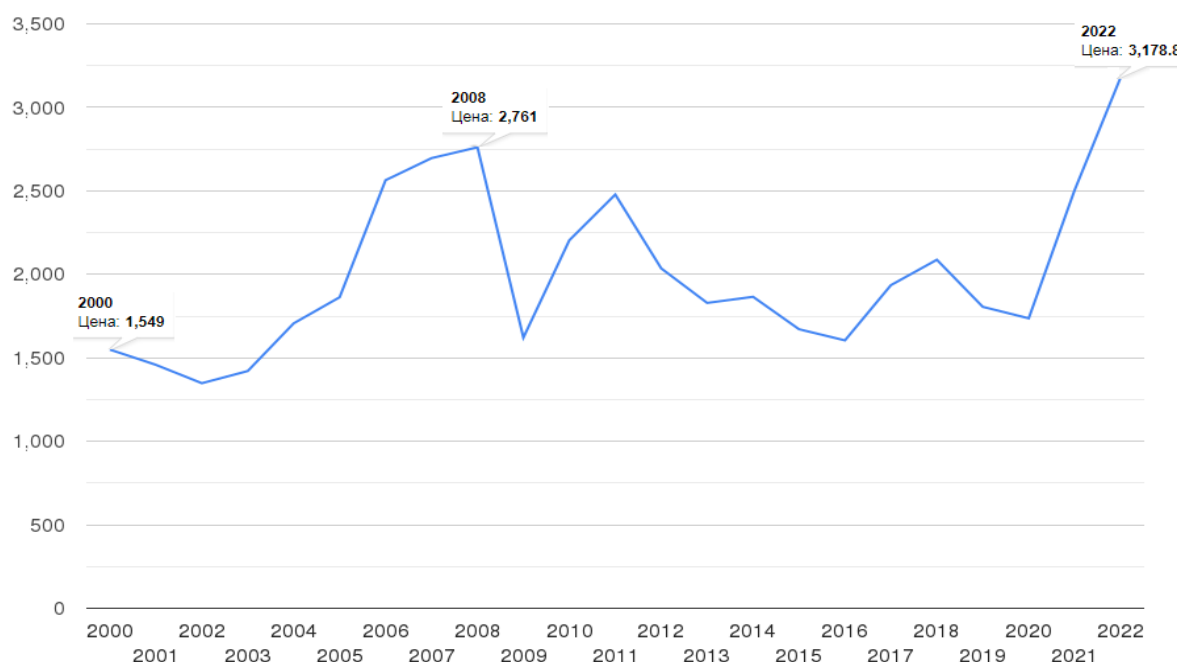


Рис. 3. Динамика цен алюминия-сырца (долл/т) на Лондонской бирже в период с 2000 по 2022 гг.

2007 года невиданной засухой, вызвавшей обмеление водохранилищ. К энергетическому кризису в Китае присоединился энергетический кризис в ЮАР, а также в Мозамбике, куда электроэнергия поступает из ЮАР, что привело к сокращению её мирового выпуска. Эту зависимость легко объяснить, зная, что резкое удорожание нефти в эти годы вызвало рост цены на электроэнергию, которая является одним из основных компонентов издержек при производстве алюминия.

Второй шок на рынке алюминия наступил в 2008–2009 гг. Причина – мировой финансовый кризис. Его ядром в реальном секторе экономики стал рынок коммерческой и жилой недвижимости, который сжался кратно. А строительная отрасль, как было сказано выше, является основным потребителем алюминия.

В 2010 году, благодаря возросшей экономической активности в Германии, Южной Америке и Азии, мировой спрос на алюминий продолжал восстанавливаться. Спрос на этот металл в США и Японии стабилизировался в третьем квартале в результате развития автомобилестроительной и машиностроительной отраслей. Рост продаж потребительских товаров, сопровождавшийся увеличением спроса на алюминиевую упаковку и тару,

оказал положительное влияние на объемы производства алюминиевого проката. Потребление алюминия в Китае в 2010 году продолжило расти уверенными темпами, достигнув 16,5 млн тонн.

Однако падение темпов прироста мирового валового внутреннего продукта ниже 3 % и резкий скачок выплавки алюминия в Китае в 2016 году обусловили снижение цены металла до 1500 долларов за тонну.

В 2020 году пандемия COVID-19 привела к искусственному сокращению потребления алюминия. В тоже время меры карантина не затронули большую часть производственных мощностей. Дисбаланс спроса и предложения во втором квартале 2020 года привел к формированию рекордного избытка предложений на алюминий и четвертому с 2000 года падению цены до 1500 долларов за тонну.

В 2022 году цена алюминия выросла из-за многочисленных опасений по поводу проблем с поставками, включая сокращение мощностей в Китае по экологическим причинам, энергетическим кризисом в Европе и потенциальными санкциями в отношении России.

Мировой рынок алюминия, как и многие другие рынки сырьевых товаров, имеет циклический характер и находится в сильной за-

висимости от колебаний мировой конъюнктуры. В отличие от готовой алюминиевой продукции экспорт необработанного алюминия подвержен резким изменениям спроса, вызывает колебания цен, что создает элементы непредсказуемости как для стран-экспортеров, так и для импортеров этого металла. Важнейшими факторами, определяющими экономический эффект от реализации продукции предприятий алюминиевой промышленности, являются стоимость электроэнергии, цена сырья, а также мировая цена на первичный алюминий, устанавливаемая на Лондонской бирже металлов.

Цены на электроэнергию и сырье определяют специфику ценообразования в алюминиевой отрасли со стороны предложения, так как доля этих двух компонентов в общих издержках на производство алюминия составляет порядка 80 %.

**Сырьё.** Бокситы содержат всего 30–60 % глинозема, остальное – кремнезем, оксид железа и оксиды титана. Для производства алюминия из бокситов с содержанием кремнезема менее 10 % используется процесс Байера [7]. Между стадией вовлечения в обработку сырья (боксит) и получением готового продукта (алюминий) существует пять стадий переработки. Каждый процесс служит для удаления попутных примесных элементов и очистки конечного продукта для дальнейшего его использования в процессе электролиза криолит-глиноземных расплавов.

Для производства тонны алюминия требуется (в среднем) три тонны бокситов. Кроме того, для выплавки тонны алюминия необходимо 15 000 кВт ч электроэнергии. Это дает некоторое представление о том, что происходит на каждом из этих этапов – от бокситов до алюминия.

Колебания цен на компоненты издержек производства алюминия гораздо менее выражены чем колебания цен на готовую продукцию. У производителей практически нет возможности приспособиться к более низкому уровню цен. Поэтому в период низких цен, обусловленных мировой конъюнктурой, предложение товарной продукции (алюминия) сокращается.

## Динамика цен акций «РУСАЛ» и «Alcoa»

Производство алюминия во всем мире росло на протяжении XX в. и продолжает расти в XXI веке. Общий объем мировых производственных мощностей по первичному алюминию за 2021 год составил 67,343 млн тонн.

Много лет мировым лидером в алюминиевой промышленности были США. Однако в 2002–2003 гг. самое большое количество алюминия произвел Китай. Стремительный рост производства данного металла в этой стране опередил даже быстро растущий спрос на внутреннем рынке.

Крупнейшими производителями алюминия, чьи акции до недавнего времени котировались на Нью-Йоркской фондовой бирже, являются корпорации АО «РУСАЛ» и «Alcoa»<sup>1</sup>. На рис. 4 представлена зависимость котировок акций от цены алюминия на Лондонской бирже цветных металлов.

Данные рис. 4 показывают, что цена алюминия является основным фактором, определяющим цену акций компаний на бирже. Причем у фирмы «Alcoa» эта зависимость выражена даже сильнее, чем у фирмы «РУСАЛ». Это можно объяснить тем, что круг собственников компании «Alcoa» более децентрализован, чем круг собственников «РУСАЛ».

## Рафинирование алюминия от примесей

Как известно, первичный алюминий производят в электролизерах электролитическим разложением глинозема, расплавленного в криолит-глиноземном расплаве [8–10]. Источниками поступления примесей в расплав являются сырьевые материалы [11, 12]: глинозем, углерод анода, фтористый алюминий, а также вторичный криолит, получаемый при переработке отходов производства. При извлечении металла из ванн и разливке алюминия в изложницы также происходит загрязнение алюминия примесями.

<sup>1</sup>[Электронный ресурс]. URL.: <https://www.finam.ru/analysis/marketnews/pervopolugodie-2020-goda-stalo-surovym-ispytaniem-dlya-alyuminievyyh-kompaniy-20200903-14450/>

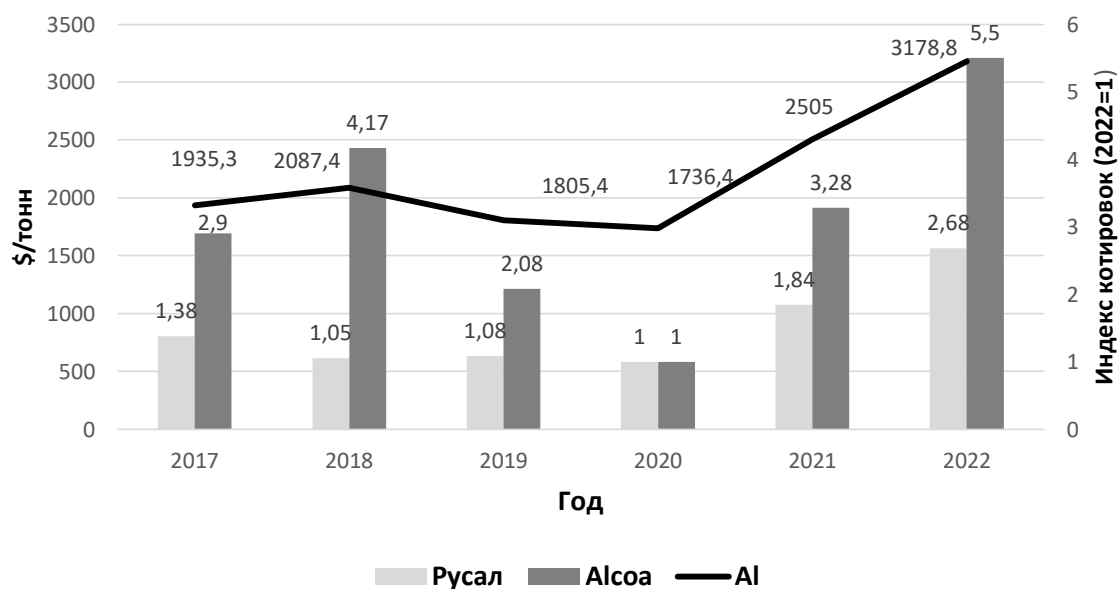


Рис. 4. Динамика мировой цены алюминия и котировок акций компаний «РУСАЛ» и «Alcoa»

Примеси в первичном алюминии-сырце делят на три группы: металлические, неметаллические и газы.

### Влияние примесей на свойства алюминия

Металлические примеси – это железо, кремний, ванадий, никель, титан, хром, медь, натрий, калий и другие. Больше всего в Al-сырце кремния и железа. Наличие этих примесей вызывает существенное изменение свойств «крылатого» металла: повышается вязкость в жидком состоянии, увеличивается электросопротивление, существенно уменьшаются пластичность и коррозионная стойкость.

Неметаллические примеси в алюминии могут присутствовать в виде оксида алюминия (глинозема), фтористых солей, углерода, карбида и нитрида алюминия. Данные примеси значительно влияют на качество алюминия, уменьшая механические, коррозионные и литейные свойства.

Примеси в виде газов в алюминии представлены преимущественно водородом (более 80 %), а также диоксидом углерода, сернистым газом, кислородом и азотом. Суммарное их содержание составляет 0,1–0,5 см<sup>3</sup> на 100 г алюминия. Газы ухудшают физико-механические свойства, вызывают образование пор, раковин, пузырьков, что отрицательно влияет на изделия проката и литья.

Пористость в слитках из алюминиевых сплавов зависит от состава и качества шихты, температуры и влажности окружающего воздуха, атмосферы плавильной печи и миксера, способа рафинирования расплава, температуры и времени выдержки готового сплава в печи или миксере. Так, при повышении содержания водорода в расплаве микропористость приводит к образованию рыхлоты и макропористости, наблюдаемые на шлифах [13]. Как показали проведенные исследования авторов [13], дефект сплава «оксидные пленки» оказался вызван их попаданием в расплав с шихтой при перемешивании и переливе металла; при этом происходят разрывы и замешивание пленки оксида алюминия, когда металл поступает открытой струей.

### Виды рафинирования алюминия

*Рафинирование методом трехслойного электролиза.*

Рафинирование осуществляется в электролизере, отличительной особенностью которого является наличие в нем трёх разных по плотности жидких слоев (рис. 5<sup>2</sup>).

Нижний слой – это анод, который состоит из первичного алюминия (плотностью 3,2–3,5 г/см<sup>3</sup>) с добавлением 30–40 % от массы меди с целью его утяжеления. Средний слой – непосредственно расплавленный электролит, состоящий из хиолита (Na<sub>5</sub>Al<sub>3</sub>F<sub>6</sub>). Для

утяжеления добавляют хлорид бария и хлорид натрия (для достижения плотности  $2,7 \text{ г/см}^3$ ). Примерный состав электролита для рафинирования алюминия: 60 %  $\text{BaCl}_2$ , 23 %  $\text{AlF}_3$ , 12–17 %  $\text{NaF}$  и 2–4 %  $\text{NaCl}$ . Температура плавления электролита  $720\text{--}810^\circ\text{C}$ .

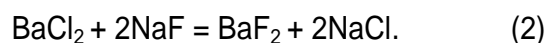
Верхний слой – это рафинируемый алюминий (с плотностью  $2,3 \text{ г/см}^3$ ). В процессе рафинирования данный слой служит в качестве катода.

На аноде растворяются алюминий и более электроотрицательные по сравнению с алюминием примеси – натрий, кальций и другие. Основные примесные элементы – железо и кремний, как и медь, являются более электроположительными, чем алюминий и накапливаются в анодном сплаве. На катоде происходит процесс восстановления катионов алюминия, а примеси электроотрицательных металлов представляют собой ионы и остаются в электролите.

Слой анодного сплава сообщается с карманом в боковой футеровке. По мере накопления примесей в анодном сплаве происхо-

дит их диффузия в карман. Примеси железа и кремния образуют с алюминием и медью интерметаллические соединения, которые при понижении температуры в кармане выпадают в виде твердых осадков, которые впоследствии извлекают.

Состав электролита: 27–35 %  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ; 8–10 %  $\text{AlF}_3$ ; 55–60 %  $\text{BaCl}_2$ ; 2–4 %  $\text{NaCl}$ . Температура плавления  $660\text{--}730^\circ\text{C}$ , плотность –  $2,72 \text{ г/см}^3$ , удельная электропроводность –  $1,46 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ . В процессе рафинирования проходят следующие реакции:



Первая реакция практически не протекает, а направление протекания второй значительно сдвинуто вправо ( $\Delta G = -30 \text{ кДж/моль}$ ).  $\text{BaCl}_2$  и  $\text{BaF}_2$  образуют тугоплавкое соединение  $\text{BaCl}_2 \cdot \text{BaF}_2$ . Электрический ток переносится катионами  $\text{Na}^+$  и  $\text{Ba}^+$  и анионами  $\text{Cl}^-$ .

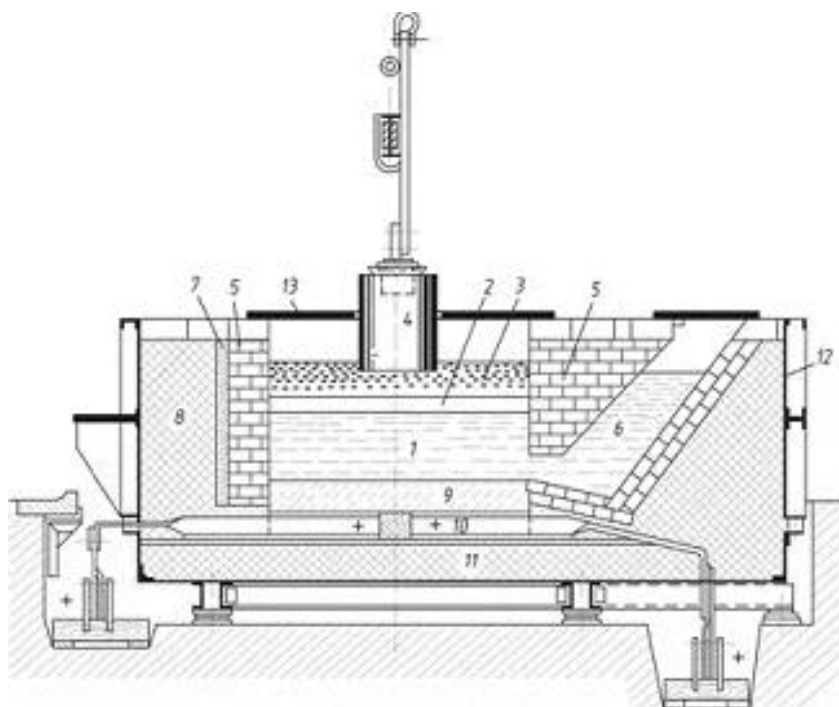


Рис. 5. Схема электролизера с передним горном для рафинирования алюминия<sup>2</sup>:

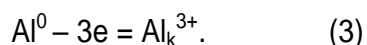
1 – алюминиевый расплав; 2 – электролит; 3 – рафинированный алюминий высокой чистоты; 4 – катод из графита; 5 – магниевая стена; 6 – передний горн; 7 – изолирующий слой; 8 – боковая изоляция; 9 – угольная подина; 10 – анодный токоподвод; 11 – изоляция подины; 12 – железный короб; 13 – крышка

<sup>2</sup>Металлургия и вторичная металлургия алюминия. [Электронный ресурс]. URL: <https://metalspace.ru/education-career/osnovy-metallurgii/metallurgiya-alyuminiya/681-poluchenie-alyuminiya.html> (16.05.2022 г.).

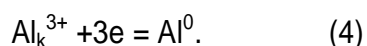
Анодный сплав (с содержанием Cu 30–40 %) образуется расплавлением меди в жидком алюминии-сырце. В процессе рафинирования в анодном сплаве накапливается также железо и кремний. То есть анодный сплав представляет собой четверную систему [Al–Cu–Fe–Si], в которой образуется эвтектика с температурой плавления 520°C. Также происходит накопление галлия (до 0,3 %), тугоплавких соединений типа  $Cu_2FeAl_7$  и  $FeSiAl_5$ .

Допустимые концентрации в анодном сплаве железа и кремния – 6–8 % и 7–9 % соответственно. С повышением температуры содержание компонентов может увеличиваться, что достаточно опасно, так как примеси могут перейти в электролит в процессе анодного растворения. С понижением температуры в карманах ниже 590°C происходит выпадение кристаллов соединения  $CuCl_2$ , при этом анодные осадки обогащаются медью, что приводит к значительным потерям меди.

Электродные процессы сводятся к окислению алюминия на аноде по реакции (3):



А также к восстановлению на катоде по реакции (4):



Катион алюминия образует фторидные комплексы  $AlF_6^{3-}$ ;  $AlF_4^-$ .

Э.д.с. гальванической цепи амальгамного типа возникает при различии в активностях алюминия в анодном сплаве и в катодном металле (рис. 6).

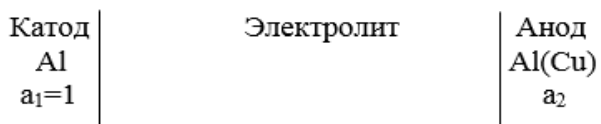


Рис. 6. Расположение электродов

Измерения э.д.с. данной цепи дают величины 0,040–0,045 В. На практике э.д.с. поляризации больше (0,365–0,372 В), причем перенапряжение на катоде близко к 0,185 В, на аноде – 0,135 В. Перенапряжение на катоде

вызвано замедленностью диффузии катионов, так как перенос тока осуществляется катионами  $Na^+$  и  $Ba^{2+}$ . Это связано не только концентрационными изменениями в электролите, но и уменьшением содержания алюминия на поверхности анодного сплава. Можно предположить, что перенапряжение на аноде связано с низкой скоростью диффузии атомов алюминия в анодном сплаве.

### Рафинирование алюмоорганических комплексных соединений

Алюминий высокой степени очистки можно получить рафинирующим электролизом технически чистого алюминия с применением электролита, состоящего из комплексных алюмоорганических соединений. Для этой цели применяют раствор 50 %-го раствора  $NaF \cdot 2Al(C_2H_5)_3$  в толуоле. Очистку проводят при 1000°C, напряжении в электролизере 1,0–1,5 В и плотности тока в пределах 0,3–0,5 А/дм<sup>2</sup> с использованием алюминиевых электродов. Выход по току составляет 99 %. В процессе рафинирования существенно снижается содержание марганца и скандия, которые практически не удаляются при зонной очистке.

Недостатками является низкая производительность процесса и высокая пожароопасность, так как работа с электролитом предполагает полное отсутствие воздуха. Алюмоорганические соединения сильно чувствительны к  $H_2O$  и  $O_2$ . Поэтому работа выполняется в атмосфере инертного газа (азот, аргон). Этот вид электролиза осуществлялся только в лабораторных условиях, но уже осуществляется в производственном масштабе, получая несколько тонн металла в год. Степень очистки составляет 99,999–99,9999 %. Такая чистота необходима в производстве токоподводов к германиевым и кремниевым пластинкам при производстве выпрямителей электрического тока.

### Зонная плавка

Зонная плавка – метод очистки твердых веществ, основанный на разной взаиморастворимости примесей в твердой и жидкой фазе [14]. Очистка происходит при многократном прохождении расплавленной зоны вдоль слитка алюминия.

Примеси в жидкой фазе в значительной мере определяют степень очистки алюминия, их можно разделить на три группы. Первая состоит из примесей, понижающих температуру плавления алюминия. При зонной плавке концентрируются в расплавленной зоне и переносятся ею к конечной части слитка. К этой группе относят: Cu, Sn, Sb, Ca, Th, Fe, Co, Ce, Te, Au, Pt, Ba, Ni, Bi, Pb, Cd, In, Na, Mg, Ga, Si, Ge, Zn. Вторая группа примесей наоборот повышает температуру плавления алюминия и в процессе концентрируются в начальной твёрдой части слитка. К ним относят: Nb, Ta, Cr, Ti, Mo. Третья группа примесей (Mn, Sc) не удаляется при зонной плавке.

Алюминий перед очисткой подвергают фильтрации, дегазации и травлению. Фильтрация подразумевает удаление оксидной пленки, диспергированной в металле, так как при затвердевании она может создавать центры кристаллизации, которые образуют поликристаллическую структуру слитка, и перераспределять примеси между твердым металлом и расплавленной зоной. Фильтрацию алюминия ведут в вакууме. Дегазацию проводят для предупреждения разбрызгивания металла при расплавлении зоны в случае проведения процесса в вакууме. При травлении поверхности алюминия применяют соляную и азотную кислоты.

Зонную плавку проводят в вакууме или в атмосфере инертного газа, так как алюминий обладает высокой химической активностью. Плавка в вакууме позволяет получать алюминий высокой чистоты вследствие улетучивания примесей при вакуумировании (магний, цинк, кадмий и т. д.), а также отсутствия загрязнения примесями.

Зонная плавка осуществляется в вакууме при постоянном отводе воздуха. Для этого используется трубка, в которой располагается графитовая лодочка со слитком алюминия. Давление составляет  $\sim 10^{-3}$  Па.

Чтобы создать расплавленную зону на очищаемом слитке алюминия, может быть использован нагрев с помощью печей сопротивления. Это достаточно простое решение ввиду отсутствия сложного аппаратного оформления процесса, но недостатком является малое сечение слитка металла. Лучшим решением создания расплавленной зоны яв-

ляется индукционный нагрев. Токи высокой частоты позволяют проводить зонную плавку для слитков больших сечений. Расплавленный металл постоянно перемешивается в зоне, что облегчает диффузию атомов примеси от кристаллизации в глубине расплава.

Зонная плавка позволяет получать алюминий чистотой 99,994–99,997 %. Для получения металла чистотой 99,9999 % достаточно провести два цикла зонной плавки. Дальнейшее повторение процесса рафинирования не повышает чистоту алюминия, а способствует увеличению общего выхода металла.

### **Дистилляция**

Давление насыщенных паров алюминия невысоко для проведения дистилляции с приемлемыми скоростями. Однако при нагревании в вакууме при 1000–1050°C алюминий с  $\text{AlF}_3$  образует легколетучий субфторид (AlF), который перегоняют в более холодную зону с температурой 800°C, где он вновь распадается с выделением чистого алюминия. Глубокая очистка возможна благодаря тому, что вероятность образования субсоединений алюминия значительно больше вероятности образования субсоединений примесей. Содержание примесей после дистилляции в слитке составляет 10,4–11 % (кремний, железо, медь, магний), газов 0,007 см<sup>3</sup> на 100 г металла. Однако дистилляция алюминия путем перевода его в субфторид имеет малую производительность и не обеспечивает высокую очистку от Mg и Sc, поэтому способ не получил промышленного развития.

Для глубокой очистки алюминия и получения металла чистотой 99,99999 % используют комбинированный метод: электролиз алюмоорганических комплексных соединений или дистилляцию с последующей зонной плавкой, где получают металл особой чистоты.

### **Отстаивание**

Достаточно простым способом рафинирования от твердых и газообразных примесей является отстаивание. Расплавленный алюминий отстаивается при сравнительно невысокой температуре (720–770°C). Во время отстаивания легковесные частицы примесей всплывают на поверхность металла, а тяже-



ловесные оседают на дно ванны. Одновременно происходит удаление части растворенного в металле газа. Пузырьки газа адсорбируются преимущественно на частицах примесей (оксидов), взвешенных в расплаве, вследствие чего с ними же и всплывают. Время отстаивания составляет примерно 25–60 минут, при продолжении процесса происходит окисление.

### Рафинирование инертным газом

Самыми распространенными инертными газами являются азот (N), аргон (Ar) или смесь газов. Газ продувают снизу через всю толщу расплава, при этом с пузырьками газа удаляется растворенный в металле водород. Всплывающие пузырьки на пути своего движения вверх встречают взвешенные неметаллические включения и выносят их на поверхность. Наиболее доступный газ – азот, он инертен по отношению к алюминию при температуре в пределах 700°C и широко применяется в промышленности. Время азотирования 3–5 минут, расход азота порядка 700–750 л на тонну металла [15–17].

### Рафинирование флюсами

Этот метод основан на извлечении неметаллических примесей из расплава путем их взаимодействия с расплавленными солями [18]. Механизм такого взаимодействия различен в зависимости от применяемого флюса. Взвешенные неметаллические включения мо-

гут растворяться в расплавленных солях, могут химически взаимодействовать с ними или сорбироваться, т. е. оседать на поверхности корольков расплавленной соли. Эффективность очистки достигается лишь в том случае, если флюсы смачивают неметаллические включения лучше, чем металл. В итоге, во время смачивания размер включений возрастает, что позволяет всплыть им практически моментально, чем до обработки флюсом.

Таким образом, алюминий для его использования в различных отраслях промышленности необходимо рафинировать. Марок алюминия существует достаточно много. Классификация марок алюминия-сырца зависит от количества примесей, обозначается как: A995; A99; A98 и т. д. В соответствии с ГОСТ 11069-2019 «Алюминий первичный. Марки» первичный алюминий принято обозначать буквой «А».

### Заключение

Российская алюминиевая промышленность является конкурентноспособной на мировом рынке благодаря тому, что алюминий отличается минимальным содержанием примесей. Наличие примесей в алюминии-сырце ухудшает его основные свойства: электропроводность, пластичность и др.

Существуют различные методы рафинирования металла от примесей, основными из которых являются рафинирование с помощью флюсов, отстаивание, продувка газами.

### Список источников

1. Беляев А. И. Металлургия легких металлов. М.: Металлургия, 1970. 368 с.
2. Левчук В. В., Трапезников А. В., Пентюхин С. И. Коррозионностойкие литейные алюминиевые сплавы (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 7(67). С. 33–40.
3. Фридляндер И. Н., Сенаторова О. Г., Ткаченко Е. А., Молостова И. И. Развитие и применение высокопрочных сплавов системы Al–Zn–Mg–Cu для авиакосмической техники // 75 лет ВИАМ. Авиационные материалы и технологии: научно-технический сборник. М.: ВИАМ, 2007. С. 155–163.
4. Антипов В. В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии: научно-технический сборник. М.: ВИАМ, 2012. С. 157–166.
5. Фридляндер И. Н. Алюминиевые сплавы в летательных аппаратах в периоды 1970–2000 и 2001–2015 гг. // Технология легких сплавов. 2002. № 1. С. 12–15.
6. Попова М. В., Прудников А. Н., Долгова С. В., Ма-  
люх М. А. Перспективные алюминиевые сплавы для авиационной и космической техники // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2017. № 3(21). С. 18–23.
7. Лайнер А. И., Еремин Н. И., Лайнер Ю. А., Певзнер И. З. Производство глинозема. М.: Металлургия, 1978. 344 с.
8. Минцис М. Я., Поляков П. В., Сиразутдинов Г. А. Электрометаллургия алюминия. Новосибирск: Наука, 2001. 368 с.
9. Grjotheim K., Kvande H. Introduction to aluminium electrolysis. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 1993. 260 p.
10. Бажин В. Ю., Смольников А. Д., Петров П. А. Концепция энергоэффективного производства алюминия «Электролиз 600+» // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 5(47). С. 37–40.
11. Nemchinova N., Lazko A. How the Chemistry of Raw Materials Affects Aluminum Produced in Cells with Prebaked Anodes // Materials Science Forum.

2022. Vol. 1052. P. 209-213.

12. Ветюков М. М., Цыплаков А. М., Школьников С. Н. Электрометаллургия алюминия и магнезия. М.: Металлургия, 1987. 320 с.

13. Nemchinova N., Belskii S., Vlasov A. Studying Aluminum Alloy Defects // Solid State Phenomena. 2021. Vol. 316. P. 353-358.

14. Пфанн В. Дж. Зонная плавка. Перевод с англ. В. А. Алексеева. М.: Металлургиздат, 1960. 272 с.

15. Садоха М. А., Андрушевич А. А. Технологии рафинирования алюминиевых сплавов продувкой газами //

Литье и металлургия. 2021. № 1. С. 38–42.

16. Макаров Г. С. Рафинирование алюминиевых сплавов газами. М.: Металлургия, 1983. 120 с.

17. Инкин С. Е., Белов Е. Д., Палачев Е. А. Рафинирование алюминиевых сплавов высокоскоростной продувкой инертным газом // Литейное производство. 1992. № 2. С. 13–15.

18. Быков П. О., Куандыков А. Б., Жунусов А. К., Тусупбекова М. Ж., Абсолямова Д. Р. Рафинирование алюминия-сырца борсодержащими материалами // Наука и техника Казахстана. 2021. № 2. С. 77–84.

#### **Информация об авторах / Information about the Authors**

##### **Игорь Александрович Другов,**

магистрант,  
Институт высоких технологий,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Российская Федерация,  
drugoffig@yandex.ru

##### **Юлия Владимировна Сокольникова,**

кандидат химических наук,  
доцент кафедры металлургии цветных металлов,  
Институт высоких технологий,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Российская Федерация,  
начальник химико-аналитической  
производственной лаборатории,  
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,  
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1А,  
Российская Федерация,  
jsokol1@yandex.ru

##### **Кирилл Денисович Скиба,**

магистрант,  
Институт высоких технологий,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Российская Федерация,  
kirill.skiba.98@mail.ru

##### **Igor A. Drugov,**

Undergraduate,  
Institute of High Technologies,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,  
Russian Federation,  
drugoffig@yandex.ru

##### **Yulia V. Sokolnikova,**

Cand. Sci. (Chemistry),  
Assistant professor of Department of Non-Ferrous Metals  
Metallurgy,  
Institute of High Technologies,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation,  
Head of Chemical-Analytical Production Laboratory,  
Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS.  
1A Favorsky St., Irkutsk 664033,  
Russian Federation,  
jsokol1@yandex.ru

##### **Kirill D. Skiba,**

Undergraduate,  
Institute of High Technologies,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074,  
Russian Federation,  
kirill.skiba.98@mail.ru