

УДК 691.5:546.46

Т. К. Акчурин, А. В. Савченко, Г. П. Губаревич

Волгоградский государственный технический университет

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ОБЖИГА ГИДРОКСИДА МАГНИЯ И ПОЛУЧЕНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО ВЯЖУЩЕГО НА ЕГО ОСНОВЕ

Изложены теоретические основы процессов термической диссоциации карбоната магния и гидратации оксида магния. Исследованы свойства магнезиального вяжущего, полученного обжигом гидроксида магния. Даны практические рекомендации по совершенствованию технологии обжига $Mg(OH)_2$ для производства строительных магнезиальных вяжущих. Определен оптимальный режим обжига гидроксида магния.

К л ю ч е в ы е с л о в а: гидроксид магния, оксид магния, хлормagneзиевые рассолы, магнезиальное вяжущее, гидратация, твердение, обжиг.

Теоретические основы процессов термической диссоциации карбоната магния и гидратации оксида магния

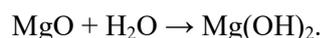
Основу магнезиального цемента (цемента Сореля) составляет каустический (kaustikos — щелочной) оксид магния MgO . Каустический MgO способен растворяться в воде и давать при этом щелочную реакцию в отличие от спеченной кристаллической магнезии. Свойства MgO , в особенности его способность взаимодействовать с водой, зависят от физико-химических характеристик и условий термического разложения содержащего его твердого материала.

При разложении (диссоциации, дегидратации) твердого вещества происходит локальная деформация решетки, обусловленная тем, что новообразованная фаза стремится перейти в свою стабильную форму. Образующиеся при этом соединения обладают различной химической активностью в зависимости от модификации или тонкодисперсности.

Образование MgO для магнезиальных вяжущих термическим разложением магнезита и доломита достигается по реакциям:



Температура диссоциации магнезита при парциальном давлении CO_2 в 1 атм равна $640^\circ C$, доломита соответственно — $735^\circ C$. В производственных условиях с целью ускорения процесса магнезит обжигается при $700...800^\circ C$, а доломит — при $800...850^\circ C$. Образующийся при этом MgO имеет скрытокристаллическое строение, благодаря чему он может реагировать с водой с образованием гидроксида магния, который способен к образованию кристаллического сростка, т. е. к твердению:



Повышение температуры обжига магнезита и доломита сопровождается рекристаллизацией MgO , интенсивность которой зависит от температуры обжига, продолжительности действия максимальной температуры и характера

газовой среды при обжиге. Скорость гидратации максимальна для MgO, полученного в интервале температур 600...800 °С, и минимальна для спекшегося магнезита. По данным [1—5], MgO, полученный обжигом при 600...800 °С, полностью гидратируется через 3 дня, полученный при 1000...1100 °С — через 3 недели, а при 1200...1300 °С — через 3 года. Гидратация на 70 % MgO, полученного обжигом при 1500 °С, заняла 6 лет.

Гидроксид магния — новое сырье для получения MgO для вяжущего. Минерал брусит — кристаллический гидроксид магния — дегидратируется при 420...505 °С, т. е. при более низкой температуре, чем диссоциирует магнезит. Образующийся при этом скрытно-кристаллический исключительно активный MgO (каустический брусит) еще и более долговечен, т. к. в нем практически отсутствуют даже следы оксида кальция.

По некоторым данным [5, 6] уже при 350 °С образуется так называемый метабрусит, который является очень активным и легко гидратируется. Установлено, что MgO, полученный из гидроксида, трудно отдает остаток воды, содержание которой даже после обжига при 1000 °С составляет 1 %.

Активность MgO объясняется поверхностной энергией ионных кристаллов, которая увеличивается с уменьшением величины кристаллов. Оксид магния с повышенным количеством свободной энергии является нестабильным и стремится перейти в более стабильную форму — периклаз. Этот переход ускоряется в присутствии воды.

При исследовании адсорбционных свойств MgO, полученного обжигом гидроксида магния при 500, 800, 1000 и 1200 °С, установлено, что с повышением температуры и времени обжига увеличиваются размеры пор продукта и уменьшается их объем. Но еще быстрее уменьшается удельная поверхность MgO. Максимальная удельная поверхность MgO, обожженного на воздухе при 500 °С, составила 40 м²/г, обработанного в вакууме при 650 °С — 114 м²/г [6].

Известно, что MgO, полученный из хлористого и азотнокислого магния или гидроксида и карбоната магния, показывает весьма различную реакционную способность к воде. Скорость роста кристаллов периклаза больше, если гидратируется MgO, полученный обжигом брусита или основного карбоната магния. Максимальная активность MgO достигается при 550...700 °С.

Процесс гидратации MgO разные исследователи связывают с его свойствами: величиной зерен, пористостью, удельной поверхностью и т. д.

По данным [7, 8], MgO при взаимодействии с водой образует соединение состава MgO · 0,5H₂O, продукт содержит как оксид, так и гидроксид магния. Предполагается также двухступенчатая гидратация MgO:

- 1) быстрая поверхностная гидратация со связыванием до 1,4 % H₂O;
- 2) медленное взаимодействие, когда образуется соединение состава MgO · 1,5H₂O.

По данным [9—11], гидроксид магния, обожженный при 640 °С, быстро связывает до 40 % воды. До образования гидроксида магния происходит адсорбция воды, равновесие которой устанавливается до начала гидратации. Способность адсорбировать водяные пары у MgO тем больше, чем ниже температура обжига гидроксида магния.

По данным [12, 13], обезвоженный в температурном интервале 350...1100 °С брусит адсорбирует до 1 моль H₂O на 1 моль MgO. Предпола-

гается, что молекулы воды вначале связываются на наружной поверхности MgO, а потом внедряются в решетку. Молекулы воды, которые внедряются в решетку MgO, связываются стехиометрически ионом O^{2-} , причем 1/3 их связана сильно, а 2/3 слабо. Прочность связи зависит от ориентации слоев. Количество адсорбированной воды пропорционально удельной поверхности MgO.

Известно, что гидратация оксида магния начинается с адсорбции водяного пара на его поверхности, а потом следует химическая реакция между адсорбированной водой и оксидом. Но скорость гидратации MgO зависит от специфической поверхности микропор, а не от удельной поверхности оксида [14, 15]. При расчете энергии адсорбции ионов OH^- в зависимости от места их нахождения установлено, что наиболее значительна она на углах кристаллов, меньше — на ребрах и плоскостях. Гидроксильные группы связаны с дефектами решетки MgO.

В связи с очень большим разбросом результатов исследований часто говорят об активном состоянии MgO, что связывают с различием в удельной поверхности, в поверхностной энергии, дефектами в решетке. Преходящее активированное состояние MgO связано с переориентацией его структуры с дефектами на структуру без дефектов [16—19].

Твердение магниальных вяжущих

Гидратационное схватывание и твердение вяжущих на основе MgO может осуществляться за счет взаимодействия его с водой, но прочность бетона при этом невелика. При растворении MgO создаются высокие пересыщения, и концентрация его в жидкой фазе может достигать 0,924 г/л, что примерно в 150 раз больше концентрации MgO в насыщенном растворе гидроксида магния. Особенности гидратационного твердения MgO являются малые скорости растворения оксида и кристаллизации гидроксида, поэтому использование таких систем в изготовлении строительных смесей нерационально.

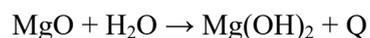
Заметно улучшает результаты процессов гидратации и твердения использование вместо воды водных растворов магниальных солей — $MgCl_2$ и $MgSO_4$ или раствора $FeSO_4$. Солевые добавки значительно повышают растворимость MgO, но почти не влияют на растворимость гидроксида. Ускоряется достижение и увеличение степени пересыщения, образуются гелеобразные продукты, интенсифицируется процесс кристаллизации гидроксида магния, причем кристаллы образуются преимущественно игольчатой формы. Одновременно происходит связывание части $Mg(OH)_2$ в оксихлорид или окисульфат, устойчивые только в растворе данной соли, но легко гидролизующиеся в воде. Состав основных солей непостоянен и зависит от концентрации солевого раствора и соотношения MgO/соль магния. Наиболее стабильной формой в системе MgO — $MgCl_2$ — H_2O при концентрации раствора $MgCl_2$ более 1,5 моль/л является соединение $3MgO \cdot MgCl_2 \cdot 11H_2O$ [3, 4, 20—23]. При меньшей концентрации хлорида устойчив гидроксид магния, а оксихлорид разлагается на хлорид магния, переходящий в раствор, и гидроксид, сохраняющийся в осадке. Метастабильная растворимость MgO в растворе хлорида магния достигает 26,86 г/л против 0,924 г/л в воде.

В реальных вяжущих и бетонах первоначально выделяется метастабильный продукт $5MgO \cdot MgCl_2 \cdot 13H_2O$, перекристаллизующийся в триоксихлорид $3MgO \cdot MgCl_2 \cdot 11H_2O$ в случае сохранения высокой концентрации $MgCl_2$

(более 3 моль/л). Если же концентрация $MgCl_2$ за счет частичного его связывания снижается, то возможны либо длительное существование фазы $5MgO \cdot MgCl_2 \cdot 13H_2O$ (область концентрации $MgCl_2$ от 3 до 1,5 моль/л), либо кристаллизация $Mg(OH)_2$ (концентрация хлорида магния менее 1,5 моль/л) с разложением выделившегося ранее оксихлорида на гидроксид магния и растворяющийся хлорид. Переход метастабильного оксихлорида $5MgO \cdot MgCl_2 \cdot 13H_2O$ в стабильный $3MgO \cdot MgCl_2 \cdot 11H_2O$ сопровождается падением прочности продуктов твердения тем более, чем ниже содержание вяжущего в бетоне и выше содержание жидкой фазы.

Практически магнезиальные вяжущие при испытании по ГОСТ 1216—87 затворяют раствором $MgCl_2$ с расходом безводной соли, близким к 25 % массы MgO ¹. Отсюда следует, что тесто или бетон с крупным непористым заполнителем содержат два основных продукта твердения: гидроксид магния и оксихлорид магния. Если же бетон содержит влагоемкий заполнитель (опилки, стружку и др.), то за счет повышения водоцементного отношения расход соли возрастает до 40...50 % от массы MgO и в таких условиях возможно локальное образование триоксихлорида магния.

Основным достоинством магнезиального цемента является быстрота твердения и высокая конечная прочность, что позволяет обойтись без тепловых затрат на твердение изделий на его основе. Затворенный водным раствором хлористого магния плотностью 1,2 г/см³ через сутки твердения на воздухе он имеет прочность на растяжение не менее 1,5 МПа, что составляет 35...50 % наибольшего значения. Образцы из трамбованного раствора на этом цементе состава 1:3 по массе через 28 сут воздушного твердения имеют прочность на сжатие 40...60 МПа. При хорошем качестве сырьевых материалов прочность таких образцов может достигать 80...100 МПа. Основным недостатком магнезиальных вяжущих является неравномерное изменение объема при твердении, что приводит к трещинообразованию в изделиях и материалах на их основе. При реакции



количество выделившегося тепла немногим меньше, чем при гидратации оксида кальция. Однако выделение тепла при гидратации MgO практически не наблюдается, поскольку взаимодействие протекает медленно, а образующееся тепло выделяется в течение длительного периода. Гидроксид магния, будучи тонкодисперсным продуктом, покрывает частицы MgO и тормозит диффузию воды. Торможение гидратации MgO , как указывалось выше, может быть очень вредным и опасным при твердении изделий на основе магнезиального цемента.

Чем больше удельная поверхность MgO , тем сильнее протекает гидратация на его поверхности в ранние сроки. Так как процесс гидратации экзотермический, то при локальном повышении температуры довольно быстро происходит кристаллизация гелеобразного гидроксида магния. Образуются трещины, которые облегчают диффузию воды к негидратированному оксиду, и гидратация продолжается.

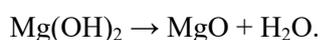
¹ ГОСТ 1216—87. Порошки магнезитовые каустические. Технические условия. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200014092?ysclid=lxktq6lipg801941179>.

Для устранения отрицательного эффекта запоздалой гидратации MgO необходимо создать такие условия, при которых большая часть оксида успевала бы гидратироваться во время затворения. Это достигается обжигом магниесодержащих исходных материалов при возможно низких температурах с целью получения MgO в самой активной форме. Технологией производства необходимо предусмотреть получение вяжущего с максимально развитой удельной поверхностью зерен. Процесс твердения вяжущего необходимо отрегулировать таким образом, чтобы напряжение в результате запоздалой гидратации MgO было минимальным и не вызывало трещинообразования.

Исследование свойств магниального вяжущего, полученного обжигом гидроксида магния

В связи с вышеизложенным естественно предположить, что гидроксид магния является наиболее перспективным сырьем для получения минерального вяжущего, поскольку позволяет получить самый активный MgO.

Теоретически разложение гидроксида магния с образованием MgO происходит при температуре 400...550 °С:



Количество отделившейся при полном разложении Mg(OH)₂ воды составляет 30,8 %.

Полученный в оптимальном режиме осаждения гидроксид магния отфильтровывали на центрифуге, промывали в 10...15 объемах воды до удаления остаточного хлора, высушивали и измельчали в лабораторной мельнице.

Термическую обработку материала осуществляли в муфельной печи в стационарном режиме. Порошок гидроксида магния при толщине слоя 30 мм обжигали в интервале температур 300...800 °С в течение 1 ч (табл. 1) или до постоянной массы, т. е. до прекращения процесса дегидратации (табл. 2, рис.). За продолжительность обжига принимали время изотермической выдержки, не включая время подъема температуры. О полноте дегидратации гидроксида магния судили по потерям при прокаливании.

Таблица 1

Физико-химические свойства оксида магния

Температура обжига, °С	Потери при прокаливании, %	Плотность, г/см ³	Удельная поверхность, м ² /кг	Размер частиц, м·10 ⁻¹⁰	Прочность в суточном возрасте, МПа
—	30,0	2,40	22,6	1300	—
300	30,0	2,40	23,1	1300	—
400	8,50	3,10	85,1	250	31,6
500	3,10	3,30	98,3	190	45,7
600	1,75	3,30	72,3	260	39,3
700	1,22	3,40	69,3	280	—
800	0,55	3,45	58,2	290	—

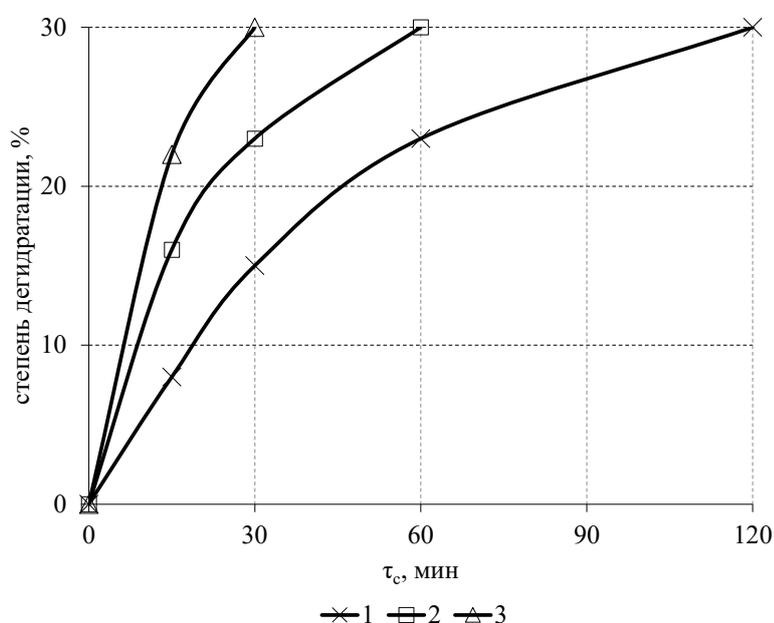
Как показали исследования (см. табл. 1), дегидратация начинается при 400 °С. Одновременно продукт быстро размельчается, достигая максимума удельной поверхности после обжига при 500 °С. Полученное при этой

температуре вяжущее наиболее активно (см. табл. 2) В дальнейшем с повышением температуры до 800 °С удельная поверхность сначала медленно, а затем быстро уменьшается, продукт уплотняется и падает его активность. То же происходит и с увеличением времени обжига.

Таблица 2

Физико-химические и механические свойства магнезиальных вяжущих, полученных из рассола бишофита

Температура обжига, °С	Химический состав, %		Плотность, г/см ³	Насыпная плотность, кг/м ³	Просев через сито № 02	Сроки схватывания, мин		Прочность при сжатии, МПа, в возрасте, сут	
	MgO	CaO				начало	конец	1	28
400	98,0	0,87	3,4	—	100	—	—	32,9	59,8
500	98,2	0,85	3,41	550	100	28	90	43,6	73,0
600	98,6	0,87	3,4	—	100	—	—	37,4	68,3



Кривые обжига Mg(OH)₂ до полного разложения при температуре, °С:
1 — 400; 2 — 500; 3 — 600

Полученные продукты термического разложения были подвергнуты домолу и испытаны в соответствии с ГОСТ 2642.8—2017² и ГОСТ 1216—87. Для определения прочности порошок MgO смешивали с раствором бишофита плотностью 1,2 г/см³ до получения теста нормальной густоты (ГОСТ 1216—87). Из теста формовали образцы-кубики с ребром 20 мм, которые испытывали на прочность при сжатии в суточном и 28-суточном возрасте воздушного твер-

² ГОСТ 2642.8—2017. Огнеупоры и огнеупорное сырье. Методы определения оксида магния. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146564?ysclid=lxktrtj3p1466416629>.

дения, и образцы-восьмерки, испытываемые на прочность при растяжении — в суточном возрасте. Результаты испытаний показали, что полученное вяжущее имеет активность в среднем 60...70 МПа. Прочность при сжатии в суточном возрасте составляет 50...60 % от 28-суточной. Прочность при растяжении — 2,0...2,2 Н/мм.

Определен оптимальный режим обжига гидроксида магния при температуре 500 °С в течение 1 ч.

Выводы

Полученный по разработанному способу MgO обладает высокой чистотой ($MgO \geq 98\%$, $CaO < 1\%$), степенью белизны и по составу отвечает требованиям ГОСТ 1216—87 к порошкам магнезитовым каустическим марки ПМК-90 и ГОСТ 844—79 к магнезиям жженым техническим марок А, Б, В³.

Получены быстротвердеющие ($R_{сyt} = 30...40$ МПа), высокопрочные ($R_{28} = 60...70$ МПа) вяжущие. Конструкционно-теплоизоляционные и отделочные материалы на их основе не требуют тепловых затрат на твердение и обладают хорошими эксплуатационно-техническими и декоративными качествами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Виноградов В. Н.* Сырьевая база промышленности вяжущих веществ СССР. М. : Недра, 1971. С. 93—96.
2. *Tai C. Y., Tai C.-T., Chang M.-H., Liu H.-S.* Synthesis of Magnesium Hydroxide and Oxide Nanoparticles Using a Spinning Disk Reactor // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2007. No. 46. Pp. 5536—5541.
3. Compressive strength of fly ash magnesium oxychloride cement containing granite wastes / L. Ying, Y. Hongfa, Z. Lina, W. Jing, W. Chengyou, T. Yong-Shan // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 38. Pp. 1—7.
4. *Yunsong J.* A new type of light magnesium cement foamed material // *Materials Letters*. 2002. Vol. 56. P. 353—356.
5. *Zeyneb C., Sema (Akyil) E., Sabriye (Doyurum) Y.* Magnesium Oxide Nanoparticles: Preparation, Characterization, and Uranium Sorption Properties // *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2012. Vol. 31. Iss. 4. Pp. 536—543.
6. *Вайвад А. Я.* Магнезиальные вяжущие вещества. Рига : Зинатне, 1971. 332 с.
7. *Позин М. Е.* Технология минеральных солей. Л. : Химия, 1974. 792 с.
8. Structural, morphological and optical properties of MgO nanoparticles for antibacterial applications / M. R. Bindhul, M. Umadevi, M. K. Michea, M. V. Arasu, N. A. Al-Dhabi // *Materials Letters*. 2016. Vol. 166. Pp. 19—22.
9. *Волженский А. В., Буров Ю. С., Колокольников В. С.* Минеральные вяжущие вещества. М. : Стройиздат, 1986. 476 с.
10. *Шойхет Б. А.* Магнезиальные продукты из природных рассолов и минералов. М. : Л. : Химия, 1966. 184 с.
11. *Дворкин Л. И., Дворкин О. Л.* Строительные минеральные вяжущие материалы: учебное пособие. Вологда : Инфра-Инженерия, 2011. 544 с.
12. *Черепанова Т. И., Муратова М. И.* Окись магния и ее получение из магнезисодержащего сырья // *Актуальные вопросы добычи и переработки природных солей: сб. науч. тр. Т. 2.* СПб. : ЛИК, 2001. С. 217—224.
13. *Вассерман И. М.* Химическое осаждение из раствора. Л. : Химия, 1980. 206 с.
14. *Акчурун Т. К., Савченко А. В., Дробин И. Ю.* Совершенствование процесса обжига гидроксида магния с целью получения магнезиального вяжущего // *Аспирант*. 2021. № 3(60). С. 34—37.

³ ГОСТ 844—79. Магнезия жженная техническая. Технические условия. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200018987?ysclid=lxkttcj9ro201138725>.

15. *Киянец А. В., Дьяков К. В., Головнев С. Г.* Магнезиальные бетоны и растворы в современном строительстве // Академический вестник УралНИИПроект РААСН. 2009. № 1. С. 74—75.
16. *Зырянова В. Н., Лыткина Е. В., Бердов Г. И.* Повышение механической прочности и водостойкости магнезиальных вяжущих веществ при введении минеральных наполнителей // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 3(615). С. 21—26.
17. *Бердов Г. И., Машкин Н. А.* Перспективные направления совершенствования составов и технологии строительных материалов на основе минеральных вяжущих веществ // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2015. № 4(676). С. 45—57.
18. *Ахмедов А. Д., Рыжов Н. М., Дубровина Ю. Ю.* Влияние процентного соотношения компонентов магнезиального вяжущего на реологические свойства // Научные исследования XXI века. 2020. № 5(7). С. 13—16.
19. *Зырянова В. Н., Лыткина Е. В., Бердов Г. И., Верещагин В. И.* Влияние минеральных наполнителей на свойства магнезиальных вяжущих // Техника и технология силикатов. 2010. Т. 17. № 2. С. 1—7.
20. *Сычев М. И., Андриянов А. М.* Способ получения гидроксида магния. А. с. 1074821 СССР. МКИ с OIF 5/22. Оpubл. 23.02.84. Бюл. № 7.
21. *Теличенко В. А., Ворошилов Г. Н.* Способ получения гидроксида магния. А. с. 1318526 СССР. МКИ с OIF 5/22. Оpubл. 05.04.87. Бюл. № 23.
22. *Акчурин Т. К., Ананьина С. А., Никитин И. Н.* Перспективы освоения и технологии переработки бишофита Волгоградских месторождений : монография. Волгоград : Изд-во ВолгГАСА, 1995. 116 с.
23. *Gur'eva V. A.* Application of magnesium-bearing technogenic raw material in the production of decorative-finishing ceramics // Glass and Ceramics. 2009. Vol. 66. Iss. 3—4. Pp. 95—98.

© Акчурин Т. К., Савченко А. В., Губаревич Г. П., 2024

Поступила в редакцию
в марте 2024 г.

Ссылка для цитирования:

Акчурин Т. К., Савченко А. В., Губаревич Г. П. Оптимизация режима обжига гидроксида магния и получение минерального вяжущего на его основе // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Вып. 2(95). С. 109—117. DOI: 10.35211/18154360_2024_2_109.

Об авторах:

Акчурин Талгат Кадимович — советник РААСН, канд. техн. наук, проф., проф. каф. строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; Scopus ID: 57190967539; info@vgasu.ru

Савченко Алексей Владимирович — канд. техн. наук, доц., доц. каф. математических и естественно-научных дисциплин, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; savtchenko2@mail.ru

Губаревич Галина Павловна — канд. техн. наук, доц., доц. каф. математических и естественно-научных дисциплин, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; ggubarevich@mail.ru

Talga K. Akchurin, Aleksei V. Savchenko, Galina P. Gubarevich

Volgograd State Technical University

OPTIMIZATION OF MAGNESIUM HYDROXIDE FIRING MODE AND PRODUCTION OF MINERAL BINDER BASED ON IT

The theoretical foundations of the process of thermal dissociation of magnesium carbonate and hydration of magnesium oxide are outlined. The properties of magnesium binder obtained by firing magnesium hydroxide were studied. Practical recommendations are given for improving the technol-

ogy of firing $Mg(OH)_2$ for the production of construction magnesium binders. The optimal firing regime for magnesium hydroxide has been determined.

Key words: magnesium hydroxide, magnesium oxide, magnesium chloride brines, magnesium binder, hydration, hardening, firing.

For citation:

Akchurin T. K., Savchenko A. V., Gubarevich G. P. [Optimization of magnesium hydroxide firming mode and production of mineral binder based on it]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2024, iss. 2, pp. 109—117. DOI: 10.35211/18154360_2024_2_109.

About authors:

Talgat K. Akchurin — Candidate of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; Scopus ID: 57190967539; info@vgasu.ru

Aleksei V. Savchenko — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; savchenko2@mail.ru

Galina P. Gubarevich — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ggubarevich@mail.ru