



УДК 669.712.034

ПЕРЕРАБОТКА НИЗКОКАЧЕСТВЕННОГО БОКСИТОВОГО СЫРЬЯ СПОСОБОМ ТЕРМОХИМИЯ-БАЙЕР

О.А.ДУБОВИКОВ¹, Э.Э.ЯСКЕЛЯЙНЕН²

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Россия

² Норильский никель, Харьявалта, Финляндия

Современное производство алюминия, вышедшее на первое место по производству в мире среди цветных металлов, состоит из трех основных стадий: добычи руды, ее переработки на глинозем и, наконец, получения первичного алюминия. Получение глинозема из бокситов, основного сырья глиноземной промышленности, базируется на двух основных способах: способе Байера и разработанным в России под руководством академика Николая Семеновича Курнакова способе спекания. Получение глинозема по способу Байера экономически более выгодно, но и более требовательно к качеству бокситового сырья. Применительно к низкокачественным бокситам выполнено большое количество исследовательских работ, направленных, во-первых, на изыскание методов обогащения сырья, во-вторых, на усовершенствование комбинированного последовательного способа Байер-спекание, в-третьих, на разработку новых гидрометаллургических способов их переработки. Механические методы обогащения бокситов пока не дали положительных результатов, а при разработке нового гидрометаллургического высокощелочного автоклавного процесса встретились существенные аппаратные трудности, к настоящему времени ещё не решенные.

Для эффективной переработки такого низкокачественного бокситового сырья предлагается использовать разработанный в Санкт-Петербургском горном университете под руководством Николая Ивановича Еремина универсальный способ термохимия-Байер, позволяющий перерабатывать различное некондиционное бокситовое сырье и характеризующийся конкурентоспособной себестоимостью по отношению к способу спекания и комбинированным способам. Основные стадии способа термохимия-Байер: термическая активация сырья, последующее его обескремнивание щелочным раствором и выщелачивание полученного бокситового продукта по способу Байера. Несмотря на высокие энергозатраты на стадии обжига, он позволяет кондиционировать низкокачественное бокситовое сырье по целому ряду технологически вредных примесей: таких как органика, сульфидная сера, карбонаты, удаляется при этом кристаллогидратная и свободная вода. Последующее же обескремнивание щелочным раствором термоактивированного боксита позволяет перевести его из категории низкокачественных бокситов в сырье, пригодное для переработки по способу Байера.

Ключевые слова: Н.С.Курнаков, Н.И.Еремин, каолинит, шамозит, месторождения бокситов, бокситы, кремниевый модуль, термическая активация, обескремнивание обожженного боксита, бокситовый концентрат, способ Байера.

Как цитировать эту статью: Дубовиков О.А. Переработка низкокачественного бокситового сырья способом термохимия-Байер / О.А.Дубовиков, Э.Э.Яскеляйнен // Записки Горного института. 2016. Т.221. С.668-674. DOI 10.18454/PMI.2016.5.668.

Введение. Качество бокситов оценивается совокупностью факторов, определяющих себестоимость производства глинозема. Удельный расход боксита и каустической щелочи определяется содержанием оксидов алюминия и кремния, поэтому за рубежом качество бокситов оценивают по базовому числу $B = \{Al_2O_{3(акт)} - (SiO_{2(акт)} + CO_2)\}$, где $Al_2O_{3(акт)}$ и $SiO_{2(акт)}$ – процентное содержание растворимого оксида алюминия и диоксида кремния.

Так как эта формула не отражает потери щелочи с красным шламом, то венгерские исследователи предложили оценивать качество бокситов по формуле $\{(C - C^{Na_2O})/Q_6\}$, где C – константа; C^{Na_2O} – стоимость потерянной с красным шламом щелочи; Q_6 – количество сухого боксита, расходуемого на 1 т глинозема [15].

Н.Н.Тихонов предложил комплексный критерий оценки качества бокситов [4], согласно которому бокситовый эквивалент равен $Q_6 k Q_{щ}$. Поправочный коэффициент k учитывает разницу в стоимости щелочи и боксита, а удельные расходы боксита Q_6 и щелочи $Q_{щ}$ на 1 т глинозема соответственно равны: $Q_6 = 99/(A_6 \eta_{\phi})$ и $Q_{щ} = 990(Si_6 h + 1,45 S_6 \eta_s + 0,14 C_6)/(A_6 \eta_{\phi})$, где процентное содержание в боксите оксида алюминия – A_6 ; серы – S_6 ; диоксидов кремния – Si_6 и углерода – C_6 , фактическое процентное извлечение из боксита глинозема – η_{ϕ} ; диоксида кремния – h и серы – η_s .

Основным показателем качества бокситов остается кремниевый модуль или весовое отношение оксида алюминия к диоксиду кремния бокситового сырья, однако минерально-сырьевая база имеет тенденцию не только к снижению качества бокситового сырья, но и к возрастанию затрат на их добычу.

В прошлом веке в России исследования, направленные на разработку технологий извлечения глинозема из низкокачественных бокситов, проводились в Горном институте и в Российском институте прикладной химии под общим руководством академика, профессора Горного института Николая Семеновича Курнакова. При определении окончательных масштабов производства алюминия Правительством СССР 14 сентября 1929 г. была принята рекомендация Н.С.Курнакова перерабатывать бокситы на

Волховском алюминиевом заводе по способу спекания методом Мюллера – Яковкина – Лилеева, а на Днепровском алюминиевом заводе – по способу Кузнецова – Жуковского, предложенному профессором Горного института профессором А.Н.Кузнецовым и его сотрудником Е.И.Жуковским.

В настоящее время в рамках одной из ведущих научных школ Горного университета продолжают исследования, проводимые в свое время под руководством заведующего кафедрой металлургии легких и редких металлов Горного института Николая Ивановича Еремина по обогащению низкокачественного бокситового сырья, идея которого состоит в использовании процессов термического воздействия и последующего селективного выщелачивания, обеспечивающих целенаправленное изменение химико-минералогического состава бокситов и возможность переработки полученных концентратов в рамках традиционных щелочных способов.

Качество байеровских бокситов в первом приближении определяется кремниевым модулем μ_{Si} , согласно которому теоретическое извлечение глинозема по способу Байера равно $[(\mu_{Si} - 1) / \mu_{Si}] 100 \%$ при условии связывания всего диоксида кремния боксита в гидроалюмосиликат натрия (ГАСН) состава $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 1,7SiO_2 \cdot nH_2O$. При повышенном содержании в боксите диоксида кремния он будет «переходить» в отходы производства – красный шлам в виде ГАСН, обуславливая тем самым большие потери глинозема и щелочи. После обескремнивания низкокачественных бокситов возможна их переработка по способу Байера с выделением не только глинозема, но и получением целого ряда техногенных продуктов на основе диоксида кремния.

Применение механических методов обогащения с целью повышения кремниевого модуля зависит от химико-минералогических свойств перерабатываемого сырья. В отдельных случаях получали байеровский концентрат с извлечением $Al_2O_3 - 50 \div 70 \%$ и выходом концентрата – $60 \div 70 \%$. При этом неизбежно получают высокремнистый продукт, качество которого невысокое: $\mu_{Si} = 1,5 \div 2,5$, а количество увлекаемого с ними глинозема достигает $30 \div 50 \%$.

Микробиологические методы позволяют несколько улучшить качество бокситов, однако промышленное применение их из-за длительности процесса на современном этапе весьма проблематично [5].

Месторождения бокситов. Основные районы концентрирования бокситов России: Северо-Уральский бокситоносный район, Тиманская бокситоносная зона, Североонежский бокситоносный район, Белгородская область, Красноярский край (рис.1) [3].

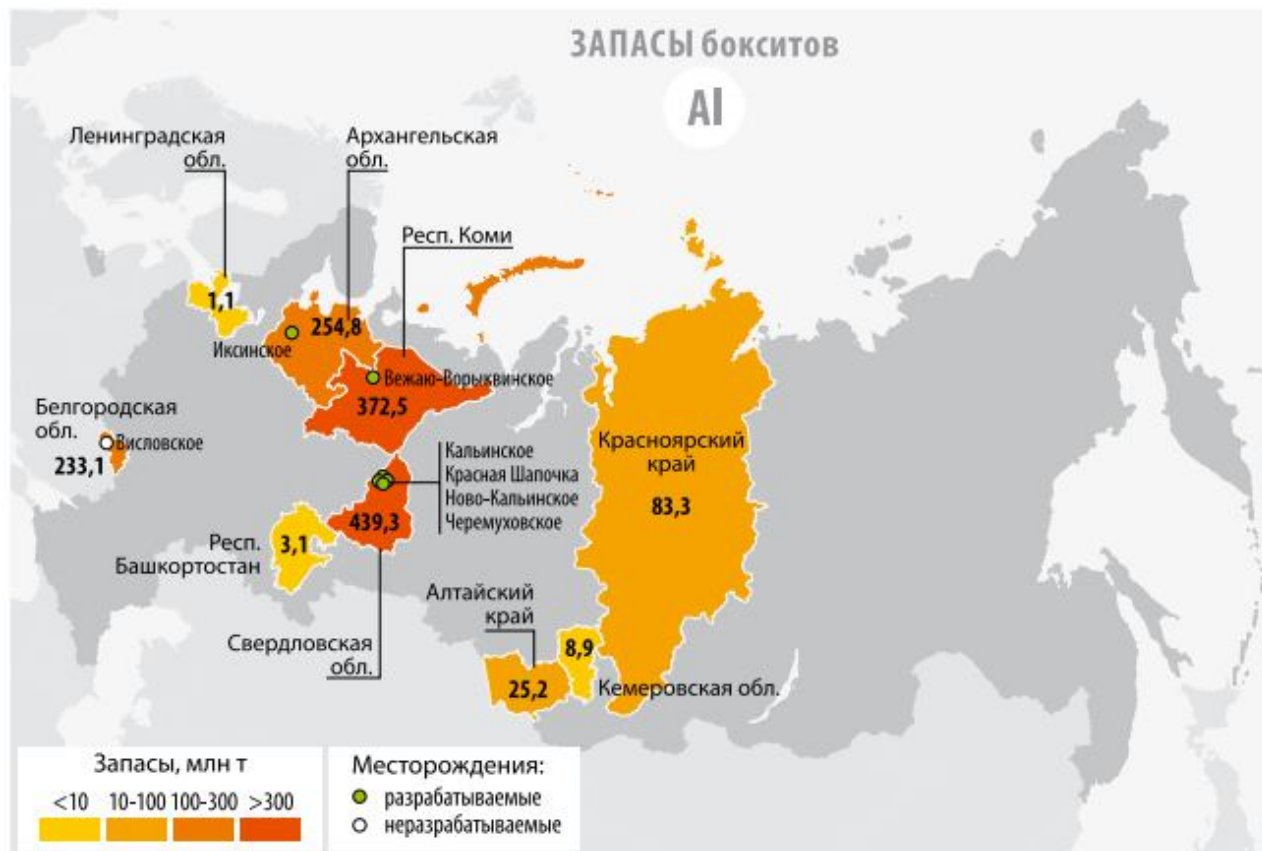


Рис.1. Основные бокситовые месторождения, распределение запасов и прогнозных ресурсов бокситов (млн т) по субъектам Российской Федерации

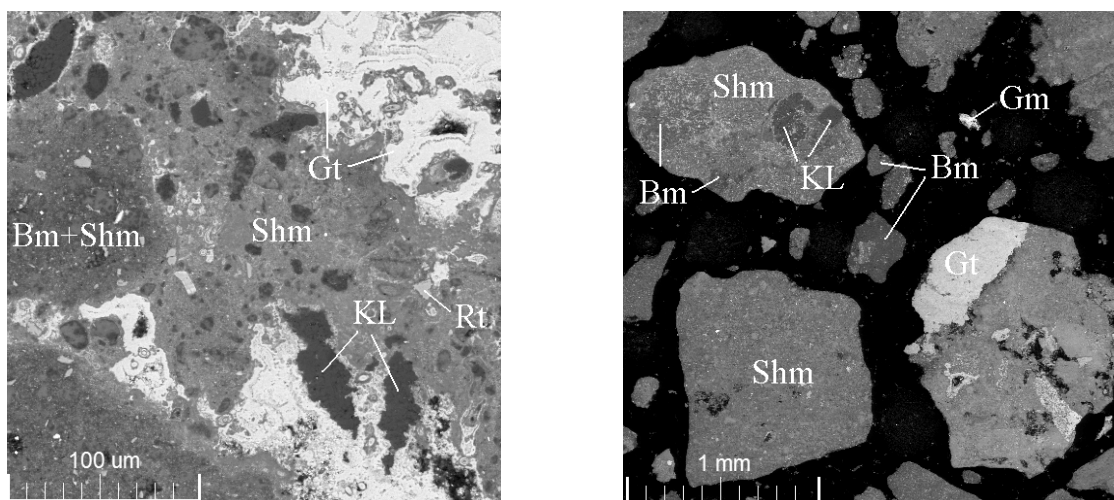


Рис.2. Бокситы Вежаю-Ворыквинского месторождения при различном увеличении
Bm – бемит/диаспор, Shm – шамозит, KL – каолинит, Rt – рутил, Gt – гетит, Gb – гиббсит, Gm – гематит

Примерно 26 % российских запасов бокситов заключено в Тиманской бокситоносной зоне (Республика Коми). Это крупное Вежаю-Ворыквинское месторождение и месторождения: Верхне-Щугорское, Восточное [12]. Бокситы характеризуются высоким содержанием железа, имеют кремниевый модуль от 3 до 6. Определенные затруднения при переработке вызывает присутствие серы в форме пирита. Бокситы залегают вблизи поверхности, что позволяет добывать их открытым способом. Прогнозируемые ресурсы Тиманской бокситоносной зоны составляют около 40 млн т.

Вежаю-Ворыквинское месторождение расположено в районе рек Ворыквы и Вежаю. Мощность рудных залежей в пределах месторождения варьируется от 1,0÷1,5 до 30÷32 м. Глубина залегания рудного пласта изменяется в пределах от 0,2÷0,5 до 132 м. Вещественный состав бокситов следующий, % по массе: SiO₂ 8,8-19; Al₂O₃ 41-48; Fe₂O₃ 21,9-29,8; FeO 3,5-7,4; TiO₂ 2,4-3,2; CaO 0,07-0,9; ППП 11,6÷12,5. Также установлено повышенное содержание редких металлов Nb₂O₅ (0,005-0,009 %) и Ta₂O₅ (0,0003 %). Главные минералы представлены бемитом, каолинитом, шамозитом и гематитом (рис.2). Бокситы месторождения относятся к промышленному бемитовому типу.

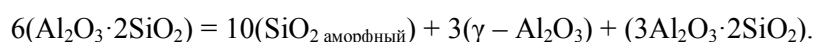
Восточное месторождение располагается к востоку от Вежаю-Ворыквинского и практически является его продолжением. Бокситы Восточного месторождения залегают на глубине от 78 до 400 м, их мощность составляет от 1,5 до 46 м. Средний состав бокситов следующий, % по массе: Al₂O₃ – 50,26; SiO₂ – 7,39; Fe₂O₃ – 27,8; TiO₂ – 2,6. Также отмечается повышенное содержание редкометаллических и редкоземельных элементов: Nb₂O₅ (до 0,0093 %), Ta₂O₅ (0,0002 %); Ga (до 100 г/т); Sc (до 120 г/т); V (до 630 г/т). Из минералов присутствуют бемит, диаспор, каолинит, шамозит, гематит. Бокситы относятся к бемитовым и диаспор-бемитовым.

Верхне-Щугорское месторождение расположено к северо-западу от Вежаю-Ворыквинского, в верхнем течении реки Щугор. Мощность залежей составляет от 0,4 до 50 м. Содержание Al₂O₃ составляет 49,76 %, SiO₂ – 6,61 %, Fe₂O₃ – 28,03 %. Основные минералы: бемит, диаспор, каолинит, гематит. Промышленный тип – моногидратные бемитовые бокситы.

Основными кремнийсодержащими минералами Тиманской бокситоносной зоны являются каолинит и шамозит.

Поведение каолинита при переработке бокситов по способу термохимия-Байер. В основе термохимического обескремнивания каолинового сырья лежит свойство каолинита распадаться при температурах выше 900 °С на алюмосиликат с меньшим, чем в каолините, содержанием диоксида кремния и аморфный, хорошо растворимый в щелочных растворах, свободный диоксид кремния [1, 2, 6, 8-10].

Наряду с рентгеноструктурным и кристаллооптическим методами анализа, для раскрытия механизма термической активации каолинита Н.И. Еремин применил простой и надежный химический метод. Было показано, что продуктами обжига каолинита при 925÷1000 °С являются аморфный SiO₂, γ-Al₂O₃ и муллит при примерно равном количественном распределении между ними оксида алюминия согласно реакции и графической интерпретации (рис.3):



Таким образом, теоретически возможное извлечение диоксида кремния при обескремнивании обожженного каолинита составляет более 80 %.

Поведение шамозита при переработке бокситов по способу термохимия-Байер. При полной ясности поведения каолинита при термической обработке, вопрос о термических превращениях шамозита оставался до конца не выясненным. Поведение шамозитов $(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_3 \cdot [\text{AlSi}_3\text{O}_{10}] \cdot (\text{OH})_2 \times \{(\text{Fe}, \text{Mg})_3(\text{O}, \text{OH})_6\}$ в способе термохимия-Байер во многом определяет технологические показатели всего процесса [7, 11, 13, 14]. Исследованию были подвергнуты пробы шамозитов Белгородского участка Курской магнитной аномалии различной степени окисленности и с различным отношением ортогональной модификации к моноклинной (табл. 1).

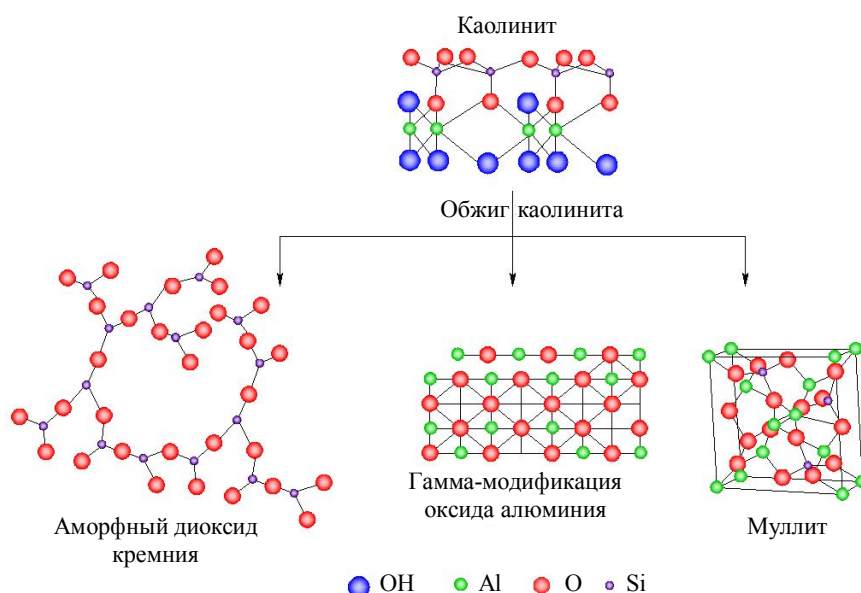


Рис.3. Графическая интерпретация термического разложения каолинита

Таблица 1

Вещественный состав шамозитов

Номер пробы	Содержание, %							Степень окисленности*	Отношение модификаций (О/М)**
	ППП	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	FeO	R_2O	TiO_2		
1	8,08	18,26	15,30	54,56	29,61	0,16	1,19	0,46	2,1
2	15,58	31,75	26,00	21,40	8,43	0,25	1,96	0,61	2,0
3	10,52	23,72	22,40	39,10	23,30	0,20	0,61	0,40	9,0

* Степень окисленности $(\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{FeO}) / \text{Fe}_2\text{O}_3$; ** (О/М) – ортогональная/моноклинная.

Согласно данным, полученным в результате рентгенофазового анализа, исследуемые пробы шамозита относятся к каолинитовому типу, поскольку отсутствует дифракционный пик, соответствующий межплоскостному расстоянию $d = 1,4$ нм, характерный для хлоритов. На рентгенограммах всех исходных проб имеются основные рефлексы шамозита: $d = 0,7$; $0,35$; $0,25$; $0,24$ нм. Также в пробах обнаруживается гематит ($d = 0,369$ нм), в пробах № 2 и 3 имеется каолинит ($d = 0,712$; $0,443$; $0,356$ нм), в пробах № 1 и 3 – небольшое количество сидерита ($d = 0,279$ нм), в пробе № 2 – гиббсит ($d = 0,483$ нм) и кварц ($d = 0,334$ нм).

Различие в соотношении интенсивностей отражений, особенно в области рефлексов, отвечающих межплоскостным расстояниям $d = 0,251$ нм и $d = 0,240$ нм, связано с разным соотношением в пробах шамозита ортогональной и моноклинной форм данного минерала. Для ортогональной формы характерно отражение $d = 0,251$ нм, тогда как для моноклинной – $d = 0,240$ нм. Для сравнения интенсивностей отражений $d = 0,251$ нм и $d = 0,240$ нм результаты рентгенофазового анализа представляли в виде штрих-диаграмм, штрихи которых получены измерением высоты пика на дифрактограмме от уровня фона спектра. Отношение интенсивностей данных отражений пропорционально соотношению содержания форм в пробе. При $I_{d=0,240} > I_{d=0,251}$ преобладает моноклинная форма, при $I_{d=0,240} < I_{d=0,251}$ – ортогональная. Как правило, ортогональная форма преобладает в шамозите. Дифракционные пики $0,7$; $0,35$ нм принадлежат обоим структурным формам.

Таким образом, сравнив отношение интенсивностей отражений $I_{d=0,251} / I_{d=0,240}$ для проб № 1; 2; 3 соответственно имеем следующие отношения интенсивностей отражений: 2,1; 2,0; 9.

Пробы шамозитов измельчались до крупности $-0,147$ мм. Далее часть из них обжигалась. Дифрактограммы исходного и обожженного шамозита представлены на рис.4.

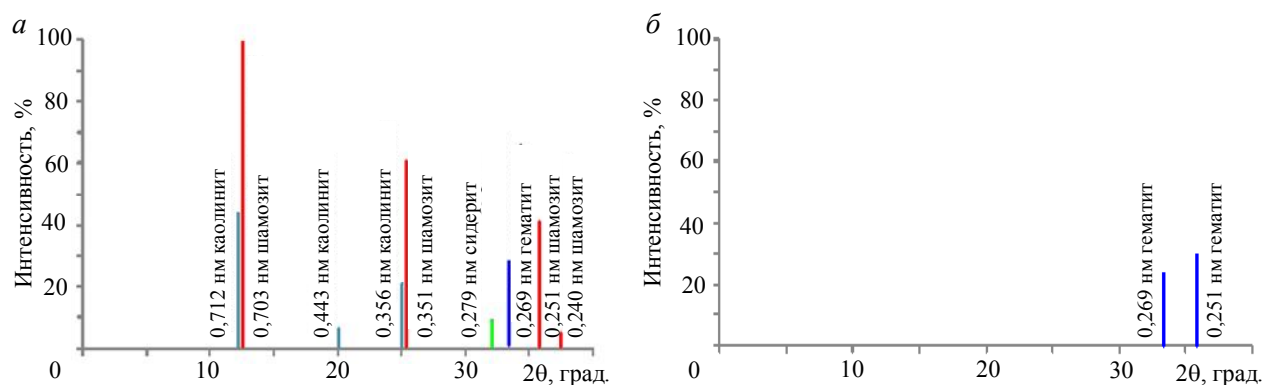


Рис.4. Характерная штрих-диаграмма шамозита до (а) и после (б) обжига при температуре 600 °С

$d = 0,251$ нм – ортогональная форма, $d = 0,240$ нм – моноклинная форма

Затем исходные и обожженные пробы шамозитов подвергались выщелачиванию при различных технологических показателях (табл.2).

Таблица 2

Состав продуктов выщелачивания

Обжиг, °С	Условия выщелачивания: температура °С, Na ₂ O _к г/л и α _к	Содержание в остатке от выщелачивания, %						Na ₂ O [*]
		ППП	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	Na ₂ O	SiO ₂ моль
Проба № 1								
Нет	95 °С, 150 г/л	8,80	17,51	14,60	53,55	20,64	1,25	0,080
400	95 °С, 150 г/л	4,75	18,83	16,00	59,02	9,12	1,30	0,080
600	95 °С, 150 г/л	8,11	15,12	14,40	56,54	1,68	5,80	0,390
Проба № 2								
Нет	80 °С, 150 г/л	–	28,00	26,40	22,50	15,10	1,40	0,051
Нет	80 °С, 150 г/л и 3,5	–	28,70	27,00	23,20	15,43	1,00	0,001
Нет	95 °С, 150 г/л	11,96	27,56	26,20	21,58	14,36	6,30	0,230
400	95 °С, 150 г/л	12,20	27,75	26,00	21,70	7,90	6,30	0,230
600	95 °С, 150 г/л	13,06	21,93	24,40	20,58	2,88	12,00	0,480
Проба № 3								
Нет	95 °С, 150 г/л	6,56	22,14	22,40	40,55	25,75	0,65	0,030
400	95 °С, 150 г/л	8,22	23,12	23,40	41,30	11,52	2,56	0,100
600	95 °С, 150 г/л	11,10	21,65	20,00	36,08	3,84	8,00	0,390

* При разложении шамозита и образовании ГАСН состава Na₂O:Al₂O₃:SiO₂ = 1:1:(2÷2,4) мольное отношение Na₂O/SiO₂ равно (0,50÷0,42)

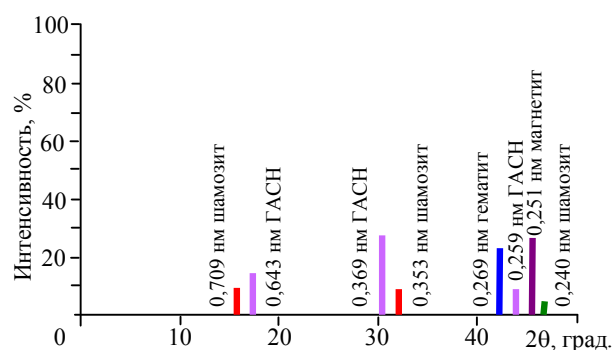


Рис.5. Штрих-диаграмма продуктов выщелачивания пробы № 3, обожженной при 600 °С

Рентгеноструктурный анализ продуктов выщелачивания (рис.5) показал, что основными продуктами являются ГАСН, характеризующийся молекулярным отношением Na₂O:Al₂O₃:SiO₂ = 1:1:(2÷2,4), и железосодержащие минералы.

Степень разложения, одним из показателей которой является отношение Na₂O к SiO₂ в твердой фазе, для проб, обожженных при 600 °С и выщелоченных при 95 °С выше, чем при обработке даже в автоклавных условиях этих проб без предварительного обжига, что позволило провести графическую интерпретацию термического разложения шамозита (рис. 6).

Одновременно с процессом термических превращений алюмосиликатов при обжиге бокситов также претерпевают изменения и глиноземсодержащие фазы. Согласно литературным данным, температуры переходов одной фазы в другую как в процессе термического разложения алюмосиликатов, так и превращений различных форм оксида алюминия зависят от ряда факторов, в том числе от режима термообработки, дисперсности материала, наличия твердых и газообразных минерализаторов [11].

Термохимическое кондиционирование бокситов Вежаю-Ворыквинского месторождения. Технологический контроль за процессом обжига бокситов осуществлялся наиболее простым, дающим максимальную информацию химическим методом.

По мере повышения температуры обжига боксита Вежаю-Ворыквинского месторождения происходит более глубокое обескремнивание. Наличие небольшого пологого участка в области 500÷800 °С объясняется содержанием в этих бокситах шамозита и его термическим разложением, в результате которого образующиеся в аморфном виде свободные оксиды алюминия и кремния свободно переходят в щелочной раствор. Это подтверждается и тем, что площадка на кривой извлечения диоксида кремния совпадает с площадкой извлечения оксида алюминия.

Дальнейший рост степени обескремнивания обожженного боксита связан с термическим разложением метакоалинита, образовавшимся из каолинита, а снижение извлечения оксида алюминия – с его полиморфными превращениями, в результате которых он становится более инертным по отношению к щелочным растворам.

Более продолжительная температурная выдержка при обжиге после достижения заданной температуры влияет аналогично повышению температуры (рис.7). Об этом говорит взаимное распо-

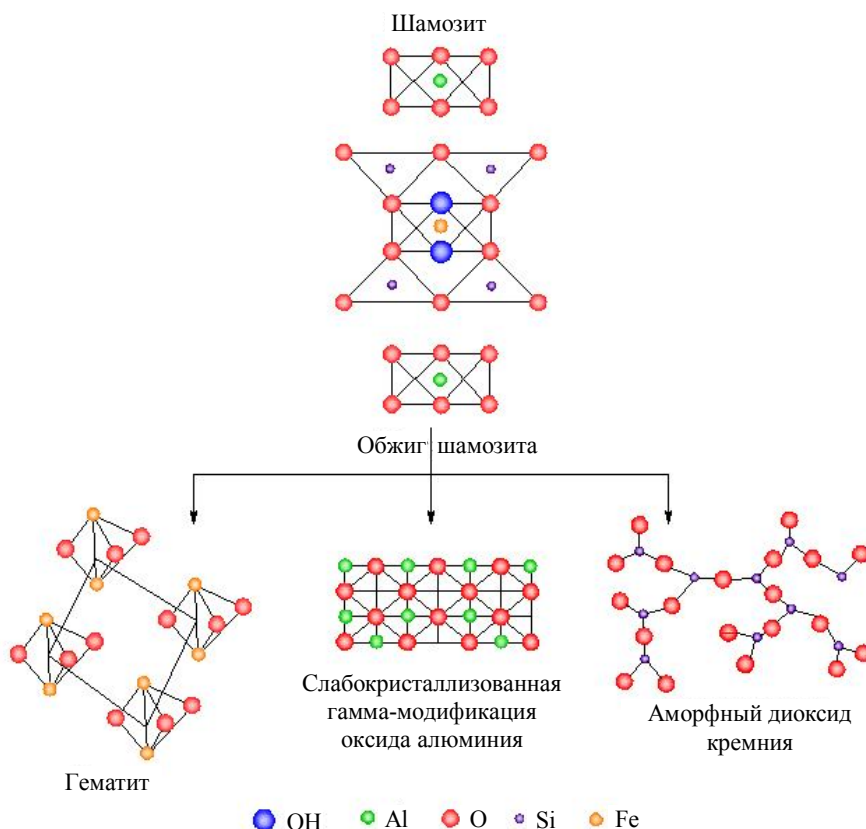


Рис.6. Графическая интерпретация термического разложения шамозита

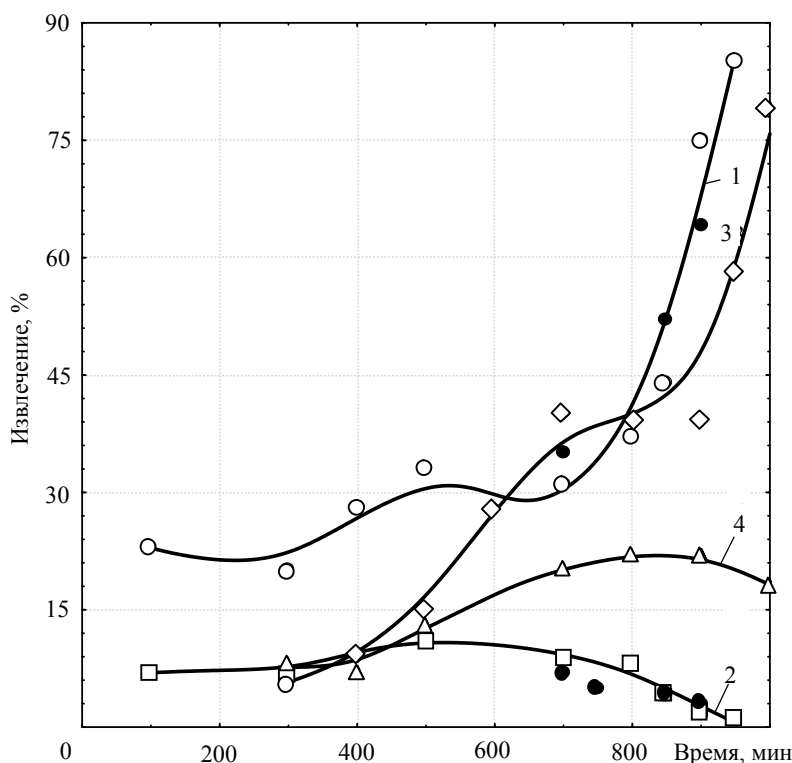


Рис.7. Извлечение SiO_2 (кривые 1, 3) и Al_2O_3 (2, 4) из бокситов с модулями $\mu_{\text{Si}} = 5,06$ (1, 2) и $\mu_{\text{Si}} = 2,27$ (3, 4) в зависимости от температуры обжига



ложение точек (незаштрихованные и заштрихованные точки обозначают соответственно отсутствие и наличие часовой выдержки при заданной температуре). Однако влияние это незначительное.

Выводы. Проведенные исследования поведения основных кремнийсодержащих минералов в процессе термохимического кондиционирования низкокачественных бокситов позволили получить ряд ценных научных результатов:

- химическое кондиционирование необожженных бокситов, основанное на растворении водных силикатов и алюмосиликатов в щелочных и алюминатных растворах, эффективно, но только для бокситов с кремниевым модулем более 5 и содержащих ограниченное количество технологически вредных для процесса Байера примесей: таких как органические вещества, карбонаты, сульфиды;
- энергоемким, но универсальным способом следует считать способ термохимия-Байер;
- продуктами обжига каолинита при $925\div 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ являются аморфный SiO_2 , $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ и муллит, что позволяет извлечь из обожженного каолинита в щелочной раствор более 80 % SiO_2 ;
- степень разложения шамозитов при взаимодействии со щелочными и алюминатными растворами зависит от соотношения его полиморфных модификаций и от степени окисленности: 1) окисление увеличивает неупорядоченность структуры, а ортогональная модификация проявляет большую стойкость в щелочных растворах; 2) обжиг шамозитов начиная с температур выше $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ сглаживает эти различия за счет разложения шамозита и образования аморфных оксидов алюминия и кремния;
- установлена зависимость глубины обескремнивания термоактивированных бокситов от температуры их обжига.

На технологии и технические решения, разработанные в Горном университете для переработки низкокачественного бокситового сырья по способу термохимия-Байер, получено более десятка авторских свидетельств и патентов Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бриндли Г.В. Реакционная серия каолинит-муллит / Г.В.Бриндли, М.Накахира // Вопросы минералогии глин. М.: Иностранная литература, 1962. С.90-135.
2. Будников П.П. Исследования влияния малых добавок на кинетику процесса муллитобразования при пониженных температурах / П.П.Будников, Т.Н.Кешимян, А.В.Волкова // Журнал прикладной химии. 1963. № 5. С.1064-1068.
3. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2013 году» [Электронный ресурс]. 2014. Режим доступа: <http://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/914/Report2014.pdf>.
4. Дубовиков О.А. Эффективные технологии переработки низкокачественных бокситов / О.А.Дубовиков, В.М.Сизяков / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2012. 195 с.
5. Дубовиков О.А. Микробиологическое кондиционирование бокситов / О.А.Дубовиков, Е.Е.Андреев, Н.В.Николаева // Обогащение руд. 2011. № 5. С.19-23.
6. Дубовиков О.А. Математическое описание процесса разложения каолинита щелочными растворами / О.А.Дубовиков, Н.В.Николаева // Записки Горного института, 2011. Т.192. С.73-76.
7. Дубовиков О.А. Поведение шамозита в процессе химического и термохимического кондиционирования / О.А.Дубовиков, Н.В.Николаева // Записки Горного института. 2011. Т.192. С.49-53
8. Еремин Н.И. Исследование термических превращений каолина химическим методом / Н.И.Еремин, М.И.Ерусалимский // Журнал прикладной химии. 1969. Вып.42. № 3. С.497-501.
9. Калинина А.М. Высокотемпературные превращения синтетического каолинита // Журнал неорганической химии. 1963. Вып.12. № 8. С.2675-2684.
10. Калинина А.М. О превращениях синтетического каолинита при нагревании // Химия и технология глинозема / НТИ СНХ. Ереван, 1964. С.63-80.
11. О роли минерализующих добавок в процессах фазовых превращений глинозема / В.М.Сизяков, О.А.Дубовиков, Н.В.Николаева и др. // Записки Горного института. 2013. Т.202. С.48-56.
12. Плякин А.М. Твердые полезные ископаемые Тимана / А.М.Плякин, В.В.Беляев / УГТУ. Ухта, 2005. 92 с.
13. Подготовка бокситов для изучения возможности переработки красных шламов для использования в черной металлургии / В.М.Сизяков, О.А.Дубовиков, Н.В.Николаева и др. // Цветные металлы. 2013. № 2. С.57-62.
14. Сизяков В.М. Теория и практика термохимического обогащения низкокачественных бокситов / В.М.Сизяков, О.А.Дубовиков, Д.А.Логинов // Обогащение руд. 2014. № 5. С.10-17.
15. Zambo J. Bauxitoh kovasavtartalmanah esohhentese aluminatlugos heselfessel // Femipari kutato int koze. 1960. Vol.4. P.57-63.

Авторы: О.А.Дубовиков, д-р техн. наук, профессор, dubovikov_oa@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Россия), Э.Э.Яскеляйнен, д-р техн. наук, профессор, eduard.jaaskelainen@nornik.fi (Норильский никель, Харьявалта, Финляндия).

Статья принята к публикации 13.09.2016.