

ПРОИЗВОДСТВО АЛЮМИНИЯ

Андрей Львович Юрков

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»,
доктор технических наук

Илья Сергеевич Курошев

Федеральное государственное автономное учреждение
«Научно-исследовательский институт
«Центр экологической промышленной политики»

Мария Викторовна Доброхотова

Федеральное государственное автономное учреждение
«Научно-исследовательский институт
«Центр экологической промышленной политики»

ВВЕДЕНИЕ¹

Описание продукции

Алюминий — один из самых молодых металлов, открытых человеком. В чистом виде в природе он не встречается, поэтому получить его удалось лишь в XIX в. благодаря развитию химии и появлению электричества. За полтора века алюминий прошел невероятно интересный путь от драгоценного металла до материала, используемого в каждой сфере деятельности людей².

Алюминий обладает множеством полезных свойств, и можно с уверенностью предположить, что применение алюминия в мире будет возрастать, объемы производства и вклад в мировую экономику — увеличиваться, следовательно, металлургии алюминия будет уделяться большое внимание. Не ослабнет интерес и к методам переработки сырья для производства глинозема.

По химическим свойствам алюминий отличается от меди, золота, серебра и не встречается в природе в виде самородков. Восстановление алюминия из горных пород сложнее, чем восстановление из горных пород железа или меди, именно поэтому история применения алюминия существенно короче.

Уникальные характеристики алюминия:

- моментальное образование на воздухе оксидной защитной пленки, которая способствует высокой коррозионной стойкости металла;
- низкая плотность при высокой прочности;
- неизменность свойств при низких температурах.

Эти качества делают алюминий незаменимым для авиационного и космического применения, а также очень привлекательным для судостроения, транспорта и гражданского строительства.

Благодаря таким свойствам, как малая плотность, высокая теплопроводность, низкое электрическое сопротивление, высокая пластичность, коррозионная стойкость, алюминий получил исключительно широкое распространение

¹ Раздел 1 «Производство алюминия» написан на основе материалов из первого издания: Энциклопедия технологий. Эволюция и сравнительный анализ ресурсной эффективности промышленных технологий / гл. ред. Д. О. Скобелев ; ФГАУ «НИИ «ЦЭПП». — М. ; СПб., 2019.

² История алюминия // Все об алюминии : Сайт об алюминии. — URL: https://aluminiumleader.ru/history/industry_history/ (дата обращения: 12.12.2021).

в различных отраслях современной техники и играет важнейшую роль среди всех цветных металлов.

Основная часть алюминия применяется в виде литейных и деформируемых сплавов, и небольшое количество алюминия — в виде порошков.

Вероятно, алюминий долго бы оставался экзотическим металлом, если бы в конце XIX в. француз Поль Луи-Гуссен Эру и американец Чарльз Мартин Холл практически одновременно не изобрели технологию получения алюминия электролизом криолит-глиноземных расплавов, что позволило резко снизить себестоимость выпуска металла и начать производство в промышленных масштабах³.

За прошедший век технология получения алюминия по методу Холла — Эру многократно совершенствовалась, однако она остается главной и основной технологией получения алюминия (хотя разработки альтернативных технологий получения алюминия не прекращаются).

Открытие технологии получения алюминия по методу Холла — Эру, с одной стороны, дало толчок к поиску месторождений сырья для производства алюминия (на которые до этого геологи мало обращали внимание). С другой стороны, оно инициировало разработку различных полезных сплавов на основе алюминия.

Современное получение алюминия осуществляется по методу Холла — Эру путем электролитического разложения глинозема (Al_2O_3), растворенного в электролите (расплавленный криолит (Na_3AlF_6) с добавками). Технологический процесс осуществляется при 950–965°С в электролизных ваннах (электролизерах)⁴.

Металлургия алюминия сводится к разработке и обогащению сырья для производства алюминия, переработке сырья (преимущественно бокситов) в глинозем, получению из глинозема первичного алюминия (алюминия-сырца) и получению сплавов на основе алюминия. Сплавы алюминия можно разделить на литейные сплавы и сплавы для проката и прессования.

Отрасль добычи и переработки алюминийсодержащего сырья в глинозем можно назвать моноотраслью — 95% всего произведенного из алюминийсодержащего сырья глинозема идет для получения алюминия и сплавов.

Если на стадии получения глинозема главным компонентом производства является алюминийсодержащее сырье (бокситы, нефелины, алунит), то для получения алюминия-сырца помимо глинозема необходимы углерод (угольный анод) и значительное количество электроэнергии. В связи с этим можно вспомнить шутку из среды алюминщиков: «Алюминий получают из электроэнергии и небольшой добавки глинозема».

³ Thonstad J. Aluminium electrolysis. Fundamentals of the Hall-Héroult process. — Düsseldorf, 2001; Борисоглебский Ю. В. Metallurgy of aluminium. — Новосибирск, 1999; Sørlie M. Cathodes in aluminium electrolysis. — Düsseldorf, 2010.

⁴ Grjothheim K. Aluminium smelter technology: A pure and applied approach. — Düsseldorf, 1988.

К основным областям применения алюминия и его сплавов относятся аэрокосмическая и пищевая промышленность, строительство, высокоскоростной железнодорожный и водный транспорт, автомобилестроение, производство электротехники, турбинной техники, упаковки пищевых продуктов и напитков, криотехники, пиротехники и ракетного топлива.

География отрасли, основные предприятия отрасли

Алюминиевое сырье

Запасы бокситов разведаны в 29 странах и составляют 11,41 млрд т, ресурсы бокситов известны в 50 странах и оцениваются в 86,46 млрд т.

Основными поставщиками бокситов на мировой рынок являются страны тропического и субтропического поясов: Австралия, Гвинея, Бразилия, Индия, Ямайка, Индонезия, разрабатывающие открытым способом поверхностные и близповерхностные месторождения, а также Китай, использующий как открытый, так и подземный способ разработки на глубоко залегающих месторождениях.

Мировое производство бокситов в 2020 г. выросло, по сравнению с предыдущим годом, почти на 3% — до 371 млн т. Значительный рост производства отмечен в Индонезии (+29%), Гвинее (+25%) и Иране (+18%). Значительно сократилось производство в Гайане (–70%), Малайзии (–45%), Сьерра-Леоне и Соломоновых островах (–32%), Ямайке (–16%) и Бразилии (–10%)⁵.

Австралия, Бразилия, Гвинея, Индонезия, Индия и Китай обеспечили около 92% мирового производства. На Австралию стабильно приходится около 30% мировой добычи; доля Гвинеи выросла за последнее десятилетие с 7 до 24%, а Китая — с 15 до 19%, в то же время сократились доли Бразилии (с 13 до 8%) и Индонезии (с 16 до 6%).

По величине запасов бокситов и их добычи Россия находится на восьмом месте в мире, имея долю в 4% в мировых запасах и 2% в мировой добыче (табл. 1).

По состоянию на 01.01.2021 на учет государственного баланса запасов поставлено 1373,5 млн т бокситов (табл. 2), заключенных в недрах 36 месторождений. Еще 20 месторождений содержат только забалансовые запасы (табл. 3, рис. 1).

По состоянию на 01.01.2021 на учет государственного баланса запасов поставлено 4836 млн т нефелиновых руд на 12 месторождениях. Еще 4 месторождения содержат только забалансовые запасы (рис. 2).

⁵ О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации : [официальный сайт]. — URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_iskpolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostyanii_i_iskpolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/ (дата обращения: 12.12.2021).

Таблица 1. Запасы бокситов и объемы их производства в мире

Страна	Запасы, категория	Запасы, млн т	Доля в мировых запасах, %	Производство в 2020 г., млн т	Доля в мировом производстве, %
Австралия	Proved + Probable Reserves	2039	18	104,3	28
Гвинея	Proved + Probable Reserves	1464	13	87,8	24
Китай	Ensured Reserves Reserves	1010	9	69,6	19
Бразилия	Proved + Probable Reserves	485	4	28,6	8
Индонезия	Proved + Probable Reserves	2963	26	21,3	6
Индия	Proved + Probable Reserves	656	6	20,5	6
Ямайка	Proved + Probable Reserves	550	5	7,6	2
Россия	Запасы категорий А+В+С ₁ *	486	4	4,5	2
Прочие	Reserves	1757	15	23,7	5
Весь мир	Запасы	11 410	100	370,9	100

* Разрабатываемые и осваиваемые месторождения.

Таблица 2. Состояние сырьевой базы алюминиевого сырья Российской Федерации

Запасы	А + В + С ₁		С ₂
Бокситы			
Количество, млн т	1090,4		283,1
Доля распределенного фонда, %	44,6		57,1
Нефелиновые руды			
Количество, млн т	4017,9		818,1
Доля распределенного фонда, %	77,8		88,4
Прогнозные ресурсы	Р ₁	Р ₂	Р ₃
Количество, млн т	58,1	39,2	0

Таблица 3. Месторождения бокситовых и нефелиновых руд на территории Российской Федерации

Месторождение (субъект РФ)	Геолого-промышленный тип	Запасы на 01.01.2021 категорий, млн т		Доля в запасах РФ, %	Содержание Al ₂ O ₃ в рудах, % (кремниевый модуль Al ₂ O ₃ /SiO ₂)	Добыча в 2020 г., тыс. т
		А + В + С ₁	С ₂			
Разрабатываемые						
АО «Боксит Тимана» (ОК «РУСАЛ»)						
Вежаю-Ворыквинское (Республика Коми)	Полигенные бокситы	87,2	3,4	6,6	49,4 (6,3)	2004
Верхне-Шугорское (Республика Коми)	Латеритные бокситы	58,7	3,0	4,6	50,6 (7,4)	2092

Таблица 3 (окончание)

Месторождение (субъект РФ)	Геолого- промышленный тип	Запасы на 01.01.2021 категорий, млн т		Доля в запасах РФ, %	Содержа- ние Al_2O_3 в рудах, % (кремниевый модуль Al_2O_3/SiO_2)	Добыча в 2020 г., тыс. т
		A + B + C ₁	C ₂			
АО «Севералбокситруда» (ОК «РУСАЛ»)						
Кальинское (Свердловская область)	Осадочные бокситы в карбонат- ных толщах	26,1	48,5	5,4	55,6 (20,8)	716
Ново-Кальинское (Свердловская область)		70	30,2	7,3	55 (17,7)	749
Черемуховское (Свердловская область)		133,1	56,8	13,8	54,4 (11,8)	552
Красная Шапочка* (Свердловская область)		7,8	16,7	1,8	14,5	–
ПАО «Североонежский бокситовый рудник»						
Иксинское** (Архангельская область)	Осадочные бокситы в терриген- ных толщах	250,9	0	18,3	53,4 (3,1)	527
АО «РУСАЛ Ачинский глиноземный комбинат» (ОК «РУСАЛ»)						
Кия-Шалтырское (Кемеровская область)	Нефелиновые руды (уртиты)	43,9	0	0,9	27,7	3122
АО «Апатит» (ПАО «ФосАгро»), АО «СЗФК» (ПАО «Акрон»)						
Хибинская группа месторождений (Мурманская область)**	Апатит-нефе- линовые руды	3223,3	4484,6	76,8	12,7	34 182
Разведываемые						
АО «РУСАЛ Ачинский глиноземный комбинат» (ОК «РУСАЛ»)						
Горячегорское (Красноярский край)	Нефелиновые руды (терали- то-сиениты)	445,9	292,1	15,3	22,5	–
Нераспределенный фонд недр						
Висловское (Белго- родская область)	Латеритные бокситы	153,4	49	14,6	49,5 (6)	–
Баянкольское (Республика Тыва)	Нефелиновые руды (уртиты)	304,8	41,5	7,2	26,5	–

* Расконсервация запасов.

** Часть запасов учитывается в нераспределенном фонде недр.



Рис. 1. Месторождения бокситов на территории Российской Федерации



Рис. 2. Месторождения нефелиновых руд на территории Российской Федерации

Алюминий

В 2020 г. в РФ добыто 6,65 млн т бокситов, в том числе 6,11 млн т металлургического сорта, и 37,3 млн т нефелиновых руд, из которых только 3,12 млн т использовались в производстве металла. В стране в 2020 г. произведено 2,81 млн т глинозема и 3,93 млн т первичного алюминия как из отечественного, так и из импортного глинозема (табл. 4)⁶.

Таблица 4. Воспроизводство и использование сырьевой базы алюминиевого сырья и алюминия в Российской Федерации, млн т

Процесс	Объем
Добыча из недр бокситов (в т. ч. металлургических сортов)	6,65 (6,1)
Добыча из недр нефелиновых руд (в т. ч. металлургических сортов)	37,30 (3,1)
Производство глинозема	2,81
Импорт глинозема	4,68
Экспорт глинозема	0
Производство первичного алюминия	3,90
Экспорт необработанного алюминия	2,70
Импорт необработанного алюминия	0,04

В 2020 г. в мире выпущено 135,1 млн т глинозема и 66,4 млн т первичного алюминия, что превышает показатели 2019 г. на 2,2 и 1,8%, соответственно. Более половины мирового выпуска глинозема (54%) и первичного алюминия (56%) обеспечивает Китай.

Мировое потребление первичного алюминия в 2020 г. выросло на 0,5% — до 65,5 млн т; 60% металла было использовано в Китае.

В целом можно сказать, что увеличение потребления алюминия стимулирует и влечет за собой увеличение добычи бокситов. Мировое потребление алюминия ежегодно растет на 5–6%. Производство первичного алюминия и добыча бокситов будут быстро расти.

Алюминиевая промышленность России

Добыча минерального сырья для производства алюминия — бокситов и уртовых руд — ведется дочерними подразделениями Объединенной компании «РУСАЛ» (ОК «РУСАЛ») (рис. 3 и 4, табл. 5)⁷.

⁶ О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации.

⁷ Там же.



Рис. 3. Структура алюминиевой промышленности России

* Подготавливаемые месторождения показаны контуром.

Источник: ОК «РУСАЛ».

Таблица 5. Алюминиевые и глиноземные заводы в Российской Федерации

№ на карте	Регион	Предприятие
1	Волгоградская область	Волгоградский алюминиевый завод (филиал ОАО «СУАЛ» «ВГАЗ-СУАЛ»)
2	Ленинградская область	Пикалевский глиноземный завод (ЗАО «БазэлЦемент-Пикалево»)
3	Республика Карелия	Надвоицкий алюминиевый завод (филиал ОАО «СУАЛ» «НАЗ-СУАЛ»)
4	Мурманская область	Кандалакшский алюминиевый завод (филиал ОАО «СУАЛ» «КАЗ-СУАЛ»)
5	Свердловская область	Уральский алюминиевый завод (филиал ОАО «СУАЛ» «УАЗ-СУАЛ»)
		Богословский алюминиевый завод (филиал ОАО «СУАЛ» «БАЗ-СУАЛ»)
6	Кемеровская область	Новокузнецкий алюминиевый завод (ОАО «РУСАЛ Новокузнецк»)
7	Республика Хакасия	Саяногорский алюминиевый завод (ОАО «РУСАЛ Саяногорск»)
8	Красноярский край	Красноярский алюминиевый завод (ОАО «РУСАЛ Красноярск»)
		Ачинский глиноземный комбинат (ОАО «РУСАЛ Ачинск»)
		Богучанский алюминиевый завод (ЗАО «Богучанский алюминиевый завод»)
9	Иркутская область	Братский алюминиевый завод (ОАО «РУСАЛ Братск»)
		Иркутский алюминиевый завод (филиал ОАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехове)

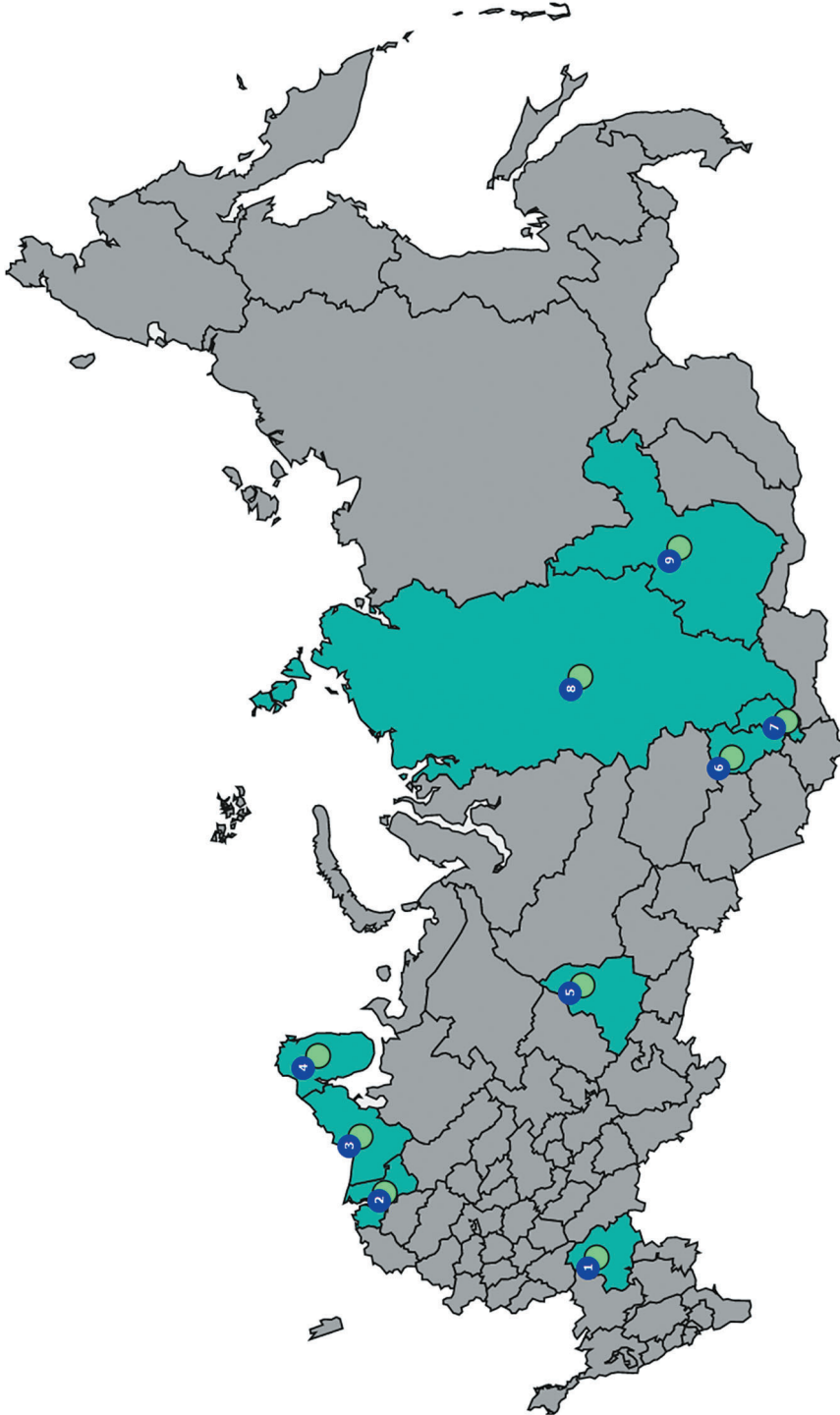


Рис. 4. Карта-схема расположения алюминиевых и глиноземных заводов в Российской Федерации (точки на карте не привязаны к фактическим местонахождениям предприятий)

ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ ОТРАСЛИ

Зарождение алюминиевой промышленности в мире

Человечество сталкивалось с алюминием задолго до того, как этот металл был получен. В «Естественной истории» римского ученого Плиния Старшего говорится о легенде I в., в которой мастер дарит императору Тиберию чашу из неизвестного металла — похожую на серебряную, но при этом очень легкую.

Не исключено, что за этой легендой могут стоять некоторые слегка преувеличенные, однако достоверные факты, поскольку силумин (сплав алюминия и кремния, по внешнему виду мало отличимый от алюминия) действительно можно получать карботермическим методом при восстановлении алюминий- и кремнийсодержащего материала (то есть при восстановлении боксита или глины) углеродом, например, древесным углем. Такие процессы можно было осуществлять и до нашей эры.

Впервые алюминиевую руду добыли в первой половине XIX в. на юго-востоке Франции, возле местечка Бокс. Отсюда и происходит название бокситов.

Сначала эта отрасль промышленности развивалась медленными темпами. Но когда человечество оценило, насколько алюминиевая руда важна для производства алюминия, начались разведка месторождений и научные изыскания по переработке руды в глинозем и алюминий. Многие страны начали поиски на своих территориях месторождений этой руды. Таким образом, мировая добыча алюминиевых руд стала постепенно возрастать. Подтверждением этого факта являются следующие данные: так, если в 1913 г. общемировой объем добытой руды составлял 540 тыс. т, то в 2014 г. — более 180 млн т⁸.

Постепенно росло и количество стран, добывающих алюминиевую руду. На сегодняшний день их насчитывается около 30. Но на протяжении последних 100 лет ведущие страны и регионы постоянно менялись. Так, в начале XX в. мировыми лидерами по добыче алюминиевой руды и ее производству были Северная Америка и Западная Европа. На эти два региона приходилось около 98% общемировой добычи. Через несколько десятков лет по количественным показателям алюминиевой промышленности лидерами стали страны Восточной Европы, Латинская Америка и Советский Союз.

В 1950–1960-е гг. лидером по объему добычи стала Латинская Америка. А в 1980–1990-х гг. произошел стремительный прорыв в алюминиевой промышленности Австралии и Африки. В мировой тенденции основными странами — лидерами по добыче алюминиевой руды являются Австралия, Бразилия, Китай, Гвинея, Ямайка, Индия, Россия, Суринам, Венесуэла и Греция.

⁸ История алюминия // Все об алюминии.

Алюминий обязан своим названием квасцам (*лат.* *alumen*) — соли алюминия. Английский химик Гемфри Дэви, много работавший с электролизом, в 1808 г. предсказал, что получить алюминий можно методом электролиза из глинозема. Он и назвал металл алюминием. До этого методом электролиза Дэви сумел получить элементарные бор, калий, натрий, барий, кальций, магний и стронций.

Однако впервые алюминий был получен датским физиком Хансом Эрстедом в 1825 г. Он восстановил хлорид этого элемента амальгамой калия при нагревании и выделил металл. Позже способ Эрстеда был улучшен немецким химиком Фридрихом Вёлером: он начиная с 1827 г. использовал для восстановления хлорида алюминия до металла чистый металлический калий. Вёлер получил относительно большие размеры слитка и впервые описал химические свойства алюминия.

Впервые полупромышленным способом алюминий получил в 1854 г. Сент-Клер Девиль по методу Вёлера, заменив калий на более безопасный натрий. Год спустя на Парижской выставке 1855 г. он продемонстрировал слиток металла, а в 1856 г. получил алюминий электролизом расплава двойной соли хлорида алюминия-натрия.

Французский император Наполеон III восхитился способом получения металла из глинозема и имел планы по вооружению всей своей армии кирасами из этого очень легкого металла для защиты кавалеристов и пехотинцев. С этой целью было построено несколько алюминиевых заводов во Франции. Это был первый шаг в формировании будущей алюминиевой промышленности мира.

Однако процесс получения алюминия все еще оставался дорогостоящим. Более дешевый метод получения металла появился во второй половине XIX в. Независимо друг от друга новый способ выделения алюминия искали двое ученых — американский инженер и химик М. Ч. Холл и французский инженер-химик П. Л.-Т. Эру. В 1887 г. Холл получил патент на новый электролитический способ получения алюминия. Этот способ заключался в электролизе расплавленного в криолите оксида алюминия и требовал большого количества электроэнергии.

Чистый алюминий является непрочным металлом и имеет малую коррозионную стойкость, потому не подходит для многих сфер применения. Первые алюминиевые сплавы — сплавы алюминия с кремнием — также имели малую прочность и низкую коррозионную стойкость. Поворотным моментом в истории развития алюминиевых сплавов стали исследования немецкого металлурга Альфреда Вильма, который в 1903 г. обнаружил в закаленном алюминиевом сплаве, содержащем медь и магний, повышение прочности в процессе закалочной термообработки. В честь города Дюрэн, где работал Вильм, сплав называли дюралюминием. В 1919 г. из него был изготовлен первый самолет.

В 1921 г. американец А. Пач модифицировал сплав Al–Si путем введения в него микроскопических доз натрия, что привело к значительному улучшению его свойств. Позже для получения алюминиевых сплавов с определенными свойствами стали применять легирование различными металлами (Cu, Mg, Mn, Si, Zn, Ni, Li, Be и др.). В России в 30–40-е гг. XX в. разработку алюминиевых сплавов и внедрение их в производство осуществляли Ю. Г. Музалевский, С. М. Воронов, И. Н. Фридляндер и др.⁹

Таким образом зародилась мировая алюминиевая промышленность, а сам металл получил широкое применение. В начале XX в. мировое производство алюминия составляло около 8000 т в год. А в XXI в. объем мирового производства металла достиг 24 млн т в год.

Зарождение алюминиевой промышленности в России

В дореволюционной России не было собственной алюминиевой промышленности. Однако в конце XIX и в начале XX столетия русские ученые (Н. Н. Бекетов, П. П. Федотьев, Н. А. Пушкин, Д. А. Пеняков, Е. И. Жуковский и др.) выполнили ряд исследований, сыгравших большую роль в развитии мировой алюминиевой промышленности. Под руководством П. П. Федотьева были проведены глубокие исследования теоретических основ электролитического способа получения алюминия, в частности были исследованы двойные системы фторида алюминия — фторид натрия, криолит-глинозем, явления растворимости алюминия в электролите, анодный эффект, а также ряд других процессов, связанных с электролизом криолито-глиноземных расплавов. Результаты этих исследований получили мировую известность¹⁰.

В 1882–1892 гг. австрийский химик К. Й. Байер разработал в России щелочной способ получения глинозема, который и в XXI в. является основным в мировой алюминиевой промышленности. В 1895 г. Д. А. Пеняков предложил способ получения глинозема из бокситов спеканием с сульфатом натрия в присутствии угля, а А. Н. Кузнецов и Е. И. Жуковский в 1915 г. — способ получения глинозема из низкосортных руд путем восстановительной плавки их на шлаки алюминатов щелочноземельных металлов. Н. А. Пушкин с сотрудниками в 1914 г. впервые в нашей стране получил алюминий «русского происхождения», то есть из отечественного сырья и материалов.

Построенная в соответствии с этим планом в 1926 г. первая крупная гидроэлектростанция на р. Волхов явилась энергетической базой первого в СССР Волховского алюминиевого завода. В декабре 1927 г. XV съезд ВКП(б) принял

⁹ Белецкий В. М. Алюминиевые сплавы : Состав, свойства, технология, применение : справочник. — М., 2005; Напалков В. И. Непрерывное литье алюминиевых сплавов. — М., 2005.

¹⁰ Борисоглебский Ю. В. Металлургия алюминия.

решение о создании алюминиевой промышленности, а в августе 1929 г. Совет труда и обороны принял решение о строительстве в СССР Волховского и Днепровского алюминиевых заводов. В 1929 г. на Ленинградском опытном заводе «Красный выборжец» под руководством П. П. Федотьева были проведены длительные производственные испытания по получению алюминия электролитическим путем из отечественных материалов.

В 1930 г. в Ленинграде был пущен опытный завод, который сыграл большую роль в развитии советской алюминиевой промышленности. На этом заводе испытывалось оборудование, осваивался технологический режим, готовились рабочие и инженерно-технические кадры для первых советских алюминиевых заводов. Одновременно были проведены исследования по производству электродных изделий, необходимых для получения алюминия. Результаты этих исследований легли в основу проектирования первых электродных заводов — Московского и Днепровского. Разработанный в Институте прикладной минералогии способ получения криолита был положен в основу проектирования производства криолита на Полевском криолитовом заводе.

В 1931 г. были созданы Государственный всесоюзный институт по легким металлам (НИИСалюминий) и проектный институт «Гипроалюминий». Позднее НИИСалюминий и «Гипроалюминий» были объединены в единый Всесоюзный алюминиево-магниевого институт (ВАМИ).

Как свидетельствуют историки, 14 мая 1932 г. в 15 ч 45 мин на Волховском заводе был получен первый советский алюминий. Эта дата стала днем рождения всей алюминиевой отрасли. Уже через два года наша страна полностью прекратила импорт этого стратегического металла, а к началу Великой Отечественной войны Советский Союз по выпуску алюминия вышел на одно из первых мест в мире. Промышленность отрасли бурно развивалась, создавались новые предприятия, но Волховский алюминиевый по-прежнему вносил существенный вклад в объемы производства¹¹.

Всесоюзный алюминиево-магниевого институт (ВАМИ) — это проектный и исследовательский институт, в 70–80-е гг. прошлого столетия не имевший аналогов в мире. По проектам ВАМИ построены практически все глиноземные и алюминиевые заводы на территории СССР, а также предприятия за рубежом.

Важным достижением советской геологии стало открытие бокситов на Урале. Это позволило создать в стране ряд крупнейших глиноземно-алюминиевых заводов (Уральский, Богословский, Новокузнецкий) и развить отечественное производство алюминия. Главные месторождения бокситов сосредоточены в Свердловской области среди палеозойских отложений Тагильского (Зеленокаменного) синклинория¹².

¹¹ Там же.

¹² *Архипова Н. П.* Как были открыты Уральские горы : очерки по истории открытия и изучения природы Урала. — Свердловск, 1990.

В 1929 г. в Алапаевском и Режевском районах этой области геолог Н. И. Архангельский открыл небольшие залежи бокситов в континентальных отложениях мезозоя. Через год месторождения железистых бокситов были найдены и в Каменском районе Свердловской области (Колчеданское, Бурнинское, Борисовское; там же в 1932 г. — Соколовское).

Более крупные открытия относятся к 1931 г. Просматривая в течение ряда лет образцы руд, хранящиеся в Федоровском музее г. Краснотурьинска (теперь Краеведческий музей — филиал Свердловского краеведческого музея), уральский геолог Н. А. Каржавин установил, что «убогие железные руды», изученные в конце прошлого столетия Е. С. Федоровым и признанные им непригодными к эксплуатации, в действительности представляют собой бокситовую руду с высоким содержанием окиси алюминия.

Через год в этом районе начались поисковые работы. Первое разведанное месторождение получило название «Красная Шапочка» за красный цвет породы, выходящей на поверхность (рудники Южный — главное рудное поле, Второй и Третий — Северные). Накануне Великой Отечественной войны в северном направлении от главного рудного поля были открыты Кальинское, Черемуховское, а затем Сосьвинское месторождения, образующие единый Северо-Уральский бассейн (предприятие СУБР — «Севуралбокситруда»).

Месторождение связано с известняками силура и девона, среди них имеются так называемые диаспоровые бокситы, содержащие до 54 % глинозема и лишь 2–5 % кремнезема. В годы Великой Отечественной войны уральские бокситы СУБРа обеспечивали производство алюминия на всех основных заводах страны.

По качеству североуральские бокситы — одни из лучших в стране: они высокоглиноземисты и однородны по составу. Серьезные трудности создает большая обводненность рудных полей, приуроченных к закарстованным известнякам, а также то, что их надо добывать шахтным способом с больших глубин.

В 1935 г. на западном склоне Южного Урала, между реками Ай и Юрюзань, А. К. Белоусов открыл Южно-Уральское месторождение бокситов, также использующихся в промышленности (предприятие ЮБР — Южно-Уральский бокситовый рудник). Бокситы здесь связаны с породами верхнего девона. Наиболее крупное из месторождений — Ново-Пристанское, бокситы которого богаты глиноземом и содержат до 6–12 % кремнезема, что отличает его от месторождений СУБР. За последние 25–30 лет границы ЮБР расширены Блиновско-Каменским, Кургазакским и другими месторождениями.

Большой вклад в изучение уральских бокситов внесли Д. Н. Наливкин, А. В. Пейве, Н. А. Каржавин, О. А. Ткаченко, Е. С. Гуткин, А. К. Белоусов, И. Г. Можжерин, И. И. Плотников, А. Н. Ходаевич и другие уральские геологи.

В таблице 6 представлены основные вехи в развитии отрасли, оказавшие на нее наиболее значимое влияние: открытия, изобретения, патенты, проекты.

Таблица 6. Развитие отрасли – основные события

Дата	Событие
1808 г.	Метод электролиза Английский химик и физик сэр Гемфри Дэви, получивший методом электролиза такие новые химические элементы, как бор, калий, натрий, барий, кальций, магний и стронций, установил, что этим же путем из глинозема можно получить новый металл. Он дал ему название алюминий
1821 г.	Открытие бокситов На юге Франции были обнаружены залежи глинистой красноватой породы, ставшей впоследствии основным сырьем для производства алюминия. Открытие принадлежит геологу Пьеру Бертье. Порода получила название по местности, где была найдена, – Les Baux (bauxite, боксит)
1825 г.	Первое получение алюминия На заседании Датской академии наук 25 марта датский физик Ханс Кристиан Эрстед объявил об успешном получении алюминия методом электролиза и 8 апреля продемонстрировал полученный им металл. Достоверно неизвестно, был ли это чистый алюминий либо его сплав с другими элементами, задействованными в опытах
1845 г.	Опыты Вёлера Немецкий химик Фридрих Вёлер продолжил опыты Эрстеда. Спустя 20 лет ему удалось получить алюминий в виде небольших шариков застывшего расплавленного металла. Это был не чистый алюминий, а его сплав со ртутью, калием и платиной
1854 г.	Электролитический способ Сент-Клер Девиль и немецкий химик Роберт Вильгельм Бунзен одновременно и независимо друг от друга разработали метод получения чистого алюминия электролитическим способом. Кому принадлежит первенство открытия, не установлено, так как Бунзен раньше опубликовал отчет о результатах работы, а Девиль первым представил образцы полученного материала
1856 г.	Драгоценный алюминий Похожий на серебро, легкий и дорогой, алюминий в первое время считался элитным материалом. Из него изготавливались украшения и предметы искусства. Первыми изделиями из алюминия считаются медали с барельефами Наполеона III, а также погремушка наследного принца Луи-Наполеона
	Производство алюминия Первое промышленное производство алюминия химическим способом организовал Сент-Клер Девиль совместно с Мораном и братьями Руссо на заводе Шарля и Александра Тиссье в Руане (Франция)
1858 г.	Первая книга об алюминии Братья Тиссье опубликовали книгу «Исследования алюминия», опередив аналогичную работу Сент-Клер Девиля, что стало для него неожиданностью. Ему в спешном порядке пришлось завершить свой труд, который он назвал «Алюминий»
1865 г.	«С Земли на Луну» Французский писатель Жюль Верн в своем научно-фантастическом романе описывает первое путешествие людей на Луну внутри вагона-снаряда, выполненного из алюминия

Таблица 6 (продолжение)

Дата	Событие
1867 г.	Продукция из алюминия На Парижской выставке были представлены алюминиевая проволока и фольга. Здесь же впервые экспонировался новый сплав — алюминиевая бронза.
1886 г.	Метод Холла – Эрү Электролитический способ получения алюминия в промышленных масштабах был изобретен одновременно двумя учеными из разных стран и почти одновременно ими запатентован. Это были французский металлург Поль Луи-Туссен Эрү и американский инженер-химик Чарльз Мартин Холл.
1888 г.	Завод Холла В Кенсингтоне близ Питтсбурга (США) был запущен алюминиевый завод, принадлежавший Чарльзу Холлу и его партнерам, на котором использовался разработанный им электролитический способ получения алюминия. В первые месяцы он производил примерно по 22,5 кг металла в сутки, а в 1890 г. — уже по 240 кг. Эта компания называлась Pittsburg Reduction Company, а впоследствии была переименована в Aluminum Company of America, или Alcoa.
1889 г.	Метод Байера Австрийский химик Карл Йозеф Байер, работая в Санкт-Петербурге на Тен-телевском заводе, изобрел метод получения глинозема — оксида алюминия Al_2O_3 — из щелочного раствора. Сегодня 90 % глинозема в мире производится методом Байера.
	Завод Эрү Во Франции, в местечке Фроже близ Гренобля, в долине реки Изер, в апреле был запущен алюминиевый завод, возглавить который Национальное электрометаллургическое общество Франции предложило лично Эрү. К концу года предприятие перешло на выпуск чистого алюминия электролитическим способом.
1891 г.	Алюминиевая посуда Началось широкое производство посуды из алюминия — она почти полностью вытеснила медную и чугунную. Алюминиевые кастрюли и сковородки легкие, быстро нагреваются и остывают, не ржавеют.
	Энергия воды Завод Холла был перенесен в Новый Кенсингтон, неподалеку от Питтсбурга, где на реке Аллегейни была запущена гидроэлектростанция. В 1893 г. завод выпускал по 500 кг алюминия в сутки, в следующем году — в два раза больше.
1893 г.	Алюминий в судостроении По заказу Альфреда Нобеля из алюминия частично сделан пассажирский катер Le Migron.
	Алюминиевая скульптура На площади Пикадилли в Лондоне открыта статуя древнегреческого бога Антэроса, автор которой — скульптор Альфред Гилберт. Фигура выполнена из алюминия и считается первой крупной работой из этого металла. Ее высота составляет 2,4 м, а размах крыльев — 1,8 м, при этом вес — всего 190,5 кг.
1894 г.	Алюминий на железной дороге Железнодорожная компания New York, New Haven, and Hartford Railroad, принадлежавшая банкиру Джону Пирпонту Моргану, начала выпускать специальные легкие пассажирские вагоны, сиденья которых были выполнены из алюминия.

Таблица 6 (продолжение)

Дата	Событие
1899 г.	Первый алюминиевый автомобиль На выставке в Берлине Карл Бенц представил первый спортивный автомобиль, корпус которого был выполнен из алюминия.
1902 г.	Образование компании Alcan Образована Северная алюминиевая компания (Northern Aluminum Company) – канадское подразделение Pittsburg Reduction Company (Alcoa). В 1925 г. она была переименована в Алюминиевую компанию Канады (Aluminum Company of Canada), или Alcan, и полностью отделилась от Alcoa в 1928 г.
1903 г.	Первый самолет Американцы братья Райт впервые в истории человечества совершили полет на управляемом летательном аппарате «Флайер-1». Чтобы поднять его в воздух, был специально разработан новый легкий 13-сильный двигатель, детали которого, в т. ч. блок цилиндров, были отлиты из алюминия.
1907 г.	Алюминиевая фольга Роберт Виктор Неер изобрел способ получения алюминиевой фольги методом непрерывной прокатки. В 1910 г. он вместе со своими сыновьями и партнером запустил первый фольгопрокатный завод в Швейцарии. Алюминиевая фольга полностью заменила применявшуюся до нее оловянную фольгу.
1909 г.	Дюралюминий Немецкий материаловед Альфред Вильм после семи лет напряженных поисков получил алюминиевый сплав, который обладал такой же плотностью, как и сам алюминий, то есть был настолько же легким, но при этом значительно превосходил его по твердости, прочности и упругости. Он был назван дюралюминием и содержал медь, магний и марганец.
1910 г.	Алюминий в коммерческом автотранспорте Алюминий был впервые использован в городском общественном транспорте при изготовлении парижских автобусов.
1911 г.	Шоколад в фольге Швейцарская компания Tobler впервые использовала для упаковки шоколада алюминиевую фольгу. В нее, в частности, был упакован и знаменитый треугольный Toblerone.
1917 г.	Самолет Юнкерса Знаменитый немецкий авиаконструктор Хуго Юнкерс поднял в воздух первый цельнометаллический самолет, фюзеляж которого был выполнен из дюралюминия.
1920 г.	ГОЭЛРО В России создана Государственная комиссия по электрификации, которая занималась реализацией плана электрификации страны. План подразумевал строительство целого ряда ГЭС в связке с алюминиевыми заводами. Впоследствии план ГОЭЛРО позволил СССР выйти в лидеры мирового алюминиевого рынка.
	Технология Содерберга Группа ученых под руководством норвежца Карла Вильгельма Содерберга изобретает новую технологию производства алюминия с использованием постоянно возобновляемых анодов. Она существенно удешевила метод Холла – Эру и позволила значительно увеличить объемы производства алюминия в мире.

Таблица 6 (продолжение)

Дата	Событие
1931 г.	<p>Empire State Building 11 апреля в Нью-Йорке построен небоскреб Empire State Building, ставший первым зданием, в строительстве которого широко использовался алюминий. Одна из визитных карточек здания — фреска на потолке и стенах его лобби — выполнена из алюминия и 23-каратного золота.</p>
	<p>Грузовые вагоны из алюминия Первые хопперы — грузовые вагоны для перевозки сыпучих и гранулированных грузов, кузов которых имеет форму воронки с люками для разгрузки в донной части, — полностью выполненные из алюминия, были выпущены в США.</p>
1932 г.	<p>Промышленное производство алюминия в России В России запущено первое промышленное производство алюминия электролитическим способом — на Волховском алюминиевом заводе, построенном за два года рядом с Волховской ГЭС.</p>
1934 г.	<p>M-10000 Американская железнодорожная компания Union Pacific выпустила первый в мире состав M-10000, полностью изготовленный из алюминия.</p>
1939 г.	<p>Турбореактивный двигатель Совершен первый полет самолета с турбореактивным двигателем. Им стал немецкий Heinkel He 178. Его максимальная скорость составляла 700 км/ч. Впоследствии турбореактивные двигатели стали основным типом двигателей в гражданской и военной авиации.</p>
1948 г.	<p>Первый Land Rover Началось производство автомобилей семейства Land Rover. Первая модель, получившая название Series I, имела полностью алюминиевый кузов, что позволяло сократить вес машины и получить устойчивость к коррозии.</p>
1950 г.	<p>Первые автоцистерны Началось массовое производство автоцистерн из алюминиевых сплавов для перевозки нефтепродуктов, сыпучих грузов и сжиженных газов.</p>
1952 г.	<p>Первая алюминиевая оранжерея (Дом эволюции) Оранжерея в Королевских ботанических садах Кью в Лондоне была преподнесена в подарок австралийским правительством. Она полностью выполнена из алюминиевого профиля и стекла, что сделало ее легкой и полностью устойчивой к коррозии. Она оснащена системой вентиляции, а также интегрированной системой очистки, включающей в себя специальные спреи внутри и полозья для крепления лестниц снаружи.</p>
	<p>Алюминиевый фасад 9 октября завершено строительство 39-этажного здания штаб-квартиры Организации Объединенных Наций в Нью-Йорке. В проекте здания впервые в мире был применен светопрозрачный фасад из стекла и алюминиевого профиля.</p>
1957 г.	<p>Спутник В СССР запущен первый искусственный спутник Земли. Его корпус полностью выполнен из алюминиевого сплава, а общая масса составляла 83,6 кг.</p>

Таблица 6 (продолжение)

Дата	Событие
1958 г.	<p>Климатрон В Ботаническом саду Миссури в Сент-Луисе (США) был построен первый климатрон — помещение, которое позволяет воспроизвести климатические условия определенной географической зоны. Он был построен в форме геодезического купола диаметром 53 м, несущую функцию которого выполнял каркас из алюминиевых труб. При этом у него нет никакой внутренней поддержки.</p>
	<p>Алюминиевая банка В США была изобретена алюминиевая банка. По одной из версий, авторство принадлежит компании Kaiser Aluminum, которая адаптировала производство банок из жести под алюминий, по другой — пивоваренной компании Coogs, которая начала разливать в них пиво, а также организовала сбор использованных банок для переработки.</p>
1962 г.	<p>Гонки «Индианаполис 500» Легендарный гонщик Микки Томпсон участвовал в гонках «Индианаполис 500» на машине с двигателем из алюминия и показал превосходный результат.</p>
1964 г.	<p>Красноярский алюминиевый завод В СССР пущен в эксплуатацию Красноярский алюминиевый завод, ставший впоследствии одним из крупнейших алюминиевых предприятий в мире.</p>
	<p>Yoyogi National Gymnasium К XVIII летним Олимпийским играм в Токио был построен спортивный комплекс Yoyogi National Gymnasium с самой большой в мире подвесной крышей. Она была выполнена из листов алюминия. Комплекс вмещает свыше 13 тыс. человек и предназначен для проведения соревнований по плаванию, прыжкам в воду, баскетболу, хоккею и мини-футболу.</p>
	<p>Shinkansen В Японии был запущен первый в мире высокоскоростной поезд. Он курсировал между Токио и Осакой и преодолевал расстояние в 515 км за 3 часа 10 минут, разгоняясь до 210 км/ч. При производстве высокоскоростных поездов алюминий стал одним из ключевых материалов.</p>
1966 г.	<p>Братский алюминиевый завод Спустя всего два года после открытия КраЗа в СССР запускается второй гигант — Братский алюминиевый завод. После выхода на полную мощность КраЗ и БраЗ станут крупнейшими в мире алюминиевыми заводами, выпускающими более 1 млн т металла в год каждый.</p>
1967 г.	<p>Coca-Cola и Pepsi Компании Coca-Cola и Pepsi начинают разливать свои напитки в алюминиевые банки.</p>
1969 г.	<p>Основание Airbus В Европе основана компания Airbus в виде консорциума европейских авиаперевозчиков. Ее основная цель — конкуренция с такими компаниями, как Boeing, McDonnell and Lockheed. В результате Airbus наряду с Boeing станет одним из крупнейших авиапроизводителей в мире.</p>

Таблица 6 (продолжение)

Дата	Событие
1970 г.	Boeing 747 Первый в мире широкофюзеляжный пассажирский самолет совершил свой первый коммерческий полет в составе авиакомпании Pan American. Появление широкофюзеляжного самолета стало новым этапом в мировой авиации. Его салон обладает существенно большей вместимостью, поскольку позволяет разместить три ряда сидений с двумя проходами между ними. Boeing 747 позволяет перевозить до 660 пассажиров. В одном самолете используется более 66 т алюминия.
1972 г.	Международный алюминиевый институт Создан Международный институт алюминия (IAI), членами которого стали производители бокситов, глинозема и алюминия, а также компании, занимающиеся переработкой алюминия и выпуском алюминиевой продукции. Институт занимается вопросами изучения и развития мировой алюминиевой отрасли.
1976 г.	Алюминиевый грузовик Швейцарская промышленная группа Alusuisse представила прототип грузовика – алюминий использовался в его конструкции практически в каждой детали, включая шасси. Сегодня все прицепы и полуприцепы для грузовиков и магистральных тягачей производятся полностью из алюминия.
1978 г.	Алюминий – биржевой товар Торги контрактами на алюминий стартовали на Лондонской бирже металлов (LME), крупнейшей в мире бирже по торговле недрагоценными металлами.
1979 г.	Dubal Запущено производство на алюминиевом заводе Dubal компании Dubai Aluminium. Впоследствии Dubal станет одним из крупнейших алюминиевых заводов в мире, производящим 1 млн т металла в год.
1981 г.	Поезд TGV Между Парижем и Лионом запущен первый высокоскоростной поезд проекта TGV, ставший сначала основой для французской, а затем и общеевропейской сети скоростных электропоездов.
1994 г.	Audi A8 Компания Audi выпустила новую модель A8, которая стала флагманской в линейке немецкого производителя, а также первым серийным автомобилем в мире с полностью алюминиевым кузовом.
1996 г.	Произведено 20 млн т Годовое производство алюминия в мире впервые превысило 20 млн т. Крупнейшими поставщиками металла являются Северная Америка, страны Европы, а также Россия, на которую приходится 14 % всего рынка.
1998 г.	Международная космическая станция На орбиту Земли запущен первый компонент международной космической станции – крупнейшего искусственного спутника нашей планеты. Большая часть конструкций станции была выполнена из алюминиевых сплавов.
2000 г.	Образование «РУСАЛ» В России образована компания «Русский алюминий», или «РУСАЛ», которая объединила алюминиевые и глиноземные активы компаний «Сибирский алюминий» и Millhouse Capital (основу последней составляло ОАО «Сибирско-Уральская алюминиевая компания», сокращенное наименование ОАО «СУАЛ»). Впоследствии «РУСАЛ» станет крупнейшим в мире производителем алюминия.

Таблица 6 (продолжение)

Дата	Событие
2005 г.	<p>Orkla покупает компанию SAPA Норвежский конгломерат Orkla Group купил компанию SAPA — один из крупнейших производителей алюминиевых профилей в мире. Orkla на тот момент уже являлась владельцем 50% акций норвежского производителя алюминия Elkem, материнской компании SAPA.</p>
2006 г.	<p>«РУСАЛ» запустил ХАЗ В России пущен в эксплуатацию Хакасский алюминиевый завод мощностью 300 тыс. т алюминия в год — первый завод по выпуску алюминия, построенный в стране после распада СССР.</p>
	<p>Проект БЭМО В России началось создание крупнейшего в мире энергометаллургического кластера, который получил название «Проект БЭМО». Он включает в себя завершение строительства законсервированной Богучанской гидроэлектростанции на 3 ГВт и строительство нового Богучанского алюминиевого завода мощностью около 600 тыс. т алюминия в год.</p>
2007 г.	<p>Китай производит треть алюминия в мире По итогам 2007 г. производство алюминия в Китае достигло 12,5 т, что составило треть от общемирового объема в 38 млн т.</p>
	<p>Rio Tinto Alcan Британо-австралийская горно-металлургическая компания Rio Tinto выиграла борьбу за канадского производителя алюминия Alcan, в которой также участвовали Alcoa и бразильская Vale. Rio Tinto направила на эту сделку рекордную сумму — 38,1 млрд долл. Цены на алюминий в тот момент были на самом высоком за 20 лет уровне.</p>
	<p>Apple iPhone Американская компания Apple вышла на рынок мобильных телефонов с первой моделью iPhone. Корпус смартфона выполнен из алюминия, стали, стекла и пластика. Apple iPhone станет самым продаваемым в мире сотовым телефоном, а также одним из символов применения алюминия в потребительских товарах.</p>
	<p>Alcoa и SAPA создают совместное предприятие Alcoa и норвежский конгломерат Orkla, владеющий компанией SAPA, объединили свои экструзионные бизнесы и создали совместное предприятие. В результате сделки SAPA стала крупнейшим производителем алюминиевых профилей в мире.</p>
2008 г.	<p>«РУСАЛ», «СУАЛ» и Glencore объединили активы Завершена сделка по объединению бокситовых, глиноземных и алюминиевых активов компаний «РУСАЛ», «СУАЛ» и швейцарской Glencore. В состав образованной в результате слияния Объединенной компании «РУСАЛ» вошли 4 предприятия по добыче бокситов, 10 глиноземных и 14 алюминиевых заводов, а также 3 фольгопрокатных предприятия. Активы компании расположены на 5 континентах в 17 странах мира. ОК «РУСАЛ» становится крупнейшим производителем алюминия в мире.</p>
	<p>Исторический максимум цены на алюминий Цена на алюминий в ходе торгов на Лондонской бирже металлов 11 июля достигла исторического максимума — 3291,5 долл. за тонну. Всего через шесть месяцев, в феврале 2009 г., она опустилась до 1253 долл. за тонну.</p>

Таблица 6 (продолжение)

Дата	Событие
2008 г.	<p>Alcoa выходит из SAPA В результате обмена активами между норвежской Orkla и американской Alcoa единственным владельцем 100% акций SAPA стала компания Orkla. Alcoa в свою очередь стала владельцем алюминиевого завода Elkem – второго по величине в Норвегии.</p>
	<p>Алюминиевый MacBook Компания Apple выпустила новое поколение своих ноутбуков MacBook, которое отличалось от предшественников принципиально новой конструкцией. Весь корпус представлял собой одну единственную деталь, выполненную из алюминия, – Unibody. Это позволило в разы упростить конструкцию, а также облегчить и сделать значительно тоньше весь ноутбук.</p>
	<p>Мировой финансовый кризис Кризис привел к резкому падению спроса на все сырьевые товары, включая алюминий, во всех отраслях промышленности. Цена на алюминий обрушилась с 3200 до 1250 долл. за тонну, производители металла не могли сбыть свой товар и начали работать «на склад», где скопилось более 5 млн т металла. Начался затяжной тяжелый период для всей алюминиевой индустрии.</p>
2009 г.	<p>Alcoa и Ma'aden Американская Alcoa и горнодобывающая компания Ma'aden (Саудовская Аравия) объявили о создании совместного предприятия с долями 25,1 и 74,9% соответственно. Оно представляет собой полностью интегрированный комплекс, включающий в себя бокситовый рудник, глиноземный и алюминиевый заводы, а также завод по производству алюминиевого проката. Объем капитальных инвестиций в СП оценивался в размере 10,8 млрд долл.</p>
2010 г.	<p>OK «РУСАЛ» проводит IPO Российская Объединенная компания «РУСАЛ» провела первичное публичное размещение своих акций (IPO). В качестве площадки была выбрана Гонконгская фондовая биржа, занимающая шестое место в мире по капитализации. В ходе IPO компания привлекла более 2,2 млрд долл. инвестиций.</p>
2012 г.	<p>HKEx покупает LME Гонконгский биржевой оператор Hong Kong Exchanges & Clearing (HKEx) купил Лондонскую биржу металлов (LME) – старейшую в мире биржу, торгующую базовыми металлами. Сумма сделки составила 1,4 млрд ф. ст. (2,2 млрд долл.).</p>
	<p>Tesla Model S Начались продажи электромобиля Model S производства американской компании Tesla, созданной в 2003 г. В автомобиле широко применяется алюминий: из него выполнены кузов, защита аккумуляторного отсека и другие компоненты.</p>
	<p>Первый алюминиевый внедорожник Компания Land Rover представила новое поколение своего внедорожника класса SUV – Range Rover. Он стал первым автомобилем в своем классе с полностью алюминиевым кузовом. Благодаря этому его вес, относительно предшественника, сократился на 420 кг – средний вес пяти взрослых людей.</p>

Таблица 6 (окончание)

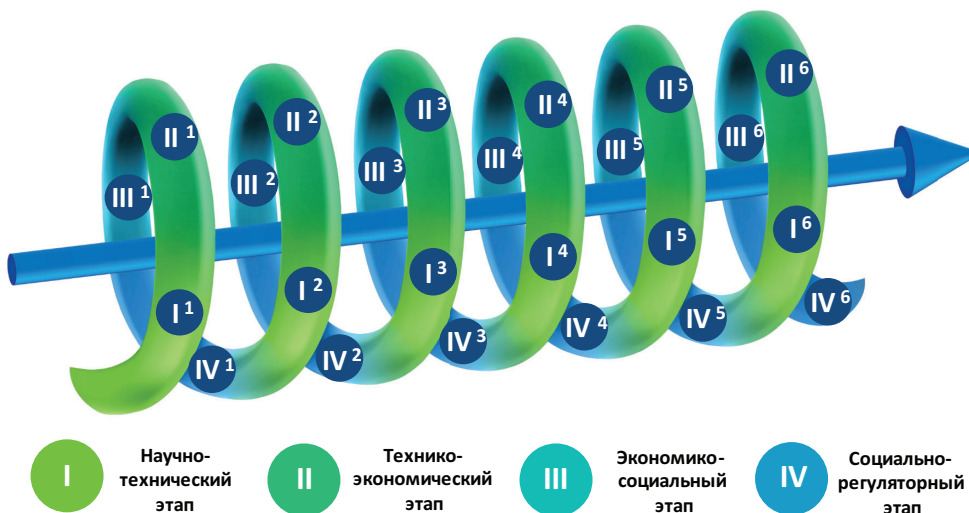
Дата	Событие
2013 г.	<p>Hydro и Orkla создают СП Норвежский производитель алюминия Norsk Hydro и конгломерат Orkla, владеющий производителем алюминиевых профилей SAPA, объединяют свои экструзионные бизнесы. Совместное предприятие сохраняет название SAPA и становится крупнейшим в мире производителем экструзионных алюминиевых продуктов.</p>
	<p>Слияние Dubal и Emal Правительство Дубая и Абу-Даби объявили о слиянии компаний Dubai Aluminium и Emirates Aliminium и образовании Emirates Global Aliminium. В результате сделки EGA становится пятым по размеру алюминиевым производителем в мире с мощностью свыше 2,3 млн т металла в год.</p>
	<p>Rio Tinto списывает активы Alcan Компания была вынуждена списать большую часть активов Alcan на общую сумму около 25 млрд долл. Напомним, что в 2007 г. Rio Tinto купила Alcan за рекордную сумму на пике алюминиевого рынка. Случившийся в 2008 г. кризис обрушил цены на алюминий на 50 %, что сделало инвестиции Rio Tinto невыгодными.</p>
	<p>Произведено 50 млн т По итогам года объем мирового производства алюминия в мире впервые превысил 50 млн т. При этом производство металла в Китае достигло 50 % мирового уровня.</p>
2014 г.	<p>Alcoa покупает Firth Rixson Алюминиевая компания Alcoa купила компанию Firth Rixson (Великобритания) — производителя компонентов для авиационных двигателей за 2,85 млрд долл.</p>
	<p>CME начинает торги Чикагская товарная биржа (CME) начала торговлю алюминием. Преимущественно контракты на CME нацелены на североамериканский рынок.</p>
	<p>Ford F-150 Самый популярный на протяжении 38 лет пикап в США получил полностью алюминиевый кузов. Благодаря этому он стал легче сразу на 315 кг.</p>
2015 г.	<p>Alcoa покупает RTI Компания Alcoa продолжает усиливать свое присутствие в downstream-сегменте алюминиевой отрасли и объявляет о покупке RTI International Metals, одного из крупнейших в мире поставщиков титановой продукции для аэрокосмической и автомобильной индустрии. Сумма сделки составила 1,26 млрд долл.</p>
	<p>Apple Watch Американская компания Apple начала продажи своих первых смарт-часов Watch. Линейка состоит из трех моделей часов: с корпусом из стали, из золота и из анодированного алюминиевого сплава 7000-й серии.</p>

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Развитие алюминиевой промышленности происходило благодаря постоянно растущему спросу на алюминий, обусловленному технологическим прогрессом и развитием промышленности. По этой причине технологические циклы становления алюминиевой промышленности можно соотнести с основными циклами развития мировой промышленности (табл. 7 и 8, рис. 5).

Таблица 7. Характеристика технологических циклов развития алюминиевой промышленности

Период, годы	Цикл	Основные области применения алюминия	Технологические лидеры
1808–1885	Первый Открытие алюминия	Украшения, предметы искусства, посуда	Великобритания, Германия, Франция, Дания
1886–1925	Второй Получение алюминия электролизом	Судостроение, скульптуры, железнодорожный транспорт	Франция, Швейцария, США, СССР
1925–1970	Третий Получение алюминия электролизом с использованием технологии самообжигающегося анода Содерберга	Судостроение, скульптуры, железнодорожный транспорт, авиация	Норвегия, Франция, Швейцария, США, СССР
1970–2000	Четвертый Широкое применение алюминия, переход на технологию обожженного анода	Судостроение, железнодорожный транспорт, автомобилестроение, авиация, космос, строительство	Франция, Норвегия, Канада, Швейцария, США, СССР
2000–2015	Пятый Получение алюминия с минимизацией затрат, электроэнергии и с минимизацией выбросов и отходов	Судостроение, железнодорожный транспорт, автомобилестроение, авиация, космос, строительство	США, Канада, Австралия, страны ЕС, Китай, Россия, Арабские Эмираты
2015 – по настоящее время и будет продолжаться	Шестой Опытно-промышленные разработки в области инертных анодов и дренируемых катодов	Судостроение, железнодорожный транспорт, автомобилестроение, авиация, космос, строительство	США, Канада, Австралия, страны ЕС, Китай, Россия, Арабские Эмираты



- I¹** – получение алюминия химическими методами из глинозема
- II¹** – совершенствование химических методов выделения алюминия
- III¹** – рост потребления алюминия
- IV¹** – высокая трудоемкость производства, высокая цена
- I²** – получение алюминия методом электролиза
- II²** – применение дешевых и достаточно мощных источников электроэнергии
- III²** – начало роста потребления в различных отраслях промышленности
- IV²** – усовершенствование электротехники, разработка новых способов извлечения глинозема
- I³** – внедрение технологии Содерберга
- II³** – снижение себестоимости производства, начало производства алюминиевых сплавов
- III³** – рост потребления алюминия
- IV³** – алюминий перестает быть драгоценным металлом и начинает массово применяться
- I⁴** – широкое применение алюминия, переход на технологию обожженного анода
- II⁴** – толчок для развития новых отраслей промышленности
- III⁴** – рост потребления алюминия
- IV⁴** – ужесточения природоохранного законодательства, отказ от неэкологичных технологий
- I⁵** – утилизация тепла, выделяемого при электролизе, переработка и использование отходов производства глинозема и алюминия
- II⁵** – снижение производства углеродных электродов, уменьшение выбросов парниковых газов, сокращение расхода электроэнергии
- III⁵** – законодательное регулирование вовлечения в производство отходов производства глинозема и алюминия
- IV⁵** – ужесточения природоохранного законодательства, отказ от неэкологичных и ресурсо-неэффективных технологий
- I⁶** – использование инертных анодов и дренируемых катодов
- II⁶** – сокращение производства углеродных электродов, сокращение выбросов парниковых газов
- III⁶** – развитие высокотехнологичных наукоемких производств для обеспечения «зеленых» технологий
- IV⁶** – ужесточение природоохранного законодательства, отказ от неэкологичных и ресурсо-неэффективных технологий

Рис. 5. Эволюция технологий производства алюминия

Таблица 8. Основные факторы циклов развития алюминиевой промышленности

Цикл	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономико-социальный этап	Социально-регуляторный этап
Первый	Получение алюминия химическими методами из глинозема	Совершенствование химических методов выделения алюминия	Рост потребления алюминия	Высокая трудоемкость производства алюминия, высокая цена
Второй	Получение алюминия методом электролиза	Применение дешевых и достаточно мощных источников электроэнергии	Начало роста потребления алюминия в различных отраслях промышленности	Усовершенствование электротехники, а также разработка новых способов извлечения глинозема
Третий	Внедрение технологии Содерберга	Снижение себестоимости производства алюминия. Начало производства алюминиевых сплавов	Рост потребления алюминия в различных отраслях промышленности	Алюминий перестает быть драгоценным металлом и начинает массово применяться
Четвертый	Широкое применение алюминия, переход на технологию обожженного анода	Толчок для развития новых отраслей промышленности	Рост потребления алюминия в различных отраслях промышленности	Ужесточение природоохранного законодательства, отказ от неэкологических технологий
Пятый	Утилизация тепла, выделяемого при электролизе, переработка и использование отходов производства глинозема и алюминия	Снижение производства углеродных электродов, уменьшение выбросов парниковых газов, сокращение расхода электроэнергии	Законодательное регулирование вовлечения в производство отходов производства глинозема и алюминия	Ужесточение природоохранного законодательства, отказ от неэкологических и ресурсо-неэффективных технологий
Шестой	Использование инертных анодов и дренируемых катодов	Сокращение производства углеродных электродов, сокращение выбросов парниковых газов	Развитие высокотехнологичных наукоемких производств для обеспечения «зеленых» технологий	

Первый цикл — открытие алюминия и получение алюминия химическими методами. Получаемый металл походил на серебро, был легким и при этом дорогим, поэтому алюминий считался элитным материалом, предназначенным для изготовления украшений и предметов роскоши. Однако уже тогда было понятно, что будущее алюминия связано отнюдь не с ювелирным делом.

Второй цикл — получение алюминия электролизом (метод Холла — Эру). Ситуация изменилась с открытием более дешевого электролитического способа производства алюминия в 1886 г. Предложенный одновременно и независимо друг от друга П. Эру и Ч. Холлом метод подразумевал электролиз расплавленной в криолите окиси алюминия и давал прекрасные результаты, но требовал большого количества электроэнергии. Поэтому свое первое производство Эру организовал на металлургическом заводе в Нейгаузене (Швейцария), рядом со знаменитым Рейнским водопадом, сила падающей воды которого приводила в действие динамо-машины предприятия.

18 ноября 1888 г. между Швейцарским металлургическим обществом и немецким промышленником Э. Ратенау было подписано соглашение об учреждении в г. Нейгаузене Акционерного общества алюминиевой промышленности (позднее — Общество алюминиевых заводов) с общим капиталом в 10 млн швейцарских франков. На его торговой марке было изображено солнце, восходящее из-за алюминиевого слитка, что должно было, по замыслу Ратенау, символизировать зарождение алюминиевой промышленности. За пять лет производительность завода возросла более чем в 10 раз. Если в 1890 г. в Нейгаузене было выплавлено всего 40 т алюминия, то в 1895 г. — 450 т¹³.

Чарльз Холл, воспользовавшись поддержкой друзей, организовал Питтсбургскую восстановительную компанию, которая запустила свой первый завод в Кенсингтоне, неподалеку от Питтсбурга 18 сентября 1888 г. В первые месяцы он выпускал лишь около 20–25 кг алюминия в сутки, а в 1890-м — уже по 240 кг ежедневно.

Свои новые заводы компания расположила в штате Нью-Йорк, вблизи новой Ниагарской гидроэлектростанции. Алюминиевые заводы и в наше время строятся в непосредственной близости от мощных, дешевых и экологичных источников энергии, таких, как ГЭС.

Так за несколько десятилетий была создана алюминиевая промышленность, завершилась история о «серебре из глины», и алюминий стал новым промышленным металлом.

Третий цикл — получение алюминия электролизом с использованием технологии самообжигающегося анода Содерберга. На рубеже XIX и XX вв. алюминий стал применяться в самых разных сферах и дал толчок для развития целых отраслей.

¹³ *Thonstad J. Aluminium electrolysis; Grjothheim K. Aluminium smelter technology; Боруко-глебский Ю. В. Металлургия алюминия; Янко Э. А. Аноды алюминиевых электролизеров.* — М., 2001.

В 1891 г. по заказу Альфреда Нобеля в Швейцарии создан первый пассажирский катер Le Migron с алюминиевым корпусом. А через три года шотландская судостроительная верфь Yarrow & Co представила изготовленный из алюминия 58-метровый миноносец «Сокол» для Военно-морского флота Российской империи, развивавшая рекордную для того времени скорость 32 узла.

Но настоящую революцию алюминий совершил в авиации, за что навсегда заслужил свое второе имя — «крылатый металл». В этот период изобретатели и авиаторы во всем мире работали над созданием управляемых летательных аппаратов — самолетов.

17 декабря 1903 г. американские авиаконструкторы братья Уилбур и Орвилл Райт впервые в истории человечества совершили полет на управляемом летательном аппарате «Флайер-1» (Flyer I). Для того чтобы заставить его полететь, они попытались использовать автомобильный двигатель, однако он оказался слишком тяжелым. Поэтому специально для «Флайера-1» разработали полностью новый двигатель, детали которого были изготовлены из алюминия. Легкий 13-сильный мотор поднял первый в мире самолет с Орвиллом Райтом за штурвалом в воздух на 12 с, за которые он пролетел 36,5 м. Братья совершили еще два полета по 52 и 60 м на высоте около 3 м от уровня земли.

Мир входил в период войн, в которых авиация стала играть стратегическую, а иногда решающую роль. Поэтому дюралюминий первое время являлся военной технологией, и метод его получения держался в секрете.

Тем временем алюминий осваивал новые и новые сферы применения. Из него начали массово производить посуду, которая быстро и почти полностью вытеснила медную и чугунную утварь. Алюминиевые сковородки и кастрюли легкие, быстро нагреваются и остывают, не ржавеют.

В 1907 г. в Швейцарии Роберт Виктор Неер изобрел способ получения алюминиевой фольги методом непрерывной прокатки алюминия. В 1910 г. он уже запустил первый в мире фольгопрокатный завод.

Четвертый цикл — широкое применение алюминия, переход на технологию обожженного анода. Очередной переломный момент для алюминиевой промышленности наступает в 1920 г., когда группа ученых под руководством норвежца Карла Вильгельма Содерберга изобрела новую технологию производства алюминия, которая существенно удешевляла метод Холла — Эру. До этого в качестве анодов при электролизе использовались предварительно обожженные угольные блоки — они быстро расходовались, поэтому постоянно требовалась установка новых. Содерберг решил эту проблему с помощью постоянно возобновляемого электрода. Он формируется в специальной восстановительной камере из коксосоляной пасты и по мере необходимости добавляется в верхнее отверстие электролизной ванны¹⁴.

¹⁴ Янко Э. А. Аноды алюминиевых электролизеров.

Технология Содерберга быстро распространилась по всему миру и привела к увеличению объемов выпуска алюминия. Именно ее взял на вооружение СССР, не имевший в 1920-е гг. собственной алюминиевой промышленности. В дальнейшем развитие технологий вновь сделало применение электролизеров с обожженными анодами предпочтительными из-за отсутствия на них выбросов смолистых веществ и меньшего расхода электроэнергии. Кроме того, одним из основных преимуществ электролизеров с обожженными анодами является возможность увеличения силы тока, то есть производительности.

Еще в 1914 г. российский химик Николай Пушин писал: «Россия, потребляющая ежегодно 80 000 пудов алюминия, сама не производит ни одного грамма этого металла, и весь алюминий покупает за границей»¹⁵.

В это время алюминий активно использовался в авиации, судостроении и автомобилестроении, а также начинал свой путь в строительстве. В США в 1931 г. был построен знаменитый небоскреб Empire State Building, вплоть до 1970 г. являвшийся самым высоким зданием в мире. Это было первое здание, при строительстве которого широко использовался алюминий — как в основных конструкциях, так и в интерьере.

Вторая мировая война видоизменила основные рынки спроса на алюминий — на первый план вышла авиация, изготовление танковых и автомобильных моторов. Война подтолкнула страны антигитлеровской коалиции к увеличению объема мощностей алюминиевых производств, совершенствовалась конструкция самолетов, а вместе с ней — и виды новых алюминиевых сплавов.

В 1957 г. СССР вывел на орбиту Земли первый в истории человечества искусственный спутник — его корпус состоял из алюминиево-магниевого сплава. Все последующие космические аппараты изготавливались из «крылатого металла».

В 1958 г. в США появился алюминиевый продукт, ставший впоследствии одним из самых массовых алюминиевых товаров, символом экологичности этого металла и даже культовым предметом в области искусства и дизайна — алюминиевая банка. Ее изобретение делят между собой алюминиевая компания Kaiser Aluminum и пивоваренная Coors, которая не только первой стала продавать пиво в алюминиевых банках, но и организовала систему сбора и переработки использованных банок. В 1967 г. разливать свои напитки в алюминиевые банки начали Coca-Cola и Pepsi.

Тем временем первенство на мировом алюминиевом рынке перешла к СССР, где ударными темпами были введены в строй новые мощные гидроэлектростанции и алюминиевые заводы на территории Сибири. В середине 1960-х гг. там запущены два гиганта алюминиевой индустрии — Братский и Красноярский алюминиевые заводы мощностью по 1 млн т металла в год каждый.

Рост применения алюминия в промышленности во многом обязан внедрению технологии самообжигающегося анода Содерберга. Себестоимость

¹⁵ История алюминия // Все об алюминии.

алюминия, произведенного по технологии Содерберга, была существенно ниже, что позволяло шире использовать алюминий. Технология самообжигающегося электрода была распространена и на производство кремния, отчасти нашла применение в черной металлургии и при производстве электрокальцинированного антрацита.

Серьезным недостатком технологии самообжигающегося электрода являются весьма значительные выбросы полиароматических соединений, которые образуются при коксовании каменноугольного пека и других высокотемпературных связующих, применяемых в качестве связки в анодной или электродной массе. В силу конструктивных особенностей анода Содерберга (а также самообжигающегося электрода) сложно организовать улавливание выбросов и дожигание их при температурах около 1200° С. Постепенно мир стал переходить на использование обожженных анодов, при производстве которых дожиг полиароматических соединений можно организовать относительно легко. Вместе с тем развитие технологий обожженного анода (что невозможно рассматривать отдельно от развития технологий электролиза) привело к ощутимому снижению себестоимости производства алюминия по этим технологиям, что в конечном итоге сделало их конкурентоспособными. Мировое сообщество стало переходить на производство алюминия по технологии обожженных анодов.

Пятый цикл — получение алюминия с минимизацией затрат электроэнергии и с минимизацией выбросов и отходов. В 1970-х гг. возросшие объемы производства алюминия в мире и спрос приводят к тому, что этот металл становится биржевым товаром. Торги алюминиевыми контрактами в 1978 г. начинаются на Лондонской бирже металлов (LME) — старейшей в мире бирже, образованной в 1877 г.

Производство алюминия неуклонно растет по всему миру и к началу 1990-х гг. достигает отметки в 19 млн т. К этому моменту на глобальной экономической карте начала возрастать роль Китая, на территорию которого постепенно сместился центр мирового производства. Выпуск собственного алюминия в 1990-х гг. в Китае не превышал и 900 тыс. т в год, но начал быстро расти, обеспечивая внутренние нужды. В России алюминиевые мощности достигли уровня в 3,5 млн т ежегодно, но страна пережила распад СССР, развал экономики и вошла в фазу смены экономической модели, поэтому рост производства алюминия остановился.

Китай обогнал Россию в 2002 г., по итогам которого его производство алюминия превысило 4,3 млн т. В дальнейшем алюминиевое производство в Китае росло опережающими темпами — всего через четыре года, в 2006 г., оно достигло почти 10 млн т, что составляло треть общемировых объемов. Страна обогнала все остальные регионы мира по выпуску «крылатого металла».

Весь производимый алюминий Китай использует для собственных нужд. Оборот металла и других материалов настолько велик, что в Китае созданы собственные товарные биржи, которые в 1999 г. были объединены

в Шанхайскую фьючерсную биржу (SHFE). Более 90% электроэнергии, которая используется для производства алюминия в Китае, вырабатывается на угольных электростанциях. Для сравнения: в России — обратная ситуация, и около 90% алюминиевого производства обеспечивается гидроэлектроэнергетикой.

Существенную роль в алюминиевой отрасли в 1990-е гг. начали играть и страны Ближнего Востока. Имея доступ к дешевой нефти и природному газу, получаемому попутно, алюминиевые производители обеспечены источником дешевой, хотя и неэкологичной, электроэнергии. Они активно наращивают свое производство и входят в число мировых лидеров по производству алюминия.

Проблемы в мировой алюминиевой отрасли начались в 2008 г. вместе с глобальным финансово-экономическим кризисом. Тогда в результате обвала рынков алюминиевая отрасль впервые в истории столкнулась с кризисом перепроизводства и, как следствие, обрушением на 50% цен на металл. На складах по всему миру скопились миллионы тонн алюминия, интерес к которым проявили биржевые трейдеры: финансовые сделки с металлом стали выгодной инвестицией.

Кризис 2008–2009 гг. привел к масштабным закрытиям алюминиевых заводов практически всех западных алюминиевых компаний. Вместе с тем производство металла в мире продолжило расти. Производители Китая и Ближнего Востока двигались в противоположном направлении и наращивали производство.

С начала третьего тысячелетия в мировом сообществе резко усилилось внимание к сокращению выбросов парниковых газов и внедрению «зеленых» технологий. Если в середине XX в. эти тенденции проявлялись только в Западной Европе, США и Японии, то с начала XXI в. эти тенденции стали повсеместными, включая страны Персидского залива (где появилось много производителей алюминия) и Китай, ставший крупнейшим производителем алюминия в мире.

При производстве глинозема больше внимания стали уделять не только сокращению расхода энергоресурсов, но и рациональному использованию отходов обогащения боксита и других алюминийсодержащих пород, а также красного шлама, который продолжает скапливаться на планете.

При производстве алюминия стали обращать внимание не только на совершенствование конструкций электролизеров и повышение выхода по току, но и на сокращение расхода электроэнергии для выплавки алюминия и утилизации тепла. Другим направлением являются переработка и рациональное использование отработанной футеровки электролизеров.

Шестой цикл — использование инертных анодов и дренируемых катодов. Стремительный рост энергопотребления и возрастающее внимание к проблемам экологии привели к необходимости энергосбережения и постепенной переориентации отдельных стран на источники энергии, оказывающие наименьшее воздействие на окружающую среду.

Человечество ищет альтернативные способы технологии Холла — Эру уже много лет. В последнее время во многих странах мира (и особенно в России) усилены работы по получению алюминия по технологии инертного анода.

Прекращение сжигания угольного анода (расход которого составляет 0,45–0,55 т на тонну выплавляемого алюминия) и, соответственно, сокращение выбросов парниковых газов, выделяющихся при электролизе, выделение чистого кислорода в качестве побочного продукта при получении алюминия — на это устремлены усилия мирового сообщества производителей алюминия в XXI в.

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Последовательные и взаимосвязанные стадии существования любой продукции от производства из природных ресурсов или сырья до конечного размещения в окружающей среде (в виде отходов, сбросов и выбросов) называют жизненным циклом продукции¹⁶.

Жизненный цикл алюминия может быть смоделирован с использованием различных технологических этапов, приведенных на рисунке 6.



Рис. 6. Жизненный цикл алюминия

¹⁶ ISO 14044:2006. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Требования и руководящие указания // ISO. — URL: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:ru> (дата обращения: 12.12.2021).

Алюминий является идеальным экометаллом. Коррозионная стойкость алюминия очень высока. В процессе переплавки теряется малое количество металла. Энергетические затраты на переплавку алюминия составляют всего 5 % от энергетических затрат на извлечение алюминия из породы, превращение в глинозем и получение алюминия электролизом.

Малозатратная переплавка и возможность повторного использования металла делает жизненный цикл алюминия «вечным».

Добыча алюминия

В мире 95–98 % бокситов добывается открытым способом. Шахтный способ добычи бокситов, вероятно, будет применяться в будущем, когда месторождения боксита, которые можно разрабатывать открытым способом, будут истощены. В отдельных случаях возможна комбинированная разработка¹⁷.

Добыча открытым способом

Открытая разработка месторождения включает в себя: подготовку поверхности, осушение месторождения, горно-капитальные работы по вскрытию и подготовке к добыче, в том числе вскрытие путем удаления вмещающих руду пустых пород, и добычные работы (рис. 7).

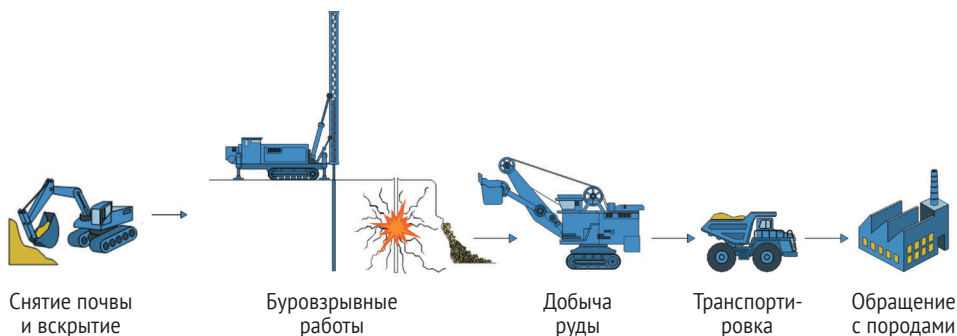


Рис. 7. Схема технологического процесса добычи алюминиевого сырья открытым способом

Основные процессы открытых горных работ: подготовительные работы (снятие почвы, вскрытие рудного тела), буровзрывные работы, добыча руды, транспортировка, обращение с породами (первичная подготовка, складирование пород и некондиционного сырья).

¹⁷ Добыча и обогащение руд цветных металлов : Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 23-2017 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/556173697> (дата обращения: 13.12.2021).

Снятие и складирование почвы

Предприятия, разрабатывающие открытым способом месторождения руд цветных металлов, обязаны снимать плодородный слой почвы и использовать его для улучшения земельных угодий. Снятие плодородного слоя почвы бульдозером осуществляется прирезками с созданием временного штабеля.

Почва грузится экскаваторами или погрузчиками и вывозится во временный отвал или к месту использования. При снятии почвы с древесной и кустарниковой растительностью осуществляется предварительная уборка древесины и освобождение от пней и корней.

Почва в отвалах сохраняет свои свойства в течение 20 лет. Под отвалы отводятся участки с исключением подтопления, засоления или загрязнения промышленными отходами и строительным мусором.

Вскрытие

Вскрытие — это комплекс обеспечения доступа к руде путем производства горно-капитальных и текущих работ.

Горно-капитальные работы обеспечивают доступ к полезному ископаемому по железнодорожным или автомобильным траншеям. Текущие вскрышные работы карьера обеспечивают объем добычи руды на запланированном уровне.

Покрывающие породы подразделяют на рыхлые и скальные. К рыхлым относят породы, выемка которых возможна при использовании экскаваторов и драглайнов без рыхления буровзрывным способом. Роторные экскаваторы непрерывного действия разрушают породу с помощью рабочих элементов роторного колеса и транспортируют ее в отвалы или склады. При разработке рыхлых пород их отделяют от массива, транспортируют и укладывают в отвал при помощи воды под напором.

Для экскавации скальных пород требуется предварительное рыхление буровзрывным способом. На карьерах применяют гидравлические экскаваторы и экскаваторы типа механическая лопата. В процессе вскрытия покрывающие породы снимают и складировывают в отвалы, обеспечивая доступ к руде.

Системы разработки

Параметрами карьера открытой добычи являются объем горной массы, конечная глубина, размеры по подошве, углы откосов бортов, запасы полезного ископаемого, объем вскрыши и полезного ископаемого, высота уступов, размеры на уровне дневной поверхности. Углы откосов бортов карьера определяются конструкцией бортов и условиями устойчивого равновесия слагающих его пород.

Горно-капитальные работы включают в себя проходку капитальных и разрезных траншей. Вскрытие месторождения осуществляют чаще всего с помощью капитальной траншеи.

Система разработки называется сплошной, если горно-подготовительные работы отсутствуют. При транспортной системе разработки вскрышных работ порода перемещается сначала во внешний отвал, а по мере развития горных работ — во внутренний отвал.

Вскрыша обрабатывается уступами, высота которых в слабых породах не должна превышать максимальную высоту черпания экскаватора, а в крепких породах — превышать не более чем в 1,5 раза.

Подготовка горных пород к выемке производится буровзрывным способом с дроблением до заданной крупности. Нужная крупность пород обеспечивается путем рассредоточения зарядов в скважинах большого диаметра. При необходимости получения породных блоков больших размеров небольшие заряды размещают на небольшом расстоянии друг от друга в скважинах малого диаметра.

Выемка горной массы осуществляется чаще всего торцовым забоем, который обеспечивает максимальную производительность экскаватора во взаимодействии с автотранспортом.

Карьерный транспорт является связующим звеном системы разработки. Затраты на него составляют не менее 50% от общих затрат на добычу.

При цикличном транспорте погрузка, движение с грузом, разгрузка и движение без груза осуществляются последовательно, а при транспорте непрерывного действия эти операции совмещаются.

Этапом производства вскрышных работ является образование отвалов. Высота отвального уступа зависит от физико-технических свойств складированных пород, а количество уступов определяется отводимой площадью и объемом пород. В зависимости от места расположения отвала по отношению к конечному контуру карьера различают внутренние и внешние отвалы. Внешние отвалы располагаются ближе к карьере, чтобы уменьшить затраты на перемещение вскрыши.

Угол откоса отвальных уступов обычно равен углу естественного откоса пород отвала и зависит от физико-технических свойств пород, их разрыхления и влажности.

Фронтом отвальных работ называют часть участка приема и размещения вскрышных пород. Процесс отвалообразования включает в себя возведение насыпей, разгрузку и складирование вскрышных пород, планировку поверхности и оборудования транспортных коммуникаций.

Буровзрывные работы

Буровзрывные работы имеют целью подготовку скального массива к экскавации.

Расчет параметров взрывания базируется на зависимости разрушенного объема породы от массы заряда взрывчатого вещества (ВВ). Свойства массива учитываются через удельный расход взрывчатого вещества, величина которого регламентируется. В большинстве случаев буровзрывное рыхление массива

основано на расположении взрывчатого вещества в скважинах, пробуренных буровыми станками.

Добыча руды

Добыча руды осуществляется с использованием преимущественно одноковшовых экскаваторов с объемом ковша от 5 до 20 м³ и гидравлических экскаваторов типа прямая или обратная лопата с вместимостью ковша до 30 м³.

Разгрузка руды осуществляется в автосамосвалы или железнодорожные думпкары. Гидравлический экскаватор разгружает руду опрокидыванием или раскрытием ковша, канатный экскаватор — путем открывания днища ковша над местом разгрузки.

Максимальная производительность экскаватора достигается при минимуме передвижек в забое и минимальном среднем угле поворота экскаватора. Высота забоя ограничивается высотой черпания экскаватора. Угол откоса поверхности забоя зависит от свойств разрабатываемого массива и составляет 70–80°. При автомобильном транспорте автосамосвалы располагаются сбоку или позади экскаватора в зоне разгрузки ковша с минимальным углом разворота от места черпания. При конвейерном транспорте горная масса загружается экскаватором в бункер-питатель, который располагается сбоку экскаватора или внутри заходки позади экскаватора.

Транспорт

Для перевозки вскрышных пород, руды и материалов используют транспорт непрерывного действия (конвейерный, трубопроводный) и циклического действия (железнодорожный, автомобильный). При большой производительности карьеров преимущественно применяется железнодорожный транспорт.

Конвейерный и трубопроводный транспорт обеспечивает поточность производства горных работ, автоматизацию управления и высокую производительность труда. Применение комплексов непрерывного действия повышает степень использования оборудования на карьере.

Для транспортирования мягких, дробленых, скальных и полускальных горных пород получили распространение ленточные конвейеры: забойные, сборочные, подъемные, магистральные и отвальные.

Забойные конвейеры предназначены для транспортирования горной массы от экскаватора до сборочного конвейера. Сборочные конвейеры в торцовых частях карьера предназначены для транспортирования горной породы от одного или нескольких забойных конвейеров к подъемнику. Подъемные конвейеры в нерабочей зоне карьера предназначены для доставки горной массы из рабочей зоны карьера на поверхность. Магистральные конвейеры располагаются на поверхности карьера и предназначены для транспортирования пород вскрыши к отвалам, а полезного ископаемого — на обогатительную фабрику или к складам. Отвальные конвейеры располагают на отвалах и перемещают вслед за отвальным фронтом.

Трубопроводный или гидравлический транспорт ограничен в применении по климатическим условиям, свойствам пород и наличию водоисточников.

Железнодорожные пути подразделяются на временные и стационарные. К временным относятся пути на рабочих площадках в карьере и на отвале. К стационарным относятся пути в траншеях, на транспортных бермах и на поверхности карьера. Скорость железнодорожного транспорта в карьере по стационарным путям составляет 35–40 км/ч, по забойным и обменным путям — 15–20 км/ч.

Широкое распространение имеет автомобильный транспорт благодаря мобильности, высокой эффективности в сложных топографических, геологических и климатических условиях. Наиболее эффективная область применения автомобильного транспорта — карьеры малой и средней производительности, глубокие горизонты крупных карьеров в комбинации с железнодорожным транспортом.

Первичное дробление используется для обеспечения возможности транспортировки дробленого материала конвейерным транспортом. Дробилки крупного дробления позволяют дробить руду на куски крупностью до 1500 мм. На выходе с дробильных установок крупность руды не превышает 400 мм, что позволяет производить ее транспортировку конвейерным транспортом. За дробилками первой стадии могут располагаться грохоты или дробилки, обеспечивающие дробление руды до крупности 150–200 мм для транспортировки ее крутонаклонными конвейерами.

Обращение с породами

Объект из пустых, скальных и рыхлых пород называется породным отвалом, некондиционных руд — складами, плодородный слой почв укладывается в бурты.

Высота яруса отвала определяется свойствами пород, рельефом поверхности, гидрогеологическими условиями и технологией образования отвала. Укладка пород в отвалы производится бульдозерами. Автосамосвалы разгружаются на некотором расстоянии от бровки по периферии отвала, а бульдозеры перемещают породу под откос, оставляя на бровке предохранительный вал. Поверхность отвала имеет подъем в сторону откоса, равный 3°. Высота бульдозерного отвала достигает 25–30 м.

Руды, не отвечающие требованиям кондиций, укладываются в отдельные отвалы.

Гидроотвалы представляют собой огороженные дамбами понижения рельефа, балки, овраги, выработанные пространства карьеров. Они заполняются из напорных трубопроводов. Твердые частицы и взвесь осаждаются на дно, а отстоявшаяся вода возвращается в систему напорного гидротранспорта.

Добыча подземным способом

Как отмечалось выше, 95–98% сырья для алюминиевой промышленности добывается открытым способом. В будущем ситуация изменится. Подземная

разработка месторождений руд цветных металлов различных форм, мощности, углов падения, на разных глубинах осуществляется с использованием подземных горных выработок. Она включает в себя следующие этапы: вскрытие, подготовку и очистную выемку, которые выполняются последовательно или совмещенно во времени и пространстве с целью обеспечения производства достаточными запасами вскрытых, подготовленных и готовых к выемке запасов полезного ископаемого (рис. 8).

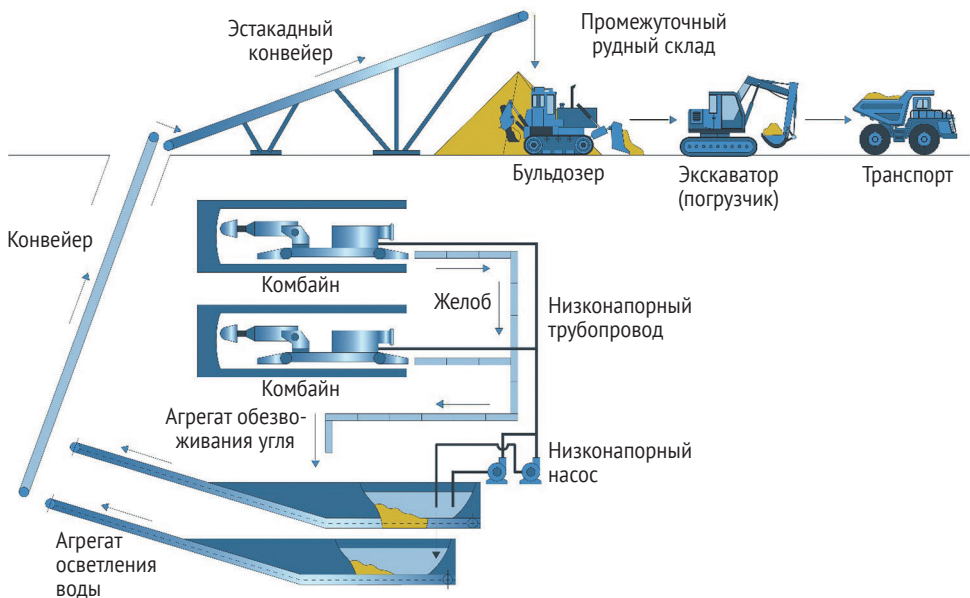


Рис. 8. Схема технологического процесса добычи подземным способом с использованием в забое самотечно-напорного гидротранспорта

Основные горные выработки:

- шахтные стволы, квершлаг и штольни, открывающие доступ ко всему месторождению или его части и обеспечивающие возможность проведения подготовительных выработок и очистной выемки в запланированных объемах;
- штреки, квершлаг, уклоны, бремсберги, восстающие, орты, которыми вскрытая часть месторождения разделяется на обособленные выемочные участки, предусмотренные принятым способом подготовки и системой разработки;
- поэтажные и слоевые выработки, выработки буровые, погрузочно-доставочные, подсечки, вентиляционные, отрезные восстающие, лавы и другие забойные выработки, обеспечивающие выемку полезных ископаемых.

Этапы подземной разработки месторождения: подготовка рудничного поля, отделение горной массы от массива, выдача на транспортные выработки и транспортирование на поверхность с размещением пород в выработанном пространстве или в отвалах.

Капитальными горными выработками называют выработки, которые обслуживают шахту в течение всего срока ее действия. К капитальным относят вскрывающие (ствол, штольня), некоторые подготавливающие выработки (квершлаг, бремсберги), а также некоторые крупные камеры.

К блоковым, поэтажным, погоризонтным, ярусным, участковым и выемочным выработкам относят вскрывающие и подготовительные выработки, обслуживающие горизонт, этаж, ярус, выемочный участок и очистной забой. В результате ведения работ образуются очистные выработки, проводимые по пласту или залежи горных пород, в которых осуществляется выемка. Очистные выработки передвигаются по мере ведения работ.

Обогащение бокситов

Бокситы представляют собой смесь гидраргиллита (гиббсита) ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), диаспора или бемита (разновидности $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) с каолинитом, кварцем, минералами железа (лимонитом, гематитом, сидеритом, пиритом), титана (ильменитом, рутилом), а также с пустыми породами. Обогащение их позволяет улучшить показатели химического и металлургического переделов¹⁸.

Бокситовые концентраты, поступающие на производство глинозема и глиноземного цемента, должны содержать не менее 28–30% Al_2O_3 при отношении $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2 = 4,0 : 5,6$, а предназначенные для производства электрокорунда — не менее 49–52% Al_2O_3 при отношении $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2 = (6-15) : 1$.

Операция обогащения бокситового концентрата не является повсеместно распространенной — ее применяют в зависимости от конкретных условий месторождения и условий переработки руды на глиноземном заводе. Бокситы различных месторождений отличаются по своим основным характеристикам, и вследствие этого технология их переработки также различна. Гвианские бокситы обычно на месте добычи промывают и сушат, а затем отправляют на глиноземные заводы.

Обогащение целесообразно в тех случаях, когда в руде содержится много пирита, сидерита и тонкого ила, насыщенного органическими веществами, гелем кремнекислоты или глинистыми веществами. Если в боксите много пирита, лучше обогащать его флотацией. Если основное вещество представлено более или менее крупными агрегатами, то для удаления тонкого ила, а с ним и органических веществ пригодна простая мойка. Так, можно отмыть до 50% органических веществ, геле кремнекислоты или глину. Однако бокситы, пригодные для обогащения, встречаются сравнительно редко.

¹⁸ Лайнер А. И. Производство глинозема. — М., 1978; Самарянова Л. Б. Технологические расчеты в производстве глинозема. — М., 1988.

Обогащение — обычно сочетание процессов дезинтеграции материала, грохочения и классификации его, флотации, флокуляции и обезвоживания, в результате чего получают высокомолекулярный бокситовый концентрат, каолининовый и иногда промежуточный продукты.

Наиболее эффективным собирателем гидратированных оксидов алюминия при обогащении флотацией является олеиновая кислота. На практике часто пользуются смесью олеиновой кислоты с талловым и машинным маслом (или керосином). Обязательные условия при флотации — снижение содержания растворимых солей (кальция, магния, железа, алюминия) и диспергирование пульпы. Для этой цели используют соду, едкий натр, сернистый натрий, фосфатные соединения, жидкое стекло и крахмал.

При обогащении бокситов возможно попутное получение ряда продуктов: каолининового, железорудного, титанового, пиритного с промышленным содержанием в них металлов или элементов, то есть возможно комплексное использование сырья.

Производство алюминия

Алюминий получают электролизом криолито-глиноземного расплава с использованием углеродных анодов. Основной вклад в себестоимость производства алюминия вносят стоимость:

- глинозема;
- электроэнергии;
- углеродного анода или анодной массы.

Для производства 1 т первичного алюминия требуется 1,92 т глинозема, 13 000–16 000 кВт электроэнергии и 425–550 кг анода или анодной массы, для изготовления которых необходимы нефтяной кокс и каменноугольный пек.

Производство глинозема

Способы производства глинозема из различных видов сырья (минералов), содержащего алюминий, основаны на получении алюминатных растворов и их свойстве самопроизвольно разлагаться при снижении температуры и концентрации на гидроксид алюминия и щелочь. Прокаливая гидроксид алюминия при температуре 1000–1200°С, получают глинозем (табл. 9, 10).

Наиболее широкое применение в промышленности нашел разработанный Байером щелочной гидрохимический способ, с помощью которого, как правило, перерабатывают лишь высокосортные бокситы с малым содержанием кремнезема — бокситы с кремниевым модулем (соотношение Al_2O_3 и SiO_2 по массе) выше 6. После подготовки сырья (дробление и размол боксита) осуществляют его обработку щелочно-алюминатным раствором — процесс выщелачивания, в результате которого из боксита извлекается оксид алюминия, переходящий в раствор с концентрацией Al_2O_3 250–300 г/л.

Таблица 9. Основные этапы производства глинозема способом спекания нефелинов

Входной поток	Этап процесса (подпроцесс)	Выходной поток	Основное технологическое оборудование	Эмиссии
Нефелин, известняк, вода	Приготовление шихты	Влажная шихта (пульпа)	Дробилки, мельницы	Пыль
Пульпа	Спекание	Спек	Вращающиеся печи	Пыль, SO ₂ , NO _x , CO
Спек	Переработка спека	Алюминатный раствор, шлам	Дробилки, мельницы	Пыль, щелочь, шлам
Алюминатный раствор	Переработка алюминатных растворов	Гидроксид алюминия, содовые растворы	Карбонизаторы, декомпозиеры, сгустители, автоклавы, фильтры	Щелочь, SO ₂ , NO _x , CO
Гидроксид алюминия	Кальцинация	Глинозем	Печи	Пыль, SO ₂ , NO _x , CO

Таблица 10. Основные этапы производства глинозема способом Байер-спекания

Входной поток	Этап процесса (подпроцесс)	Выходной поток	Основное технологическое оборудование	Эмиссии
Боксит, известняк, вода, сода	Подготовка шихты к выщелачиванию и спеканию	Влажная шихта (пульпа)	Дробилки, шаровые мельницы	Пыль
Пульпа	Выщелачивание	Алюминатный раствор, шлам	Автоклавные батареи	Щелочь
Шлам	Сгущение и промывка шлама ветвей Байера и спекания (раздельно)	Шлам в отвал	Сгустители, фильтры	Щелочь, шлам
Пульпа	Спекание	Спек	Вращающиеся печи	Пыль, SO ₂ , NO _x , CO
Спек	Переработка спека	Алюминатный раствор, шлам (красный)	Дробилки, мельницы	Пыль, щелочь
Алюминатный раствор	Переработка алюминатных растворов (раздельно для каждой ветви)	Очищенный алюминатный раствор (оборотный), гидроксид алюминия	Декомпозиеры, сгустители	Щелочь
Гидроксид алюминия	Кальцинация	Глинозем	Печи	Пыль, SO ₂ , NO _x , CO

При этом в осадок выпадают нерастворимые соединения, содержащиеся в боксите, — так называемый красный шлам. Последующие процессы производства связаны с отделением и очисткой алюминатного раствора от красного шлама и промывкой последнего для более полного извлечения алюминатного раствора.

Бокситы с кремниевым модулем ниже 6 и другие виды высококремнистого сырья, пригодного для производства глинозема (нефелины, алуниты, каолины), перерабатывают или по способу спекания, или комбинированному способу — сочетание способа Байера со способом спекания.

Способ спекания основан на термической обработке смеси алюмосиликатной руды с известняком с целью перевода практически всего оксида алюминия из сырья в растворимую форму в спеке (алюминат натрия) и связывания диоксида кремния сырья в нерастворимую форму (двукальциевый силикат).

Способ Байера — самый экономичный, но его применение ограничивается качеством и количеством боксита; способ спекания является наиболее затратным, но более универсальным и пригоден для любого вида сырья.

На действующих российских предприятиях, выпускающих глинозем, применяются все из перечисленных технологий. На Ачинском глиноземном комбинате и Пикалевском глиноземном заводе («БазэлЦемент-Пикалево») перерабатывается нефелиновое сырье. Технология производства глинозема, основанная на спекании нефелина с известняком, предусматривает комплексную переработку сырья на глинозем, соду и цемент. Шлам, получаемый при выщелачивании спека (нефелиновый шлам), используют для получения цементного клинкера.

Богословский и Уральский алюминиевые заводы перерабатывают отечественные байеровские и спекательные бокситы. Производство глинозема осуществляется по комбинированному способу — параллельная схема Байер-спекания. По способу Байера получают около 80–90% глинозема, остальное — по технологии спекания. Ветвь спекания состоит из отделений приготовления шихты (дополнительного к ветви Байера), спекания, размола, выщелачивания спека и отделения алюминатного раствора от осадка шлама. Получаемый в этой ветви алюминатный раствор объединяется с алюминатным раствором из ветви Байера, а усредненный раствор поступает на последующую переработку, включая стадию прокаливания гидроксида алюминия в печах кальцинации.

Предприятие по производству глинозема

Цех подготовки шихты. В цехе подготовки шихты происходит измельчение боксита. В зависимости от условий боксит может поступать в цех кусками до 300 мм. В таком случае боксит подвергают дроблению (молотковые и щековые дробилки), а затем измельчению (до 0,05–0,14 мм) в шаровых мельницах мокрого помола. Сырую пульпу подают на выщелачивание в гидрометаллургический цех.

Гидрометаллургический цех. Полученную при помоле бокситовую пульпу направляют в гидрометаллургический цех на выщелачивание. Для полного протекания выщелачивания (образования алюмината натрия) необходимы щелочная среда, нагрев пульпы до 100–240°С (в зависимости от сорта боксита), ее длительное (около 2 ч) перемешивание и иногда (в зависимости от типа боксита) высокое давление (~3 МПа).

Для классического Байер-процесса, бемитовых и диаспоровых бокситов такие условия обеспечиваются в автоклавах — сосудах, работающих под давлением. Если предприятие перерабатывает гиббситовые (гидрагеллитовые) бокситы, то используются выщелачиватели без применения давления. Применяемые автоклавы представляют собой стальные цилиндрические сосуды диаметром 1,6–2,5 и высотой 13,5–17,5 м.

Давление в автоклаве 2,5–3,3 МПа, пульпу подают сверху, снизу через патрубок с барботером — пар, который нагревает и перемешивает ее. Из автоклава пульпа выдавливается через трубу. Пульпу обычно пропускают через батарею из 6–10 последовательно установленных автоклавов, где в течение ~2 ч содержащийся в пульпе глинозем реагирует со щелочью, переходя в алюминат.

В первый автоклав пульпу подают насосом, предварительно подогрев до ~150°С, из последнего автоклава пульпа попадает в два автоклава-испарителя, в которых давление снижается до атмосферного. Продуктом является автоклавная пульпа, состоящая из алюминатного раствора (содержащего алюминат натрия) и шлама (осадка, в который выпадают остальные примеси боксита).

Сгущение и промывка красного шлама. После выщелачивания автоклавную пульпу необходимо разделить на алюминатный раствор и твердую фазу — красный шлам (то, что не растворилось при выщелачивании, плюс гидроалюмосиликат натрия).

Разделение алюминатного раствора и шлама после разбавления пульпы водой производят в сгустителях (отстойниках) — сосудах диаметром 15–50 м, на дне которых оседает шлам, а через верх сливается отстоявшийся алюминатный раствор. Также происходит промывка твердой фазы шламовой пульпы (красного шлама) в системе промывателей с целью наиболее полного отделения алюминатного раствора от твердой фазы шламовой пульпы. Получаемый красный шлам (окраску ему придают частицы Fe_2O_3) идет в отвал, шлам содержит: 12–18% Al_2O_3 , 6–11% SiO_2 , 44–50% Fe_2O_3 , 8–13% CaO .

Алюминатный раствор дополнительно пропускают через фильтры и направляют на следующую операцию — декомпозицию. Разложение алюминатного раствора, называемое также декомпозицией или выкручиванием, проводят с целью перевести алюминий из раствора в осадок в виде $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, для чего обеспечивают течение приведенной выше реакции выщелачивания влево, в сторону образования $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Чтобы указанная реакция шла влево, необходимо понизить давление (до атмосферного), разбавить и охладить раствор, ввести в него затравки (мелкие кристаллы гидроксида алюминия) и пульпу

для получения достаточно крупных кристаллов $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ перемешивать в течение 50–90 ч.

Декомпозиция — это процесс кристаллизации гидроксида алюминия при разложении пересыщенного алюминатно-щелочного раствора в присутствии большого количества кристаллических зерен затравки (затравочного гидроксида).

Этот процесс осуществляют в серии установленных последовательно и соединенных перепускными сифонами декомпозеров, через которые последовательно проходит пульпа (алюминатный раствор с выпадающими кристаллами гидроксида алюминия). В серии устанавливают 10–11 декомпозеров с механическим перемешиванием или 16–28 декомпозеров с воздушным перемешиванием пульпы.

Первые представляют собой баки диаметром до 8 м, в которых перемешивание осуществляют вращением вокруг вертикальной оси волокуш (гребков). Декомпозеры второго типа представляют собой цилиндрические баки высотой 25–35 м и объемом до 3000 м³; снизу в них подают сжатый воздух, перемешивающий пульпу.

После декомпозиции пульпа поступает в сгустители, где гидроксид отделяют от раствора. Полученный гидроксид в гидросепараторах разделяют на фракцию с размером частиц 40–100 мкм и мелкую фракцию (размером менее 40 мкм), которые используют в качестве затравки при декомпозиции. Крупную фракцию промывают, фильтруют и направляют на кальцинацию.

Декомпозиция является наиболее важной стадией при производстве глинозема по способу Байера, поскольку от физико-химических свойств полученного гидроксида алюминия непосредственно зависит качество глинозема, а производительность этой стадии определяет экономику всего глиноземного производства.

При кристаллизации гидроксида алюминия из пересыщенного алюминатного раствора в присутствии затравочных зерен происходят следующие явления:

- образование центров кристаллизации (вторичное зародышеобразование);
- агломерация кристаллических зерен затравки;
- линейный рост кристаллов и их разрушение.

Основное оборудование участка декомпозиции — декомпозер, гидросепаратор, сгуститель (предназначенный для осаждения гидроксида), охладители и фильтры для фильтрации гидроксида алюминия.

Цех спекания. Способ спекания основан на термической обработке смеси алюмосиликатной руды с известняком¹⁹ с целью перевода практически всего оксида алюминия из сырья в растворимую форму в спеке (алюминат натрия) и связывания диоксида кремния сырья в нерастворимую форму (двухкальциевый силикат).

¹⁹ Логина И. В. Технология производства глинозема : учебное пособие. — Екатеринбург, 2015.

Спек из печи направляют на выщелачивание смесью воды с маточным или оборотным содощелочным раствором. После отделения белитового шлама полученный алюминатный раствор подвергают обескремниванию с целью вывода растворенной массы SiO_2 в твердую фазу в виде гидроалюмосиликата натрия. Очищенный от диоксида кремния алюминатный раствор направляют на контрольную фильтрацию и затем подают на разложение углекислым газом. Большую часть алюминатного раствора подвергают полной карбонизации, после чего разделяют полученный гидроксид алюминия и содовый раствор. Гидрат направляют на кальцинацию, а содовый раствор выпаривают для кристаллизации соды. Соду обезвоживают и направляют на шихтовку вместе со свежей содой для восполнения потерь щелочи в полном цикле.

В отличие от переработки бокситов по способу Байера, алюминатные растворы по способу Байер-спекания после выщелачивания алюминатных спеков ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 80\text{--}150$ г/л) всегда пересыщены по оксиду кремния по отношению к равновесному составу относительно алюмината натрия; растворы имеют низкий кремниевый модуль ($\mu\text{Si} = 20\text{--}50$), поэтому перед выделением из них $\text{Al}(\text{OH})_3$ они должны быть подвергнуты операции обескремнивания²⁰.

Обескремнивание проводят в одну или две стадии. Одностадийное обескремнивание производят, если раствор разлагается декомпозицией, двухстадийное — при разложении карбонизацией.

Первая стадия обескремнивания. Процесс может быть осуществлен как при температуре $90\text{--}100^\circ\text{C}$ при атмосферном давлении в присутствии большого количества затравки алюмината натрия (безавтоклавное обескремнивание), так и при температуре 175°C (автоклавное обескремнивание).

Вторая стадия обескремнивания. Для проведения первой стадии обескремнивания используют как автоклавы (при температуре $160\text{--}170^\circ\text{C}$), так и мешалки в присутствии значительных количеств затравки ГАСН (до 100 г/л). В мешалках проводится и вторая стадия обескремнивания в присутствии добавки извести (3–8 г/л).

Для разложения алюминатных растворов в спекательных схемах применяют карбонизацию — способ разложения алюминатных растворов при барботировании через них газов, содержащих CO_2 . Технологические предпосылки такого способа — наличие отходящих газов печей спекания, содержащих 12–14% CO_2 ; получение карбонатных растворов, которые могут быть эффективно использованы для различных целей.

Красный шлам — комплексное сырье. Красные шламы после выщелачивания бокситов способом Байера обычно складывают на шламовых полях вблизи глиноземных заводов. Отмытый красный шлам разбавляется до необходимого отношения ж : т = (3–10) : 1 и системой гидротранспорта перекачивается на шламовое поле.

²⁰ Там же.

Для промывки твердой фазы шламовой пульпы используется вода из системы водооборота, подшламовая вода. В отдельных случаях может использоваться промышленная вода.

С одной стороны, складирование в шламохранилищах красного шлама (при Баейр-спекании — серого шлама), содержащего большое количество щелочей, влечет за собой загрязнение окружающей среды и требует больших земельных площадей под шламовые поля²¹.

С другой стороны, с отвальными красными шламами теряется безвозвратно 10–20 % глинозема, содержащегося в исходном боксите, а также много оксида натрия и очень много оксида железа. Ежегодные потери железа с красным шламом крупного завода составляют около 0,5 млн т. Поэтому красные шламы следует рассматривать как один из потенциальных источников получения глинозема, каустической щелочи, железа и редкоземельных элементов.

Красные шламы выводятся из процесса в виде пульпы с ж : т = (3–10) : 1. Жидкая фаза шлама содержит более 15 г/л Na₂O. Химический и минералогический состав шламов очень сложен. Он определяется составом исходного боксита и условиями его выщелачивания (температурой, дозировкой CaO и др.). Пульпа красного шлама, представляющая собой остатки бокситов после выщелачивания, имеет состав твердой фазы: 12–13 % Al₂O₃; 45–50 % Fe₂O₃; 6–11 % SiO₂. Состав жидкой фазы: 3–5 % Na₂O; 2–3 % Al₂O₃. Жидкая фаза шламовой пульпы собирается в центрах шламовых карт и возвращается в производство по системе гидротранспорта. Так, при переработке диаспоровых североуральских бокситов с $\mu\text{Si} = 10\text{--}12$ при 235°С в присутствии 3–5 % CaO получается шлам примерно следующего среднего состава: 44,5 % Fe₂O₃; 12,0 % CaO; 4,0 % TiO₂; 5,0 % Na₂O; 1,0–1,5 % CaO. Эти шламы представлены гидроалюмосиликатом натрия — содалитом (40 %), бемитом (4 %), гематитом (15 %), кальцит-доломитом (3 %), пиритом (2 %) и некоторыми другими минералами²².

В разных странах мира проводятся широкие исследования по использованию красных шламов в качестве добавок для производства красок, цветных стекол, утяжелителя в нефтяной промышленности и особенно для получения различных строительных материалов (кирпича, черепицы, метлахских плиток, цемента и т. д.). Возможна добавка 10–15 % красного шлама к доменной шихте при выплавке чугуна. Во всех этих случаях используется отфильтрованный шлам.

Естественно, частичное использование красного шлама в качестве добавочного материала в различных областях техники не решает вопроса о переработке больших количеств этого отвального продукта глиноземного производства. Поэтому в последние годы во многих странах мира проводятся широкие исследования по извлечению из красных шламов ценных компонентов²³.

²¹ Лайнер А. И. Производство глинозема.

²² Логинова И. В. Технология производства глинозема.

²³ TRAVAUX 49. Proceedings of the 38th International ICSOBA Conference (16–18 November 2020). — URL: <https://icsoba.org/assets/files/publications/2020/AL18S.pdf> (дата обращения: 16.12.2021).

Цех прокатки глинозема. Процесс кальцинации заключается в термическом воздействии на гидроксид алюминия, в результате последовательно протекают процессы:

- при 110–120°С из гидроксида начинается удаление внешней влаги;
- при 200–250°С гидроксид алюминия теряет молекулы кристаллизационной воды и превращается в бемит;
- при температуре около 500°С гидроксид алюминия превращается в безводный $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$;
- при температуре выше 850°С начинается превращение $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Все эти превращения идут с поглощением значительного количества тепла (эндотермический процесс), кроме превращения $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (экзотермический процесс). Основное количество тепла затрачивается при нагревании материала до 500–600°С, когда происходит испарение выделяющейся влаги и разложение гидроксида алюминия²⁴.

Кальцинацию или обезвоживание гидроксида алюминия осуществляют в футерованных шамотом трубчатых вращающихся печах диаметром 2,5–5,0 и длиной 35–110 м, отапливаемых природным газом или мазутом. Гидроксид медленно перемещается вдоль вращающегося барабана навстречу потоку горячих газов, температура которых повышается от 200–300°С в месте загрузки до ~1200°С вблизи горелки у разгрузочного торца барабана. При нагреве гидроксида идет реакция:



заканчивающаяся при 900°С. Продуктом является глинозем Al_2O_3 (порошок белого цвета).

Аппаратурное оформление передела кальцинации. На большинстве отечественных заводов кальцинация глинозема осуществляется в трубчатых вращающихся печах, а охлаждение прокаленного глинозема — в барабанных холодильниках или холодильниках кипящего слоя²⁵. Аппаратурно-технологическая схема кальцинации показана на рисунке 9.

Промытый гидроксид алюминия из бункера 5 пластинчатым питателем 6 подается в смеситель 4, где смешивается с пылью, возвращаемой из газоочистных устройств 7, 8. Перемешанный с пылью гидроксид по наклонной течке 12 поступает в печь 3, по мере продвижения материала по длине печи происходит обжиг; протекают превращения. Выходящий из печи глинозем охлаждается в холодильнике 1, после чего камерным насосом транспортируется в бункера готовой продукции. Для улавливания пыли, уносимой из печи топочными газами, установлены мультициклоны 7 и электрофильтр 8.

²⁴ Лайнер А. И. Производство глинозема; Самарянова Л. Б. Технологические расчеты в производстве глинозема; Ибрагимов А. Т. Развитие технологии производства глинозема из бокситов Казахстана. — Павлодар, 2010; Логинова И. В. Технология производства глинозема.

²⁵ Логинова И. В. Технология производства глинозема.

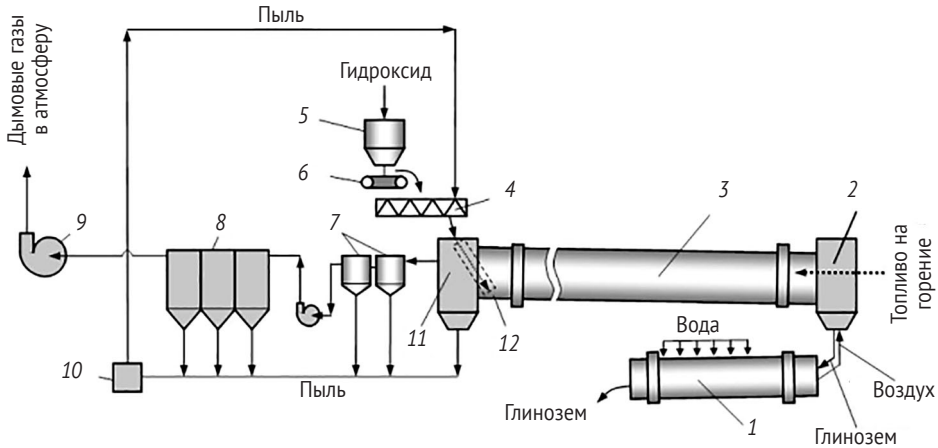


Рис. 9. Аппаратурно-технологическая схема процесса кальцинации:

- 1 – барабанный холодильник (БХ); 2 – топочная камера; 3 – трубчатая вращающаяся печь (ТВП); 4 – шнековый смеситель; 5 – загрузочный бункер; 6 – пластинчатый питатель; 7 – мультициклоны; 8 – электрофильтр; 9 – дымосос; 10 – насосы; 11 – загрузочная головка; 12 – течка для подачи гидроксида в печь

Производство анодов и анодной массы

В зависимости от типа используемого электролизера в качестве анодных материалов используется анодная масса или предварительно обожженные аноды.

Анодные материалы являются одним из ключевых элементов в технологии электролитического производства алюминия. Угольные аноды или анодную массу для получения первичного алюминия, как правило, производят на том же алюминиевом заводе, что и сам металл. Хотя в некоторых случаях их могут производить на отдельных анодных фабриках.

Сырьем для производства анодной массы и анодов служат каменноугольный пек (связующий материал) и нефтяной кокс с низким содержанием зольных примесей (наполнитель).

Производство анодной массы. Исходный сырой кокс поступает на склад предприятия и по транспортной системе подается на первичное дробление. Далее через систему питания кокс подается в прокалочный агрегат, после которого по системе транспорта прокаленный кокс поступает в бункер запаса. Некоторые предприятия, не имея в своем составе прокалочных печей, осуществляют закупку уже прокаленного кокса. На сушку кокс поступает из бункера прокаленного кокса, затем на дробление и рассев, после чего полученные сортовые фракции прокаленного кокса подогреваются и направляются в смеситель, где происходит смешение кокса с пеком.

Пек поступает на предприятие в жидком и (или) твердом виде и после подготовки с помощью дозатора и пекового насоса подается в смеситель.

После смесителя через орошаемый водой конвейер и систему транспорта охлажденные брикеты анодной массы поступают на склад готовой продукции.

Количество и качество связующего пека являются фактором, определяющим выделение в атмосферу загрязняющих веществ. Улавливаемая в системах аспирации и пылеочистки пыль от переделов производства анодной массы возвращается в производство.

Изложенные принципы производства анодной массы не меняются уже много десятилетий. Однако аппаратурное оформление, качество оборудования и принципы управления технологическим процессом постоянно совершенствуются.

В таблице 11 представлено описание основных этапов технологического процесса получения анодной массы.

Таблица 11. Основные этапы технологического процесса получения анодной массы

Входной поток	Этап процесса (подпроцесс)	Выходной поток	Основное технологическое оборудование	Эмиссии
Кокс нефтяной сырой	Прием, хранение, предварительное дробление	Кокс нефтяной сырой дробленый	Двухвалковая зубчатая дробилка	Пыль кокса
Кокс нефтяной сырой дробленый	Прокалка	Кокс нефтяной прокаленный	Вращающаяся прокалочная печь барабанного типа	Пыль кокса, CO, SO ₂ , NO _x
Кокс нефтяной прокаленный	Дробление, размол, рассев на фракции	Сортовые фракции прокаленного кокса	Дробилка молотковая однороторная, дробилка двухвалковая, грохот универсальный, шаровые барабанные мельницы	Пыль кокса
Сырой прокаленный кокс	Сушка	Сухой прокаленный кокс	Сушильный агрегат	Пыль кокса, CO, SO ₂ , NO _x
Пек гранулированный каменноугольный	Прием, хранение, пекоподготовка	Пек жидкий	Пекоприемники	Пыль пека, возгоны пека
Пек жидкий каменноугольный	Прием, хранение, пекоподготовка	Пек жидкий	Пекоприемники, пекоплавители	Возгоны пека
Сортовые фракции прокаленного кокса, пек жидкий	Дозирование, смешение, формование	Брикеты анодной массы	Весовые дозаторы, смесители, формовочное устройство	Пыль кокса, возгоны пека

Производство анодной массы является подчиненным к производству алюминия и осуществляется практически на всех алюминиевых заводах, применяющих технологию электролиза с самообжигающимися анодами (Содерберга).

Производство анодов. Процесс производства анодов в части дробления, измельчения и смешивания сырьевых материалов идентичен производству анодной массы, за исключением использования отходов обожженных анодов (огарки), которые вместе с коксом проходят стадии дробления и отсева. Затем из смешанного материала формируются «зеленые» аноды и после охлаждения поступают на склад «зеленых» анодов. Со склада «зеленые» аноды по системе конвейеров направляются в печи обжига. Обжиг осуществляется в многокамерных кольцевых печах открытого типа с подвижной зоной «огня». Печь обжига состоит из блока вертикальных камер, соединенных между собой простенками для последовательного прохода дымовых газов из одной камеры в другую. Эти простенки делят камеры на кассеты, в которые загружаются анодные блоки. Продвижение огня производится путем переноса рампы с горелки, дутьевых и отсасывающих труб вдоль печи на одну камеру в соответствии с заданным темпом обжига. В качестве топлива используется мазут. Обожженные анодные блоки по конвейеру поступают на сборку в анодно-монтажное отделение (АМО), которое включает в себя отделение демонтажа и монтажа анодов. При монтаже обожженных анодов осуществляется заливка ниппельных гнезд чугуном, подготовка анододержателя и, как правило, покрытие поверхности анодного блока защитным слоем от интенсивного выгорания поверхностного слоя. При демонтаже огарков анодов в АМО производится их зачистка от электролита, отделение от анододержателя и его зачистка, дробление огарка в дробилках для транспортировки его в заготовительное отделение.

В технологическом процессе образуется некоторое количество брака «зеленых» анодов и анодной массы, которые после дробления возвращаются обратно в смеситель. При производстве анодов на специальных установках газоочистки с помощью глинозема из паров абсорбируются смолистые вещества, фториды из анодных огарков. Улавливаемая в системах аспирации и пылеочистки коксовая пыль от переделов производства анодов возвращается в производство.

В таблице 12 приведены основные технологические этапы производства обожженных анодов.

Производство первичного алюминия

Алюминий производится (табл. 13) путем электролитического восстановления оксида алюминия (глинозема), растворенного в расплавленном электролите (криолите) при температуре приблизительно 960–965° С²⁶.

Схема производства алюминия представлена на рисунке 10.

²⁶ Thonstad J. Aluminium electrolysis...; Grjothheim K. Aluminium smelter technology...; Борисоглебский Ю. В. Металлургия алюминия.

Таблица 12. Основные этапы производства обожженных анодов

Входной поток	Этап процесса (подпроцесс)	Выходной поток	Основное технологическое оборудование	Эмиссии
Кокс нефтяной сырой, огарки анодов	Прием, хранение, предварительное дробление	Кокс нефтяной сырой дробленый, огарки анодов дробленые	Двухвалковая зубчатая дробилка	Пыль кокса
Кокс нефтяной прокаленный, дробленые огарки	Дробление, размол, рассев на фракции	Сортовые фракции прокаленного кокса	Дробилка молотковая однороторная, дробилка двухвалковая, грохот универсальный, шаровые барабанные мельницы	Пыль кокса
Пек гранулированный каменноугольный, пек жидкий	Прием, хранение, пекоподготовка	Пек жидкий	Пекоприемники, пекоплавители	Пыль пека, возгоны пека
Сортовые фракции прокаленного кокса и огарков, пек жидкий	Дозирование, смешение	Анодная масса	Весовые дозаторы, смесители	Пыль кокса, возгоны пека
Анодная масса	Формование	«Зеленые» аноды	Вибропресс	Возгоны пека
«Зеленые» аноды	Обжиг	Обожженные аноды	Многокамерная кольцевая печь открытого типа	Пыль кокса, возгоны пека, HF, CO, SO ₂ , NO _x
Обожженные аноды	Монтаж анодов	Смонтированные аноды	Печи ИЧТ, конвейеры, системы очистки огарков, дробилки	Пыль кокса, в том числе твердые фториды

Таблица 13. Производство первичного алюминия

Входной поток	Этап процесса	Выходной поток	Основное технологическое оборудование	Эмиссии
Свежий глинозем, фторсоли	Прием, хранение сырья на складах и в силосах	Свежий глинозем, анодная масса/ аноды, фторсоли	Склады, силоса, бункера	В атмосферный воздух: – оксид алюминия; – твердые фториды
Сырье: глинозем, анодная масса/ аноды, фторсоли. Электроэнергия	Электролитическое производство первичного алюминия	Первичный алюминий (алюминий-сырец)	Электролизеры: – с самообжигающимися анодами; – с предварительно обожженными анодами	В атмосферный воздух: – фтористый водород; – твердые фториды; – диоксид серы; – оксид углерода; – пыль неорганическая; – смолистые вещества (для электролизеров Содерберга). В поверхностные и подземные воды – отсутствуют. В почву непосредственно – отсутствуют. Отходы производства: – отработанная футеровка электролизеров; – отработанная угольная футеровка; – отработанная кирпичная футеровка; – угольная пена; – огарки обожженных анодов. Прочее: физические воздействия (тепловое, шум, вибрация, электромагнитное загрязнение) не являются лимитирующими для производства первичного алюминия

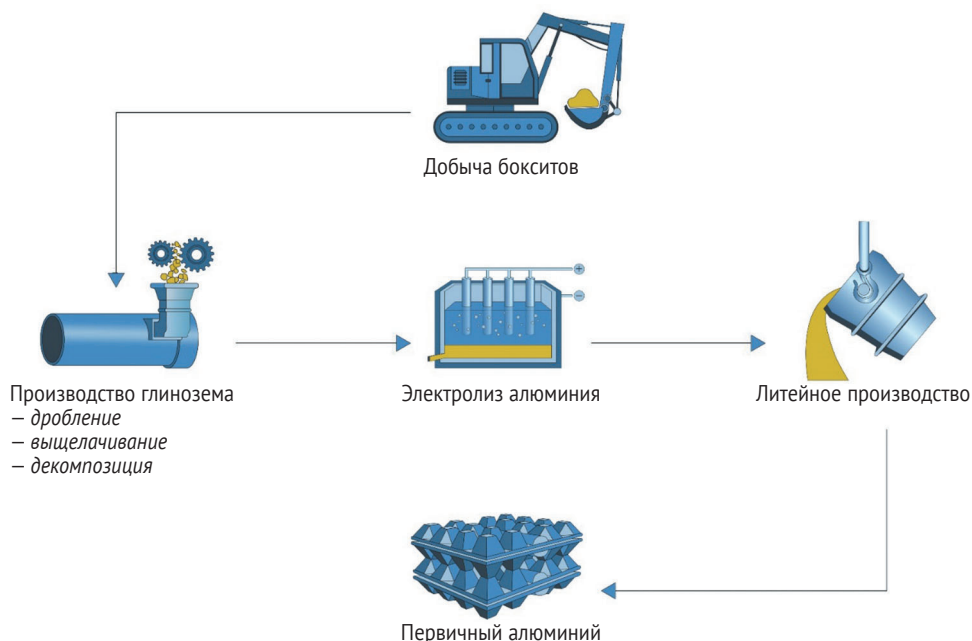


Рис. 10. Схема производства первичного алюминия

Расплавы алюминия и электролита — несмешивающиеся жидкости. Плотность расплавленного алюминия — около $2,3 \text{ г/см}^3$, плотность расплавленного электролита — около $2,1 \text{ г/см}^3$. В электролитической ванне расплав электролита находится над слоем расплава алюминия. В реальности катодом в процессе электролиза является поверхность расплава алюминия на дне электролитической ванны. Обычно высота расплава алюминия — 15–40 см, высота расплава электролита — 15–25 см.

В процессе электролиза расплав электролита выполняет три функции:

- проводит электрический ток между анодом и катодом;
- растворяет оксид алюминия;
- является физическим барьером между образующимся расплавом алюминия и оксидом/диоксидом углерода, образующимся на аноде.

В процессе Холла — Эру электролитом является криолит $\text{Na}_3\text{AlF}_6 (3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3)$, с добавками фторидов алюминия, кальция, магния и растворенным в нем оксидом алюминия (рис. 11). Температура плавления чистого криолита $\text{Na}_3\text{AlF}_6 (3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3)$ (криолитовое отношение 3) — 1010°C , добавки фторидов (до 12–14%) и варьирование криолитового отношения снижают температуру плавления до $930\text{--}965^\circ\text{C}$. Температура процесса электролиза — $950\text{--}965^\circ\text{C}$.

Аноды погружены в расплав электролита, межполюсное расстояние составляет 4–6 см. Над расплавом электролита есть корка замерзшего электролита, укрытая глиноземом. Замерзший электролит образует гарнисаж на бортах электролитической ванны.

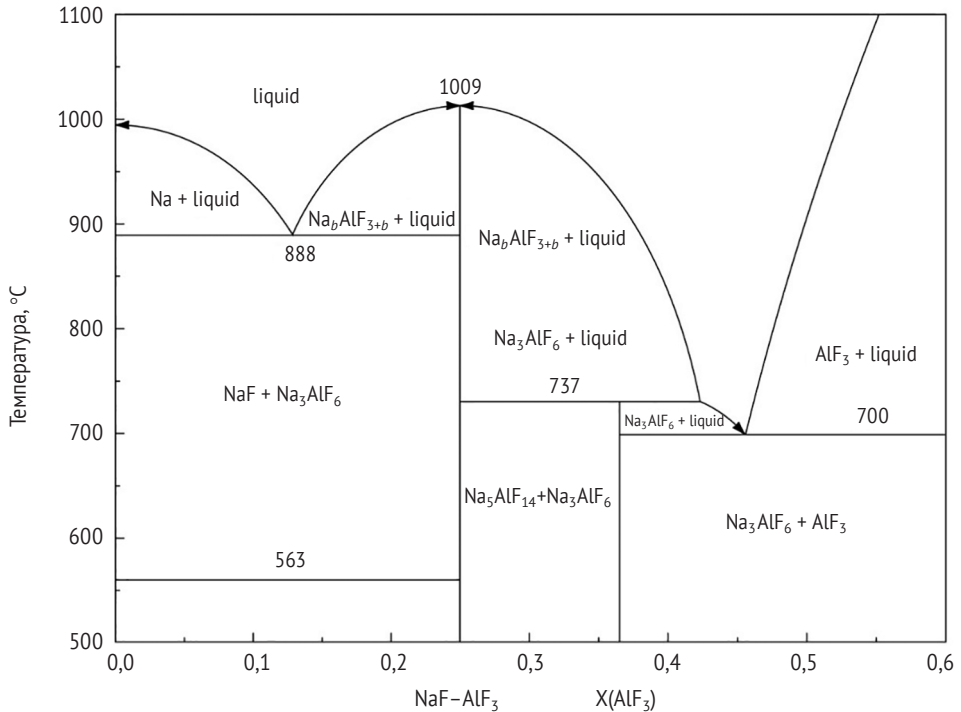


Рис. 11. Диаграмма NaF–AlF₃

Источники: Grjothheim K. Aluminium smelter technology...; Борисоглебский Ю. В. Metallurgy of aluminum; Thonstad J. Aluminium electrolysis...; Sorlie M. Cathodes in aluminium electrolysis; Yurkov A. Refractories for aluminum...

Образовавшийся в процессе электролиза алюминий сливают раз в сутки при помощи вакуумного ковша, количество неслитого алюминия должно быть достаточно для нормальной работы ванны. Ковши с расплавленным алюминием перемещаются в литейный цех.

Количество алюминия, образующегося в процессе электролиза, рассчитывают по закону Фарадея:

$$M = 0,3354 I t,$$

где M — количество алюминия; 0,3354 — электрохимический коэффициент для алюминия, г/А·ч; I — сила тока, А; t — время.

Процесс промышленного электролиза контролируют по нескольким параметрам:

- расход электроэнергии — обычно в пределах 13 000–16 000 кВт на тонну алюминия;
- расход глинозема — обычно 1,92 т на тонну алюминия;
- расход анодов — 425–550 кг на тонну алюминия (теоретический расход для реакции 1 — 338 кг/т, для реакции 2 — 667 кг/т), обычно расход анодной массы в электролизерах Содерберга выше, чем в электролизерах с обожженными анодами;

- выход по току (обычно до 95 % для электролизеров с обожженными анодами и до 90 % для электролизеров Содерберга).

Как правило, параметры работы электролизера со сроком службы 60 месяцев и более — ниже. Еще один важный параметр, по которому учитывают работу алюминиевого завода, — срок службы электролизера²⁷. Одной из тенденций нашего времени является некоторое снижение силы тока в надежде достичь низкого значения удельного расхода электроэнергии.

Наилучшие достигнутые показатели работы электролизера:

- выход по току — до 96 %;
- удельный расход электроэнергии — 12 000–13 200 кВт на тонну алюминия²⁸.

Приведем некоторые факторы, которые могут повлиять на ритмичную работу электролизера и на технико-экономические показатели работы:

- низкое качество глинозема может привести к образованию «настыли» — слоя замерзшего электролита на поверхности углеродного катода;
- низкое качество анода (из-за низкого качества кокса, пека или нарушений технологии анода) может привести к перегреву электролита в ванне;
- перегрев электролита;
- недостаточное количество электролита в ванне; и пр.

Виды электролизеров и технологий электролиза

Промышленное получение алюминия осуществляется в электролизерах, различающихся по конструкции и единичной мощности²⁹. В настоящее время применяются следующие технологии электролиза:

- технология производства алюминия на электролизерах с предварительно обожженными анодами (технология электролиза ОА);
- технология производства алюминия на электролизерах с самообжигающимися анодами (или электролизеры с анодом Содерберга).

Электролизеры с самообжигающимися анодами различаются также по принципу подвода тока к аноду — с боковым и верхним токоподводом (технологии электролиза БТ и ВТ соответственно).

На электролизерах Содерберга с верхним токоподводом токоподводящие штыри устанавливают вертикально на высоту, обеспечивающую их запекание при опускании анодного массива. При достижении нижним концом штыря расстояния от подошвы анода, определяемого безопасным ведением процесса (минимальное расстояние от штыря до подошвы анода — не менее 20 см), штырь раскручивается и извлекается из тела анода.

Катодное устройство электролизера состоит из стального кожуха, футерованного внутри угольными подовыми блоками и боковыми плитами,

²⁷ Sørli M. Cathodes in aluminium electrolysis; Yurkov A. Refractories for Aluminum: Electrolysis and the Cast House. — Cham (Switzerland), 2017.

²⁸ TRAVAUX 49. Proceedings of the 38th International ICSOBA Conference...

²⁹ Sørli M. Cathodes in aluminium electrolysis; Yurkov A. Refractories for Aluminum...; Громова Б. С. Обжиг и пуск алюминиевых электролизеров. — М., 2001; Борисоглебский Ю. В. Металлургия алюминия.

огнеупорными и теплоизоляционными материалами. В нижнюю часть подовых блоков перед их установкой в электролизер заливают чугуном стальные стержни — блюмсы, служащие для отвода тока от подины. Швы между подовыми блоками и периферийный шов набивают подовой массой.

Анодное устройство электролизера Содерберга с верхним токоподводом состоит из угольного анода, помещенного в стальной кожух, анодной шины и анодных штырей, служащих для подвески анода и подвода тока. В нижней части анодного кожуха по его периметру на специальном поясе подвешен газосборный колокол, собранный из чугунных литых секций. Колокол подвешивается на уголок (пояс) анодного кожуха и служит газосборником, собирающим из-под анода смесь газов. На рисунке 12 представлена конструкция электролизера ВТ.

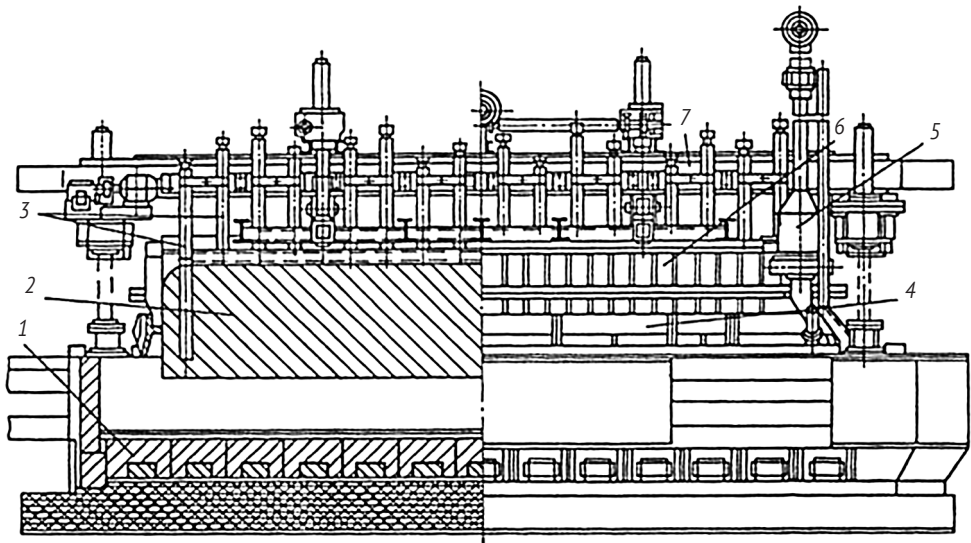


Рис. 12. Электролизер Содерберга с верхним токоподводом:

1 — катодные угольные блоки; 2 — анодный массив; 3 — анодный токоведущий штырь; 4 — колокольный газосборник; 5 — горелочное устройство; 6 — анодный кожух; 7 — анодная шина

На электролизерах ВТ анодные газы эвакуируются с помощью системы колокольного газосборника и горелочного устройства. Колокольный газосборник, собранный из чугунных секций, крепится к пояску анодного кожуха и герметизируется в нижней части засыпкой глинозема. Анодные газы собираются под газосборником и под избыточным давлением поступают в горелочные устройства (для дожигания оксида углерода и смолистых веществ).

Разработкой новой конструкции электролизеров с верхним токоподводом является проект «Создание экологически приемлемой и конкурентоспособной технологии электролиза с анодом Содерберг» (проект «ЭкоСодерберг»).

Проект «ЭкоСодерберг» включает в себя практически весь комплекс работ, связанных с производством алюминия, а именно:

- технологию и оборудование по производству анодной массы;
- технологию изготовления и конструкцию катодного узла;
- технологию анода и электролиза с современной автоматизированной системой управления;
- комплекс мероприятий по дожигу и удалению газов от электролизера;
- автоматизированные системы по транспортировке и питанию электролизера сырьем;
- механизмы, устройства и инструменты, исключаяющие или снижающие долю ручного труда в обслуживании электролизера.

К новым техническим и технологическим решениям конструкции электролизера «ЭкоСодерберг» относятся:

- устройство электролизеров С-8БМ(Э) и С-8Б(Э) с новым безгорелочным газосборным колоколом и новой системой газоудаления;
- новый технологический инструмент, средства механизации, новые технологические практики для обслуживания данных электролизеров;
- технология производства и использования анодной массы с низким содержанием связующего.

На электролизерах БТ конструкция катодного устройства такая же, как у стандартного (рядового) электролизера ВТ.

Анодное устройство электролизера БТ состоит из стальной анодной рамы, которая с помощью стальных канатов и системы полиспасов подвешивается на металлоконструкции. По мере сгорания анода и его опускания для поддержания установленного межэлектродного расстояния одновременно с ним опускается анодная рама. Токоведущими являются два нижних ряда штырей. Они подключаются к анодной ошиновке с помощью медных или (чаще) алюминиевых спусков. Стальные токоведущие анодные штыри забиваются под определенным углом в боковые поверхности анодного массива в верхних зонах, где еще не прошли процессы спекания анода, и по мере сгорания анода перемещаются вместе с анодом в нижние, более горячие, зоны, где спекаются со скоксовавшимся массивом и при достижении определенных температур воспринимают токовую нагрузку. Когда становится вероятным выход нижнего конца штыря из тела анода и контакт с электролитом, штырь извлекается из тела анода и забивается в верхний горизонт. Электролизеры БТ снабжены укрытием для сбора вредных веществ, выделяющихся при электролизе. Укрытие монтируется на каркасе и имеет сверху газосборный колпак и шторы (навивные, створчатые и др.), закрывающие боковые стороны электролизера.

По-разному осуществляется и эвакуация анодных газов, образующихся при электролизе на электролизерах разных типов. На электролизерах БТ все устройство, ограниченное коркой электролита и боковыми поверхностями анода, перекрыто шторными укрытиями. Анодные газы, содержащие горючий оксид углерода, выделяются через специально устраиваемые отверстия в корке электролита — «огоньки». При этом горючие компоненты анодного газа сгорают, а продукты горения удаляются с отсасываемой от электролизера газовойдушной смесью.

На рисунке 13 представлена конструкция электролизера БТ.

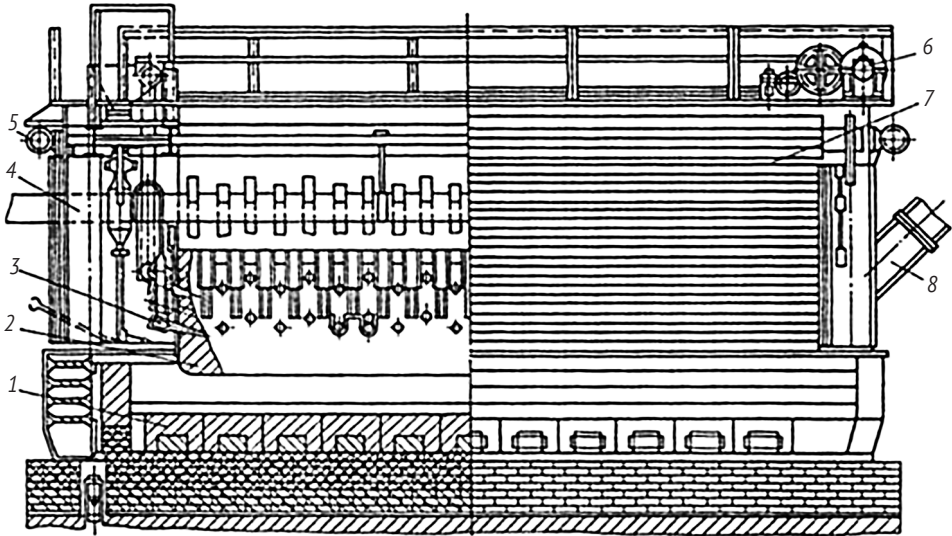


Рис. 13. Электролизер БТ:

- 1 – катодные угольные блоки; 2 – анодный массив; 3 – анодный токоведущий штырь;
 4 – анодная шина; 5 – механизм подъема штор; 6 – механизм перемещения анода;
 7 – шторное укрытие; 8 – патрубок отсоса газов

Электролизеры с обожженными анодами (ОА) отличаются от рассмотренных выше электролизеров с самообжигающимся анодом конструкцией анодного устройства. Обычно электролизеры ОА имеют многоблочный анодный массив. Число анодных блоков зависит от их размеров.

Анодами служат формированные и пресованные угольные блоки, обожженные в печах при конечной температуре 1100–1200°С. После обжига анодов в них монтируются анододержатели, в комплекте с которыми они поставляются в корпус электролиза. Аноды присоединяются к анодным шинам с помощью анододержателей, алюминиевая штанга которых прижимается специальным зажимом к шине, а стальная (ниппели) — закрепляется в ниппельных гнездах блока с помощью чугунной заливки. Для перемещения анодного массива на электролизере имеется подъемный механизм.

Укрытие электролизера ОА предназначено для сбора и удаления образующихся вредных веществ. На рисунке 14 представлена конструкция электролизера ОА.

Завод по производству алюминия — основные цеха, расположение заводов

Существуют две концепции строительства алюминиевых заводов. Согласно одной из существующих концепций, алюминиевый завод должен производить 100–200 тыс. т алюминия в год. Считается, что в таком случае экологическая нагрузка на окружающую среду невысока. Таких заводов много в компании Alcoa.

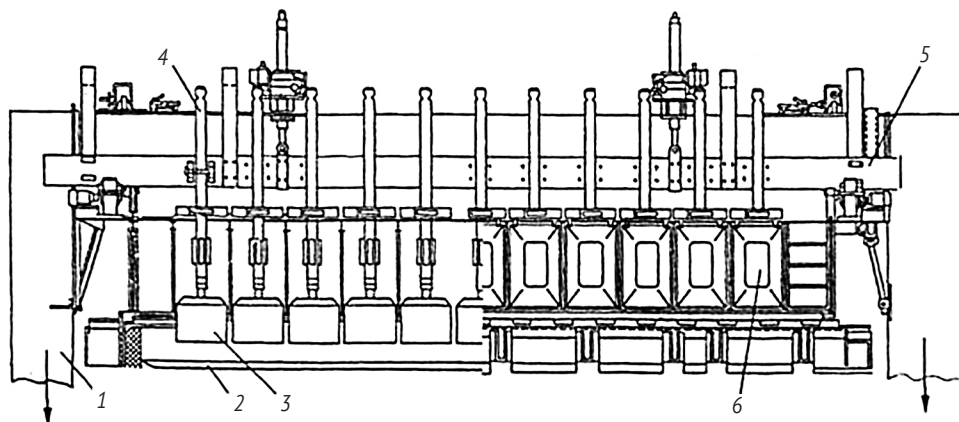


Рис. 14. Конструкция электролизера ОА:

- 1 – анодная шина; 2 – катодное устройство; 3 – ОА; 4 – анодные штанги;
5 – анодная рама; 6 – створки укрытия

Согласно другой концепции строят заводы мощностью 600–700 тыс. т и даже более. Аргументом в пользу такой концепции является то, что современные методы очистки газов и выбросов совершенны и экологическая нагрузка даже от большого завода невысока. Ярким примером реализации такой концепции являются заводы-гиганты на берегу Персидского залива в Эмиратах.

В любом случае алюминиевый завод — это крупнотоннажное производство, нуждающееся в крупном транспортном узле для подвоза глинозема и кокса и транспортировки алюминия потребителям продукции. Очень часто крупные алюминиевые заводы расположены либо на берегу моря вблизи порта, либо вблизи электростанций, обеспечивающих алюминиевые заводы электроэнергией.

Обычно алюминиевый завод состоит из корпусов электролиза, литейного цеха, в который отвозят выработанный первичный алюминий, и цеха изготовления анодов или анодной массы.

Корпуса электролиза — длинные одноэтажные здания, как правило, соединенные переходом для проезда технологического транспорта. Литейный цех расположен так, чтобы в него было удобно по технологическим проездам привозить расплавленный алюминий из корпусов электролиза.

Сортность алюминия

В литейные цеха алюминиевых заводов жидкий металл транспортируют в ковшах из корпусов электролиза. Электролизом криолито-глиноземных расплавов удается получать металл, содержащий не выше 99,80–99,85 % Al. Обычная чистота технического металла 99,5–99,7 % Al. Извлекаемый из электролизеров алюминий-сырец содержит ряд примесей, ухудшающих его качество, поэтому его перед разливкой рафинируют. После обработки расплава в миксере флюсом, снятия шлака, корректировки температуры расплава, химического состава и анализа на содержание водорода расплав считается готовым к разливке.

Как правило, в литейном цехе алюминиевого завода производят первичный алюминий и сплавы. Первичный алюминий производят в виде чушки мелкой и крупногабаритной из алюминия технической чистоты. Сплавы производят в виде плоских, цилиндрических и Т-образных слитков, также часто производят катанку (проволоку). В миксер заливают жидкий металл из корпусов электролиза, и он используется либо для приготовления сплавов, либо для разливки алюминия-сырца в чушку на литейных конвейерах. Миксер предназначен для выдержки металла в течение определенного времени с целью дегазации, введения лигатур и присадок для приготовления сплава, введения флюсов для удаления примесей.

Примеси, содержащиеся в алюминии, можно разбить на три группы: неметаллические (электролит, глинозем, карбид алюминия, угольные частицы, оксидные пленки), механически увлекаемые при переливе металла из ванны; металлические (железо, кремний, титан, натрий, кальций), переходящие из сырья; газообразные — преимущественно водород.

Если миксер используется для разливки алюминия технической чистоты в чушку, то металл из летки по желобу подается на чушкоразливочный конвейер. Во время рафинирования одновременно с очисткой алюминия от примесей происходит смешивание различных по качеству партий, благодаря чему получается средний по составу металл. Смешивание ведут в определенных соотношениях с таким расчетом, чтобы первичный алюминий получался установленных марок, по качеству отвечающих требованиям к металлу. По стандарту ГОСТ 11069-2001 «Алюминий первичный... Марки» первичный алюминий разделяется на три класса и 13 марок (табл. 14)³⁰.

Алюминий высокой чистоты (АВЧ) выпускают также электролизом, но электролитическая ванна имеет принципиально другую конструкцию. В качестве исходного материала используется расплав алюминия технической чистоты.

Алюминий высокой чистоты применяется в аэрокосмической отрасли для изготовления различных узлов и компонентов, а также в производстве компьютерных винчестеров (жестких дисков) и конденсаторной фольги.

Алюминий особой чистоты (ОСЧ, марки А999, чистота 99,999 %) может быть получен тремя способами: зонной плавкой, дистилляцией через субгалогениды и электролизом алюминийорганических соединений. На территории нашей страны существует производство способом зонной плавки. Принцип зонной плавки заключается в многократном прохождении расплавленной зоны вдоль слитка алюминия.

Алюминиевый порошок и алюминиевая пудра — высокодисперсные порошки алюминия с незначительным содержанием примесей (обычно медь, марганец, кремний, железо и др.). Частицы преимущественно имеют вид тонких пластинок, покрытых слоем оксида и жира.

³⁰ ГОСТ 11069-2001. Алюминий первичный. Межгосударственный стандарт. Марки : дата введения 2003-01-01 // Центр сертификации и стандартизации «АНО МЦК». — URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294846/4294846342.htm> (дата обращения: 20.12.2021).

Таблица 14. Алюминий первичный. Классификация и марки по ГОСТ 11069-2001

Марки алюминия	Химический состав, мас. %									
	Al	Fe	Si	Mn	Cu	Mg	Zn	Ga	Ti	Прочие примеси, каждой в отдельности не более
Алюминий высокой чистоты										
A995	99,995	0,0015	0,0015	0,001	0,003	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001
A99	99,99	0,003	0,003	0,002	0,002	0,001	0,003	0,003	0,002	0,001
A98	99,98	0,006	0,006	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,002	0,001
A97	99,97	0,015	0,015	0,002	0,005	0,005	0,004	0,003	0,002	0,002
A95	99,95	0,03	0,03	0,002	0,01	0,005	0,005	0,003	0,002	0,005
Алюминий технической чистоты										
A85	99,85	0,08	0,06	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02
A8	99,8	0,12	0,1	0,02	0,01	0,02	0,04	0,03	0,01	0,02
A7	99,7	0,16	0,16	0,03	0,01	0,02	0,05	0,03	0,01	0,02
A7E	99,7	0,2	0,08	–	0,01	0,02	0,04	0,03	0,01	0,02
A7Э	99,7	0,2	0,1	0,03	0,01	–	0,04	0,04	0,01	0,03
A6	99,6	0,25	0,2	0,03	0,01	0,03	0,06	0,03	0,02	0,03
A5E	99,7	0,35	0,2	–	0,02	0,03	0,04	0,03	0,015	0,02
A5	99,7	0,3	0,3	0,05	0,02	0,03	0,06	0,03	0,03	0,03
A35	99	0,5	0,5	0,05	0,02	0,05	0,08	–	0,03	0,03
A0	99	0,8	0,5	0,05	0,03	0,05	0,08	–	0,03	0,03

Следует различать алюминиевый порошок и алюминиевую пудру. Алюминиевый порошок используется в порошковой металлургии и имеет частицы диаметром 100–1000 мкм, в то время как толщина лепестка пудры составляет 0,2–0,5 мкм, а средний линейный размер не превышает 30 мкм.

Заводы по производству вторичного алюминия

Сплавы алюминия отливают в литейных цехах алюминиевых заводов и плавильно-литейных цехах заводов по переработке алюминия. В плавильно-литейных цехах заводов по переработке алюминия металл поступает в виде крупных и мелких чушек или слитков. Организация цехов и состав плавильно-литейных агрегатов немного отличаются.

Для приготовления сплавов металл дополнительно очищают и легируют. От неметаллических и газообразных примесей, а также от натрия и кальция алюминий очищают продувкой расплавленного металла газом. В этом случае по желобам металл из миксеров поступает в дегазационное устройство и далее в кристаллизаторы.

На заводах по переработке алюминия плавильно-литейный агрегат, как правило, состоит из плавильной печи и миксера, в который металл поступает по системе перелива. В плавильные печи металл загружается либо через боковые двери мультдозавалочными машинами, либо сверху (при наличии съёмного свода). Металл поступает, уже частично очищенный от газовых включений и примесей, других принципиальных отличий в организации цехов нет.

Плавильно-литейные агрегаты литейных цехов алюминиевых заводов — это плавильные печи, миксеры (стационарные или наклоняемые), устройства для дегазации, индукционные печи тигельные или каналные (служащие для переплава отходов и для приготовления сплавов), пламенные печи для переплава отходов.

Обычно в литейных цехах алюминиевых заводов кроме алюминия технической чистоты производят малолегированные сплавы, а на заводах по переработке алюминия — высоколегированные сплавы (табл. 15).

Таблица 15. Классификация алюминиевых сплавов

Тип сплава	Деформируемые сплавы	Литейные сплавы
Алюминий-сырец	1XXX	1XXXO
Al–Cu	2XXX	2XXXO
Al–Mn	3XXX	–
Al–Si	4XXX	4XXXO
Al–Mg	5XXX	5XXXO
Al–Mg–Si	6XXX	6XXXO
Al–Zn–Mg	7XXX	7XXXO
Al–Fe–Si	8XXX	–

Самыми распространенными легирующими элементами в составе алюминиевых сплавов являются медь, магний, марганец, кремний и цинк, реже — цирконий, литий, бериллий, титан.

В основном алюминиевые сплавы можно разделить на две основные группы: литейные сплавы³¹ и деформируемые (конструкционные)³². В свою очередь, конструкционные сплавы подразделяются на термически обработанные и термически необработанные.

Для изготовления литейных сплавов расплавленный алюминий заливают в литейную форму, которая соответствует конфигурации получаемого изделия.

³¹ ГОСТ 1583-93. Группа В51. Межгосударственный стандарт. Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия : дата введения 1997-01-01 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200009199> (дата обращения: 13.12.2021).

³² ГОСТ 4784-2019. Межгосударственный стандарт. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки : дата введения 2019-09-01 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200166725> (дата обращения: 14.12.2021).

Эти сплавы часто содержат значительные примеси кремния для улучшения литейных свойств.

Деформируемые сплавы сначала разливают в слитки, а затем придают им нужную форму. Происходит это несколькими способами в зависимости от вида продукта:

- прокаткой, если необходимо получить листы и фольгу;
- прессованием, если нужно получить профили, трубы и прутки;
- формовкой, чтобы получить сложные формы полуфабрикатов;
- ковкой, если требуется получить сложные формы с повышенными механическими свойствами.

Большая часть производимых сплавов относится к деформируемым, которые предназначены для последующейковки и штамповки. Существуют стандарты на сплавы — ГОСТ 1583-93; ГОСТ 4784-2019.

Алюминиево-магниевые сплавы Al-Mg (серия 5XXX) — одни из самых распространенных, они существуют как в виде деформируемых сплавов, так и в виде сплавов для изделий фасонного литья³³. Сплавы системы Al-Mg характеризуются сочетанием удовлетворительной прочности, хорошей пластичности, очень хорошей свариваемости и коррозионной стойкости. Наиболее широкое распространение в промышленности получили сплавы с содержанием магния от 1 до 5%. Рост содержания магния в сплаве существенно увеличивает его прочность. Увеличение концентрации магния на каждый процент содержания повышает предел прочности сплава на ~30 МПа, а предел текучести — на ~20 МПа. Для улучшения прочностных характеристик сплавы системы Al-Mg легируют хромом, марганцем, титаном, кремнием или ванадием.

Алюминиево-кремниевые сплавы (силумины, серия 4XXX) — группа литейных сплавов. Имеют малую усадку при кристаллизации расплава. Применяются для отливок корпусов разных механизмов, корпусов приборов, деталей бытовых приборов, для декоративного литья.

Алюминиево-марганцевые Al-Mn (серия 3XXX, AMц) сплавы обладают хорошей прочностью, пластичностью и технологичностью, высокой коррозионной стойкостью и хорошей свариваемостью.

Сплавы алюминий-медь-кремний называют алькусинами. Из-за высоких технических свойств их используют во втулочных подшипниках, а также при изготовлении блоков цилиндров. Обладают высокой твердостью поверхности, поэтому плохо обрабатываются.

Механические свойства алюминиево-медных сплавов (серия 2XXX) в термоупрочненном состоянии порой превышают даже механические свойства некоторых низкоуглеродистых сталей. Алюминиево-медные сплавы легируют марганцем, кремнием, железом и магнием. Легирование магнием значительно повышает предел текучести и прочности. Добавление железа и никеля в сплав повышает его жаропрочность, кремния — способность к искусственному старению.

³³ *Белецкий В. М.* Алюминиевые сплавы...; *Напалков В. И.* Непрерывное литье алюминиевых сплавов.

Авиаль — группа сплавов системы алюминий-магний-кремний (серия 6XXX) с незначительными добавлениями иных элементов (Mn, Cr, Cu). Название образовано от сокращения словосочетания «авиационный алюминий». Эти сплавы отличаются высокой пластичностью и удовлетворительной коррозионной стойкостью. Из авиала изготавливают кованные и штампованные детали сложной формы. Например, лонжероны лопастей винтов вертолетов.

Материальный и энергетический баланс производства алюминия

Под технологическим балансом подразумевают результаты расчетов (выражение в виде уравнений, таблиц или диаграмм), отражающих количество введенных и полученных в производственном процессе материалов и энергии (их приход и расход).

В основе составления материальных и энергетических балансов лежат законы сохранения материи и энергии.

В каждом материальном балансе количество введенных в производственный процесс материалов должно равняться количеству полученных основных и промежуточных продуктов и отходов производства. Точно так же количество введенной тепловой или электрической энергии должно быть равно количеству энергии, выведенной с продуктами и отходами производства.

Материальные и энергетические балансы имеют большое значение для анализа и эффективного осуществления производственного процесса. С их помощью устанавливают фактический выход продукции, коэффициенты полезного использования энергии, расходы и потери сырья, топлива и других материалов. По числовым данным технологических балансов принимаются организационные и технические решения по совершенствованию работы оборудования, максимальному использованию, утилизации или регенерации материальных и энергетических ресурсов. Балансы весьма важны для составления рациональных схем технологического процесса и установления оптимальных размеров, мощности и производительности оборудования.

Поскольку в полном энергетическом балансе потоки энергии при производстве алюминия связаны с определенными материальными потоками, то каждому потоку энергии соответствует материальный поток. Следовательно, диаграмма балансов производства алюминия будет выглядеть следующим образом (рис. 15)³⁴.

ХАРАКТЕРИСТИКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

В таблице 16 приведены сведения о химических веществах процесса производства алюминия.

³⁴ Степанов В. С. Эффективность использования энергии. — Новосибирск, 1994.

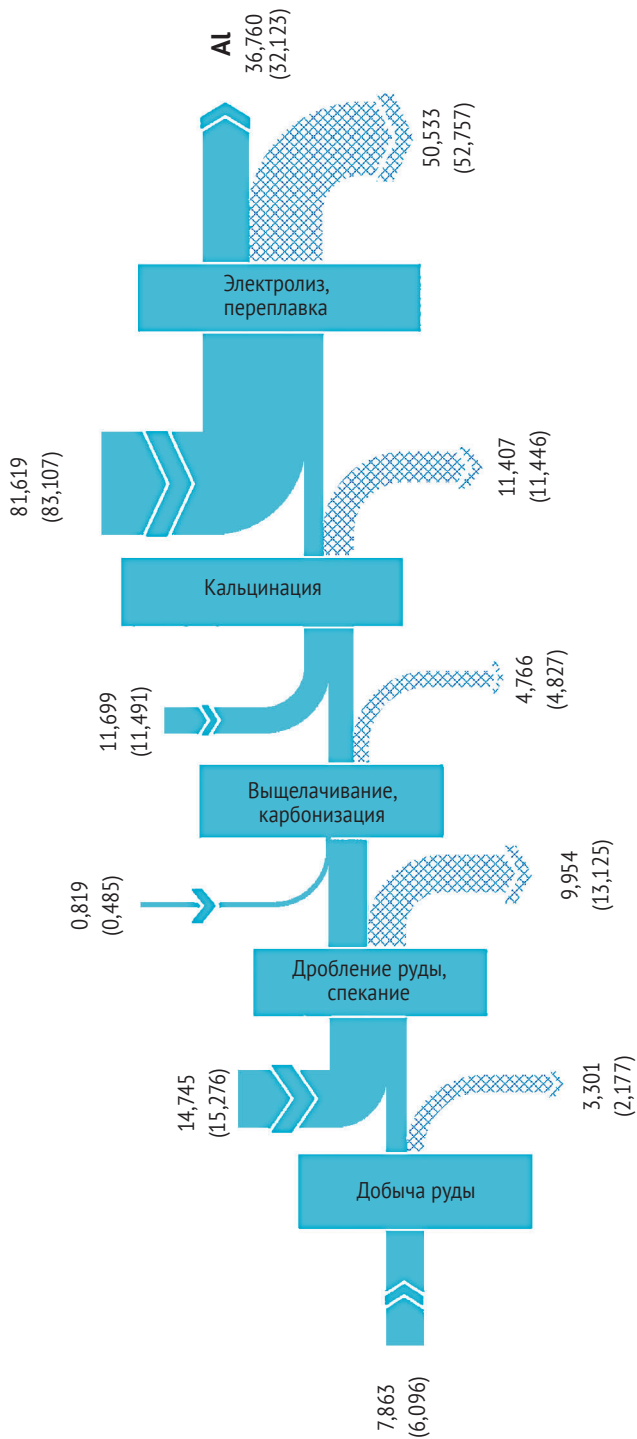


Рис. 15. Диаграмма потоков энергии (эксергии) производства алюминия

Таблица 16. Сведения о химических веществах процесса производства алюминия

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
1	Алюминий	Основной процесс	Производство алюминия	Целевой продукт, эмиссия (сбросы)	7429-90-5	Твердое	Al
2	Оксид азота	Основной процесс	Производство алюминия	Эмиссия (выбросы)	10102-43-9	Газ	NO
3	Диоксид азота	Основной процесс	Производство алюминия	Эмиссия (выбросы)	10102-44-0	Газ	NO ₂

Сведения о веществе				
Гигиенические нормативы ^{а)}				Краткое описание опасности и основные характеристики ^{б)}
В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
ПДК, мг/м ³	Класс опасности	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	
6/2 (по алюминию и его сплавам)	3	–	–	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Воспламеняющееся твердое вещество. При контакте с водой выделяет воспламеняющиеся газы. В форме порошка склонен к спонтанному воспламенению на воздухе (пирофорное вещество): $T_{св.} = 320-520^{\circ}C$; Нижний концентрационный предел распространения пламени 40 г/м³.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> При вдыхании пыли вызывает раздражение верхних дыхательных путей, может поражать легкие в результате продолжительного воздействия (фиброгенное действие).</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Вызывает изменение органолептических свойств воды (растворимые в воде формы).</p>
5 (по оксидам азота в пересчете на NO ₂)	3	0,4/-/0,06	3	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Окисляющий газ: может вызвать или усилить возгорание.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Смертельно при вдыхании: $LC_{50} = 57,5$ ppm (инг., крысы, 4 ч). Вызывает химические ожоги кожи и глаз. Может поражать органы (дыхательную систему, ЦНС, систему крови) в результате продолжительного воздействия.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Не оказывает негативного воздействия^{с)}.</p>
2	3	0,2/0,1/0,04	3	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Окисляющий газ: может вызвать или усилить возгорание.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Смертельно при вдыхании: $LC_{50} = 88$ ppm (инг., крысы, 4 ч). Вызывает химические ожоги кожи и глаз.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Не оказывает негативного воздействия^{с)}.</p>

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
4	Диоксид серы	Основной процесс	Производство алюминия	Эмиссия (выбросы)	7446-09-5	Газ	SO ₂
5	Диоксид углерода	Основной процесс	Производство алюминия	Эмиссия (выбросы)	124-38-9	Газ	CO ₂
6	Бензапирен	Основной процесс	Производство алюминия	Эмиссия (выбросы)	50-32-8	Твердое	C ₂₀ H ₁₂

Таблица 16 (продолжение)

Сведения о веществе				
Гигиенические нормативы ^{а)}				Краткое описание опасности и основные характеристики ^{б)}
В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
ПДК, мг/м ³	Класс опасности	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	
10	3	0,5/0,05/-	3	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Токсично при вдыхании: LC₅₀ = 884,14 ppm (инг., крысы, 4 ч). Смертельная концентрация для человека 2660 мг/м³ (при вдыхании в течение 10 мин). Вызывает химические ожоги кожи и глаз.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Не оказывает негативного воздействия^{с)}.</p>
27000/9000	4	-	-	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Негативное воздействие проявляется в высоких концентрациях при снижении парциального давления кислорода в воздухе (вызывает удушье, наркотический эффект).</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Парниковый газ.</p>
-/0,00015	1	-/0,000001/ 0,000001	1	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Вызывает раздражение кожи и глаз. При контакте с кожей может вызывать аллергическую реакцию. Может вызывать генетические дефекты и раковые заболевания (мутагенное и канцерогенное действие), отрицательно повлиять на способность к деторождению или на неродившегося ребенка (репродуктивная токсичность).</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Чрезвычайно токсично для водных организмов, в т. ч. с долгосрочными последствиями: LC₅₀ (NOEC) < 0,1 мг/л (рыбы, 96 ч).</p>

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
7	Фториды газообразные, включая:	Основной процесс	Производство алюминия	Эмиссия (выбросы)	–	Газ	–
	Фтористый водород			Эмиссия (выбросы)	7664-39-3	Газ	HF
8	Фториды твердые:	Основной процесс	Производство алюминия	Эмиссия (выбросы)	–	Твердое	–
	а) неорганические хорошо растворимые						
	б) неорганические плохо растворимые включая:						
	Алюминия фторид				7784-18-1	Твердое	AlF ₃

Таблица 16 (продолжение)

Сведения о веществе				
Гигиенические нормативы ^{а)}				Краткое описание опасности и основные характеристики ^{б)}
В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
ПДК, мг/м ³	Класс опасности	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	
–	–	–	–	Сведения об опасных свойствах и идентификационные данные зависят от конкретного вещества данной группы. Сведения по фтористому водороду приведены ниже.
0,5/0,1	2	0,02/0,014/ 0,005	2	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Смертельно при вдыхании и попадании на кожу; LC₅₀ = 790 мг/м³ (инг., крысы, 1 ч). Смертельная концентрация для человека 41,6 мг/м³ (при вдыхании в течение 30 мин). Вызывает химические ожоги кожи и глаз. Поражает органы дыхательной системы в результате однократного воздействия, поражает органы (костную ткань, ЦНС, почки, печень, бронхи и др.) в результате продолжительного воздействия.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Не оказывает негативного воздействия^{с)}.</p>
–	–	0,03/0,01/– 0,2/0,03/–	2	Сведения об опасных свойствах и идентификационные данные зависят от конкретного вещества данной группы. Сведения по фториду алюминия приведены ниже.
2,5/0,5	3	0,2/0,03/– (по фторидам неорганическим плохо растворимым)	2	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Вредно при проглатывании, может причинить вред при вдыхании пыли: LD₅₀ = 1800 мг/кг (в/ж, крысы); LC₅₀ > 530 мг/м³ (инг., крысы, 4 ч). Вызывает раздражение кожи, глаз и верхних дыхательных путей.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Может вызывать долгосрочные отрицательные последствия для водных организмов.</p>

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
9	Хлористый водород	Основной процесс	Производство алюминия	Эмиссия (выбросы)	7647-01-0	Газ	HCl
10	Углерода оксид	Основной процесс	Производство алюминия	Эмиссия (выбросы)	630-08-0	Газ	CO
11	Глинозем	Основной процесс	Производство алюминия	Целевой продукт, сырье	1344-28-1	Твердое	Al ₂ O ₃

Таблица 16 (продолжение)

Сведения о веществе				
Гигиенические нормативы ^{а)}				Краткое описание опасности и основные характеристики ^{б)}
В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
ПДК, мг/м ³	Класс опасности	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	
5	2	0,2/0,1/0,02	2	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Токсично при вдыхании: LC₅₀ = 8300 мг/м³ (инг., крысы, 1 ч). Смертельная концентрация для человека 4542 мг/м³ (при вдыхании в течение 5 мин). Вызывает химические ожоги кожи и глаз, раздражение верхних дыхательных путей.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Вызывает изменение органолептических свойств воды.</p>
20	4	5,0/3,0/3,0	4	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Чрезвычайно легковоспламеняющийся газ: образует взрывоопасные смеси с воздухом в концентрации 10,9 об. % и более.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Токсично при вдыхании: LC₅₀ = 1300 ppm (инг., крысы, 4 ч). Поражает органы (ЦНС, систему крови, иммунную систему и др.) в результате продолжительного воздействия. Предполагается, что данное вещество может отрицательно повлиять на способность к деторождению (репродуктивная токсичность).</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Не оказывает негативного воздействия^{в)}.</p>
-/6	4	-/0,01/0,005	2	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Вызывает раздражение кожи, глаз и верхних дыхательных путей. Может поражать легкие в результате продолжительного воздействия при вдыхании пыли (фиброгенное действие).</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Вызывает изменение органолептических свойств воды.</p>

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
12	Боксит	Основной процесс	Производство алюминия	Сырье	1318-16-7	Твердое	$Al_2O_3 \cdot nH_2O$
13	Нефелин, включая:	Основной процесс	Производство алюминия	Сырье	1302-72-3	Твердое	$AlK_{0-0,25}Na_{0,75-1,04}Si$
	Калий натрий алюмосиликат				12736-96-8		
14	Пыль неорганическая, содержащая двуокись кремния, в %:	Основной процесс	Производство алюминия	Эмиссия (выбросы)	–	Твердое	–
	а) > 70						
	б) 20–70						
	в) < 20 включая:						

Таблица 16 (продолжение)

Сведения о веществе				
Гигиенические нормативы ^{а)}				Краткое описание опасности и основные характеристики ^{б)}
В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
ПДК, мг/м ³	Класс опасности	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	
-/6	4	-	-	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Вызывает раздражение кожи, глаз и верхних дыхательных путей. Может поражать легкие в результате продолжительного воздействия при вдыхании пыли (фиброгенное действие).</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Не оказывает негативного воздействия^{с)}.</p>
-/6 (по алюмо- силикатам)	4	-/0,003/- (по алюмосиликатам)	2	<p>Сведения об опасных свойствах и идентификационные данные зависят от конкретного вещества данной группы. Сведения по калий-натрий-алюмосиликату приведены ниже.</p> <p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Вызывает раздражение кожи, глаз и верхних дыхательных путей. Может поражать легкие в результате продолжительного воздействия при вдыхании пыли (фиброгенное действие).</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Вызывает изменение органолептических свойств воды.</p>
0,02 (ОБУВ по кремнию диоксиду аморфному)	-		3	Сведения об опасных свойствах и идентификационные данные зависят от конкретного состава пыли. Данные по диоксиду кремния приведены ниже.
		0,15/0,05		
		0,3/0,1		
		0,5/0,15		

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
14	<p>Кремний диоксид</p> <p>а) аморфный в виде аэрозоля конденсации при содержании более 60 %; кремний диоксид аморфный и стеклообразный в виде аэрозоля дезинтеграции; кристаллический при содержании в пыли более 70 %</p> <p>б) кремний диоксид аморфный в виде аэрозоля конденсации при содержании от 10 до 60 %; кремний диоксид кристаллический при содержании в пыли от 10 до 70 %</p> <p>в) кремний диоксид кристаллический при содержании в пыли от 2 до 10 %</p>	Основной процесс	Производство алюминия	Эмиссия (выбросы)	7631-86-9 (аморфный) 14464-46-1 (кристаллит) 14808-60-7 (кварц)	Твердое	SiO ₂
15	Взвешенные вещества	Основной процесс	Производство алюминия	Эмиссия (сбросы)	–	–	–

Примечания

- ^{a)} Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания”».
- ^{b)} Основные характеристики согласно справочным материалам и сведениям, представленным в базах данных по химическим веществам:
- База данных ChemADVISOR. – URL: <https://www.chemadvisor.com/Online> (дата обращения: 20.12.2021);
 - База данных Европейского Химического Агентства (ECHA). – URL: <https://echa.europa.eu/> (дата обращения: 20.12.2021);
 - База данных АРИПС «Опасные вещества». – URL: <http://www.gpohv.ru/online/> (дата обращения: 20.12.2021);
 - Гусева Т. В. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды: справочные материалы. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2005.
- ^{c)} Согласно принятым на международном уровне подходам к классификации опасности химических веществ – Рекомендациям ООН «Согласованная на глобальном уровне система классификации опасности и маркировки химической продукции» (GHS). – URL: <https://unece.org/ru/ghs-rev7-2017> (дата обращения: 20.12.2021).

Идентификационные данные вещества:

Номер CAS (Chemical Abstracts Service), или CAS Number – уникальный численный идентификатор химического вещества, внесенного в Реестр Химической Реферативной службы (подразделение Американского химического общества).

Таблица 16 (окончание)

Сведения о веществе				
Гигиенические нормативы ^{а)}				Краткое описание опасности и основные характеристики ^{б)}
В воздухе рабочей зоны		В атмосферном воздухе городских и сельских поселений		
ПДК, мг/м ³	Класс опасности	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	
3/1	3	0,15/0,05	3	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Не опасен.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Вызывает раздражение кожи, глаз и верхних дыхательных путей. Пыль кристаллического кремния (кварц, кристобалит) может поражать легкие в результате продолжительного воздействия при вдыхании (фиброгенное действие).</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Не оказывает негативного воздействия^{с)}.</p>
6/2		0,3/0,1		
-/4		0,5/0,15		
-	-	0,5/0,15/0,075	3	<p>Сведения об опасных свойствах и идентификационные данные зависят от конкретного состава взвешенных веществ.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Нарушают общесанитарный режим водоемов.</p>

Показатели опасности, обусловленной физико-химическими свойствами вещества:

$T_{св}$ – температура самовоспламенения – наименьшая температура окружающей среды, при которой в условиях специальных испытаний наблюдается самовоспламенение вещества.

Показатели опасности, обусловленной токсикологическими свойствами вещества:

LC_{50} (Letal Concentration) – средняя смертельная концентрация в воздухе – концентрация вещества, вызывающая гибель 50 % животных при 1- или 4-часовом ингаляционном (инг.) воздействии.

LD_{50} (Letal Dose) – средняя смертельная доза – доза вещества, вызывающая гибель 50 % животных при однократном введении в желудок (в/ж) или нанесении на кожу (н/к).

Показатели опасности, обусловленной экотоксикологическими свойствами вещества:

LC_{50} (Letal Concentration) – средняя смертельная концентрация – концентрация вещества в воде, вызывающая гибель 50 % водных организмов (гидробионтов) при установленном времени воздействия (96-часовом для рыб, 48-часовом для ракообразных, 72- или 96-часовом для водорослей) в течение заданного периода наблюдения.

NOEC (No Observed Effect Concentration), NOEL (No Observed Effect Limit), NOAEL (No Observed Adverse Effect Level), NOELR (No Observed Effect Loading Rate) – максимально недействующая доза – максимальная концентрация вещества в воде, при которой не происходит гибели водных организмов и/или не наблюдается иного видимого токсического эффекта на гидробионтов в пределах установленного времени воздействия в течение заданного периода наблюдения.

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Сравнение технологий производства алюминия по технологическим этапам

Для сравнения технологий производства алюминия по технологическим этапам необходимо определить показатели, пригодные для сравнения согласно соответствующим условиям:

- актуальность на протяжении всех технологических этапов развития алюминиевой промышленности;
- наличие сопоставимых статистических данных за рассматриваемый период.

В качестве наиболее распространенных критериев, характеризующих промышленность, можно выделить: ресурсоемкость, энергоемкость, экологичность, трудоемкость. Сравнение технологий различных технологических этапов развития алюминиевой промышленности производилось по двум критериям: чистота получаемого алюминия и расход электроэнергии на получение алюминия.

На рисунке 16 представлены объемы производства алюминия, этапы развития алюминиевой промышленности и выбранные критерии для сравнения (чистота получаемого алюминия и расход электроэнергии на получение алюминия).

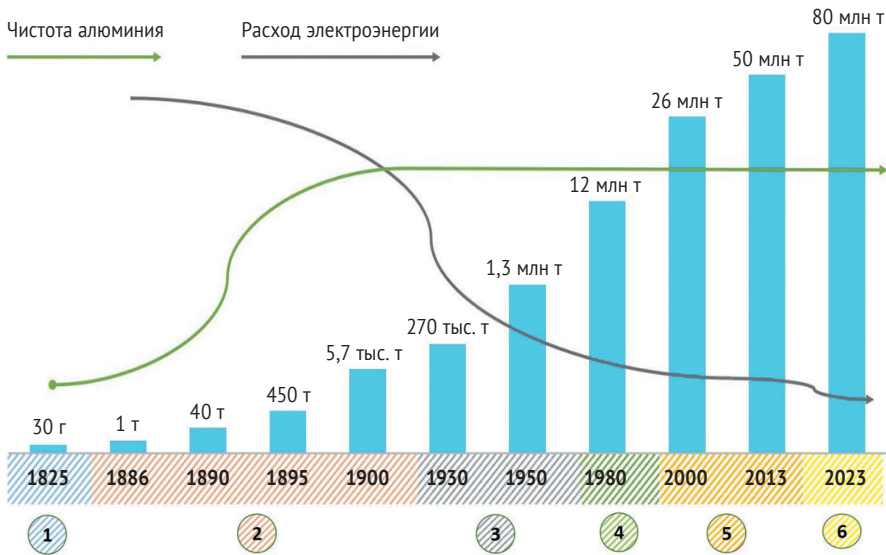


Рис. 16. График исторического развития алюминиевой промышленности:

- 1 — открытие алюминия и получение его химическими методами;
- 2 — получение алюминия электролизом;
- 3 — получение алюминия электролизом с использованием технологии самообжигающегося анода Содерберга;
- 4 — широкое применение алюминия, переход на технологию обожженного анода;
- 5 — получение алюминия с минимизацией затрат электроэнергии и минимизацией выбросов и отходов;
- 6 — получение алюминия с использованием инертных анодов и дренируемых катодов

Сравнение применяемых технологий производства первичного алюминия

Расход сырья, электроэнергии, выбросы пыли и образование отходов являются основными показателями ресурсо- и энергосбережения при производстве первичного алюминия.

Расход сырья зависит от многих факторов: типа электролизера, состояния технологии, качества сырья, транспортных потерь и т. д.³⁵

В мире нет единообразия применяемых устройств для получения алюминия (электролитических ванн) и технологий (несмотря на то что в основе всех ныне применяемых технологий лежит метод Холла — Эрру).

До сих пор в мире осуществляется технология получения алюминия с применением анода Содерберга (и есть попытки разработать технологию анода Содерберга с минимальным количеством выбросов полиароматических углеводородов (ПАУ)), используются маломощные электролизеры с силой тока менее 140 кА, а также и сверхмощные электролизеры с силой тока 550–600 кА (и есть разработки электролизеров с силой тока до 700–900 кА).

При разработке сверхмощных электролизеров можно выделить две тенденции — повышение плотности тока (что ведет за собой неизбежные проблемы МГД-стабильности) и увеличение площади электролизеров без повышения плотности тока.

Вне всякого сомнения, усилия разработчиков электролизеров и технологий получения алюминия сконцентрированы на повышении эффективности процесса и сокращении расхода электроэнергии и в конечном итоге на сокращении себестоимости производства алюминия.

В целом в мире наблюдается довольно большой разброс в ценах на электроэнергию и многообразии природоохранных законодательств. И есть прецеденты, когда (с учетом логистики, транспортных расходов, а также постоянных устойчивых связей с заказчиками, например, из автомобильной промышленности) производители алюминия, работающие с устаревшими маломощными электролизерами, успешно конкурируют с самыми современными алюминиевыми заводами, работающими на электролизерах с силой тока 450–500 кА.

В таблице 17 приведены данные по расходу сырья, материалов и энерго-ресурсов для разных технологий электролиза³⁶.

³⁵ Thonstad J. Aluminium electrolysis...; Grjothheim K. Aluminium smelter technology...; Бору-соглебский Ю. В. Металлургия алюминия.

³⁶ Производство алюминия : Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 11-2019 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/564068890> (дата обращения: 14.01.2022).

Таблица 17. Расход сырья, материалов и энергоресурсов

Наименование оборудования	Технологические характеристики			
	Расход электроэнергии, кВт·ч/т Al	Расход глинозема, кг/т Al	Расход анодов нетто или анодной массы, кг/т Al	Расход фтор-алюминия, кг/т Al
Электролизеры с самообжигающимися анодами и верхним токоподводом	15 216–16 111	1920–1939	522–528	21–40
Электролизеры с самообжигающимися анодами и боковым токоподводом	15 171–15 620	1932–1944	510–515	12,0–21,0
Электролизеры с предварительно обожженными анодами*	13 158–15 126*	1917–1938	420–460	12,0–21,0

* Наилучшие значения расхода электроэнергии на 2020 г. – 12 000–13 200 кВт·ч/т Al, целью на сегодняшний день среди производителей алюминия можно считать 10 000–11 000 кВт·ч/т Al.

Источник: Производство алюминия : Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 11-2019 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов.

Расход глинозема практически не зависит от типа электролизеров и определяется в основном транспортными потерями, потерями на перевозку от склада до электролизеров и содержанием мелких фракций, значительная часть которых теряется в виде пыли.

Расход фторидов (криолит и трифторид алюминия) зависит от многих факторов: типа электролизера; состояния технологии; состава и температуры перегрева электролита; наличия, вида, КПД и КПИ газосборного и газоочистного оборудования; состояния технологической дисциплины; содержания оксида натрия в глиноземе; количества снимаемой угольной пены и эффективности ее флотации и др.

Расход анодов зависит от типа электролизеров. Фактически в электролизере на производство 1 т алюминия расходуется 420–460 кг обожженных анодов. При этом остается огарок, который вовлекается в изготовление анодов. Расход анодной массы также зависит от многих факторов: потерь при транспортировке, потерь летучих компонентов при коксовании пека и с поверхности жидкой анодной массы, осыпания и окисления боковых поверхностей анода, выхода по току и плотности тока.

Расход электроэнергии зависит главным образом от типа электролизера и выхода по току. При прочих равных условиях наибольший расход электроэнергии — у электролизеров с самообжигающимся анодом, а наименьший — у ванн с обожженным анодом. Источниками выделения вредных веществ при производстве алюминия являются используемые сырье и материалы. При этом зачастую очень важную роль играет не столько химический состав применяемых сырья и материалов, сколько их физические характеристики, такие, например, как гранулометрический состав.

Образование и выделение из электролизеров фтористых соединений, основным из которых является фторид водорода, происходят непрерывно, хотя они и не связаны непосредственно с электрохимическим процессом, а обусловлены процессами испарения и разложения расплава электролита и загружаемых фтористых солей. Летучестью электролита и загружаемых фтористых солей обусловлено выделение из электролизеров лишь некоторой части твердых фторидов, обнаруживаемых в пыли. Вторым источником пылевидных фторидов служит механический унос загружаемых солей восходящими потоками анодных газов либо отсасываемой от электролизера газозвушной смесью.

Источником выделения и выбросов в атмосферу ПАУ при производстве алюминия в электролизерах с самообжигающимися анодами является в основном каменноугольный пек, используемый в качестве связующего при получении анодной массы. ПАУ выделяются из электролизеров в результате термохимических процессов, происходящих при коксовании анодной массы. Второй источник выделения смолистых веществ связан с операцией перестановки токоподводящих штырей в аноде. При использовании рядовой анодной массы после раскручивания и извлечения штыря в образовавшееся отверстие в спеченной части анода затекает жидкая анодная масса из верхних зон. При попадании жидкой анодной массы в зону высоких температур происходит бурное коксование пека с образованием большого количества возгонов смолы, которое выбрасывается в атмосферу корпуса. Кроме того, сырая угольная масса налипает на горячий штырь в момент извлечения его из анода, когда раскаленная его часть касается слоя жидкой анодной массы, при этом в атмосферу корпуса также выделяются ПАУ.

ПАУ, образующиеся при коксовании анодной массы и поступающие в газосборник, дожигаются в горелках. Полнота сгорания зависит от конструкции горелок, регулировки процесса горения и контроля за процессом. Часть несгоревшей смолы, особенно ее тяжелые фракции, конденсируется и вместе с пылью оседает в каналах газоходов, остальная поступает на газоочистку. В зависимости от типа электролизера, условий и уровня его эксплуатации объем и состав пылегазовоздушной смеси может изменяться.

Итак, основными факторами загрязнения атмосферы при производстве алюминия по методу Холла — Эру являются выбросы пыли и образование угольной пены (табл. 18).

Таблица 18. Выбросы пыли в атмосферу и образование отходов при производстве первичного алюминия

Наименование	Единица измерения	Технология электролиза ОА	Технология электролиза самообжигающимися анодами	Технология электролиза ВТ
Пыль общая	кг/т Al	3,4–4,9	3,20–5,50	3,2–16,9
Угольная пена	кг/т Al	До 0,8	До 13	15–43

На рисунке 17 представлен график показателей ресурсо- и энергоэффективности при производстве первичного алюминия.

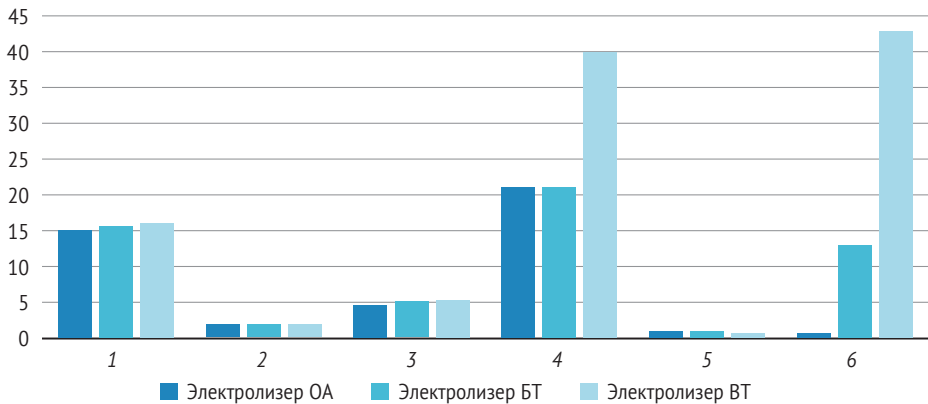


Рис. 17. График показателей ресурсо- и энергоэффективности при производстве первичного алюминия:

1 – расход электроэнергии, кг/т Al $\times 10^3$; 2 – расход глинозема, кг/т Al $\times 10^3$; 3 – расход анодов и анодной массы, кг/т Al $\times 10^2$; 4 – расход фторидов алюминия, кг/т Al; 5 – выбросы пыли, кг/т Al $\times 10^2$; 6 – образование отходов, кг/т Al

Сравнение технологий производства алюминия по технологическим этапам с использованием эксергетического анализа

Показатель качества энергии, определяемый как максимальная работа, которую может совершить система в обратимом процессе при таком взаимодействии, в результате которого все ее параметры перейдут в состояние термодинамического равновесия с параметрами окружающей среды, был назван эксергией, а метод, использующий это понятие, — эксергетическим.

В понятии «эксергия» учитываются оба начала термодинамики: 1) работу можно извлечь лишь в том случае, если тело не находится в равновесии с окружающей средой; 2) максимальную работу можно получить только при обратимом протекании процессов.

Различные формы энергии можно представить в виде суммы неограниченно превратимой энергии — эксергии, и энергии, которую нельзя преобразовать, — анергии. Эксергия может превращаться в любые формы энергии и в анергию, но обратный переход анергии в эксергию невозможен.

В процессе превращения энергии в другие виды часть энергии переходит в менее ценные формы, следовательно, потеря энергии — это фактически потеря эксергии.

В отличие от энергии, эксергия и анергия зависят не только от параметров системы, но также от параметров окружающей среды и характеристик рассматриваемого процесса, то есть и эксергия, и анергия не являются параметрами состояния системы, а представляют собой параметры процесса, совершаемого системой.

Все формы энергии предлагается представлять как сумму эксергии и анергии, причем каждая из них может быть равна нулю.

Таким образом, технологические этапы развития алюминия можно представить в виде, показанном на рисунке 18.

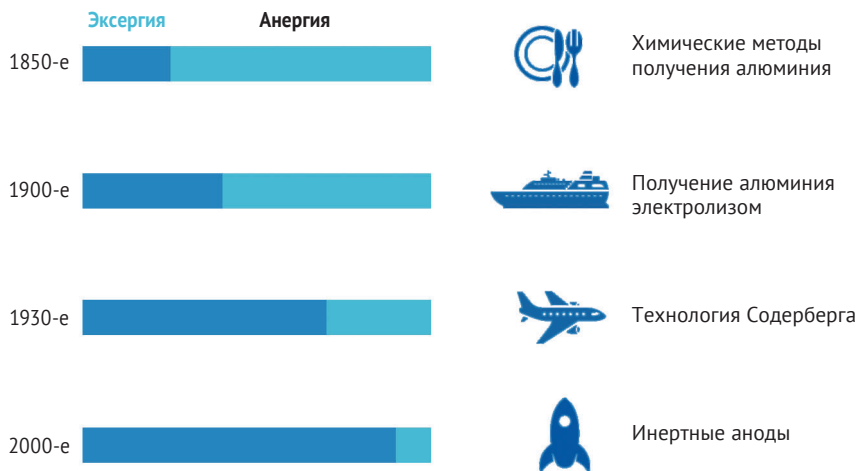


Рис. 18. Технологические этапы развития алюминия

Сравнение применяемых в настоящее время технологий с использованием эксергетического анализа

Эксергетический метод позволяет провести:

- оценку эффективности различных технологических процессов;
- определение энергетических потерь, установленных при энтальпийном анализе;
- выявление и количественное определение потерь (потери от необратимости процессов горения, теплообмена);
- разработку рекомендаций совершенствования технологических процессов;
- разработку и апробацию методик проведения системного анализа для различных энерготехнологических систем.

Согласно описаниям исследований, при расчете коэффициента полезного действия (КПД) любого процесса или технологии используют значения теоретических затрат энергии/работы на осуществление процесса — I_{\min} , E_{\min} индексы³⁷. Они определяются из полного энергетического баланса идеального аналога с предельной степенью идеализации с $\eta_{\text{эн}}^{\text{ид}} = 1$; $\eta_{\text{экс}}^{\text{ид}} = 1$ (где $\eta_{\text{эн}}$ и $\eta_{\text{экс}}$ — КПД энергии и эксергии, соответственно) и являются абсолютным минимумом затрат энергии и работы для производства продукта или услуги с помощью любой

³⁷ Obaidat M. Energy and Exergy Analyses of Different Aluminum Reduction Technologies // Sustainability. — 2018. — No 10(4). — P. 1216.

технологии, то есть тоже являются термодинамическими пределами. В такой ситуации энергетическая эффективность любого технологического процесса определяется двумя КПД — энергетическим и эксергетическим³⁸:

$$\eta_{\text{ЭН}}^{\text{реал}} = I_{\text{min}} / I_{\text{ЭН}}^{\text{реал}} ; \eta_{\text{ЭКС}}^{\text{реал}} = E_{\text{min}} / E_{\text{ЭКС}}^{\text{реал}} .$$

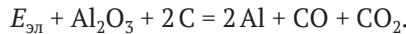
Сопоставление реальных процессов с идеализированными аналогами означает, по существу, оценку степени совершенства (зрелости) исследуемого процесса на основе относительных КПД:

$$\eta_{\text{ЭН}}^{\text{отн}} = \eta_{\text{ЭН}}^{\text{реал}} / \eta_{\text{ЭН}}^{\text{ид}} ,$$

$$\eta_{\text{ЭКС}}^{\text{отн}} = \eta_{\text{ЭКС}}^{\text{реал}} / \eta_{\text{ЭКС}}^{\text{ид}} .$$

Согласно полному энергетическому балансу, на производство алюминия затрачивается электроэнергия E , химическая энергия топлива I_x в виде углерода (анодная масса или обожженные аноды), химическая энергия сырья I_c (глинозема).

Идеализированный аналог процесса электролиза описывается той же реакцией, что и реальный процесс³⁹:



Для процесса электролиза по методу Холла — Эру рассчитали материальный и полный энергетические балансы процесса получения алюминия (табл. 19)⁴⁰.

В соответствии с данными определим значения достигнутого эксергетического КПД:

$$\eta_{\text{ЭКС}} = 84,88 / 32,123 = 37,8\% ,$$

$$\eta_{\text{ЭКС}}^{\text{ид}} = 30,935 / 38,001 = 81,4\% .$$

Таким образом, относительный КПД процесса составляет $\eta_{\text{ЭКС}}^{\text{отн}} = 46,4\%$.

Углубляясь в эксергетический анализ, можно рассмотреть потенциал применения его в области наилучших доступных технологий.

Значение НДТ технологического показателя удельного энергопотребления электролиза алюминия составляет 43 ГДж/т⁴¹, следовательно:

$$\eta_{\text{ЭКС}}^{\text{НДТ}} = 64,196 / 32,123 = 50,0\% .$$

³⁸ *Obaidat M. Energy and Exergy Analyses...; Balomenos E. Carbothermic reduction of alumina: A review of developed processes and novel concepts. — TMS, 2011. — P. 407–414.*

³⁹ *Obaidat M. Energy and Exergy Analyses...; Степанов В. С. Химическая энергия и эксергия веществ. — Новосибирск, 1990; Степанов В. С. Термодинамические исследования металлургических процессов: энергетические балансы, эксергетический анализ. — Иркутск, 2007; Степанов В. С. Эксергетический анализ термодинамической эффективности теплоэлектроцентрали и ее подсистем // Вестник ИрГТУ. — 2012. — № 3(62). — С. 95–101.*

⁴⁰ *Степанов В. С. Химическая энергия и эксергия веществ; Степанов В. С. Эксергетический анализ термодинамической эффективности...; Степанов В. С. Термодинамические исследования металлургических процессов...*

⁴¹ *Логонова И. В. Технология производства глинозема.*

Таблица 19. Материальный, энергетический и эксергетический балансы идеализированного аналога и реального производства первичного алюминия в электролизере с самообжигающимся анодом

Приход				Расход			
Статья баланса	Масса, т	Энергия, ГДж/т	Эксергия, ГДж/т	Статья баланса	Масса, т	Энергия, ГДж/т	Эксергия, ГДж/т
<i>Идеализированный аналог</i>							
Al ₂ O ₃	1,889	4,292	1,663	Al	1,0	35,360	30,935
C	0,444	14,533	14,562	CO	0,518	5,241	4,755
				CO ₂	0,815	0,0	0,0
E _{эл}	–	21,776	21,776	Потери эксергии	–	–	2,311
Итого	2,333	40,601	38,001		2,333	40,601	38,001
<i>Реальный процесс</i>							
Глинозем	1,948	4,431	1,719	Al	1,0	36,76	32,123
Анодная масса	0,599	19,178	19,477	Отходящие газы	1,563	5,691	4,972
E _{эл}	–	63,684	63,684				
Итого	2,648	87,293	84,88		2,648	87,293	84,88

Авторы приводят несколько отличающиеся значения эксергетического КПД. По опубликованным данным, относительный КПД процесса получения алюминия по методу Холла – Эру составляет $\eta_{\text{экс}}^{\text{отн}} = 46,4\%$ ⁴². Другие авторы приводят значение $\eta_{\text{экс}}^{\text{отн}} = 40,3\%$.

Далее, получив численные показатели эталонного и фактического термодинамического предела развития технологии, их можно отобразить в векторном пространстве. Это графическое решение позволяет наглядно наблюдать за фактической удаленностью текущей технологии от идеальной (реальной) технологии производства алюминия (рис. 19, 20).

Согласно данным публикации «Energy and Exergy Analyses of Different Aluminum Reduction Technologies»⁴³, анализ суммарных затрат на получение алюминия по классической технологии и по перспективным технологиям дает результаты, приведенные в таблице 20.

⁴² Obaidat M. Energy and Exergy Analyses...; Balomenos E. Carbothermic reduction of alumina...; Степанов В. С. Химическая энергия и эксергия веществ; Степанов В. С. Эксергетический анализ термодинамической эффективности...; Степанов В. С. Термодинамические исследования металлургических процессов...

⁴³ Obaidat M. Energy and Exergy Analyses...

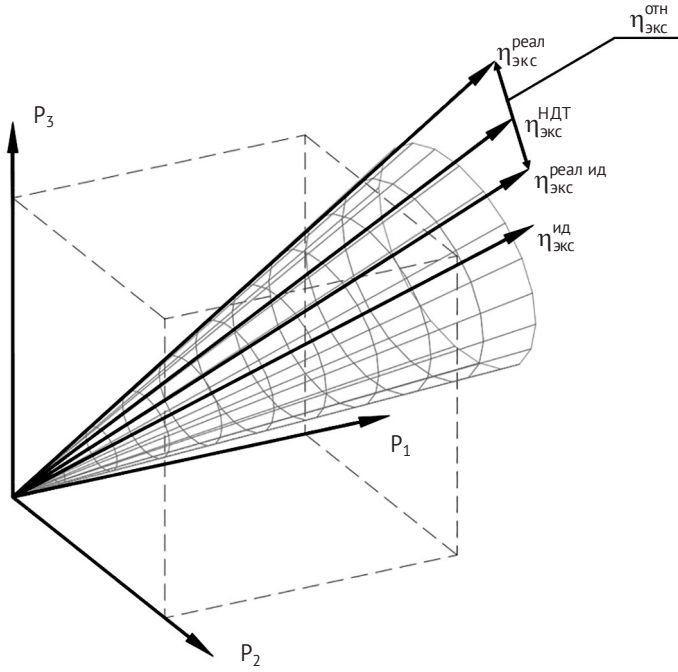


Рис. 19. Набор показателей технологии электролиза в векторном пространстве

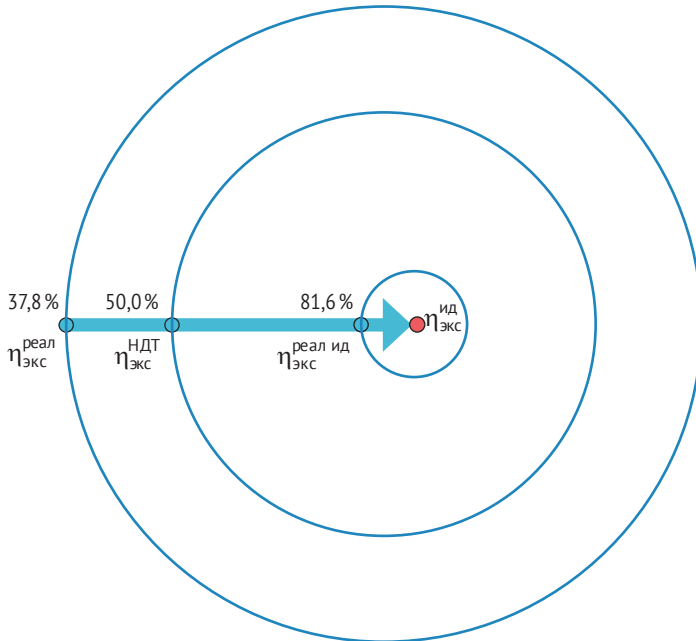


Рис. 20. Проекция вектора термодинамического предела развития электролиза

Таблица 20. Затраты энергии. Расход материалов и выбросы диоксида углерода по технологии Холла – Эру и по перспективным технологиям получения алюминия (затраты на получение 1 кг алюминия)

Технология	Используемая энергия, кВт	Глинозем, кг	Расход анода (углерода), кг	CO ₂ /CO, кг
Холла – Эру	15,37	1,93	0,45	1,66
Дренируемый катод	11,83	1,93	0,45	1,66
Инертный анод	16,82	1,93	0,00	0,00
Карботермия	10,15	1,89	0,67	1,56

В общем, эксергетический анализ показывает на возможности экономии расхода энергии при процессе получения алюминия. Действительно, процесс Холла – Эру является очень энергоемким.

Эксергетический анализ учитывает энергию, необходимую для производства вспомогательных материалов процесса, а также энергию, необходимую для улавливания и нейтрализации выбросов и твердых отходов.

Удельный расход энергии на электролизерах с анодом Содерберга примерно на 1000–1500 кВт·ч выше, чем на электролизерах с обожженными анодами. Удельный расход энергии при электролизе с использованием малорасходуемых анодов выше, чем при электролизе с обожженными анодами, если не учитывать расход энергии и энергоемкость получения анодов и собственно запасенную энергию перерабатываемых пека и кокса.

С учетом расхода энергии на производство угольных анодов, электролиз с использованием малорасходуемых анодов имеет несомненный приоритет с точки зрения эксергетического анализа, особенно вместе с использованием технологии смачиваемого дренируемого катода, обеспечивающего снижение энергозатрат на 16,15 % по сравнению с классическим процессом Холла – Эру.

Технология электролиза алюминия с использованием малорасходуемого анода все-таки является технологией будущего. Однако уже сейчас ведутся работы по утилизации тепла при электролизе алюминия за счет улавливания теплового потока от бортов электролитических ванн (разутепленные борта электролитических ванн – одна из особенностей конструкции электролизера по методу Холла – Эру). Есть возможности снижения расхода энергии за счет совершенствования конструкций футеровок в печах прокалики кокса для приготовления анодов и анодной массы.

В каждом конкретном случае вопрос о внесении изменений в конструкцию теплового агрегата будет решаться на основе компромисса между стремлением снизить расход энергии и оценкой стоимости внесения изменений в конструкцию теплового агрегата и стоимости изготовления этого агрегата с учетом стоимости энергоносителей.

ОТХОДЫ И ВТОРИЧНЫЕ РЕСУРСЫ

Цепочка производства боксита, глинозема и алюминия начинается с добычи боксита или алюминийсодержащих руд и заканчивается производством металла, изделий из металла и высокотехнологичных продуктов из алюминиевых сплавов.

Как известно, содержание глинозема в алюминийсодержащих рудах (представляющих промышленный интерес на настоящий момент) может колебаться от 22 до 45 % (в мире существуют небольшие месторождения боксита и с более высоким содержанием глинозема, но они для производства алюминия не используются). Соответственно, на начальных стадиях цепочки отходов образуется довольно много, а по мере приближения к высокотехнологичным продуктам доля отходов существенно уменьшается.

Во многом именно этим объясняется стремление развитых стран организовать и контролировать добычу боксита и производство глинозема в менее индустриально развитых странах (экваториальная Африка, экваториальная Южная Америка, Вьетнам) и ввозить сырье для более высокотехнологичных переделов в свои страны (Европа, США, Канада, Япония). Тенденция последних лет — даже производство алюминия-сырца оставлять в непосредственной близости от заводов по производству глинозема и ввозить первичный алюминий для производства сплавов и строительных конструкций, деталей автомобилей и самолетов в свои страны.

Добыча бокситов и других алюминийсодержащих пород

В мире 95–98 % бокситов добывается открытым способом. Дискуссионный вопрос: где будет больше оставаться отходов и вторичных ресурсов — при добыче шахтным способом или открытым.

При добыче открытым способом первым этапом являются вскрышные работы. Предприятия, разрабатывающие открытым способом месторождения руд цветных металлов, обязаны снимать плодородный слой почвы и использовать его для улучшения земельных угодий. При снятии почвы с древесной и кустарниковой растительностью осуществляется предварительная уборка древесины и освобождение от пней и корней.

Почва грузится экскаваторами или погрузчиками и вывозится во временный отвал или к месту использования.

Как правило, содержание оксида алюминия в слое пород неравномерно, поэтому часть залежей считается некондиционными рудами, а часть — пустыми породами. Пустые, скальные и рыхлые породы называется породным отвалом, а некондиционные руды — складами, их складывают в отдельные отвалы.

Обогащение бокситов

Обогащение бокситов и алюминийсодержащего сырья производится не всегда, а применительно к конкретному месторождению и к способу переработки боксита в глинозем. Бокситы экваториальной Африки, как правило, в обогащении не нуждаются. Как правило, бокситовые концентраты, поступающие на производство глинозема, должны содержать не менее 28–30 % Al_2O_3 .

Обогащение обычно проводят гидроспособом, обогащение заключается в дезинтеграции, флотации, флокуляции и обезвоживании.

Гидроотвалы представляют собой огороженные дамбами понижения рельефа, балки, овраги, выработанные пространства карьеров. Они заполняются из напорных трубопроводов. Твердые частицы и взвесь осаждаются на дно, а отстоявшаяся вода возвращается в систему напорного гидротранспорта.

При обогащении бокситов возможно попутное получение ряда продуктов: каолинитового, железорудного, титанового, пиритного с промышленным содержанием в них металлов или элементов, то есть комплексное использование сырья.

Производство глинозема

Способы производства глинозема из различных видов сырья, содержащего алюминий (минералов), основаны на получении алюминатных растворов (по возможности избежав перевода в раствор остальных составляющих боксита — оксида кремния, оксидов железа и др.), и их свойстве разлагаться при снижении температуры растворов и концентрации на гидроксид алюминия и щелочь, с дальнейшим отделением гидроксида алюминия.

Качество боксита и другого алюминийсодержащего сырья и способ его переработки определяются так называемым кремниевым модулем — отношением содержания оксида алюминия к оксиду кремния.

В целом при производстве глинозема по способу Байера реализуется технологический цикл:

- выщелачивание, Al_2O_3 из минералов боксита переходит в растворимый алюминат натрия;
- разбавление раствора и последующее обескремнивание, при этом диоксид кремния переходит в нерастворимую форму;
- выкручивание, алюминат натрия гидролизуеться, Al_2O_3 из раствора выпадает в осадок;
- прокаливание гидроксида алюминия с получением глинозема.

Диоксид кремния и все сопутствующие оксиды должны выпасть в фильтруемый осадок — красный шлам. Красный шлам — побочный продукт производства глинозема — это все то, что остается от бокситовой руды, когда гидроксид алюминия переходит в раствор и отделяется. Шлам содержит 12–18% Al_2O_3 , 6–11% SiO_2 , 44–50% Fe_2O_3 , 8–13% CaO . Обычно завод производит в два и более раза больше красного шлама, чем алюминия.

Практически же все заводы, применяющие технологическую схему производства глинозема по способу Байера, сбрасывают красный шлам в отвал.

Красный цвет вызван присутствием оксида железа, составляющего до 50% (а иногда и больше) массы красного шлама⁴⁴. Также в нем содержится заметное количество оксида кремния, невыщелоченного остаточного алюминия и окси-

⁴⁴ Лайнер А. И. Производство глинозема; Самарянова Л. Б. Технологические расчеты в производстве глинозема; Ибрагимов А. Т. Развитие технологии производства глинозема из бокситов Казахстана; Логинова И. В. Технология производства глинозема.

да титана. На заводах, работающих по схеме Байер-спекание шлам, может не иметь красного цвета (это связано с переходом оксида железа из одной валентной формы в другую), но минеральный и химический состав шлама остается примерно таким же.

Красный шлам содержит примеси оксидов металлов и представляет собой одну из самых важных проблем с утилизацией при производстве алюминия.

Утилизация красного шлама представляет большую проблему⁴⁵. Красный шлам занимает площадь, которая непригодна ни для строительства, ни для сельского хозяйства. Как отход процесса Байера красный шлам отличается высокой щелочностью с pH от 10 до 13. Для понижения щелочности с целью уменьшения вреда окружающей среде применяются разные методы. Ведутся исследования возможных применений красного шлама. Еще в 1887 г. Байер понимал эту проблему и предполагал, что красный шлам можно будет использовать в металлургии черных металлов и в качестве красителя.

На некоторых заводах по переработке боксита в глинозем налажено производство галлия в качестве побочного продукта. Есть работы по извлечению из красных шламов золота, которое также присутствует в небольших количествах в некоторых месторождениях боксита и, соответственно, переходит в отвалы красного шлама. Работы по использованию красного шлама ведутся много лет, однако проблема ждет решения.

Красные шламы после выщелачивания бокситов способом Байера обычно складывают на шламовых полях вблизи глиноземных заводов. Отмытый красный шлам разбавляется до необходимого отношения $ж : т = (3-10) : 1$ и системой гидротранспорта перекачивается на шламовое поле.

Для промывки твердой фазы шламовой пульпы используется вода из системы водооборота, подшламовая вода. В отдельных случаях может использоваться промышленная вода.

С одной стороны, складирование в шламохранилищах красного шлама (в случае Байер-спекания — серого шлама), содержащего большое количество щелочей, влечет за собой загрязнение окружающей среды и требует больших земельных площадей под шламовые поля⁴⁶

С другой стороны, с отвальными красными шламами теряется безвозвратно 10–20% глинозема, содержащегося в исходном боксите, а также много оксида натрия и очень много оксида железа. Ежегодные потери железа с красным шламом крупного завода составляют около 0,5 млн т.

Во многом вопрос переработки красного шлама — это вопрос комплексной переработки, в ходе которой можно было бы извлекать и использовать сразу несколько компонентов, а оставшуюся силикатную часть рационально перерабатывать в строительные материалы.

Этот подход необходим при строительстве новых заводов по производству глинозема, когда на стадии проектирования будут предусмотрены цеха

⁴⁵ TRAVAUX 49. Proceedings of the 38th International ICSOBA Conference...

⁴⁶ Ibid.

и мощности по переработке силикатной составляющей боксита и нефелина в строительные материалы (бетоны, цементы, шлакоблоки, кирпичи).

На стадии проектирования возможно также предусмотреть мощности по извлечению из шламов солей полиметаллов (в частности для производства галлия), а также небольших производств глинозема не металлургического назначения (электрокорунда для абразивного производства, глинозема для производства керамики и огнеупоров и пр.).

В разных странах мира проводятся широкие исследования по использованию красных шламов в качестве добавок для производства красок, цветных стекол, утяжелителя в нефтяной промышленности и особенно для получения различных строительных материалов (кирпича, черепицы, метлахских плиток, цемента и т. д.). Возможна добавка 10–15 % красного шлама к доменной шихте при выплавке чугуна. Во всех этих случаях используется отфильтрованный шлам.

Естественно, частичное использование красного шлама в качестве добавочного материала в различных областях техники не решает вопроса о переработке больших количеств этого отвального продукта глиноземного производства. Поэтому в последние годы во многих странах мира проводятся широкие исследования по извлечению из красных шламов ценных компонентов⁴⁷.

Огнеупорный материал вращающихся печей спекания и печей кальцинации глинозема отправляют на огнеупорные заводы для последующего вовлечения в огнеупорное производство.

Производство анодов и анодной массы

Производство анодов и анодной массы можно считать безотходным. Практически все отходы вовлекаются в повторное производство. При электролизе алюминия от обожженных анодов остаются так называемые «огарки» — небольшие остатки верхней части анода, где анод крепится к «штанге» анододержателя. Огарки дробят, измельчают до нужных фракций и небольшими количествами вовлекают в процесс изготовления следующих анодов.

Огнеупорный материал печей обжига анодов (как правило — муллитовые или муллитокремнеземистые огнеупоры) отправляют на огнеупорные заводы, где его дробят, рассеивают и вовлекают в последующее производство огнеупоров. Так же поступают и с огнеупорным материалом (как правило, шамотный огнеупор) печей прокалики кокса.

Производство первичного алюминия

При производстве алюминия отходов образуется немного. При остановке ванн электролит сливают и используют вновь.

Когда электролизер выходит из строя, его останавливают. Металлический кожух электролизера служит, как правило, 3–4 кампании, после чего металл отправляют на переплавку.

⁴⁷ Ibid.

Футеровка электролизера выполнена из углеродных катодных подовых блоков, слоя огнеупорной футеровки и слоя теплоизоляционного материала. И углеродные блоки, и огнеупорный слой пропитаны фтористыми солями, а пропитанный отработанный материал использовать нельзя.

Извлечению фтористых солей посвящено много работ, есть опытно-конструкторские разработки.

Большинство опытно-конструкторских разработок по извлечению фтористых солей сводится либо к мокрому извлечению, либо к термическому испарению солей с последующим улавливанием⁴⁸.

Подпроблемой является разделение отработанного углеродного материала электролизеров и огнеупорного материала.

Следует отметить работы, проводимые компанией «РУСАЛ» по рециклингу огнеупорной части футеровки катода (что становится возможным в случае применения барьерных слоев, непроницаемых для расплава алюминия и криолита)⁴⁹.

Главные экологические проблемы добычи бокситов сводятся к восстановлению площадей, на которых находились разработанные залежи бокситов⁵⁰.

В целом производство глинозема не считается оказывающим серьезное воздействие на экологию, выбросы пыли и газов хорошо контролируются и вносят небольшой вклад по сравнению с другими отраслями цветной металлургии и химической промышленностью.

РОЛЬ ОТРАСЛИ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ

Производство в мире

В 2019 г. мировой спрос на алюминий вырос на 0,1 %, в 2020 г. планировался рост в пределах 1,3 %, но пандемия изменила эту тенденцию, и уже по итогам первого квартала показатель просел на 6,4 %.

Снижение спроса на алюминий вызвано резким сокращением производства продукции потребляющих отраслей — автомобилей, строительных и упаковочных материалов — на 50–80 %. Наиболее острой проблемой для мировой алюминиевой отрасли стала приостановка производства автомобилей на заводах в Европе, Китае, США и других странах.

Так, автомобильная промышленность ЕС, потребляющая более трети алюминиевой продукции в этих странах, в марте–апреле 2020 г. снизила выпуск на 2,3 млн автомобилей по сравнению с аналогичным периодом 2019 г., а ряд крупнейших производителей заявили о намерении сократить производственные мощности и закрыть отдельные предприятия. Был отложен до лучших времен и запуск новых моделей, в том числе электромобилей.

⁴⁸ TRAVAUX 49. Proceedings of the 38th International ICSOBA Conference...

⁴⁹ Ibid.

⁵⁰ Ibid.

Объемы выплавки первичного металла в мире практически не изменились — компании не останавливали электролизные линии из-за высоких затрат, связанных с временным прекращением и повторным запуском производства, однако продажи их готовой продукции упали. Например, норвежская компания Norsk Hydro в апреле–мае 2020 г. увеличила производство первичного алюминия на 5 % по сравнению с аналогичным периодом прошлого года, но снизила продажи алюминиевого проката на 21 %, экструдированного профиля — на 42 %.

В результате если в 2019 г. на мировом рынке алюминия (без учета Китая) наблюдался дефицит около 0,3 млн т, то по итогам первого квартала 2020 г. образовался профицит в объеме 1,7 млн т, что вызвало падение мировых цен: в начале года они находились на уровне 1800 долл. за 1 т, в апреле — начале мая упали до 1500 долл. за 1 т, после чего начали немного отыгрывать падение, но не поднимались выше 1600 долл. за 1 т (рис. 21).

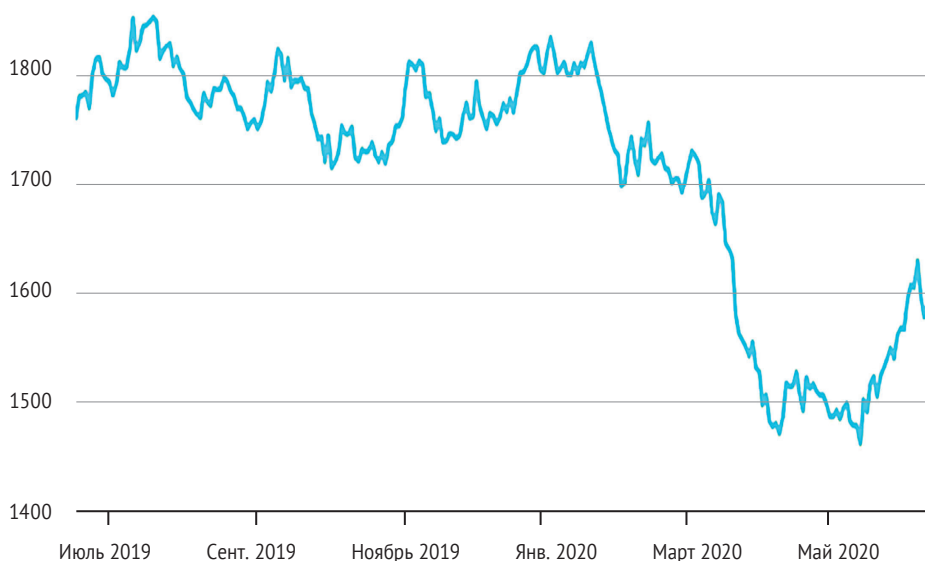


Рис. 21. Динамика мировых цен на алюминий (LME.Alum) в 2019–2020 гг., долл./т

Источник: Финам. — URL: <https://www.finam.ru/>

В апреле 2020 г., по оценкам «РУСАЛ», четверть мировых мощностей по производству алюминия (без учета Китая) была убыточной, что в случае продолжения мировой рецессии из-за новой волны коронавирусной инфекции может создать риск закрытия части производств. При таком развитии событий, предполагают эксперты, может повториться ситуация кризиса 2008 г.: с рынка будут вынуждены уйти частные компании с высокими затратами, расположенные в основном в западных странах, тогда как китайская алюминиевая отрасль практически не пострадает. Если же восстановление экономик после пандемии будет происходить быстрыми темпами (V-образно), то убыточные производства закрываться не будут.

Мировое потребление алюминия за 2020 г. составило ~64,5 млн т (рис. 22). Из них 16,3 млн т (~25 %) пришлось на строительный сектор. Алюминий стал очень востребован при постройке офисных небоскребов, торговых и выставочных центров для придания городам современного облика.

Следующая по значимости отрасль — транспортная, которая в 2020 г. потребила ~15,5 млн т металла (24 %). Большая часть потребляемого алюминия приходится на автомобильную промышленность (~10–12 млн т), а остальное — на морские суда, самолеты, поезда и космические корабли. Большая популярность этого металла в транспортной индустрии обусловлена его свойствами: легкость, пластичность и прочность.

На фольгу, упаковку и потребительские товары (алюминиевые банки) пришлось ~13,9 млн т (22 %) металла.

В энергетике за 2020 г. было потреблено ~7 млн т алюминия (11 %). Этот металл используется при создании проводов для высоковольтных линий передач. Небольшой вес алюминия позволяет снизить нагрузку на опоры электросетей и увеличить расстояние пролетов между ними.

Оставшаяся часть потребления за 2020 г. пришлась на машиностроение (9 %), зеленую энергетику, которая включает в себя электрокары, солнечные панели и ветряки (4 %) и прочее (4 %).

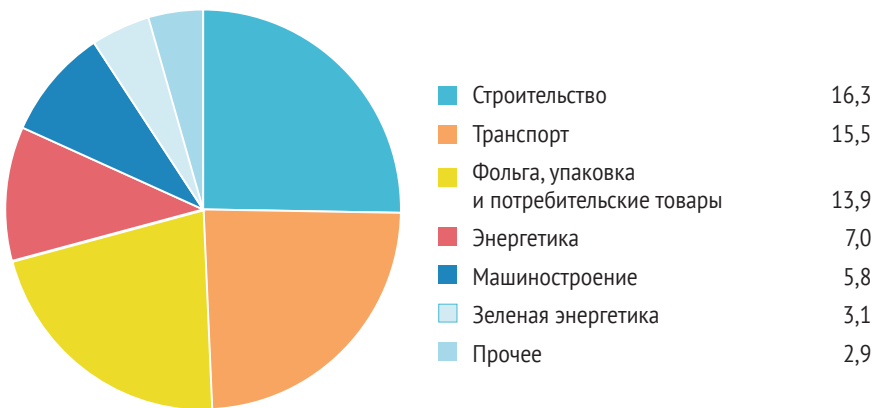


Рис. 22. Потребление алюминия за 2020 г., млн т

Производство в России

Российские мощности по производству алюминия составляют около 3,8 млн т в год, все они сосредоточены в руках компании «РУСАЛ», образованной в 2000 г. Интересно, что с этим показателем «РУСАЛ» долгое время был мировым лидером, но в 2014 г., вследствие бурного развития алюминиевой промышленности в Китае, уступил место компании Hongqiao. По итогам 2019 г. «РУСАЛ» опустился на третье место в мировом рейтинге — первенство перешло

к китайской компании Chalco (6,1 млн т), а экс-лидер — компания Hongqiao (5,7 млн т) — заняла второе место.

В 2013–2019 гг. производство алюминия в России находилось на уровне 3,6–3,8 млн т без выраженной тенденции к росту, по итогам 2019 г. показатель составил 3,76 млн т, оставаясь на уровне предыдущего года (рис. 23).

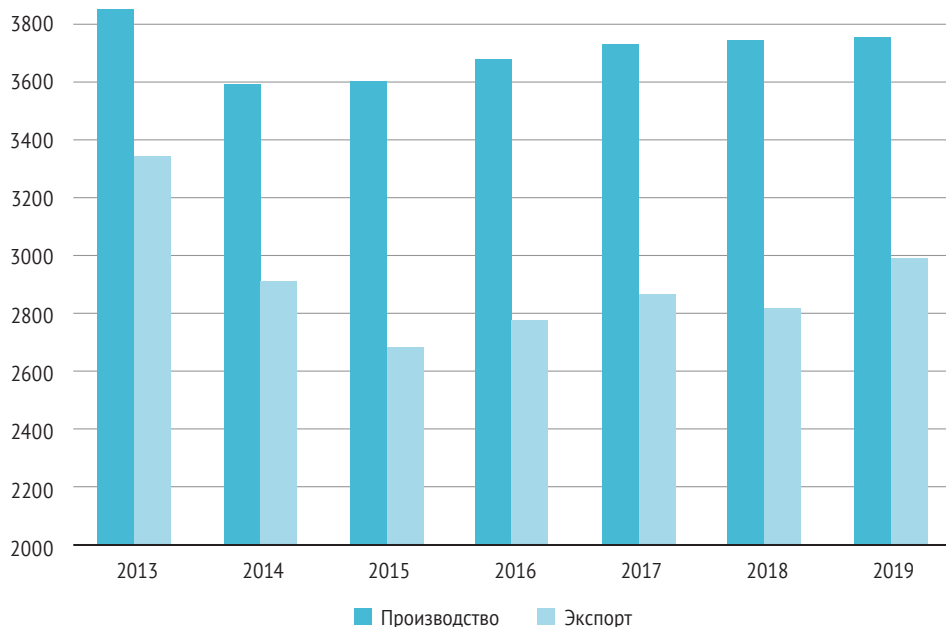


Рис. 23. Динамика производства и экспорта алюминия в России в 2013–2019 гг. (тыс. т)

Источники: Федеральная служба государственной статистики. — URL: <https://rosstat.gov.ru/>; Федеральная таможенная служба. — URL: <https://customs.gov.ru/>

Продажи алюминия в 2019 г. выросли на 13,8% по сравнению с 2018 г., составив 4,18 млн т. Такую динамику эксперты объясняют, во-первых, частичной распродажей запасов первичного алюминия, которые были накоплены к концу 2018 г. в результате действия санкций Минфина США в отношении «РУСАЛ», введенных в апреле 2018 г. и снятых в январе 2019-го, а также полного запуска первой серии Богучанского алюминиевого завода (БоАЗ) в марте 2019 г.

В первом квартале 2020 г. «РУСАЛ» произвел 940 тыс. т алюминия, что на 1,3% больше, чем в четвертом квартале 2019 г. За январь–май 2020 г. выпуск алюминия увеличился на 6,5%.

Предприятия «РУСАЛ» остаются рентабельными даже при очень низких мировых ценах на металл, что достигается благодаря использованию электролизеров нового поколения и дешевой гидроэнергии, утверждают эксперты, ссылаясь на кризисные периоды 2009 и 2014 гг., и также не ожидают снижения производства в условиях нынешнего коронакризиса.

В подтверждение этого в мае 2020 г. на Волгоградском алюминиевом заводе (ВгАЗ) было запущено новое производство протекторов из алюминиевых

сплавов с улучшенными эксплуатационными характеристиками для защиты металлических объектов от коррозии в нефтегазовой, судостроительной и других отраслях. В июне 2020 г. в эксплуатацию был введен новый литейный комплекс на БоАЗе мощностью 120 тыс. т сплавов в год. На новой установке выпускается сплав алюминия с высоким содержанием кремния, который отличается повышенными прочностными характеристиками и активно используется в автомобильной промышленности для изготовления колесных дисков, деталей двигателей и других запчастей.

Что касается перспектив расширения российского производства, с 2007 г. ведется строительство Тайшетского алюминиевого завода (ТаАЗ) в Иркутской области. Первоначально мощность проекта предполагалась 750 тыс. т алюминия в год, но затем была скорректирована до 428 тыс. т. Первая серия завода была запущена в декабре 2021 г.

Экспорт

В 2019 г. на экспорт из России было отправлено почти 3 млн т алюминия, или 79% от его производства, что, по сравнению с 2018 г. (2,8 млн т, или 75%) (рис. 24), больше на 200 тыс. т (на 4%). Впрочем, такая динамика во многом объясняется восстановлением объемов экспорта после отмены в начале 2019 г. упомянутых выше санкций Минфина США.

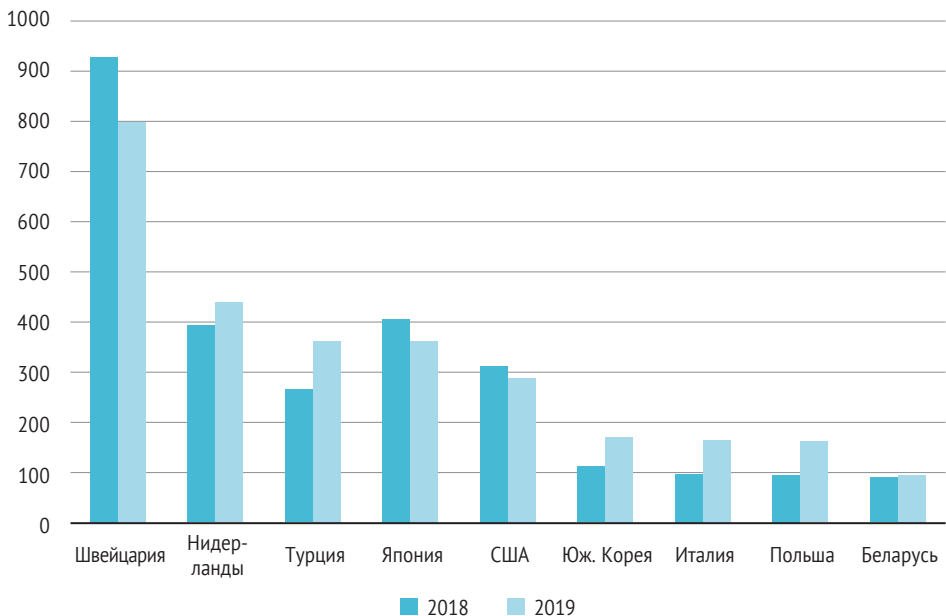


Рис. 24. Динамика экспорта алюминия из России в отдельные страны, 2018–2019 гг., тыс. т

Источник: Федеральная таможенная служба. — URL: <https://customs.gov.ru/>

Основными экспортными рынками для российского алюминия являются Северная Америка и ЕС, главными странами-импортерами — Швейцария, Нидерланды, Турция, Япония и США. По итогам 2019 г., сократились поставки алюминия в Швейцарию, Японию, США, выросли — в Нидерланды, Италию, Польшу, Турцию, Южную Корею.

В прошлом году темпы роста общемирового спроса на первичный алюминий в основных регионах-импортерах были низкими из-за замедления промышленного производства и слабого мирового спроса на автомобили. В соответствии с политикой президента США по возвращению ключевых производств на территорию страны экспортные поставки алюминия из России в эту страну сталкивались со значительными торговыми ограничениями в виде пошлин. Наконец, дополнительно усложняло российский экспорт и усиление конкуренции с Китаем, который продолжал увеличивать производственные мощности и экспортные поставки.

Несмотря на эти сложности, к началу 2020 г. Россия успела занять прочные позиции на внешних рынках по отдельным видам алюминиевой продукции, в том числе по продукции с добавленной стоимостью (ПДС). Например, в структуре импорта стран ЕС экструзионного алюминиевого профиля Россия была на втором месте после Китая.

Планировался дальнейший рост ПДС в поставках, но пандемия внесла коррективы в эти планы. Как отметил генеральный директор «РУСАЛ» Евгений Никитин в интервью ТАСС в апреле 2021 г., в условиях коронавируса потребительский спрос заметно сдвинулся в сторону товаров первой необходимости, и наибольшие сложности испытывают компании, производящие высокотехнологичную продукцию, которые являются основными потребителями сложных сплавов и другой ПДС из алюминия. По его словам, позитивные ожидания «РУСАЛ» по поводу восстановления и роста доли ПДС в продажах, имевшие место в начале года, пока отодвигаются⁵¹.

Снижение мирового спроса отразилось на динамике экспортных поставок: по данным ФТС, объем экспорта российского алюминия в натуральном выражении в январе–апреле 2020 г., по сравнению с аналогичным периодом 2019 г. сократился на 35,3%, до 690,7 тыс. т. В денежном выражении падение было более глубоким — на 38,5%, до 1,15 млрд долл.

Согласно прогнозам Bloomberg 2019 г., потребление алюминия в автомобилестроении и транспортном машиностроении ЕС в течение 5–10 лет должно было вырасти на 10%, а использование алюминия в автомобилестроении Северной Америки — на 36,8% к 2025 г. В 2021 г. эти прогнозы неактуальны, а новых пока никто не делает, эксперты лишь осторожно говорят о перспективах восстановления спроса со стороны ключевых потребляющих отраслей до прежних уровней. По некоторым оценкам, полное восстановление потребления произойдет не ранее 2023–2024 гг.

⁵¹ Корчагин М. Глава «РУСАЛ»: декарбонизация — необратимый тренд : [интервью с Е. Никитиным] // ТАСС. — 2021. — 7 апреля. — URL: <https://tass.ru/interviews/11082305> (дата обращения: 16.12.2021).

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Перспективные направления в производстве алюминия

Наука в области получения алюминия не стоит на месте. Процесс Холла — Эру практически доведен до совершенства. Выход по току 95–96 % (по сути, КПД процесса электролиза, степень отклонения от расчетного количества полученного алюминия по закону Фарадея за счет технологических несовершенств) — это очень высокий показатель.

Вместе с тем следует помнить о том, что алюминий в ряду энергозатратных материалов на 1 кг находится на одном из первых мест, алюминиевая промышленность — один из лидеров по энергопотреблению среди всех отраслей промышленности⁵². Есть мнение, что в алюминиевой промышленности имеется большой потенциал как для снижения выбросов парниковых газов, так и для снижения энергопотребления⁵³. Считается, что теоретический минимум для получения 1 кг алюминия составляет 6,23 кВт, тогда как в среднем энергозатраты при выпуске алюминия по методу Холла — Эру составляют до 15–16 кВт/кг (как было отмечено ранее, на лучших и наиболее современных заводах, работающих по традиционному методу Холла — Эру, достигнуто энергопотребление 12–13 кВт/кг, есть намерение достигнуть значения 10 кВт/кг).

Новые направления получения алюминия условно можно разделить на методы, основанные на методе Холла — Эру (хоть и значительно преобразованные), и на методы, не основанные на методе Холла — Эру.

К первым следует отнести технологию смачиваемого дренированного катода и технологию инертного (малорасходуемого) анода.

Ко вторым следует отнести хлоридный способ (процесс Тота) и карботермический метод.

Поиски альтернативных способов получения алюминия не прекращались, даже на заре производства алюминия, когда казалось, что альтернатив процессу Холла — Эру нет. Было много интересных разработок. Несомненно, самым интересным и близким к практической реализации является способ получения алюминия электролизом криолит-глиноземных расплавов с использованием инертного (малорасходуемого) анода. Вероятно, этот способ могла бы хорошо дополнять технология смачиваемого катода. По сути технология инертного анода (так же как и технология смачиваемого дренируемого катода) — это развитие метода получения алюминия электролизом Холла — Эру.

⁵² *Robinson T.* Lowering energy intensity and emissions in the aluminum industry with government/industry/academia partnership // *Light Metals*. — Warrendale, 2004. — P. 277–281.

⁵³ *Aluminium Industry for Technology Roadmap* // *Aluminium Association*. — Washington, USA, 2003. — URL: https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/resources/aluminum/pdfs/al_roadmap.pdf (дата обращения — 10.01.2022); *Obaidat M.* Energy and Exergy Analyses...

Несмотря на то что расход энергии при электролизе с использованием малорасходуемого анода больше, чем при электролизе с использованием угольного анода, суммарный расход энергии при использовании малорасходуемого анода существенно снижается (поскольку не требуется расход угольного анода, на производство которого идет постоянный расход энергии)⁵⁴.

Технология смачиваемого дренированного катода

Что касается смачиваемого дренированного катода, то здесь тоже можно условно выделить два взаимодополняющих подхода — смачиваемый катод (вопрос материала) и дренируемый катод (вопрос конструкции).

Углерод не является идеальным материалом для подовых блоков электролитических ванн, работающих по принципу Холла — Эру. Идеальный материал подового блока должен удовлетворять следующим требованиям:

- высокая электропроводность;
- высокая термостойкость;
- возможность обеспечения хорошего электрического контакта с токоподводами;
- минимальная открытая пористость;
- хорошая смачиваемость расплавом алюминия;
- химическая инертность;
- высокая стойкость к истиранию;
- высокая сопротивляемость внедрению (интеркаляции) и перемещению натрия через материал блока к огнеупору;
- минимальное капиллярное течение электролита по порам к огнеупору.

Подобному комплексу свойств не удовлетворяет ни один известный углеродный материал. Начиная с 80-х гг. XX в. проводились работы по созданию неуглеродного катода для процесса Холла — Эру. Предполагалось, что применение неуглеродного катода обеспечит большой срок службы и значительную экономию энергии за счет уменьшения межполюсного расстояния и уменьшения напряжения в катоде⁵⁵.

Относительно высокий столб металла в электролизерах поддерживается из-за плохого смачивания углеродного катода металлом (давление столба металла позволяет обеспечивать хороший электрический контакт). Этот столб металла создает перепад напряжения, что ведет к энергетическим потерям при электролизе. Было предложено достаточно много конструкций смачиваемого плоского катода. Однако современная концепция подразумевает, что смачиваемый катод будет дренируемым, то есть образующийся алюминий будет стекать по наклонным плитам катода в желоб и далее в накопитель.

⁵⁴ *Obaidat M. Energy and Exergy Analyses...; Степанов В. С. Химическая энергия и эксергия веществ.*

⁵⁵ *Чанг Х. Материалы, используемые в производстве алюминия методом Холла — Эру. — Красноярск, 1998.*

В целом расход глинозема и расход фтористых солей остается без изменения; если используется угольный анод, то расход угольных анодов должен оставаться без изменения, а расход электроэнергии должен существенно снизиться.

Уменьшение межполюсного расстояния пропорционально уменьшает перепад напряжения, который составляет около 1,76 В. При использовании конструкции и технологии дренируемого катода можно, в зависимости от конструкции, снизить межполюсное расстояние с 50 до 20 мм, при этом перепад напряжения снизится до 0,704 В⁵⁶. Если считать усредненное напряжение в электролизере 4,64 В, то оно снизится до 3,58 В, что соответствует снижению расхода электроэнергии на 23%. Если брать усредненный расход электроэнергии 15,37 кВт/кг алюминия (это значение на многих современных алюминиевых заводах уже снижено), то теоретическое снижение расхода электроэнергии будет составлять 11,83 кВт/кг алюминия.

Вероятно, как в энергетическом плане, так и в концептуальной технологии инертного (малорасходуемого) анода весьма выиграла при совмещении с технологией смачиваемого дренируемого катода.

Технология инертного анода

Инертные аноды всегда были целью производителей алюминия. Для инертного анода пытались использовать многие материалы. На самом деле полностью инертных материалов не существует, но некоторые материалы могут расходоваться с замедленной скоростью, и количество примесей, получаемых за счет растворения инертных анодов, может быть приемлемо для промышленного производства алюминия.

Работы по созданию материала инертного (малорасходуемого) анода вели в трех направлениях: металлический анод, керметный анод и керамический анод.

Исследования по созданию металлического анода вели, главным образом, в системе «никель-железо-медь». Образующийся при окислении атомарным кислородом феррит никеля является электропроводным материалом, малорастворимым в расплаве электролита.

Керметы состава «феррит никеля — медь» также всерьез рассматриваются как кандидаты материала малорасходуемого анода. В прессе были сообщения о промышленном использовании керметного анода на одном из заводов компании Alcoa, о крупномасштабных испытаниях керметных малорасходуемых анодов из Китая от компании Chalco.

Среди керамических материалов наиболее привлекательным выглядит оксид олова, почти нерастворимый в электролите материал, обладающий полупроводниковой проводимостью. К сожалению, технологически и в стоимостном выражении этот материал наиболее сложен в изготовлении массивных конструкций.

⁵⁶ Zhang H. Materials used in the Hall-Herault cell for aluminum production. — Warrendale, 1994. — P. 15–35.

Химическая реакция производства алюминия в электролизерах с инертными анодами может быть представлена в следующем виде:



Таким образом, если при использовании обожженных анодов в электролизе при получении 1 т алюминия сгорает 0,5 т углерода с образованием 1,4 т оксида и диоксида углерода, то при использовании нерасходуемых инертных анодов в атмосферу будет выделяться 0,9 т кислорода. Кроме того, использование инертных анодов позволит исключить выбросы диоксида серы и смолистых полиароматических веществ, значительно снизить выбросы пыли и фторидов за счет высокой герметизации электролизеров.

В рамках проекта по созданию инертного (малорасходуемого) анода ведутся работы по применению низкотемпературного электролита. Такие работы могут иметь большое значение, поскольку, во-первых, при снижении температуры электролиза будет меньше растворимость в электролите малорасходуемого анода, во-вторых, снизятся потери электроэнергии, в-третьих, могут снизиться выбросы фтористых солей.

Однако энергетический анализ, проведенный для температуры электролиза 960 °С, показывает увеличение напряжения, необходимого для проведения электролиза с использованием малорасходуемых анодов, до 5,08 В, что соответствует 16,82 кВт/кг алюминия. При этом не расходуется углеродный анод (на производство которого также тратится энергия) и отсутствуют выбросы диоксида и монооксида углерода.

На Красноярском алюминиевом заводе технология электролиза с инертными анодами на силу тока более 150 кА проходит опытно-промышленные испытания в опытном корпусе электролиза.

Говоря о технологии получения алюминия с использованием инертного (малорасходуемого) анода, следует помнить и то обстоятельство, что для производства алюминия по технологии Холла — Эру (и, разумеется, для карботермического метода) требуется большое количество специально подготовленного углерода. Углеродные аноды делают из каменноугольного кокса, и его производство жестко привязано к переработке нефти. Если считать, что запасы нефти в мире начинают истощаться, то возникнет острый дефицит нефтяного кокса, пековый кокс полностью заменить нефтяной кокс не может. Можно считать, что малорасходуемый (инертный) анод для производства алюминия электролизом — в какой-то мере неизбежность.

Из других перспективных способов получения алюминия отметим хлоридный способ и карботермию.

Хлоридный способ

В январе 1973 г. фирма Alcoa заявила о разработке нового способа получения алюминия. Данный способ предусматривает получение из алюминийсодержащего сырья хлорида алюминия и последующий электролиз хлорида алюминия. Электролиз хлорида алюминия проводят при температуре 700°С. Потенциально

энергетические затраты этого метода получения алюминия существенно ниже энергетических затрат метода Холла — Эру.

Фирма работала над процессом 15 лет. В г. Палестине (Техас, США) действовал завод с проектной мощностью 30 тыс. т выпуска алюминия в год этим способом.

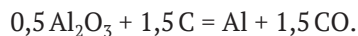
Хлорид алюминия в гранулированном или парообразном состоянии поступает на электролиз. Электролизер, используемый в данной технологии, состоит из стального кожуха, футерованного шамотным и в нижней части дополнительно диатомовым кирпичом, то есть теплоизоляционным непроводящим огнеупорным материалом, который слабо взаимодействует с хлоридными расплавами.

На дне ванны расположен графитовый отсек для сбора жидкого алюминия. На крышке электролизера имеются отверстия для загрузки хлорида алюминия, периодического отсоса алюминия и непрерывного вывода газообразного хлора, используемого в производстве хлорида алюминия. Боковые стенки и крышка электролизера — водоохлаждаемые. При электролизе используются графитовые нерасходуемые электроды. Это преимущество (по сравнению с электролизом криолитоглиноземных расплавов) вместе с относительно низкой температурой процесса (около 700°С) дает возможность полной герметизации электролизеров.

Преимущества хлоридного способа получения алюминия могли бы быть более ощутимыми в связи с удорожанием электроэнергии, исходных материалов для существующего промышленного способа производства алюминия, повышением требований к охране окружающей среды. С другой стороны, хлоридный способ, снимая некоторые проблемы воздействия на окружающую среду, создает другие и, может быть, более серьезные. Парообразный хлорид алюминия — весьма агрессивное вещество. Стальные конструкции корродируют под воздействием парообразного хлорида алюминия, что было установлено при полупромышленном пуске завода получения алюминия хлоридным способом.

Карботермия

Термодинамические расчеты показывают, что карботермическое восстановление углеродом алюминийсодержащего сырья возможно при 2100°С.



В процессе карботермии получают силумины или сплавы системы алюминий-кремний-железо. Фирма Alcan экстракцию алюминия из полученных сплавов осуществляла за счет прохождения газообразного хлорида алюминия.

Был предложен способ электрокарботермического восстановления алюминия из оксида алюминия.

По замыслам авторов, восстановление алюминия должно происходить из эвтектического расплава карбида и оксида алюминия при 2200–2400°С. Проблемными являются температуры, при которых должен происходить процесс, материалы, которые должны долгое время работать при таких температурах,

осаждение и сбор алюминия, который при таких температурах будет переходить в пар, а также большой выброс диоксида углерода.

Энергетически процесс выглядит очень привлекательно. Расход энергии на 1 кг алюминия можно сократить до 8,123 кВт, при этом для получения одного килограмма алюминия потребуется 1,89 кг глинозема и 0,67 кг углерода. Выброс монооксида углерода составит 1,67 кг.

Технология выглядит привлекательной, хоть и следует помнить, что мы пользуемся результатами формального упрощенного анализа без учета технологических особенностей (проблемы улавливания и сбора парообразного алюминия, проблемы отсутствия материалов, стойких к расплаву эвтектики карбида алюминия и углерода при 2100°С и пр.).

Совершенствование развития технологии получения первичного алюминия по методу Холла — Эру

Технологии получения алюминия по методу Холла — Эру уже более 100 лет, однако она непрерывно совершенствуется. Несомненно, большим вкладом в развитие технологии в свое время стал анод Содерберга. Первые электролизеры работали на силе тока начиная от 20 кА, и долгое время считалось, что электролизер с силой тока 60–80 кА — это мощный электролизер.

Вслед за этим типовой конструкцией стал электролизер на силу тока 250–300 кА, затем были введены электролизеры на силу тока 450–550 кА, проектируются электролизеры на силу тока 700 кА, и сказать, что в конструировании электролизеров поставлена точка, нельзя. По крайней мере еще 25–30 лет конструкции электролитических ванн для производства алюминия будут совершенствоваться.

Но в какой-то мере технология Холла — Эру практически достигла совершенства. Выход по току 95 % (на этом показателе работают в настоящее время лучшие алюминиевые заводы мира) — это не только характеристика совершенства процесса электролиза, это и свидетельство того, что знания по всем технологиям, задействованным в процессе электролиза, почти достигли предела, поскольку причины оставшихся 5 % также хорошо известны: в основном это обратные реакции окисления алюминия, которые технологически при нынешнем уровне развития техники неизбежны.

Несомненно, внедрение технологии инертного (малорасходуемого) анода потребует пересмотра технологических параметров процесса Холла — Эру. Внедрение технологии смачиваемого катода также потребует пересмотра конструкции электролитических ванн, а следовательно, и корректировки параметров процесса Холла — Эру.

Перспективные направления в производстве глинозема

В последние годы большое внимание уделяется исследованиям по усовершенствованию технологии спекания нефелинов, а именно переводу печей спекания на сухой или полусухой способ термообработки шихты в коротких печах с теплообменниками.

Подобная технология внедрена в цементной промышленности для обжига клинкера и дала значительный экономический и экологический эффекты (экономия топлива — более 30 %).

Реконструкция существующих печей спекания «мокрой» шихты или сооружение подобных установок при строительстве новых глиноземных заводов позволит достичь подобного эффекта. Однако валовые выбросы NO_x могут быть существенно снижены только за счет установки на печах горелок с низким выделением оксидов азота и внедрения специальных перспективных технологий — технологии селективного некаталитического восстановления (SNCR) и технологии селективного каталитического восстановления (SCR), что позволит снизить выбросы NO_x от печей глиноземного производства в атмосферу до 70 %⁵⁷.

SNCR заключается в инъекции водного раствора аммиака (до 25 % NH_3), водных растворов соединений аммиака или мочевины в дымовые газы для восстановления NO до N_2 . В SCR NO и NO_2 восстанавливаются до N_2 с помощью NH_3 и катализатора.

Перспективными технологиями следует также считать применение современного газоочистного оборудования — электрофильтров и гибридных фильтров, обеспечивающих концентрацию пыли в выбросе менее 50 мг/м³, а также систем контроля, управления ремонтом, обслуживания при эксплуатации газоочистных установок.

Считается, что печи кипящего слоя для получения глинозема имеют преимущества перед трубчатыми вращающимися печами. Преимущества сводятся к следующему:

- 1) интенсивное перемешивание материала приводит к практически полному выравниванию температуры во всем объеме слоя;
- 2) высокие значения коэффициента теплоотдачи от газа к слою (и наоборот) позволяют осуществлять процессы с большой тепловой нагрузкой;
- 3) подвижность слоя, позволяющая осуществить непрерывный процесс при переработке твердой фазы;
- 4) сравнительно простое устройство.

Образование производственных отходов (шлама) неизбежно. Для его складирования постоянно требуются дополнительные площади. В настоящее время ведутся разработки, направленные на использование красного шлама в строительстве, извлечение из шлама ценных компонентов⁵⁸

Только 5 % всего производимого глинозема используется не для производства алюминия. Эти 5 % идут для производства абразивных порошков и абразивного инструмента, огнеупоров, керамики, бетона и стекла.

Абразивный инструмент (корундовые наждачные круги) можно подвергать рециклингу — собирать отработанные абразивные круги на предприятиях металлопереработки, измельчать отработанные абразивные круги до

⁵⁷ Логинава И. В. Технология производства глинозема.

⁵⁸ TRAVAUX 49. Proceedings of the 38th International ICSOBA Conference...

определенных фракций и вовлекать полученный корунд в качестве фракции при производстве абразивного инструмента. Заводы по производству абразивного инструмента стараются налаживать контакты с крупными заказчиками, закупать у них отработанный абразивный инструмент, перерабатывать и вовлекать в производство.

Существует рециклинг огнеупорных материалов. Главная проблема рециклинга огнеупорных материалов заключается в том, что относительно легко использовать огнеупоры, не подвергавшиеся коррозии и химическому перерождению и изменению химического состава. Как правило, «стареют» без серьезного изменения химического состава шамотные и муллитовые огнеупоры в печах прокалики и обжига. Огнеупорные материалы, обогащенные по щелочам, вовлекать без отмывки проблематично.

Экологические аспекты добычи алюминийсодержащего сырья и производства глинозема

Главные экологические проблемы добычи бокситов сводятся к восстановлению площадей, на которых находились разработанные залежи бокситов.

В целом производство глинозема не оказывает серьезного воздействия на экологию, выбросы пыли и газов хорошо контролируются и вносят небольшой вклад в загрязнение окружающей среды, по сравнению с другими отраслями цветной металлургии и химическими отраслями промышленности.

Главной экологической проблемой является то, что глиноземное предприятие производит в полтора-два раза больше отходов, по сравнению с целевым продуктом — глиноземом. Проблема утилизации красного шлама (на предприятиях, работающих по способу Байер-спекания — серого шлама) — очень большая проблема.

Красный шлам перекачивается для хранения на карты шламохранилища. Содержание щелочей в красных шламах очень высоко, поэтому вокруг шламохранилищ создают уходящие вглубь стены во избежание взаимодействия щелочей с грунтовыми водами.

Красные шламы содержат много оксида кремния, оксида железа, много щелочей, много оксида алюминия, а также много полиминеральных примесей. Попытки вовлечения красного шлама в строительство (для производства бетонов, для производства кирпичей, для дорожного строительства) известны более ста лет, потенциально красный шлам может быть сырьем в черной металлургии, а также является резервным сырьем для металлургии алюминия.

Во многом вопрос переработки красного шлама — это вопрос комплексной переработки, в ходе которой можно было бы извлекать и использовать сразу несколько компонентов, а оставшуюся силикатную часть рационально перерабатывать в строительные материалы.

Этот подход необходим при строительстве новых заводов по производству глинозема, когда на стадии проектирования будут предусмотрены цеха и мощности по переработке силикатной составляющей боксита и нефелина в строительные материалы (бетоны, цементы, шлакоблоки, кирпичи).

На стадии проектирования возможно также предусмотреть мощности по извлечению из шламов солей полиметаллов (в частности для производства галлия), а также небольших производств глинозема не металлургического назначения (электрокорунда для абразивного производства, глинозема для производства керамики и огнеупоров и пр.).

Согласно опубликованным данным, для производства 1 кг глинозема расходуется около 20,238 кДж, при этом выделится 0,712 кг диоксида и будет переработано 2,64 кг боксита (табл. 21).

Таблица 21. Необходимые ресурсы для производства 1 кг глинозема

Ресурс	Количество
Мазут, кг	0,098
Природный газ, кг	0,170
Электричество, кВт	0,109
Боксит, кг	2,640

Анализ производства глинозема показывает, что имеются большие резервы для экономии энергии, расходуемой при производстве глинозема. Это утилизация и тепла при прокатке глинозема, и тепла печей спекания, и тепла отходящих газов, и совершенствование конструкций футеровок печей для сокращения теплопотерь. Вопросы утилизации тепла, вероятно, будут решаться в соответствии с динамикой роста цен на энергоносители.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Архипова Н. П.* Как были открыты Уральские горы : очерки по истории открытия и изучения природы Урала / Н. П. Архипова, Е. В. Ястребов. — Свердловск : Средне-Уральское книжное издательство, 1990.
2. *Белецкий В. М.* Алюминиевые сплавы : Состав, свойства, технология, применение : справочник / В. М. Белецкий, Г. А. Кривов. — Москва : Коминтех, 2005.
3. *Борисоглебский Ю. В.* Металлургия алюминия / Ю. В. Борисоглебский, Г. В. Галевский, Н. М. Кулагин. — Новосибирск : Наука, 1999.
4. ГОСТ 1583-93. Группа В51. Межгосударственный стандарт. Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия : дата введения 1997-01-01 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200009199> (дата обращения: 13.12.2021).
5. ГОСТ 11069-2001. Алюминий первичный. Межгосударственный стандарт. Марки : дата введения 2003-01-01// Центр сертификации и стандартизации «АНО МЦК». — URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294846/4294846342.htm> (дата обращения: 20.12.2021).
6. ГОСТ 4784-2019. Межгосударственный стандарт. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки : дата введения 2019-09-01 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200166725> (дата обращения: 14.12.2021).

7. Громов Б. С. Обжиг и пуск алюминиевых электролизеров / Б. С. Громов, Е. Н. Панов, М. Ф. Боженко [и др.]. — Москва : Руда и металлы, 2001.
8. Добыча и обогащение руд цветных металлов : Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 23-2017 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — <https://docs.cntd.ru/document/556173697> (дата обращения: 13.12.2021).
9. Ибрагимов А. Т. Развитие технологии производства глинозема из бокситов Казахстана / А. Т. Ибрагимов, С. В. Будон. — Павлодар, 2010.
10. История алюминия // Все об алюминии : Сайт об алюминии. — URL: https://aluminiumleader.ru/history/industry_history/ (дата обращения: 12.12.2021).
11. Корчагин М. Глава «РУСАЛ»: декарбонизация — необратимый тренд : [интервью с Е. Никитиным] // ТАСС. — 2021. — 7 апреля. — URL: <https://tass.ru/interviews/11082305> (дата обращения: 16.12.2021).
12. Лайнер А. И. Производство глинозема / А. И. Лайнер, Н. И. Еремин, Ю. А. Лайнер [и др.]. — Изд. 2-е. — Москва : Металлургия, 1978.
13. Логинава И. В. Технология производства глинозема : учебное пособие / И. В. Логинава, А. В. Кырчиков, Н. П. Пенюгалова. — Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2015.
14. Напалков В. И. Непрерывное литье алюминиевых сплавов / В. И. Напалков, Г. В. Черепок, С. В. Махов. — Москва : Интермет Инжиниринг, 2005.
15. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 году // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации : [официальный сайт]. — URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/ (дата обращения: 12.12.2021).
16. Производство алюминия : Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 11-2019 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/564068890> (дата обращения: 14.12.2021).
17. Самарянова Л. Б. Технологические расчеты в производстве глинозема / Л. Б. Самарянова, А. И. Лайнер. — Москва : Металлургия, 1988.
18. Степанов В. С. Термодинамические исследования металлургических процессов: энергетические балансы, эксергетический анализ / В. С. Степанов, С. В. Степанов. — Иркутск : ИрГТУ, 2007.
19. Степанов В. С. Химическая энергия и эксергия веществ / В. С. Степанов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Новосибирск : Наука, 1990.
20. Степанов В. С. Эксергетический анализ термодинамической эффективности теплоэлектроцентрали и ее подсистем / В. С. Степанов, Н. В. Старикова // Вестник ИрГТУ. — 2012. — № 3(62). — С. 95–101.
21. Степанов В. С. Эффективность использования энергии / В. С. Степанов, Т. Б. Степанова; РАН, Сиб. отд-ние, Сиб. энерг. ин-т. — Новосибирск : Наука, 1994.
22. Федеральная служба государственной статистики : [сайт]. — URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 17.12.2021).
23. Федеральная таможенная служба : [сайт]. — URL: <https://customs.gov.ru/> (дата обращения: 13.12.2021).
24. Финам : [сайт]. — URL: <https://www.finam.ru/> (дата обращения: 11.12.2021).
25. Чанг Х. Материалы, используемые в производстве алюминия методом Холла — Эру / Х. Чанг, В. де Нора, Дж. А. Секхар ; пер. с англ. П. В. Полякова. — Красноярск : КГУ, 1998.

26. Янко Э. А. Аноды алюминиевых электролизеров / Э. А. Янко. — Москва : Руда и металлы, 2001.
27. Aluminium Industry for Technology Roadmap // Aluminium Association. — Washington, USA, 2003. — URL: https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/resources/aluminum/pdfs/al_roadmap.pdf (дата обращения: 10.12.2021).
28. Balomenos E. Carbothermic reduction of alumina: A review of developed processes and novel concepts / E. Balomenos [et al.]. — TMS, 2011. — P. 407–414.
29. Grjothheim K. Aluminium smelter technology: A pure and applied approach / K. Grjothheim, B. J. Welch. — 2nd ed. — Düsseldorf : Aluminium-Verlag, 1988.
30. ISO 14044:2006. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Требования и руководящие указания // ISO. — URL: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:ru> (дата обращения: 12.12.2021).
31. Obaidat M. Energy and Exergy Analyses of Different Aluminum Reduction Technologies / M. Obaidat, A. Al-Ghandoor, P. Phelan, R. Villalobos, A. Ikhaliidi // Sustainability. — 2018. — No 10(4). — P. 1216. — DOI: 10.3390/su10041216.
32. Robinson T. Lowering energy intensity and emissions in the aluminum industry with government/industry/academia partnership / T. Robinson // Light Metals. — Warrendale : TMS, 2004. — P. 277–281.
33. Sørli M. Cathodes in aluminium electrolysis / M. Sørli, H. A. Øye. — 3rd ed. — Düsseldorf : Aluminium-Verlag, 2010.
34. Thonstad J. Aluminium electrolysis. Fundamentals of the Hall-Héroult process / J. Thonstad, P. Fellner, G. M. Haarberg [et al.]. — Düsseldorf : Aluminium-Verlag, 2001.
35. TRAVAUX 49. Proceedings of the 38th International ICSOBA Conference (16–18 November 2020). — URL: <https://icsoba.org/assets/files/publications/2020/AL18S.pdf> (дата обращения: 16.12.2021).
36. Yurkov A. Refractories for Aluminum: Electrolysis and the Cast House / A. Yurkov. — 2nd ed. — Cham (ZG, Switzerland) : Springer International Publishing AG, 2017.
37. Zhang H. Materials used in the Hall-Herault cell for aluminum production / H. Zhang, V. de Nora, J. A. Sekhar. — Warrendale : TMS, 1994. — P. 15–35.