

А. С. Аяшева (асп.¹, рук. отд.²)^{1,2}, Е. В. Пояркова (д.т.н., доц., зав. каф.)¹

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ОКСИДА МАГНИЯ ПРИ ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ МАГНЕЗИАЛЬНОГО СЫРЬЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УГОЛЬНОЙ КИСЛОТЫ

¹ Оренбургский государственный университет, кафедра механики материалов, конструкций и машин
460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13; e-mail: mmkm@mail.osu.ru

² ООО «ЭКСИС», отдел новых и химических технологий
462781, Оренбургская области, г. Ясный, ул. Ленина, д. 7, оф. 311; e-mail: kalmykova.a.c@yandex.ru

A. S. Ayasheva^{1,2}, E. V. Poyarkova¹

EXTRACTION OF MAGNESIUM OXIDE DURING THE LEACHING OF MAGNESIAN RAW WITH THE USE OF CARBONIC ACID

¹ Orenburg State University

13, Pobedy Str., 460018, Orenburg, Russia; e-mail: mmkm@mail.osu.ru

² «EXIS» LLC

7, Lenina Str., 462781, Yasnyi, Russia; e-mail: kalmykova.a.c@yandex.ru

Процесс подготовки минерального сырья играет ключевую роль в комплексной переработке руд и оказывает существенное влияние на качество и выход готового продукта. В статье рассматривается влияние технологических параметров термической обработки магнезильного сырья различной природы на количественные показатели оксида магния при получении его в лабораторных условиях. Определены оптимальные температуры и продолжительность обжига исходных природных минеральных материалов – магнезита, доломита и серпентинита и установлено, что факторами, влияющими на выход готового продукта (оксида магния), являются не только время обжига, температура процесса, но также и исходный химический и минералогический состав магнезильной руды.

Ключевые слова: выщелачивание; доломит; жженая магнезия; магнезильное сырье; магнезит; оксид магния; обжиг; параметры термической обработки; прокаливание; серпентинит.

Как известно, в соответствии с прогнозом научно-технологического развития РФ на период до 2030 года и с учетом перечня критических технологий РФ¹, к приоритетным направлениям развития науки и техники относятся как рациональное природопользование, так и энергоэффективность и энергосбережение. Анализируя состояние сырьевой базы магнезильного сырья в РФ и за ее пределами и его связи с возрастающим дефицитом высокочистого оксида магния, повышение энерго-

The process of preparation of mineral raw materials plays a key role in the complex processing of ores and has a significant impact on the quality and yield of the finished product. The article considers the influence of technological parameters of heat treatment of magnesia raw materials of various nature on quantitative indicators of magnesium oxide when it is obtained in the laboratory. The optimal temperatures and duration of firing of the initial natural mineral materials – magnesite, dolomite and serpentinite were determined, and it was found that the factors influencing the yield of the finished product (magnesium oxide) are not only the firing time, the process temperature, but also the initial chemical and mineralogical composition of the magnesia ore.

Key words: burnt magnesia; calcination; dolomite; firing; heat treatment parameters; leaching; magnesian raw materials; magnesite; magnesium oxide; serpentinite.

эффективности технологического процесса его извлечения из магнезильного сырья различной природы и побочных продуктов добывающей промышленности имеет достаточно высокий потенциал снижения энергозатрат на производство.

Требования, предъявляемые к производимому оксиду магния в мировой практике, исходят в основном от областей его применения, таких как:

- металлургическая промышленность;
- фармацевтическая и косметическая промышленности;

Дата поступления 21.12.22

- медицина;
- целлюлознобумажная промышленность;
- сельскохозяйственное производство, а также производстве кормов и различных добавок;
- кожевенная промышленность;
- резинотехническая промышленность и производство полимеров;
- производство огнеупоров;
- изготовление буровых растворов и др.

Согласно аналитическим обзорам о применении оксида магния ^{2–6} в различных сферах, были выделены основные группы, согласно которым основные объемы производимого продукта оксида магния потребляются в металлургической, резинотехнической и огнеупорной промышленности. Области применения оксида магния достаточно разнообразны, при этом потенциал расширения номенклатуры магнезиальных материалов далеко не исчерпан и для технического прогресса в выше перечисленных промышленных сферах необходимо наиболее полное использование добываемого магнезиального сырья и отходов промышленности, создание комплексных энергосберегающих технологий и производств.

В настоящее время известно более 60 минералов, содержащих магний в своем составе, и наибольшее содержание этого металла наблюдается в магнезите (MgCO_3), брусите ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), доломите ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), бишофите ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), серпентините ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) ^{2, 3, 5–8}. Основные виды магнезиального сырья представлены на рис. 1.

Наиболее распространенным и доступным видом сырья для получения жженой магнезии является магнезит ^{9, 10}.

При извлечении оксида магния используют различные технологии, но наибольшее распространение получили: солянокислотный способ, аммонийный способ и бикарбонатный способ ¹¹.

Предлагаемые способы выщелачивания MgO с использованием сильных минеральных кислот (H_2SO_4 , HCl , HNO_3) непригодны как с экономической, так и экологической точки зрения ¹². Несмотря на то, что технологий получения оксида магния достаточно много, в их большинстве главным этапом получения ценного продукта выступает процесс обжига.

Известно, что магнезия бывает трех видов, и в зависимости от температуры обжига она подразделяется:

- обожженная каустическая магнезия (600–900 °С);
- мертво обожженная магнезия (900–1500 °С);
- плавленная магнезия или периклаз (1500–2000 °С).

В этой связи, оксид магния по активности может быть активным (легким) и неактивным (тяжелым). Чаще всего используется активный оксид магния в качестве наполнителя для резин, адгезивов, пластических масс, полимеров, в качестве стабилизаторов при производстве хлоропреновых каучуков, рафинирующих присадок органических растворителей, в фармацевтической, фармакопейной и пищевой промышленности, в производстве катализаторов, специальной керамики, специальных стекол (линз фото-, кино-, астрообъективов), в производстве магнезиальных цементов и других магнийсодержащих материалов ¹³.

По описанию многих технологий получения оксида магния необходимо вести обжиг сырья в умеренных температурах от 500 до 1000 °С, а затем производить измельчение обожженного материала. Выход и качество получаемой жженой магнезии напрямую зависит от вида и состава сырья, от параметров обжига (температуры и времени), а также от дальнейшей механоактивации исходного материала ⁴.

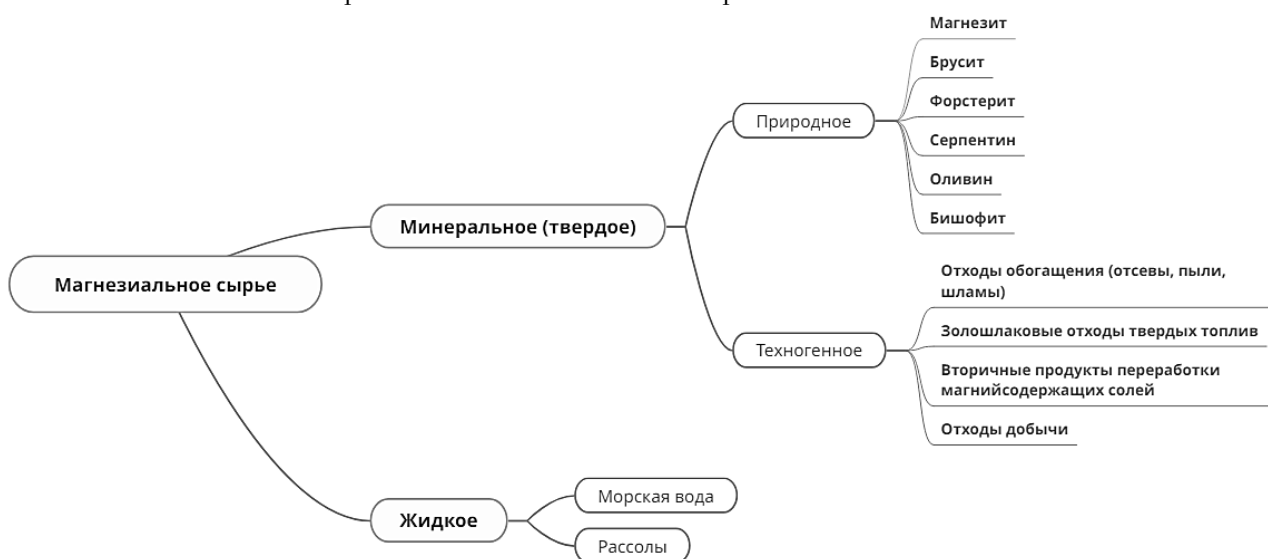


Рис. 1. Основные виды магнезиального сырья

Важной характеристикой является реакционная способность оксида магния, которая имеет высокие показатели именно у активного MgO . Определить реакционную способность магнезии можно, проанализировав такие показатели, как удельная поверхность, активность по иодному числу, активность по лимонному числу, активность по уксусному числу, типичная реакционная способность ¹⁴.

В связи с известной зависимостью выхода и качества готового продукта от параметров исходных манипуляций с сырьем, целью настоящей работы являлось исследование влияния параметров термической обработки на выход готового продукта из разных видов магнезиального сырья при выщелачивании оксида магния с использованием угольной кислоты.

Материалы и методы

В рамках достижения цели исследования в настоящей работе были использованы образцы руд магнезита Халиловского месторождения, доломита Саткинского месторождения и серпентинита Киембаевского месторождения, химический состав которых представлен в табл. 1–3.

Для выявления зависимости выхода оксида магния от параметров термической обработки (ТО) был использован способ получения жженой магнезии карбонатным выщелачиванием из природных магнезиальных материалов, представленных на рис. 2.

В работе было задействовано следующее лабораторное оборудование: электропечь сопротивления SNOL 15/1100, электропечь сопротивления низкотемпературная SNOL 58/350; дробилка валковая лабораторная ДГ 200*125; измельчитель вибрационный ИВ-4, весы лабораторные электронные СЕ и лабораторный реактор РВДС 1-1000.

В табл. 1–3 представлены также и результаты влияния термической обработки (прокаливания) на изменение химического состава магнезиальных пород трех различных месторождений. Эффект от ТО выражен в нахождении отношения содержания (в %) каждого из оксидов как компонента руды в прокаленном состоянии к процентному содержанию этого же оксида в сырой руде и обозначен в таблице стрелками ($\uparrow$ – повышение, а $\downarrow$ – понижение содержания оксида).

Анализ табличных данных позволил сделать некоторые заключения:

- термическая обработка руды магнезита Халиловского месторождения способствует увеличению в ее составе оксида магния более чем в 2.5 раза, тогда как содержание остальных компонентов руды в виде основных и кислотных оксидов

увеличивается достаточно равномерно (примерно в 1.97 раза). Ввиду того, что Халиловский магнезит представлен аморфной скрыто-кристаллической разновидностью $MgCO_3$ и отличается наличием серпентинизированных магнезитов ¹⁵, повышение содержания оксида кремния SiO_2 в химическом составе данной гидромагнезиальной породы становится закономерным;



а: слева – исходная руда; справа – обожженная при 700 °С и измельченная до 140 мкм



б: слева – исходная руда; справа – обожженная при 900 °С и измельченная менее 140 мкм



в: слева – исходная руда; справа – обожженная при 700 °С и измельченная менее 140 мкм

Рис. 2. Внешний вид магнезиальных материалов: а – магнезит Халиловского месторождения; б – доломит Саткинского месторождения; в – серпентинит Киембаевского месторождения

- прокаливаемость доломита Саткинского месторождения позволяет в большей степени повысить процентное соотношение оксида магния в составе руды (в 2.8 раза) за счет изменения содержания других компонентов. Так, содержание кис-

Таблица 1

Средний состав руд Халиловского месторождения магнезита (Оренбургская область)

Состояние руды	Содержание оксидов, %									
	MgO		Al ₂ O ₃		SiO ₂		CaO		Fe ₂ O ₃	
Сырое	40.34	↑2.556	0.31	↑1.968	2.39	↑1.971	2.55	↑1.972	0.95	↑1.968
Прокаленное	87.80		0.61		4.71		5.03		1.87	

Таблица 2

Средний состав руд Саткинского месторождения доломита (Челябинская область)

Состояние руды	Содержание оксидов, %									
	MgO		Al ₂ O ₃		SiO ₂		CaO		Fe ₂ O ₃	
Сырое	23.7	↑2.838	0.47	↓3.917	2.30	↑1.478	26.03	↑1.183	0.52	↑4.231
Прокаленное	67.27		0.12		3.40		30.80		2.20	

Таблица 3

Средний состав руд Киембаевского месторождения серпентинита (Оренбургская область)

Состояние руды	Содержание оксидов, %									
	MgO		Al ₂ O ₃		SiO ₂		CaO		Fe ₂ O ₃	
Сырое	38.39	↑1.204	0.6	↑4.1	33.66	↑1.094	1.45	↑1.483	7.53	↑1.186
Прокаленное	46.24		2.46		36.84		2.15		8.93	

Таблица 4

Роль компонентов магнезиальных пород различной природы в формировании свойств руды

Месторождение (магнезиальная порода)	Наличие ТО	Основность по магнию MgO/ SiO ₂	Основность по кальцию CaO/ SiO ₂	Суммарное содержание основных оксидов MgO + CaO	Суммарное содержание кислотных оксидов SiO ₂ + Al ₂ O ₃	Поглотительная способность руды (MgO + CaO) / (SiO ₂ + Al ₂ O ₃)
Халиловское (магнезит)	-	16.879	1.067	42.89	2.70	15.885
	+	18.641	1.068	91.83	5.32	17.261
Саткинское (доломит)	-	10.304	11.317	49.73	2.77	17.953
	+	19.785	9.058	98.07	3.52	27.861
Киембаевское (серпентинит)	-	1.141	0.043	39.84	34.26	1.163
	+	1.255	0.058	48.39	39.30	1.231

лотных оксидов в руде при термической обработке изменяется в среднем в 4 раза (корунд Al₂O₃ значительно уменьшается, а гематит Fe₂O₃ увеличивается);

– термическая обработка серпентинита Киембаевского месторождения повышает содержание оксида магния в прокаленной руде в среднем на 20%, тогда как увеличение процентного содержания кислотных оксидов существенно разнится. Содержание корунда Al₂O₃ в составе прокаленной руды изменяется в 4 раза, а диоксида кремния SiO₂ (и без того являющегося преобладающим компонентом данной магнезиальной породы) не более, чем на 10%.

Повышение содержания MgO в термообработанной руде до определенного предела, зависящего от содержания других компонентов, приводит к понижению температур плавления и вязкости самой руды. При дальнейшем повышении содержания MgO как правило увеличивается как температура плавления, так и вязкость.

Вместе с тем, при подобном анализе потенциала извлечения оксида магния из природных магнезиальных материалов, необходимо оценить по-

глотительную способность руды, зависящую от ее основности, выражаемой отношением суммарного содержания в нем основных оксидов к суммарному содержанию кислотных ¹⁶.

С увеличением содержания MgO в прокаленной руде отношение CaO/SiO₂ в ней уменьшается лишь в доломите Саткинского месторождения, хотя содержание окиси кальция в нем при термическом воздействии возрастает примерно на 18%. В двух других исследуемых природных магнезиальных материалах основность по кальцию не позволяет выявить какую-либо закономерность. Так, в руде Халиловского месторождения этот показатель при термообработке колеблется лишь в пределах расчетной погрешности, а в руде Киембаевского месторождения возрастает более чем на одну треть.

Вместе с тем, японские ученые ¹⁷ еще в конце прошлого столетия доказали влияние значений MgO/SiO₂ и CaO/SiO₂ в руде на ее восстановимость и размягчение при высокой температуре. Расчет основных химико-физических величин для руд, содержащих оксид магния, из трех различных месторождений представлен в табл. 4.

Результаты и их обсуждение

Данное исследование было проведено в лабораторных условиях, продолжительность каждого эксперимента составляла 4 ч. Вся работа состояла из 3 серий испытаний, в каждой из которых для получения достоверных результатов в среднем было проведено по 20 опытов. Последовательность этапов эксперимента представлена на рис. 3.

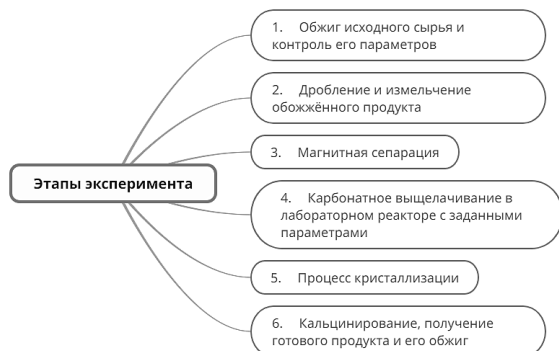


Рис. 3. Последовательность технологии переработки магнезиальных руд в лабораторных условиях

Параметры остальных этапов заданы по умолчанию, в данной статье исследованию и анализу подлежит только термическая активация.

На рис. 4 представлена зависимость выхода оксида магния, после выщелачивания с использованием угольной кислоты из магнезитового сырья Халиловского месторождения, от температуры и времени обжига.

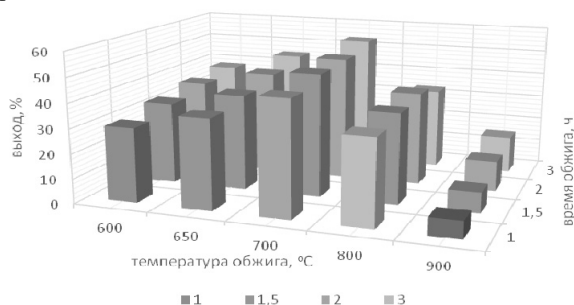


Рис. 4. Зависимость выхода оксида магния из магнезитового сырья Халиловского месторождения от температуры и времени обжига

Как видно из рис. 4, выход оксида магния максимальный при условии обжига сырья в течение 3 ч при 700 °С, что сопоставимо с результатами эксперимента¹⁴.

При обжиге Халиловской руды основным химическим процессом является его разложение на MgO и CO_2 .

Согласно термодинамическому расчету, теоретическая температура протекания этой реакции составляет 304.2 °С. Вместе с тем, многочисленными исследованиями на практике^{4, 12} установлено, что этот процесс берет начало в диапазоне темпера-

тур от 500 до 660 °С, а его пик в промышленности зафиксирован на 700 °С, при этом происходят значительные потери массы из-за удаления углекислотной части. В том случае, если реакция разложения $MgCO_3$ пройдет не в полной мере (при температурах ниже 700 °С), и останется значительное количество неразложившегося магнезита, который в свою очередь не обладает гидравлической активностью, то выход оксида магния существенно сократится.

При температуре, превышающей оптимальное значение, есть риск образования уже другой формы оксида магния – периклаза, который обладает низкой активностью, а это в свою очередь существенно сказывается на эффективности выщелачивания целевого продукта. К тому же дальнейшее повышение температуры увеличит затраты тепла при обжиге, что окажет влияние на экономическую сторону вопроса данного процесса.

На рис. 5 представлена зависимость выхода оксида магния из доломитового сырья Саткинского месторождения от температуры и времени обжига.

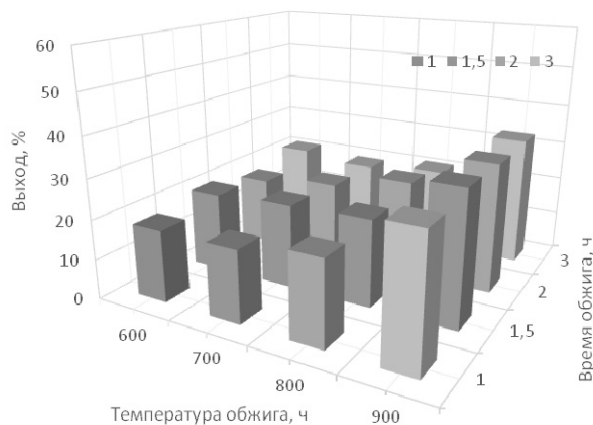


Рис. 5. Зависимость выхода оксида магния из доломитового сырья Саткинского месторождения от температуры и времени обжига

Как известно, доломит является самой распространенной высокомагнезиальной и перспективной рудой для добычи оксида магния. В отличие от магнезита доломитовая руда подвергается при обжиге разложению в два этапа: на первом этапе декарбонизации образуется оксид магния и карбонат кальция, на втором уже получается оксид кальция. По этой причине параметры термической активации должны выдерживаться максимально точно.

Достаточно подробный анализ процесса термической диссоциации представлен в¹⁸, согласно которому разложение $MgCO_3$ происходит в интервале температур от 700 до 870 °С, а $CaCO_3$ начинает диссоциировать лишь от температуры

820 °С и заканчивается процесс при 1000 °С. Процесс разложения кальция и магния во многом зависит от кристаллического строения породы, содержания в ней карбоната магния и наличия вида и количества примесей^{12, 19}. Таким образом, для предотвращения разложения оксида кальция и перехода его в фильтрат процесс термической активации не должен превышать 870 °С, а обжиг при температуре ниже 700 °С нецелесообразен ввиду неполного разложения оксида магния, а значит низкого выхода готового продукта²⁰.

Анализ рис. 5 подтверждает результаты других ученых о подборе термической обработки доломитового сырья. Наибольший выход оксида магния получен после обжига сырья при 890 °С в течение 1,5 ч.

Следующим этапом была проведена серия опытов с получением оксида магния из серпентинита Кiemбаевского месторождения. На рис. 6 приведена зависимость выхода оксида магния от температуры и времени обжига.

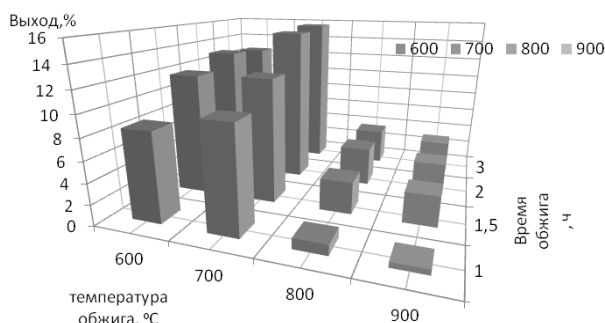


Рис. 6. Зависимость выхода оксида магния из серпентинита Кiemбаевского месторождения от температуры и времени обжига

Несмотря на сложный состав серпентинитовой руды, при определенных параметрах ее термической обработки и некоторых манипуляций, возможно получить оксид магния с достаточно хорошим выходом готового продукта.

В данной серии экспериментов, подготовленные образцы руды были подвергнуты обжигу в интервале температур от 600 до 900 °С. Результаты экспериментов представлены на рис. 6. Следует отметить, что аналогично результатам, представленным в⁴, обжиг породы приводит к изменению окраски от серого до светло коричневого (рис. 2). Этот процесс связан с перекристаллизацией и окислением железосодержащих минералов.

Согласно²¹, при нагреве до 500 °С структура хризотила не претерпевает никаких изменений, что также подтверждается результатами рентгенофазового анализа. Процесс потери кристалличности начинается от 600 °С и полностью переходит в аморфное состояние при 725 °С, а уже дальнейший нагрев до 800 °С приводит к формирова-

нию форстерита (рис. 7), устойчивого к действию кислот, и соответственно, к снижению выхода целевого продукта.

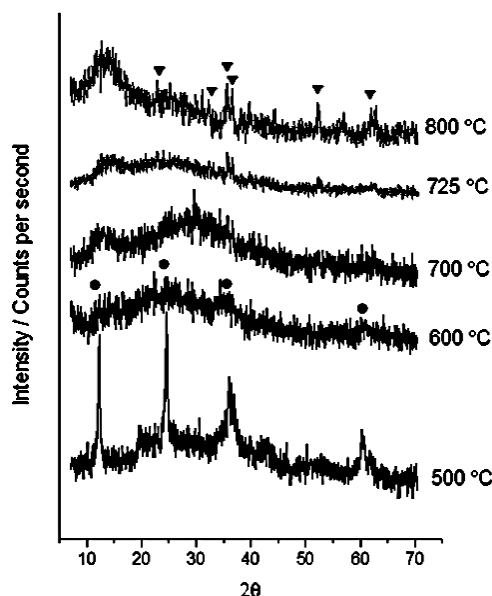


Рис. 7. Дифрактограммы термообработанного образца серпентинита

Учитывая результаты на рис. 6, установлено, что термическую обработку исходного материала необходимо проводить при температуре 700 °С в течение 3 ч.

Анализ поверхностных диаграмм (рис. 4–6) и выявление в каждой из них ряда с наилучшими показателями для определенной руды из исследуемых в настоящей работе природных магнезиальных материалов, позволили обобщить результат в виде графика, представленного на рис. 8.

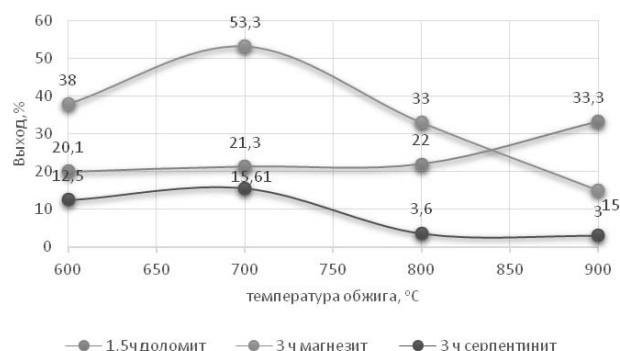


Рис. 8. Зависимость выхода оксида магния от температуры термической обработки при оптимальном времени обжига (для каждого вида сырья)

Обобщая результаты экспериментов, установлено, что факторами, влияющими на выход готового продукта – оксида магния, являются не только время обжига, температура процесса, но так же и исходный химический и минералогический состав магнезиальной руды.

Оценивая возможности организации производства по добыче оксида магния, необходимо учитывать все параметры, влияющие на рентабельность и экономический эффект: стоимость исходного сырья; выход готового продукта и его качество; тепловые и энергетические затраты; доступность сырья; концентрацию суспензии, подлежащую выщелачиванию, продолжительность процесса и другие.

Таким образом, подбор оптимальных температур термической обработки исходного магнезительного сырья существенно сказывается на выходе оксида магния, как целевого и востребованного

продукта; выход готового продукта MgO зависит от времени и температуры обжига руды; выход оксида магния из доломитового и магнезитового сырья также зависит от химического и минералогического состава исходной руды; процесс термообработки серпентинита Кiemбаевского месторождения не сопровождается образованием низкотемпературного форстерита, который формируется при температуре 800 °C за счет миграции большого количества ортосиликатных единиц. Оптимальным является режим активации при 700 °C и продолжительности 3 ч.

Литература

1. Указ Президента РФ от 07.07.2011 №899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации». Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/33514>.
2. Осадченко И.М., Лябин М.П., Романовская А.Д. Оксид магния: свойства, методы получения и применения // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 11: Естественные науки. – 2018. – №3. – С. 5-14.
3. Еремин Н.И. Неметаллические полезные ископаемые. – М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2007. – 459 с.
4. Аверин Г.Ф., Черных Т.Н., Орлов А.А. и др. Выявление возможности использования магнезиальных отходов ГОК для производства вяжущих // Строительные материалы. – 2017. – №5. – С.86-89.
5. Щербакова Т.А., Шевелев А.И. Сырьевая база магнезита России и перспективы ее развития // Георесурсы. – 2016. – №1. – С.75-78.
6. Масалимов А.В., Смирнов А.Н., Орехова Н.Н. и др. Состояние сырьевой базы для обнаружения перспективных источников получения оксида магния в процессах обогащения // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2021. – Т.27, №3. – С.16-25.
7. Адылов Д.К., Мирзаев А.У., Турдалиев У.М. и др. Комплексная переработка доломита // Горный вестник Узбекистана. – 2019. – №2. – С.80-82.
8. Белоусов М.В., Сироткин С.А., Ракипов Д.Ф. Технико-экономические особенности производства магния в России // Цветные металлы. – 2014. – №1 (853). – С.16-20.
9. Мирюк О.А. Перспективы использования отходов в технологии магнезиальных строительных материалов // Наука и мир. – 2014. – Т.1, №11(15). – С.41-48.
10. Обзор рынка магнезительного сырья (магнезита и брусита) и магнезитовых порошков в СНГ. – М.: ИнфоМайн, 2011. – 137 с.
11. Урванцев А.И., Кашеев И.Д. Обогащение магнезита сухим способом // Новые огнеупоры. – 2012. – №4. – С.12-15.
12. Клочковский С.П., Смирнов А.Н., Савченко И.А. и др. Физико-химические основы комплексной переработки высокомагнезиальных сидеритовых руд

References

1. Decree of the President of the Russian Federation of 07.07.2011 No.899 «On Approval of Priority Directions for the Development of Science, Technology and Engineering in the Russian Federation and the List of Critical Technologies of the Russian Federation». <http://www.kremlin.ru/acts/bank/33514>.
2. Osadchenko I.M., Lyabin M.P., Romanovskova A.D. *Oksid magniya: svoystva, metody polucheniya i primeneniya* [Magnesium oxide: properties, methods of obtaining and application] *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 11: Estestvennyye nauki* [Bulletin of the Volgograd State University. Series 11: Natural Sciences], 2018, no.3, pp.5-14.
3. Eremin N.I. *Nemetallicheskiye poleznyye iskopayemyye* [Non-metallic minerals]. Moscow, Publishing House of Moscow State University M.V. Lomonosov, 2007, 459 p.
4. Averin G.F., Chernykh T.N., Orlov A.A. i dr. *Vyyavleniye vozmozhnosti ispol'zovaniya magnezial'nykh otkhodov GOK dlya proizvodstva vyazhushchikh* [Identification of the possibility of using magnesite waste from mining and processing plants for the production of binders]. *Stroitel'nyye materialy* [Construction Materials], 2017, no.5, pp.86-89.
5. Shcherbakova T.A., Shevelev A.I. *Syr'yevaya baza magnezita Rossii i perspektivy yeye razvitiya* [Raw material base of magnesite in Russia and prospects for its development]. *Georesursy* [Georesources]. – 2016. – №1. – S.75-78.
6. Masalimov A.V., Smirnov A.N., Orekhova N.N. i dr. *Sostoyaniye syr'yevoy bazy dlya obnaruzheniya perspektivnykh istochnikov polucheniya oksida magniya v protsessakh obogashcheniya* [The state of the raw material base for the discovery of promising sources of magnesium oxide production in enrichment processes]. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Transbaikalian State University], 2021, vol.27, no.3, pp.16-25.
7. Adylov D.K., Mirzayev A.U., Turdaliyev U.M. i dr. *Kompleksnaya pererabotka dolomita* [Complex processing of dolomite]. *Gornyy vestnik Uzbekistana* [Mining Bulletin of Uzbekistan], 2019, no.2, pp.80-82.
8. Belousov M.V., Sirotkin S.A., Rakipov D.F. *Tekhniko-ekonomicheskiye osobennosti proizvodstva magniya v Rossii* [Technical and economic features of magnesium production in Russia]. *Tsvetnyye metally* [Non-ferrous metals], 2014, no.1 (853), pp.16-20.
9. Miryuk O.A. *Perspektivy ispol'zovaniya otkhodov v tekhnologii magnezial'nykh stroitel'nykh materialov* [Prospects for the use of waste in the technology of magnesian building materials]. *Nauka i mir* [Science and the world], 2014, vol.1, no.11(15), pp.41-48.

- Бакальского месторождения // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – Т.16, №4(3). – С.572-575.
13. Патент РФ №2690808С1. Активный высокочистый оксид магния и способ его производства / Е.П. Гордон, А.В. Коротченко, Н.И. Левченко и др. // Б.И. – 2019. – №1.
14. Turchin M.Y., Masalimov A.V., Smirnov A.N., Grishin I.A. Highly reactive magnesia production: modeling and experiment // *Refractories and Industrial Ceramics*. – 2019. – Т.60, №3. – С.254-257.
15. Митина Н.А., Лотов В.А. Исследование изменения фазового состава, свойств и гидравлической активности при термической обработке магнезиальных материалов // *Новые огнеупоры*. – 2017. – №6. – С.53-59.
16. Тимофеева А.С., Никитченко Т.В., Кожухов А.А. Роль оксида магния в формировании физико-химических и металлургических свойств железорудных окатышей // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. – 2018. – №5. – С.23-27.
17. Юсфин Ю.С., Бакумова Н.Б., Базилевич Т.Н. и др. Влияние состава связки в окатышах на их свойства // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 1986. – №9. – С.7-10.
18. Некрасова Г.Н., Кузьменков Д.М. Исследование термохимических превращений доломита месторождения «Руба» // *Труды БГТУ*. – 2018. – Серия 2, №2. – С.10-15.
19. Аксельрод Л.М., Турчин М.И., Назмиев М.Ю. Обогащение магнезита Саткинского месторождения рентгенотрасмиссионным методом // *Новые огнеупоры*. – 2016. – №3. – С.21-22.
20. Аксельрод Л.М. Развитие огнеупорной отрасли - отклик на запросы потребителей // *Новые огнеупоры*. – 2013. – №3. – С.107-122.
21. Кременецкая И.П., Иванова Т.К., Зулумян Н.О. и др. Исследование термического разложения хризотила Халиловского месторождения // *Труды Кольского научного центра РАН*. – 2018. – Т.9, №2. – С.852-856.
10. *Obzor rynku magnezial'nogo syr'ya (magnezita i brusita) i magnezitovykh poroshkov v SNG* [Overview of the market of magnesia raw materials (magnesite and brucite) and magnesite powders in the CIS]. Moscow, InfoMayn Publ., 2011, 137 p.
11. Urvantsev A.I., Kashcheyev I.D. *Obogashcheniye magnezita sukhim sposobom* [Enrichment of magnesite by dry method]. *Novyye ognepory* [Novye refractories], 2012, no.4, pp.12-15.
12. Klochkovskiy S.P., Smirnov A.N., Savchenko I.A. i dr. *Fiziko-khimicheskiye osnovy kompleksnoy pererabotki vysokomagnezial'nykh sideritovykh rud Bakal'skogo mestorozhdeniya* [Physical and chemical bases of complex processing of high-magnesian siderite ores of the Bakalskoye deposit]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the RAS], 2014, vol.16, no.4(3), pp.572-575.
13. Gordon E.P., Korotchenko A.V., Levchenko N.I. *Aktivnyy vysokochistyy oksid magniya i sposob yego proizvodstva* [Active high-purity magnesium oxide and method of its production]. Patent RF no.2690808C1, 2019.
14. Turchin M.Y., Masalimov A.V., Smirnov A.N., Grishin I.A. [Highly reactive magnesia production: modeling and experiment]. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2019, vol.60, no.3, pp.254-257.
15. Mitina N.A., Lotov V.A. *Issledovaniye izmeneniya fazovogo sostava, svoystv i gidravlicheskoy aktivnosti pri termicheskoy obrabotke magnezial'nykh materialov* [Investigation of the change in phase composition, properties and hydraulic activity during heat treatment of magnesia materials]. *Novye ognepory* [New refractories], 2017, no.6, pp.53-59.
16. Timofeyeva A.S., Nikitchenko T.V., Kozhukhov A.A. *Rol' oksida magniya v formirovaniy fiziko-khimicheskikh i metallurgicheskikh svoystv zhelezorudnykh okatyshyey* [The role of magnesium oxide in the formation of the physicochemical and metallurgical properties of iron ore pellets]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii* [Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information], 2018, no.5, pp.23-27.
17. Yusfin Yu.S., Bakumova N.B., Bazilevich T.N. i dr. *Vliyaniye sostava svyazki v okatyshakh na ikh svoystva* [Influence of binder composition in pellets on their properties]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy], 1986, no.9, pp.7-10.
18. Nekrasova G.N., Kuz'menkov D.M. *Issledovaniye termokhimicheskikh prevrashcheniy dolomita mestorozhdeniya «Ruba»* [Study of thermochemical transformations of dolomite from the Ruba deposit] *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2018, ser. 2, no.2, pp.10-15.
19. Aksel'rod L.M., Turchin M.I., Nazmiyev M.Yu. *Obogashcheniye magnezita Satkinskogo mestorozhdeniya rentgenotrasmissionnym metodom* [Enrichment of magnesite of the Satka deposit by X-ray transmission method]. *Novyye ognepory* [New refractories], 2016, no.3, pp.21-22.
20. Aksel'rod L.M. *Razvitiye ognepornoy otrasli – otklik na zaprosy potrebiteley* [Development of the refractory industry – a response to consumer requests]. *Novyye ognepory* [New refractories], 2013, no.3, pp.107-122.
21. Kremenetskaya I.P., Ivanova T.K., Zulumyan N.O. i dr. *Issledovaniye termicheskogo razlozheniya khризотила Khalilovskogo mestorozhdeniya* [Study of thermal decomposition of chrysotile of the Khalilov deposit]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Kola Science Center of the RAS], 2018, vol.9, no.2, pp.852-856.