

Снижение температуры получения магнезиального вяжущего из бруситов

К.т.н., доцент Т.Н. Черных;*

к.т.н., доцент А.А. Орлов;

д.т.н., профессор Л.Я. Крамар;

д.т.н., профессор Б.Я. Трофимов,

*ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный
исследовательский университет);*

к.ф.-м.н., доцент А.В. Перминов,

ФГБОУ ВПО Челябинский государственный университет

Ключевые слова: брусит; серпентин; обжиг; магнезиальное вяжущее вещество; температура; добавки-интенсификаторы; энергоэффективность

Благодаря развитию строительного материаловедения, во всем мире наблюдается рост интереса к магнезиальным строительным материалам [1, 2]. Расширяется номенклатура магнезиальных вяжущих веществ: перспективным является переработка бруситов [3, 4], в России начался промышленный выпуск магнезиального вяжущего из бруситового сырья 3-го и 4-го сортов, некондиционных с точки зрения получения огнеупоров. Известно, что бруситовая порода под воздействием окружающей среды накапливает продукты выветривания – серпентины и серпентиноподобные минералы (продукты неполной серпентинизации), разлагающиеся с потерей воды при 560–900°C [5, 6]. В процессе обжига пары воды, удаляющиеся из серпентинов и им подобных минералов, сдерживают полную дегидратацию брусита и, вследствие этого, периклаз образуется и кристаллизуется при температурах выше температуры полной дегидратации всех минералов породы [7, 8]. В результате этого процесса для получения магнезиального вяжущего из бруситовой породы 3–4 сортов необходим повышенный расход энергии, требуется обжиг при температурах 1100–1200°C, что увеличивает себестоимость вяжущего и делает его производство малорентабельным [7, 9, 10].

Наиболее эффективным способом снижения энергозатрат на обжиг является использование добавок-интенсификаторов, позволяющих получать продукт заданного качества при экономии энергетических ресурсов [11, 12]. Такие разработки существуют в областях, смежных с технологией магнезиального вяжущего из бруситовых пород, например, для получения извести с пониженным тепловыделением при гашении карбонатные породы перед обжигом обрабатывают раствором хлорида натрия [13]. При термической обработке карбонатных минералов для их разложения при более низкой температуре вводят воду и растворы некоторых солей [14–17]. Ускоряющее действие интенсификаторов на процесс формирования цементного клинкера, по мнению многих авторов [14, 18, 19, 20], предопределяется сочетанием анионов и катионов, входящих в состав интенсификатора. Установлено, что эффективность действия катионов при производстве клинкера убывает в ряду $Be^{2+} \rightarrow Mg^{2+} \rightarrow Li^+ \rightarrow Na^+ \rightarrow K^+$ с увеличением их электроотрицательности. В то же время интенсивность минерализующего действия анионов, наоборот, убывает с уменьшением их электроотрицательности в ряду $SiF_6^{2-} \rightarrow F^- \rightarrow SO_4^{2-} \rightarrow Cl^-$ [19]. Таким образом, правильный выбор и использование подобных добавок при обжиге бруситовой породы для строительного магнезиального вяжущего приведут к снижению энергозатрат и повышению эффективности производства вяжущего.

Цель настоящей работы – снижение температуры обжига серпентинизированного бруситового сырья с помощью добавок-интенсификаторов при получении магнезиального вяжущего.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи:

- установить особенности воздействия различных добавок-интенсификаторов на процесс дегидратации брусита и серпентинов;
- выявить наиболее эффективные добавки-интенсификаторы, способные снижать температуру обжига бруситового сырья;
- определить свойства вяжущего, полученного обжигом при пониженных температурах.

Черных Т.Н., Орлов А.А., Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Перминов А.В. Снижение температуры получения магнезиального вяжущего из бруситов

Для проведения исследований применяли бруситовую породу 3-го сорта Кульдурского месторождения следующего минералогического состава (табл. 1).

Таблица 1. Минералогический состав исследуемой бруситовой породы

Минералы	Брусит $Mg(OH)_2$	Доломит и кальцит $CaMg(CO_3)_2$ и $CaCO_3$	Серпентины $3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	Другие примеси
Содержание, %	82,0-96,0	2,7-3,9	9,7-12,0	до 5,6

В качестве добавок-интенсификаторов использовали ацетат цинка, хлорид натрия, хлористый магний шестиводный (бишофит), карналлит, хлорид калия, сульфат железа. Выбор добавок основан на их распространенности и достаточном объеме промышленного производства. Кроме того, он обусловлен видами катионов и анионов, а также возможностью образования добавкой расплава при низких температурах обжига (выбор был сделан таким образом, чтобы электроотрицательность ионов добавки значительно отличалась, при этом присутствовали как плавящиеся, так и неплавящиеся добавки). Интенсифицирующее действие исследовали с помощью термогравиметрического метода анализа материалов на дериватографе системы «Luxh STA 409» фирмы «Netsch».

Контроль вяжущего проводили в соответствии с ГОСТ 1216 «Порошки магниевые каустические. Технические условия» и ТУ 5744-001-60779432-2009 «Магниевое вяжущее строительного назначения. Технические условия».

Для выявления особенностей воздействия добавок-интенсификаторов на процесс дегидратации составляющих бруситовой породы был проведен анализ процессов разложения породы без добавок и при их наличии. Для проведения эксперимента бруситовую породу предварительно измельчали в лабораторной мельнице до полного прохода через сито 02, полученный порошок смешивали с водными растворами добавок-интенсификаторов, количество сухих добавок от массы бруситовой породы составляло 2%, влажность шихты – 15%. Полученную смесь высушивали при температуре $105 \pm 5^\circ C$, снова измельчали и помещали в печь дериватографа.

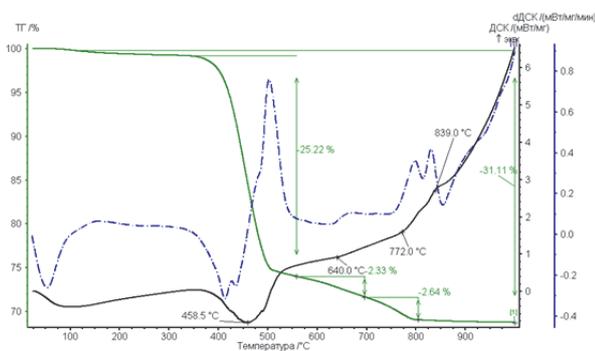


Рисунок 1. Дериватограмма бруситовой породы без добавок

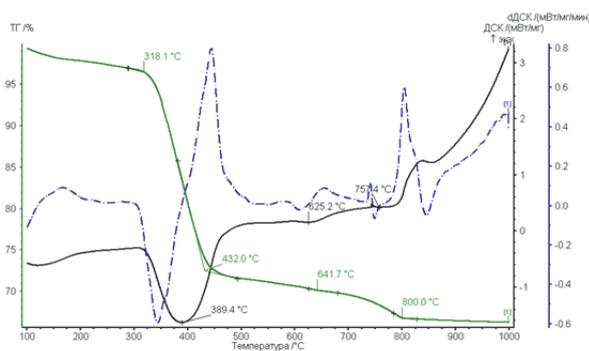


Рисунок 2. Дериватограмма разложения бруситовой породы с добавкой ацетата цинка

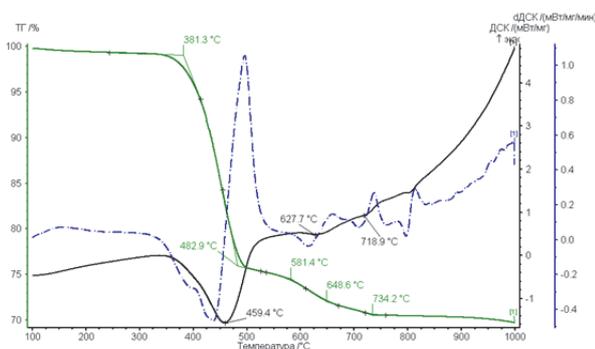


Рисунок 3. Дериватограмма разложения бруситовой породы с добавкой хлорида натрия

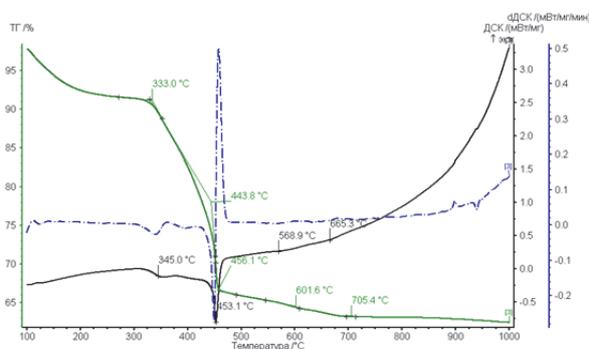


Рисунок 4. Дериватограмма разложения бруситовой породы с добавкой хлорида магния

Черных Т.Н., Орлов А.А., Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Перминов А.В. Снижение температуры получения магниевых вяжущих из бруситов

При обжиге породы без добавок (рис. 1) процесс удаления воды из пробы непрерывен в диапазоне температур от 380°C до 810°C и включает в основном дегидратацию брусита и серпентина. Непрерывное присутствие паров воды в разлагающейся породе приводит к тому, что для получения магнезимального вяжущего обжиг нужно вести при температуре не менее 820°C. В промышленных условиях, из-за большого объема обжигаемого материала и других особенностей обжига, требуемая температура достигает 1100–1200°C. По результатам анализа термограмм разложения бруситовой породы с интенсификаторами добавки разделили на три вида по механизму действия.

Проследим воздействие добавки-интенсификатора первого вида на примере ацетата цинка (рис. 2) (к этой группе относится также сульфат железа и др.). Из дериватограммы следует, что плавление добавки смещает температуру дегидратации брусита с 450°C до 318°C, но при температуре 454°C ацетат цинка прекращает свое воздействие на обжигаемую шихту, так как продукты его разложения находятся в твердом состоянии. В результате температура дегидратации серпентинов остается практически такой же, как и в шихте без добавок – 810°C (рис. 1). Способность добавки образовывать жидкую фазу при невысоких температурах играет немаловажную роль в процессе разложения исходных минералов, так как жидкая фаза при обжиге способствует расклиниванию микротрещин в частицах материала, диспергирует реагирующие компоненты, улучшает тепло- и массообмен. Но такая особенность действия добавок не решает проблем, создаваемых в породе серпентином или другими минералами, теряющими химически связанную воду при высоких температурах.

Добавки-интенсификаторы второго вида способны ускорять разложение минералов бруситовой породы за счет «ионного воздействия» без образования расплава. Характер разложения серпентинизированной бруситовой породы с добавкой-интенсификатором второго вида (хлоридом натрия) представлен на рис. 3. Из термограмм следует, что введение в сырьевую смесь такой добавки снижает температуру окончания дегидратации минерала брусита на 80°C, а серпентинов – на 70°C. Добавка плавится при 833°C после разложения серпентинов, а значит, ее интенсифицирующее действие объясняется не воздействием расплава, а тем, что ионы интенсификатора при повышенных температурах обладают высокой активностью, что дестабилизирует кристаллическую решетку минералов породы и разрушает ее. Активность ионов выражается в их подвижности. С повышением температуры расстояния между ионами добавки увеличиваются, и когда они приближаются к решетке брусита, между соседними ионами магния в породе возникают неуравновешенные силы. Это приводит к увеличению интенсивности их колебаний и ускорению разрыва кристаллических связей. Похожим действием обладает добавка хлорида калия.

Третий вид добавок интенсификаторов объединяет оба способа воздействия на обжигаемый материал. Из дериватограммы на рис. 4 следует, что добавка шестиводного хлорида магния смещает дегидратацию брусита до 333°C, а серпентинов – до 705°C, понижая температуру полного разложения бруситовой породы на 105°C. В породе при нагревании до 150–350°C происходит удаление воды из добавки и перестройка ее кристаллической решетки. Это приводит к разрыву химических связей, повышению активности добавки и способствует сдвигу начала дегидратации брусита в низкотемпературную область (333–456°C), далее при 444°C дегидратация брусита значительно ускоряется, о чем свидетельствует изменение вида кривой ТГ. Этот эффект можно объяснить диссоциацией добавки, начинающейся при 420°C, с образованием активных ионов, что ускоряет дегидратацию серпентина и продуктов серпентинизации брусита. Плавление добавки при 716°C способствует дополнительной интенсификации удаления паров воды из обжигаемой массы. Похожий эффект воздействия на обжигаемый материал наблюдается также при использовании добавки карналлита.

Третий вид добавок является наиболее эффективным, так как совмещает в себе разные механизмы воздействия на обжигаемый материал.

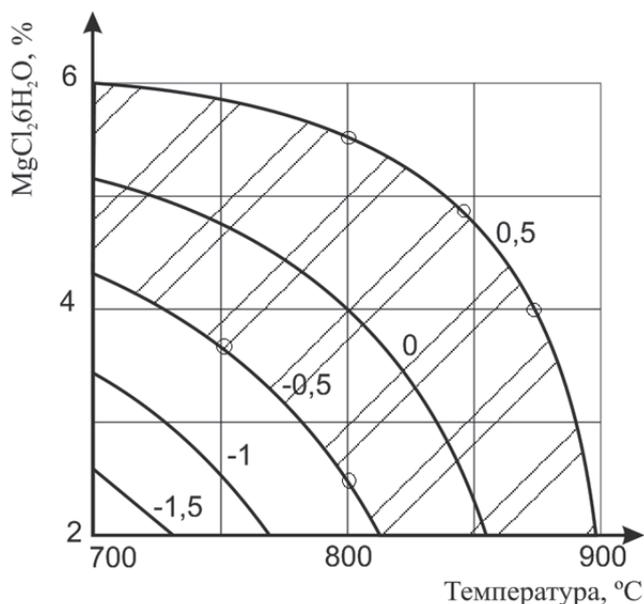
Таким образом, на основе результатов проведенных исследований и с учетом современных взглядов на данный вопрос [4, 14, 15, 16, 18] добавки-интенсификаторы можно разделить на три вида: первый вид интенсифицирует обжиг за счет образования расплава, второй – за счет «ионного воздействия», третий – за счет образования расплава и «ионного воздействия».

Исходя из вышесказанного, магнезиальное вяжущее из серпентинизированной бруситовой породы 3-го сорта можно получить при температуре более чем на 100°C ниже той, которая применяется в традиционной технологии (без добавок).

С целью определения влияния добавок-интенсификаторов на основные физико-механические характеристики магнезиального вяжущего был спланирован и реализован двухфакторный эксперимент. В качестве варьируемых факторов были выбраны: температура обжига (700°C, 800°C, 900°C) и количество добавки-интенсификатора обжига $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ (2%, 4%, 6%). Добавка бишофита выбрана как наиболее эффективная. Откликами приняты предел прочности при сжатии в возрасте 1 и 28 суток и равномерность изменения объема.

Для проведения эксперимента исходную бруситовую породу измельчали в лабораторной мельнице до остатка на сите 02 не более 15%, смешивали с раствором добавки-интенсификатора $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, затем гранулировали. Полученные гранулы диаметром 10...15 мм сразу после изготовления помещали в камерную печь ПКЛ-1,2 и выдерживали при требуемых температурах в течение 2 часов, после чего охлаждали на воздухе. Обоженные гранулы измельчали в лабораторной мельнице до остатка на сите 008 не более 15%. Магнезиальное вяжущее затворяли водным раствором хлорида магния (бишофитом) плотностью 1,2 г/см³, согласно ГОСТ 1216-87 «Порошки магнезитовые. Технические условия».

Наиболее полную информацию о пригодности вяжущего для использования в строительстве дает показатель равномерности изменения объема твердеющего магнезиального камня. Из зависимости на рис. 5 видно, что образцы камня вяжущего, полученного при температуре 750–850°C с 3–5% шестиводного хлорида магния, характеризуются равномерностью изменения объема, т.е. трещины на них отсутствуют.

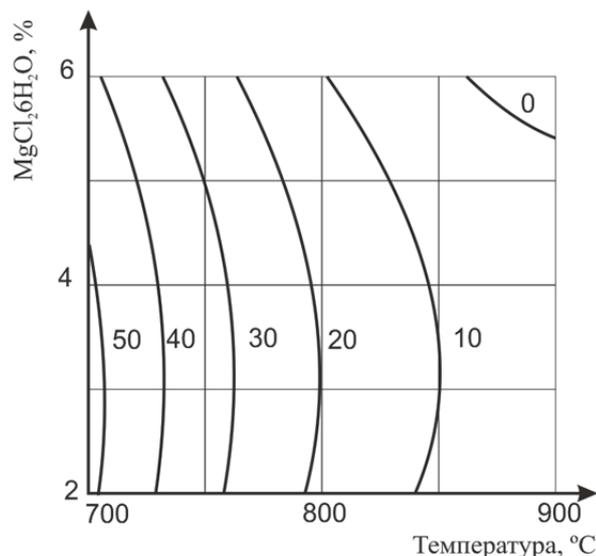


$$РИО(x,y) = 0,67x + 0,67y - 0,5xy \quad (F_0=3,7)^1$$

Рисунок 5. Зависимость равномерности изменения объема от температуры получения вяжущего и количества добавки («-2» – разрушение на отдельные блоки, «-1» – сеть трещин, «0» – нет трещин, «1» – единичные сквозные или радиальные трещины, «2» – много сквозных трещин, «-0,5» и «0,5» - условные границы равномерного изменения объема)

Введение в обжигаемую шихту добавки бишофита менее 3% или снижение температуры обжига ниже 750°C приводит к образованию на образцах трещин, характерных для излишне активного вяжущего. Повышение дозировки добавки бишофита сверх 5% или температуры выше 850°C также приводит к образованию трещин, но радиальных – характерных для вяжущего с сильно закристаллизованным периклазом. Диапазон оптимальных значений равномерности изменения объема проверен экспериментально, путем испытания на равномерность изменения объема 5 проб, параметры получения которых лежат на условных границах равномерного изменения объема (на рис. 5 обозначены кружками).

Другим значимым фактором для вяжущего является предел прочности при сжатии. В первые сутки твердения (рис. 6) на набор прочности оказывает существенное влияние только температура обжига вяжущего, добавка-интенсификатор практически не влияет на прочность камня.

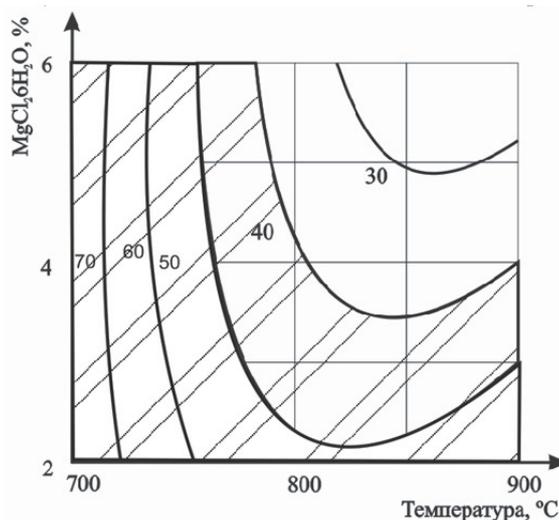


$$R_1(x,y) = 19,143 - 23,514x - 3,957y + 8,864x^2 - 4,565y^2 + 0,744xy \quad (F_0=4,1)$$

Рисунок 6. Зависимость предела прочности при сжатии в возрасте 1 суток от температуры обжига и количества добавки

Низкую раннюю прочность вяжущего, полученного с 6% добавки-интенсификатора и при температуре более 800°C, можно объяснить значительным увеличением среднего размера кристаллов MgO и получением пережога, что снижает активность вяжущего. Это подтверждается результатами определения среднего размера кристаллов оксида магния по области когерентного рассеивания: при дозировке 6% и температуре 800...900°C по отражению в плоскости 2-2-0 размер составляет 60,5...77,34 нм. При этом оптимальный размер кристаллов для магниального вяжущего из бруситов по данному направлению должен находиться в диапазоне 50...55 нм [7, 10]. Увеличение температуры обжига бруситовой породы приводит к снижению активности вяжущего и его прочности при любых дозировках добавки.

Прочность магниального камня при сжатии в возрасте 28 суток в зависимости от температуры обжига и количества добавки приведена на рис. 7.



$$R_{28}(x,y) = 25,294 - 12,464x - 10,141y + 21,087x^2 + 14,491y^2 - 9,823xy \quad (F_0=2,9)$$

Рисунок 7. Зависимость предела прочности при сжатии образцов в возрасте 28 суток от температуры обжига и количества добавки

Черных Т.Н., Орлов А.А., Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Перминов А.В. Снижение температуры получения магниального вяжущего из бруситов

В 28 сутки, так же как в раннем возрасте, при температурах ниже 750°C добавка-интенсификатор не оказывает существенного влияния на прочность. Это связано с незначительным изменением среднего размера кристаллов в данном диапазоне температур, т.к. только при 700°C заканчивается дегидратация серпентинов и возможна кристаллизация периклаза. Обжиг брусита при 900°C приводит к росту прочности с увеличением дозировки добавки вследствие увеличения плотности затворителя, в связи с присутствием в вяжущем после обжига некоторого количества безводного хлорида магния. Повышение плотности затворителя способствует активизации «пережога», что и вызывает увеличение прочности. В данном случае плотность раствора бишофита повышается с 1,2 до 1,23 г/см³. Оптимальная область факторов выделена на рис. 7 штриховкой.

Таким образом, обжиг шихты, включающей бруситовую породу и 3–5% MgCl₂·6H₂O, при температуре 800±50°C позволяет получить вяжущее нормальной активности, характеризующееся равномерностью изменения объема и стабильным набором прочности при твердении, которая достигает к 28 суткам не менее 40 МПа (табл. 2).

Таблица 2. Требования ТУ и основные свойства разработанного вяжущего

Показатель	Норма по ТУ	Вяжущее, полученное при пониженной температуре
Сроки схватывания		
начало	не ранее 40 мин.	50 мин.
конец	не позднее 6 ч.	5 ч. 10 мин.
Равномерность изменения объема	не должно появляться трещин	трещин нет
Прочность		
при сжатии через 1 сут., МПа	не менее 10	18,9
при сжатии через 28 сут., МПа	не менее 40	39,5
при изгибе через 28 сут., МПа	не менее 7	8,1

Выводы

1. Показано, что для снижения температуры получения магнезиального вяжущего из серпентинизированных бруситовых пород целесообразно использовать добавки-интенсификаторы, способные к образованию расплава в температурном интервале разложения минералов бруситовой породы или способные к дестабилизации кристаллической решетки этих минералов.

2. Выявлено, что наиболее эффективными являются добавки, дестабилизирующие кристаллическую решетку минералов обжигаемой породы и одновременно образующие расплав в период их дегидратации, т.е. добавки-интенсификаторы третьего вида.

Заключение

Некондиционное бруситовое сырье можно использовать для получения качественного магнезиального вяжущего при пониженных на 100–300°C температурах обжига при введении в шихту добавок-интенсификаторов. Это позволяет уменьшить расход теплоносителя, использовать более дешевую футеровку тепловых агрегатов и снизить эмиссию углекислого газа в атмосферу.

Литература

1. Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries. Best Available Techniques (BAT). Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide. [Электронный ресурс]. URL: <http://eippcb.jrc.es/reference/cl.html> (Дата обращения: 20.02.2013).
2. Li G., Yu Y., Li J., Wang Y., Liu H. Experimental study on urban refuse/magnesium oxychloride cement compound floor tile // Cement and Concrete Research. 2003. No.33. Pp. 1663–1668.
3. De Silva P., Bucea L., Sirivatnanon V. Chemical, microstructural and strength development of calcium and magnesium carbonate binders // Cement and Concrete Research. 2009. No.39. Pp. 460–466.

4. Bearat H., McKelvy M.J., Chizmeshya A.V.G., Sharma R., Carpenter R.W. Magnesium hydroxide dehydroxylation/carbonation reaction process: implications for carbon dioxide mineral sequestration // Journal of the American Ceramic Society. 2002. No.85(4). Pp. 742–748.
5. Nahdi K., Rouquerol F., Ayadi M.T. Mg(OH)₂ dehydroxylation: A kinetic study by controlled rate thermal analysis (CRTA) // Solid State Sciences. 2009. No.11. Pp. 1028–1034.
6. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. М.: Высшая школа, 1981. 335 с.
7. Крамар Л.Я., Черных Т.Н. Обжиг бруситовой породы для получения магнезиального вяжущего строительного назначения // Популярное бетоноведение. 2009. №5. С. 47–53.
8. Harper F.C. Effect of calcinations temperature on the properties of magnesium oxide for use in magnesium oxochloride cements Journal of Applied Chemistry. 1967. Vol. 17. Issue 1. Pp. 5–10.
9. Черных Т.Н., Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я. Свойства магнезиального вяжущего из бруситовой породы и их взаимосвязь с размерами кристаллов периклаза // Строительные материалы. 2006. №1. С. 52–53.
10. Черных Т.Н. Магнезиальные вяжущие из бруситовой породы Кульдурского месторождения: Автореф. дисс. канд. техн. наук. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. 24 с.
11. Орлов А.А., Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я. Энергосбережение при получении магнезиального вяжущего строительного назначения // Строительные материалы. 2011. №8(680). С. 58–61.
12. Орлов А.А. Магнезиальное вяжущее низкотемпературного обжига из бруситовых пород и материалы на его основе: Автореф. дисс. канд. технических наук. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2012. 23 с.
13. Пат. 2380334 МПК С 04 В 2/10. Способ получения извести / Якутский научно-исследовательский и проектный институт алмазодобывающей промышленности Акционерной компании «Алмазы России – Саха».
14. Paulik J., Paulik F., Wiczorek-Ciurowa K. Influence of foreign materials upon the thermal decomposition of dolomite, calcite and magnesite part II. Influence of the presence of water // Thermochemica Acta. 1980. No.38/2. Pp. 165–172.
15. Wiczorek-Ciurowa K., Paulik J., Paulik F. Influence of foreign materials upon the thermal decomposition of dolomite, calcite and magnesite part I. Influence of sodium chloride // Thermochemica Acta. 1980. No.38/2. Pp. 157–164.
16. Wiczorek-Ciurowa K., Paulik J., Paulik F. Influence of foreign materials upon the thermal decomposition of dolomite, calcite and magnesite. Part III. The effect of the thermal dissociation and sulphation conditions on the capture of sulphur dioxide // Thermochemica Acta. 1981. No.46/1. Pp. 1–8.
17. Hrabě Z., Svetík Š. The influence of water vapour on decomposition of magnesite and brucite // Thermochemica Acta. 1985. No.92. Pp. 653–656.
18. Волконский Б.В., Коновалов П.Ф., Макашев С.Д. Минерализаторы в цементной промышленности. М.: Стройиздат, 1963. 192 с.
19. Пономарев И.Ф., Грачмян А.Н., Зубехин А.П. Влияние минерализаторов на процесс клинкерообразования // Цемент. 1964. №4. С. 3–5.
20. Розов М.Н., Нудельман Б.И., Уварова И.Т. Интенсификация производства клинкера во вращающихся печах // Цемент. 1961. №5. С. 14–15.

**Тамара Николаевна Черных, г. Челябинск, Россия*

Тел. раб.: +7(351)267-94-72; эл. почта: chernyhntn@gmail.com

© Черных Т.Н., Орлов А.А., Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Перминов А.В., 2013

doi: 10.5862/MCE.38.4

Temperature reduction during brucite-based magnesia cement production

T.N. Chernykh;
A.A. Orlov;
L.Y. Kramar;
B.Y. Trofimov,
A.V. Perminov,

South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia
+7(351)267-94-72; e-mail: chernyhtn@gmail.com

Key words

brucite; serpentine; roasting; magnesium oxichloride cement (MOC); temperature; additives; intensifiers; energy efficiency

Abstract

The article considers the problem of reducing the energy consumption during the production process of magnesia cement based on brucite admixed with serpentine, because this solid requires roasting at high temperatures (1100–1200°C).

It was demonstrated that the most effective way to increase the energy efficiency of the technology is to use additives, so that roasting intensifiers. We investigated the effect of various additives and intensifiers to reduce the roasting temperature of serpentinized brucite material. We found that the most effective additives are those, destabilizing a crystal lattice of roasted solid and simultaneously producing the hot melt during their dehydration.

It was shown that the highest temperature can be reduced by 100–300°C without increasing the heat treatment time. We also estimated the quality of magnesia cement obtained by the developed method and confirmed its compliance with all relevant regulations.

References

1. *Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries. Best Available Techniques (BAT). Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide.* [Online]. URL: <http://eippcb.jrc.es/reference/cl.html> (Accessed: 20.02.2013).
2. Li G., Yu Y., Li J., Wang Y., Liu H. Experimental study on urban refuse/magnesium oxichloride cement compound floor tile. *Cement and Concrete Research*. 2003. No.33. Pp. 1663–1668.
3. De Silva P., Bucea L., Sirivivatnanon V. Chemical, microstructural and strength development of calcium and magnesium carbonate binders. *Cement and Concrete Research*. 2009. No.39. Pp. 460–466.
4. Bearat H., McKelvy M.J., Chizmeshya A.V.G., Sharma R., Carpenter R.W. Magnesium hydroxide dehydroxylation/carbonation reaction process: implications for carbon dioxide mineral sequestration. *Journal of the American Ceramic Society*. 2002. No.85(4). Pp. 742–748.
5. Nahdi K., Rouquerol F., Ayadi M.T. Mg(OH)₂ dehydroxylation: A kinetic study by controlled rate thermal analysis (CRTA). *Solid State Sciences*. 2009. No.11. Pp. 1028–1034.
6. Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savelyev V.G. *Metody fiziko-khimicheskogo analiza vyazhushchikh veshchestv* [Methods of physical-chemical analysis of cements]. Moscow: Vysshaya shkola, 1981. 335 p. (rus)
7. Kramar L.Y., Chernykh T.N. *Populyarnoye betonovedeniye*. 2009. No.5. Pp. 47–53. (rus)
8. Harper F.C. Effect of calcinations temperature on the properties of magnesium oxide for use in magnesium oxichloride cements. *Journal of Applied Chemistry*. 1967. Vol. 17. Issue 1. Pp. 5–10.
9. Chernykh T.N., Kramar L.Y., Trofimov B.Y. *Construction materials*. 2006. No.1. Pp. 52–53. (rus)

Chernykh T.N., Orlov A.A., Kramar L.Y., Trofimov B.Y., Perminov A.V. Temperature reduction during brucite-based magnesia cement production

10. Chernykh T.N. *Magnezialnyye viazhushchiye iz brusitovoy porody Kuldurskogo mestorozhdeniya* [Brucite-based magnesia cement from Kuldur deposit]. Abstract of a PhD thesis. Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGU, 2005. 24 p. (rus)
11. Orlov A.A., Kramar L.Y., Trofimov B.Y. *Construction materials*. 2011. No.8(680). Pp. 58–61. (rus)
12. Orlov A.A. *Magnezialnoe vyazhushcheye nizkotemperaturnogo obzhiga iz brusitovykh porod i materialy na yego osnove* [Brucite-based magnesia cement of low-temperature roasting and materials on its basis]. Abstract of a PhD thesis. Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGU, 2012. 23 p. (rus)
13. Pat. 2380334 MPK S 04 V 2/10. *Sposob polucheniya izvesti. Yakutskiy nauchno-issledovatel'skiy i proektniy institutalmazodobyvayushchey promyshlennosti Aktsionernoy kompanii «Almazy Rossii – Sakha»* [The method of lime obtainment. Yakut research and planning institute of diamond-mining industry of stock company “Diamonds of Russia – Sakha”]. (rus)
14. Paulik J., Paulik F., Wieczorek-Ciurowa K. Influence of foreign materials upon the thermal decomposition of dolomite, calcite and magnesite part II. Influence of the presence of water. *Thermochimica Acta*. 1980. No.38/2. Pp. 165–172.
15. Wieczorek-ciurowa K., Paulik J., Paulik F. Influence of foreign materials upon the thermal decomposition of dolomite, calcite and magnesite part I. Influence of sodium chloride. *Thermochimica Acta*. 1980. No.38/2. Pp. 157–164.
16. Wieczorek-ciurowa K., Paulik J., Paulik F. Influence of foreign materials upon the thermal decomposition of dolomite, calcite and magnesite. Part III. The effect of the thermal dissociation and sulphation conditions on the capture of sulphur dioxide. *Thermochimica Acta*. 1981. No.46/1. Pp. 1–8.
17. Hrabě Z., Svetík Š. The influence of water vapour on decomposition of magnesite and brucite. *Thermochimica Acta*. 1985. No.92. Pp. 653–656.
18. Volkonskiy B.V., Konovalov P.F., Makashev S.D. *Mineralizatory v tsementnoy promyshlennosti* [Mineralizers in cement industry]. Moscow: Stroyizdat, 1963. 192 p. (rus)
19. Ponomarev I.F., Grachyan A.N., Zubekhin A.P. *Tsement*. 1964. No.4. Pp. 3–5. (rus)
20. Rozov M.N., Nudelman B.I., Uvarova I.T. *Tsement*. 1961. No.5. Pp.14–15. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 29–35