Получение строительных материалов на основе доломитовой извести ускоренного твердения за счет принудительной карбонизации

Т.А. Бахтина, Н.В. Любомирский, А.С. Бахтин, В.В. Николаенко

Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» (Академия строительства и архитектуры, ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»); г. Симферополь, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Для решения проблемы роста концентрации парниковых газов в атмосфере, приводящей к глобальным экологическим проблемам, в области производства строительных материалов ведутся поиски способов снижения эмиссии CO_2 . Доломитовая известь характеризуется пониженной температурой обжига, снижением выбросов CO_2 и дальнейшим связыванием выделившегося углекислого газа в нерастворимые соединения, обуславливающие получение материала на его основе с высокими механическими характеристиками.

Материалы и методы. Обжиг доломитовой породы фракцией 5–10 мм осуществляли в лабораторной камерной печи, а обожженный продукт измельчали до прохождения сквозь сито с ячейкой 1,25 мм и затворяли водой. Из полученной после гидратации доломитовой извести методом прессования изготавливали опытные образцы-цилиндры диаметром и высотой 30 мм и подвергали их принудительной карбонизации в специальной камере при определенной концентрации CO_2 и времени выдержки в камере.

Результаты. Определены физико-механические характеристики опытных карбонизированных образцов (прочность при сжатии от 2 до 36 МПа, при средней плотности 1500–1800 кг/м³), твердевших в среде повышенной концентрации углекислого газа. Выполнена апробация полученных в лабораторных условиях результатов в промышленных условиях на действующем предприятии путем прессования партии одинарного кирпича, последующего его карбонатного твердения в опытно-промышленной камере принудительной карбонизации и определения основных нормируемых свойств.

Выводы. Низкообжиговая доломитовая известь карбонатного твердения позволяет снизить эмиссию углекислого газа при производстве за счет снижения температуры обжига с последующим использованием выделившегося CO_2 для осуществления карбонатного твердения изделий на его основе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: доломиты, доломитовая известь, углекислый газ, принудительная карбонизация

Благодарность. Исследования выполнены при финансовой поддержке внутривузовского гранта Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского в рамках научного проекта № ВГ 01/2018.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бахтина Т.А., Любомирский Н.В., Бахтин А.С., Николаенко В.В. Получение строительных материалов на основе доломитовой извести ускоренного твердения за счет принудительной карбонизации // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 1. С. 43–57. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.43-57

Obtaining construction materials based on the dolomite lime of accelerated forced-carbonization hardening

Tamara A. Bakhtina, Nikolay V. Lyubomirskiy, Aleksandr S. Bakhtin, Vitaliy V. Nikolaenko

Academy of Construction and Architecture of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "V.I. Vernadsky Crimean Federal University" (ACA Vernadsky CFU); Simferopol, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. To solve the problem of increasing the concentration of greenhouse gases in the atmosphere leading to global environmental problems, searches of ways to reduce carbon dioxide emissions are conducted in the field of construction material production. lower burning temperature, lower carbon dioxide emissions, and further binding of the exuding carbon dioxide to insoluble compounds, which determine the obtainment of a dolomite lime-based material with high mechanical properties are characteristic of dolomite lime.

Materials and methods. Dolomite rock with a fraction of 5 mm to 10 mm was burned in a laboratory chamber furnace, while the calcined product was ground to pass through a 1.25 mm mesh sieve and tempered with water. The dolomite lime obtained

after hydration was pressed into cylinder samples with a diameter and a height of 30 mm. The samples were subjected to forced carbonization in a particular chamber at a certain carbon dioxide concentration and for a certain chamber holding time.

Results. The physicomechanical characteristics of the experimental carbonized samples were determined (compressive strength of 2 to 36 MPa with an average density of 1500 to 1800 kg/m³). The samples got hard under conditions of an increased carbon dioxide concentration. The results obtained under laboratory conditions were tested under industrial conditions at a functioning enterprise by pressing a single brick batch, its subsequent carbonate hardening in a pilot industrial chamber for forced carbonization, and determination of the main standardized properties.

Conclusions. The low-burned carbonate-hardened dolomite lime allows reducing carbon dioxide emission during production by means of lowering the burning temperature with the subsequent use of the exuding carbon dioxide for the implementation of carbonate hardening of dolomite lime-based products.

KEYWORDS: dolomites, dolomite lime, carbon dioxide, forced carbonization

Acknowledgement. The studies were carried out with funding from a grant of V.I. Vernadsky Crimean Federal University in the scope of the scientific project VG 01/2018.

FOR CITATION: Bakhtina T.A., Lyubomirskiy N.V., Bakhtin A.S., Nikolaenko V.V. Obtaining construction materials based on the dolomite lime of accelerated forced-carbonization hardening. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(1):43-57. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.43-57 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные экологические проблемы, связанные с изменением климата, в результате деятельности человека, прочно вошли в разряд наиболее обсуждаемых на международном уровне вопросов. Увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере, приводящее к негативным последствиям, привело к необходимости разработки новых продуктов и методов производства, характеризующихся более низкими выбросами CO₂, чем традиционные подходы [1–3]. В области строительных материалов одним из наиболее энергоемких процессов является производство портландцемента, на долю которого приходится от 5 до 10 % антропогенных выбросов CO₂ во всем мире [4–6]. Для их сокращения рассматриваются несколько направлений, которые включают сокращение потребления энергии при производстве портландцемента, замену портландцементного клинкера отходами [7] или промышленными побочными продуктами и разработкой альтернативных связующих веществ [8–10]. Кроме этого, в качестве путей сокращения выбросов углекислого газа предлагаются повышение экономичности производства (снижение температуры обжига для образования клинкера, оптимизация фазового состава), предпочтение клинкерных минералов, синтезируемых с пониженным образованием CO₂, а также замена гидратации вяжущих веществ на карбонизацию [11]. К альтернативным низкоуглеродистым связующим относят сульфоалюминатный цемент, щелочевывороченное вяжущее [12] и реакционноспособный цемент на основе оксида магния [13, 14]. Реактивный магнезиальный цемент (РМЦ) был разработан

более десяти лет назад, и представляет интерес благодаря более низкой температуре производства (750 °С в отличие от 1450 °С для портландцемента), а также способности набирать прочность в результате реакции карбонизации [15, 16]. Главным компонентом РМЦ является реактивный оксид магния MgO, который получают путем обжига магнезита (порода, состоящая из 90 % MgCO₃, 7 % SiO₂ и 3 % CaCO₃) в печи при 750 °С [17]. Твердение реактивного магнезиального цемента происходит в два этапа: 1 — гидратация MgO с образованием брусита Mg(OH)₂ и 2 — реакция брусита с CO₂ с образованием ряда гидратированных карбонатов магния. Так, в смесях на основе реактивного магнезиального цемента, по данным исследователей [18–20], были обнаружены такие виды гидратированных карбонатов магния, как несквегонит (MgCO₃ · 3H₂O), гидромагнезит (4MgCO₃ · Mg(OH)₂ · 4H₂O), дипингит (4MgCO₃ · Mg(OH)₂ · 5H₂O) и артинит (MgCO₃ · Mg(OH)₂ · 3H₂O). Также авторы указывали, что процесс карбонизации бетонных смесей на основе РМЦ состоит из диффузии CO₂ в насыщенную сетку пор, проникновения и растворения CO₂ в системе пор, образовании углекислоты H₂CO₃ в растворе пор, ионизации углекислоты и появлении H⁺ и CO₃²⁻, выщелачивании Mg²⁺ из-за растворения кристаллов Mg(OH)₂ и образовании гидратированных карбонатов магния посредством реакции между Mg²⁺ и CO₃²⁻. Исследованиями [21–23] было установлено, что бетоны, содержащие MgO после карбонизации, характеризуются снижением пористости и повышением прочности при сжатии по сравнению с бетонами, не подвергавшимися обработке угле-

кислым газом. Однако в работе [24] представлены результаты исследований, из которых следует, что, хотя реактивная магнезия и прокаливается при гораздо более низкой температуре, чем портландцементный клинкер, выброс углерода, вызванный разложением магнезита, несколько больше, чем при разложении кальцита, и выброс углерода из топлива (FDCO_2) при производстве магнезиального цемента выше, чем у портландцемента. Термодинамический анализ показал, что существуют трудности в поглощении магнезиальными цементами углекислого газа с образованием гидромагнезита, артинита, лансфордита или несквегонита так, как карбонизация брусита является особенно сложной, ввиду тенденции Mg образовывать метастабильные гидрокарбонаты, свободная энергия образования которых зависит от парциального давления CO_2 .

Таким образом, изучение карбонизации систем, содержащих помимо гидроксида кальция, гидроксид магния позволит разработать научно-технологические основы ускоренного получения строительных материалов принудительного карбонатного твердения из отходов добычи и переработки доломитовых горных пород, создающих принципы направленного формирования структуры и свойств на основе принудительно карбонизированных CaO –, MgO – содержащих систем, «зеленых» технологий их производства и секвестрации CO_2 .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходного сырья для научных исследований использовали доломитовые породы, добываемые для производства щебня в карьере «Каменные Борницы» на территории Ленинградской области фракцией до 10 мм. Химический анализ исходного доломитового сырья определяли с помощью рентгенофлуоресцентного анализа на ЭД-спектрометре Epsilon 3XLE (PANalytical). Результаты анализа представлены в табл. 1.

Минералогический состав исходного доломитового сырья определяли с помощью высокотемпературного синхронного анализатора STA 8000 (Perkin Elmer) в интервале температур 30–1000 °C при скорости нагрева 10 °C/мин, в среде

азота (см. рис. 1). Минералогический состав исходной доломитовой породы, рассчитанный по результатам термического анализа, представлен в табл. 2.

Данные термического анализа согласуются с результатами рентгенофлуоресцентного анализа в части определения оксидов кальция и магния, которые в основном и определяют вяжущие свойства данного вида сырья, при организации его твердения в среде с повышенной концентрацией углекислого газа. На представленной термограмме (см. рис. 1) присутствуют два ярко выраженных эндотермических эффекта с экстремумами при температурах 827 и 880 °C, которые соответствуют разложению карбонатов магния и кальция соответственно. Необходимо отметить, что согласно данным термического анализа полное разложение карбоната магния завершается при температуре 850 °C, а карбоната кальция — при 970 °C.

Обжиг доломитовой породы осуществляли в лабораторной камерной печи Nabertherm LH 30/13 при определенной температуре с изотермической выдержкой при заданной температуре в течение 45 мин. Для обжига использовали фракцию доломита 5–10 мм. Обожженный продукт измельчали до прохождения сквозь сито с ячейкой 1,25 мм и затворяли (гасили) водой в соотношении 1:1. После гашения полученный продукт высушивали в сушильном шкафу при температуре 80 °C до постоянной массы. На основе полученных таким образом образцов гашеной доломитовой извести изготавливали опытные образцы для изучения формирования структуры и свойств данного вяжущего принудительного карбонатного твердения.

Опытные образцы из доломитовой извести изготавливали в виде цилиндров диаметром и высотой 30 мм методом полусухого двухстороннего прессования в металлической форме при удельном давлении прессования 30 МПа. Водосодержание вяжущего при этом варьировалось от 10 до 20 % масс. Значения удельного давления прессования и водосодержания формовочных смесей приняты на основании результатов исследований, проведенных авторами настоящей статьи ранее [25–27], которые позволили установить определяющее влияние указанных факторов на эффективность протекания

Табл. 1. Химический состав исходной доломитовой породы

Table 1. Chemical composition of initial dolomite rock

Наименование / Denomination	Содержание, % / Content, %									
	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	K ₂ O	TiO ₂	CO ₂	Всего, % / Total, %
Доломитовая порода / Dolomite rock	25,77	20,57	10,62	2,88	0,75	0,03	0,87	0,11	38,3	99,9

Рис. 1. Термограмма исходной доломитовой породы

Fig. 1. Thermogram of the initial dolomite rock

Табл. 2. Минералогический состав исходной доломитовой породы

Table 2. Mineralogical composition of initial dolomite rock

Потери в интервале температур 450–840 °C, % / Loss in the temperature range of 450 to 840 °C, %	Содержание MgCO ₃ /MgO, % / MgCO ₃ /MgO content, %	Потери в интервале температур 840–1000 °C, % / Loss in the temperature range of 840 to 1000 °C, %	Содержание CaCO ₃ /CaO, % / CaCO ₃ /CaO content, %	Примеси, % / Impurities, %
22,2	42,5/20,3	20,5	46,8/26,2	до 10,0

процесса принудительной карбонизации. Принудительную карбонизацию опытных образцов-цилиндров осуществляли в специальной камере без избыточного давления и повышения температуры. Концентрация углекислого газа в камере карбонизации поддерживалась в диапазоне 30–35 %, что соответствует средней концентрации CO_2 в отходящих газах аппаратов по обжигу карбонатного и доломитового сырья, а также тепловых установок ТЭС. Время карбонизации составляло 90 мин. По истечении времени карбонизации образцы высушивались до постоянной массы, а затем подвергались испытаниям.

Изменение фазового состава опытных образцов изучали методом дифференциально-термического (ДТА) и термогравиметрического (ТГА) анализов на высокотемпературном синхронном анализаторе STA 8000 (Perkin Elmer) в интервале температур 30–1000 °C при скорости нагрева 10 °C/мин в среде азота. Исследования микроструктуры опытных образцов проводили на сканирующем электронном микроскопе серии EVO MA (Carl Zeiss). Испытание опытных образцов на среднюю плотность, водопоглощение по массе, прочность на сжатие и на растяжение при изгибе осуществляли по стандартным методикам с использованием автоматической системы испытаний, на базе консоли управления MCC8 (Controls).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты изменения фазового состава обожженного продукта после его гидратации, рассчитанные по данным термического анализа, представлены в табл. 3. Примеси в виде инертных оксидов, показанные в табл. 1, не учитывались.

Анализ данных табл. 3 позволяет сделать вывод, что в полученных образцах доломитовой извести количество активного оксида магния возрастает при увеличении температуры обжига доломитовой породы до 850 °C и далее его количество заметно снижается в связи с процессом спекания и укрупнения частиц MgO . Пережженные частицы периклаза не вступают во взаимодействие с водой, что подтверждается снижением количества $\text{Mg}(\text{OH})_2$, рассчитанным по кривой зависимости изменения массы от температуры. Количество CaO в исследуемом интервале температур закономерно возрастает и составляет при 1000 °C 23,3 %. Согласно полученным опытным данным максимальное содержание активных оксидов CaO и MgO составило 40,8 % для продукта полученного при температуре обжига доломита 850 °C. Так как основная цель данной работы заключалась в исследовании возможности получения строительных материалов на основе доломитовой извести ускоренного твердения за счет принудительной карбонизации и получения соот-

Табл. 3. Изменение фазового состава продукта обжига доломита после его гидратации в зависимости от температуры обжига

Table 3. Change in phase composition of dolomite burning product after its hydration depending on the calcination temperature

Температура обжига, °C / Calcination temperature, °C	Потери массы в интервале температур эндотермического эффекта 360–490 °C, % / Mass loss in the endothermic effect temperature range of 360 to 490 °C, %	Содержание $\text{Mg}(\text{OH})_2/\text{MgO}$, % / $\text{Mg}(\text{OH})_2/\text{MgO}$ content, %	Потери массы в интервале температур эндотермического эффекта 490–550 °C, % / Mass loss in the endothermic effect temperature range of 490 to 550 °C, %	Содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CaO}$, % / $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CaO}$ content, %	Потери массы в интервале температур эндотермического эффекта 550–960 °C, % / Mass loss in the endothermic effect temperature range of 550 to 960 °C, %	Содержание $\text{MgCO}_3/\text{CaCO}_3$, % / $\text{MgCO}_3/\text{CaCO}_3$ content, %
700	2,55	8,3/5,7	–	–/–	35,1	30,6/46,8
750	4,54	14,7/10,2	0,42	1,7/1,3	29,7	21,2/44,5
800	6,71	21,7/15,0	1,0	4,1/3,1	23,1	11,1/41,3
850	8,48	27,5/19,0	7,0	28,8/21,8	5,9	2,8/7,9
900	4,1	13,3/9,2	7,2	29,6/22,4	3,0	–/6,8
1000	2,69	8,7/6,0	7,5	30,8/23,3	2,3	–/5,2

ветственно строительных изделий карбонатного твердения с высокими механическими характеристиками, то дальнейшие исследования проводили с доломитовой известью, обожженной при температурах до 850 °С. Из полученной при исследуемых температурах доломитовой извести после ее гидратации изготавливали опытные образцы-цилиндры, которые подвергали процессу принудительной карбонизации и определяли их физико-механические свойства. Принудительную карбонизацию проводили без избыточного давления и повышенной температуры в камере карбонизации. Результаты испытаний представлены в табл. 4.

Анализ данных табл. 4 позволяет сделать вывод об эффективности протекания процесса карбонатного твердения исследуемых систем, результатом чего является существенное увеличение значений прочности на сжатие и средней плотности опытных образцов. Следует отметить, что водосодержание сырьевой смеси также оказывает влияние на исследуемые характеристики опытных образцов и существует оптимальное его значение для достижения максимальной степени карбонизации, которая выражается увеличением физико-механических

характеристик образцов. Доломитовая известь, полученная при температурах до 750 °С и подверженная гидратации, в основном представлена бруситом ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) в количестве до 14,7 % и неразложившимся остатком карбоната магния и кальция. Увеличение прочности и плотности для этих систем после их карбонизации несущественно в сравнении с вяжущими, полученными при температурах от 750 до 850 °С. Данный факт говорит о том, что в ускоренном синтезе прочности в процессе принудительной карбонизации существенное влияние оказывает наличие в вяжущем портландита ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), который появляется при увеличении температуры обжига свыше 750 °С. Детальное изучение данных таблицы позволяет сделать вывод, что брусит не вступает в активное взаимодействие с углекислым газом при обычных условиях, а портландит напротив, появляясь в системе с увеличением температуры обжига доломита, приводит к существенному увеличению показателей прочности и плотности за счет связывания CO_2 и перехода в кальцит. Данный вывод подтверждается термическим анализом сырьевой смеси доломитовой извести, полученной при температуре обжига 820 °С, до карбонизации и после

Табл. 4. Физико-механические характеристики опытных образцов в зависимости от условий получения

Table 4. Physicomechanical characteristics of test samples depending on obtaining conditions

№ п/п / Item number	Температура обжига доломита, °C / Dolomite calcination temperature, °C	Условия получения образцов-цилиндров / Cylinder sample obtaining conditions		Свойства опытных образцов до карбонизации / Properties of experimental samples before carbonization		Свойства опытных образцов после карбонизации / Properties of experimental samples after carbonization		
		Давление прессования $p_{\text{сп}},$ МПа / Pressing pressure $p_{\text{сп}},$ MPa	Водосодержание сырьевой смеси $W, \%$ / Raw mixture water content $W, \%$	Прочность при сжатии, МПа / Compression strength, MPa	Плотность, кг/м³ / Density, kg/m³	Прочность при сжатии, МПа / Compression strength, MPa	Плотность, кг/м³ / Density, kg/m³	Увеличение прочности, % / Strength increase, %
1	700	30,0	10	4,7	1791	5,0	1795	7,1
2			15	3,3	1792	3,7	1806	51,0
3			20	2,1	1785	2,2	1792	4,8
4	750		10	6,3	1624	7,0	1656	11,1
5			15	7,9	1648	9,9	1673	25,3
6			20	8,7	1663	9,1	1682	4,6
7	800		10	11,5	1526	27,2	1638	136,5
8			15	14,1	1553	34,7	1659	146,1
9			20	14,7	1566	33,7	1656	129,3
10	850		10	16,5	1339	33,0	1501	100,0
11			15	14,7	1379	35,8	1540	143,5
12			20	12,7	1399	29,0	1537	128,3

нее (рис. 2 и 3). Поскольку при диссоциации MgCO_3 количество выделяющегося CO_2 на 19 % больше в сравнении с диссоциацией CaCO_3 , необходимо определить температуру обжига доломита, которая бы обеспечивала оптимальный фазовый состав вяжущего вещества и получение высоких механических характеристик карбонизированного материала на основе этой смеси, при минимальном количестве выделившегося углекислого газа. Для исследуемой доломитовой породы эта температура находится в пределах 800–850 °С и соответствует экстремуму диссоциации карбоната магния, а именно 820 °С.

Полученное при 820 °С вяжущее после гидратации (см. рис. 2) имеет три ярко выраженных эндотермических эффекта: первый с максимумом при 406 °С соответствует дегидратации $\text{Mg}(\text{OH})_2$, второй при 471 °С — дегидратации $\text{Ca}(\text{OH})_2$, третий при 826 °С — диссоциации карбоната кальция и незначительного остатка карбоната магния. Минералогический состав полученной доломитовой извести, рассчитанный по результатам термического анализа представлен в табл. 5. Незначительный эндозффект при 178 °С с потерей массы в 1,84 % соответствует удалению адсорбционной воды.

Рис. 2. Термограмма доломитовой извести, полученной при 820 °С после ее гидратации и сушки

Fig. 2. Thermogram of dolomite lime obtained at 820 °C after its hydration and drying

Рис. 3. Термограмма доломитовой извести, полученной при 820 °C после ее гидратации, сушки и последующей карбонизации при водосодержании смеси 20 %

Fig. 3. Thermogram of dolomite lime obtained at 820 °C after its hydration, drying, and subsequent carbonization with the mixture water content of 20 %

Термограмма, представленная на рис. 3, характеризуется наличием двух ярко выраженных эндотермических эффектов. Первый при температуре 439 °C соответствует разложению не вступившего в реакцию карбонизации $Mg(OH)_2$, второй при 867 °C — $CaCO_3$. Сравнивая результаты термического анализа до и после карбонизации (рис. 2, 3) можно сделать вывод, что гидроксид магния прак-

тически не вступает в реакцию карбонизации. Следует отметить, что потеря массы в диапазоне температур 370–520 °C характеризующих дегидратацию $Mg(OH)_2$ снижается после карбонизации на 0,2 %, что соответствует снижению гидроксида магния всего на 0,7 %. При этом после карбонизации на рис. 3 появляется незначительный растянутый эндотермический эффект с потерей массы в интервале темпе-

Табл. 5. Минералогический состав доломитовой извести, полученной при 820 °С

Table 5. Mineralogical composition of dolomite lime obtained at 820 °C

Температура обжига, °С / Calcination temperature, °С	820
Потери массы в интервале температур эндотермического эффекта 360–490 °С, % / Mass loss in the endothermic effect temperature range of 360 to 490 °С, %	6,98
Содержание $Mg(OH)_2/MgO$, % / $Mg(OH)_2/MgO$ content, %	22,7/15,6
Потери массы в интервале температур эндотермического эффекта 490–550 °С, % / Mass loss in the endothermic effect temperature range of 490 to 550 °С, %	1,2
Содержание $Ca(OH)_2/CaO$, % / $Ca(OH)_2/CaO$ content, %	4,9/3,7
Потери массы в интервале температур эндотермического эффекта 550–960 °С, % / Mass loss the in endothermic effect temperature range of 550 to 960 °С, %	20,4
Содержание $MgCO_3/CaCO_3$, % / $MgCO_3/CaCO_3$ content, %	9,9/40,2

ратур 630–740 °С равной 4,1 % и характеризующий предположительно диссоциацию образовавшегося $MgCO_3$. Присутствие портландита в системе после карбонизации не выявлено, что говорит о полном его переходе в $CaCO_3$. Результатом данных химических преобразований в структуре материала после его карбонизации является увеличение значений прочности при сжатии с 12,2 до 31,7 МПа и средней плотности с 1550 до 1650 кг/м³.

Таким образом, после карбонизации образцов в течение 90 мин весь портландит, находящийся в системе в результате взаимодействия с углекислым газом, перешел в карбонат кальция. Анализируя количество гидроксида магния, вступившего в реакцию с CO_2 , можно сделать вывод, что при нормальных условиях протекания данной реакции брусит вступает в химическое взаимодействие с CO_2 в крайне малых количествах. По-видимому, это связано с очень низкой растворимостью гидроксида магния в воде (0,0012 г/100 мл) в сравнении с растворимостью гидроксида кальция (0,19 г/100 мл). На рис. 4 представлены фото микроструктуры карбонизированного материала опытных образцов на основе доломитовой извести.

Структура карбонизированного материала представлена пластинчатыми кристаллами $Mg(OH)_2$, расположенными на подложке из ромбоэдрических кристаллов кальцита и доломита. Размеры в продольном и поперечном направлениях кристаллов $Mg(OH)_2$ находятся в пределах от 0,2 до 1 мкм, при толщине 15–70 нм. Размеры ромбоэдрических кристаллов кальцита и доломита варьируются в пределах от 2 до 30 мкм. Анализируя данные рис. 4, можно отметить, что в результате искусственной карбонизации образцов из доломитовой извести, полученной обжигом доломита при 820 °С, формируется прочная структура с кристаллами различной формы и размеров, в которой гидроксид магния, не вступивший в реакцию, веро-

ятно, выполняет роль уплотняющего компонента, имея наименьшие размеры кристаллов, в том числе в нанодиапазоне. Высокие значения прочности при сжатии, полученные в краткие сроки, объясняются тем, что остатки неразложившегося доломита, очевидно, являются активными компонентами, влияющими на структурообразование данной системы, выступая в качестве «подложки» для ориентированной кристаллизации новообразованного кальцита на поверхности доломитовых частиц с формированием прочных когезионных контактов, создавая, таким образом, компактную сросшуюся структуру из кристаллов кальцита, доломита и гидроксида магния, не вступивших в реакцию карбонизации.

Результаты, полученные в лабораторных условиях, были апробированы в условиях промышленного предприятия. На производственной линии по производству изделий полусухого прессования предприятия ООО «Канон», расположенного в пос. Зуя (Республика Крым) была изготовлена опытно-промышленная партия полнотелых изделий (одинарный кирпич) на основе доломитовой извести, произведенной в лабораторных условиях путем обжига доломита при температуре 820 °С. Размеры изделий ($L \times B \times H$): 250 × 120 × 65 мм. При изготовлении опытно-промышленной партии карбонизацию изделий осуществляли в течение 90 мин в карбонизационной камере собственной конструкции. После принудительного карбонатного твердения изделия высушивали до постоянной массы и определяли их основные физико-механические характеристики. Результаты испытаний изделий опытно-промышленной партии представлены в табл. 6.

Анализ опытных данных табл. 6 показал, что значения прочности на сжатие изделий из опытно-промышленной партии (19,9 МПа), полученных при удельном давлении прессования 30 МПа, ниже чем у опытных лабораторных образцов (31–34 МПа),

2 мкм / μm
 EHT = 20,00 кВ / kV
 WD = 18,0 мм / mm
 I Probe = 1,2 нА / nA

Signal A = BSD
 Увеличение = 2,12 тысяч раз /
 Mag = 2.12 K X
 System Vacuum = 1,71e-005 mbar
 Gun Vacuum = 2,88e-007 mbar
 BSD Mode = Compo

a

2 мкм / μm
 EHT = 20,00 кВ / kV
 WD = 18,0 мм / mm
 I Probe = 1,2 нА / nA

Signal A = BSD
 Увеличение = 8,47 тысяч раз /
 Mag = 8.47 K X
 System Vacuum = 1,77e-005 mbar
 Gun Vacuum = 2,77e-007 mbar
 BSD Mode = Compo

b

Рис. 4. Микроструктура карбонизированного материала образцов на основе доломитовой извести, полученной при 820 °С и начальном водосодержании смеси 20 %: а — кристаллы доломита; б — кристаллы брусита

Fig. 4. The microstructure of carbonized sample material based on dolomite lime obtained at 820 °C and initial mixture water content of 20 %: a — dolomite crystals; b — brucite crystals

Табл. 6. Физико-механические характеристики опытных образцов кирпича в зависимости от условий получения
Table 6. Physicomechanical characteristics of test brick samples depending on obtaining conditions

Номер п/п / Item number	Условия получения / Obtaining conditions		Свойства опытных образцов кирпича после карбонизации / Properties of test brick samples after carbonization		
	Давление прессования $p_{уд}$, МПа / Pressing pres- sure p_{sp} , МПа	Водосодержание сырьевой смеси, % / Raw mixture water content, %	Предел прочности при изгибе, МПа / Ultimate bending strength, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа / Ultimate compres- sion strength, МПа	Водопоглощение, % масс. / Water absorption, mass %
1	30	20	3,0	19,9	10,2
2	45		3,5	23,5	8,0
3	60		4,3	30,3	6,9

полученных при аналогичных условиях. Это объясняется значительно большим поперечным сечением изделий по сравнению с опытными лабораторными образцами-цилиндрами и, связанным с этим наличием в центральной части поперечного сечения зоны в виде рыхлого ядра, состоящей из непрореагировавшей с CO_2 сырьевой смеси. Прочность изделий определяет образовавшийся в результате реакции карбонизации карбонатный слой, величина которого составляет от 30 до 35 мм. Можно предположить, что прочность на сжатие закарбонизированной части изделий из опытно-промышленной партии соответствует прочности лабораторных образцов.

С увеличением удельного усилия прессования до 45 и 60 МПа толщина карбонизированного слоя в изделиях из опытно-промышленной партии уменьшается за счет большей плотности и, соответственно, снижения газопроницаемости материала. При этом следует отметить, что прочностные показатели изделий увеличиваются и снижается их водопоглощение. Следовательно, можно заключить, что при давлениях прессования до 30 МПа прочностные свойства материалов карбонатного твердения формируются, главным образом, за счет карбонизационного твердения путем формирования прочного карбонатного каркаса, а при увеличении удельного давления прессования, в большей степени, за счет контактного взаимодействия частиц.

В результате проведения опытно-промышленной проверки научно-практических результатов, полученных в лабораторных условиях, установлено, что физико-механическими свойствами изделий принудительного карбонатного твердения можно управлять, как путем изменения продолжительности выдерживания изделий в среде с повышенной концентрацией CO_2 , так и изменяя геометрические параметры изделий. Из полученных результатов следует, что наиболее эффективной конфигурацией изделий принудительного карбонатного твердения является пустотелая форма с толщиной стенок, например, до 30–40 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что потенциал доломитового сырья в производстве строительных материалов и изделий используется не в полной мере. Из данного сырья возможно получение вяжущего с низкой эмиссией CO_2 . Суть данного утверждения заключается в определении минимально возможной температуры обжига доломитового сырья, которая бы обеспечивала оптимальный фазовый состав извести, обеспечивающий получение материала карбонатного твердения с высокими механическими характеристиками. Для исследуемой доломитовой породы минимальная температура обжига, обеспечивающая необходимые требования составила 820 °С. Следует также учесть, что значение температуры будет варьироваться в зависимости от химического состава исходного доломитового сырья, что предопределяет более глубокий уровень исследований в аспекте технологии получения предлагаемого вяжущего и его свойств. Подбор минимальной температуры обжига будет способствовать снижению выделяющегося в данном процессе углекислого газа, а направление этого CO_2 в технологический процесс в качестве сырьевого компонента — его минимальному выбросу в атмосферу. Таким образом, получая доломитовую известь и, используя отходящий углекислый газ в технологическом процессе, получается замкнутая ресурсосберегающая технология производства низкоуглеродных строительных изделий карбонатного твердения. При этом данные изделия не требуют длительной выдержки для достижения ими марочной прочности, как например, на основе портландцемента, так как основные физико-механические характеристики карбонизированного материала достигаются при завершении технологического процесса производства. Такие аспекты производства, как невысокая температура обжига, использование вторичного сырья (отсевы доломитов, выбросы CO_2) и быстрый технологический цикл снижают себестоимость готовых изделий.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ekolu S.O.* A review on effects of curing, sheltering, and CO₂ concentration upon natural carbonation of concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 127. Pp. 306–320. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.056
2. *Ruan S., Unluer C.* Influence of mix design on the carbonation, mechanical properties and microstructure of reactive MgO cement-based concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2017. Vol. 80. Pp. 104–114. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.03.004
3. *Possan E., Thomaz W.A., Aleandri G.A., Felix E.F., C.P. dos Santos A.* CO₂ uptake potential due concrete carbonation: A case study // *Case Studies in Construction Materials*. 2017. Vol. 6. Pp. 147–161. DOI: 10.1016/j.cscm.2017.01.007
4. *Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M.* Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 114. Pp. 2–26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015
5. *Gartner E.* Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements // *Cement and Concrete Research*. 2004. Vol. 34. Issue 9. Pp. 1489–1498. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.01.021
6. *Jang J.G., Kim G.M., Kim H.J., Lee H.K.* Review on recent advances in CO₂ utilization and sequestration technologies in cement-based materials // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 127. Pp. 762–773. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.017
7. *Хохряков О.В., Хозин В.Г., Харченко И.Я., Газданов Д.В.* Цементы низкой водопотребности — путь эффективного использования клинкера и минеральных наполнителей в бетонах // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. № 10 (109). С. 1145–1152. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.10.1145-1152
8. *Schneider M., Romer M., Tschudin M., Bolio H.* Sustainable cement production — present and future // *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41 (7). Pp. 642–650. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.03.019
9. *Panesar D.K., Mo L.* Properties of binary and ternary reactive MgO mortar blends subjected to CO₂ curing // *Cement and Concrete Composites*. 2013. Vol. 38. Pp. 40–49. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.03.009
10. *Maddalena R., Roberts J.J., Hamilton A.* Can portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 186. Pp. 933–942. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.138
11. *Польманн Х.* Пути сокращения выбросов CO₂ при производстве альтернативных цементов // *Цемент и его применение*. 2016. № 2. С. 89–93.
12. *Shi C., Jimenez A.F., Palomo A.* New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to portland cement // *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41. Issue 7. Pp. 750–763. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.03.016
13. *Vandeperre L., Liska M., Al-Tabbaa A.* Microstructures of reactive magnesia cement blends // *Cement and Concrete Composites*. 2008. Vol. 30. Issue 8. Pp. 706–714. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.05.002
14. *Unluer C., Al-Tabbaa A.* Enhancing the carbonation of MgO cement porous blocks through improved curing conditions // *Cement and Concrete Research*. 2014. Vol. 59. Pp. 55–65. DOI: 10.1016/j.cemconres.2014.02.005
15. *Harrison A.J.W.* The properties of reactive magnesia — portland cement — pozzolan blends // *Concrete in the Third Millennium : proceedings CIA Conference*. CIA : Brisbane, Australia, 2003. URL: <https://www.tececo.com.au/files/conference%20papers/PropertiesofMagnesiaPortlandCementPozzolanBlends8thIntSemConcreteandBuildMatNewDelhi181103.pdf>
16. *Liska M., Al-Tabbaa A.* Performance of magnesia cements in pressed masonry units with natural aggregates: Production parameters optimisation // *Construction and Building Materials*. 2008. Vol. 22. Issue 8. Pp. 1789–1797. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.05.007
17. *Cherubini F., Raue M., Ulgiati S.* LCA of magnesium production // *Resources, Conservation and Recycling*. 2008. Vol. 52. Issue 8–9. Pp. 1093–1100. DOI: 10.1016/j.resconrec.2008.05.001
18. *Unluer C., Al-Tabbaa A.* Impact of hydrated magnesium carbonate additives on the carbonation of reactive MgO cements // *Cement and Concrete Research*. 2013. Vol. 54. Pp. 87–97. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.08.009
19. *Dung N.T., Lesimple A., Hay R., Celik K., Unluer C.* Formation of carbonate phases and their effect on the performance of reactive MgO cement formulations // *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 125. P. 105894. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105894
20. *Unluer C.* Carbon dioxide sequestration in magnesium-based binders // *Carbon Dioxide Sequestration in Cementitious Construction Materials*. 2018. Pp. 129–173. DOI: 10.1016/B978-0-08-102444-7.00007-1
21. *Ruan S., Unluer C.* Influence of supplementary cementitious materials on the performance and environmental impacts of reactive magnesia cement concrete // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 159. Pp. 62–73. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.05.044
22. *Dung N.T., Unluer C.* Development of MgO concrete with enhanced hydration and carbonation mechanisms // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 103. Pp. 160–169. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.10.011

23. Al-Tabbaa A. Reactive magnesia cement. *Eco-efficient Concrete*. 2013. Pp. 523–543. DOI: 10.1533/9780857098993.4.523
24. Shen W., Cao L., Li Q., Wen Z., Wang J., Liu Y. et al. Is magnesia cement low carbon? Life cycle carbon footprint comparing with portland cement // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 131. Pp. 20–27. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.082
25. Lyubomirskiy N.V., Fedorkin S.I., Bakhtin A., Bakhtina T. Structuring of composite systems based on lime harden through carbonation and secondary lime-stone raw materials // *Malaysian Construction Research Journal*. 2017. Vol. 23. Issue 3. Pp. 15–26.
26. Lyubomirskiy N., Bakhtin A., Bakhtina T. Alternative approach to the organization of hardening of dolomite binding materials // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 365. P. 032032. DOI: 10.1088/1757-899X/365/3/032032
27. Lyubomirskiy N., Bakhtina T., Bakhtin A., Fedorkin S. The carbonate-hardening lime construction material properties formation during their long-term storage and use under normal conditions // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 974. Pp. 187–194. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.187

Поступила в редакцию 17 октября 2019 г.

Принята в доработанном виде 19 ноября 2019 г.

Одобрена для публикации 28 декабря 2019 г.

О Б АВТОРАХ: **Тамара Алексеевна Бахтина** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; **Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» (Академия строительства и архитектуры, ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»);** 295493, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; РИНЦ ID: 840822, Scopus: 57202813160, ResearcherID: N-8860-2016, ORCID: 0000-0002-5241-0074; t.bakhtina83@gmail.com;

Николай Владимирович Любомирский — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; **Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» (Академия строительства и архитектуры, ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»);** 295493, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; РИНЦ ID: 779436, Scopus: 57202812296, ResearcherID: Y-4548-2019, ORCID: 0000-0001-6298-5077; niklub.ua@gmail.com;

Александр Сергеевич Бахтин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; **Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» (Академия строительства и архитектуры, ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»);** 295493, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; РИНЦ ID: 846523, Scopus: 57191596769, ResearcherID: N-9489-2016, ORCID: 0000-0001-6255-8948; aleserba@gmail.com;

Виталий Витальевич Николаенко — старший преподаватель кафедры строительного инжиниринга и материаловедения; **Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» (Академия строительства и архитектуры, ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»);** 295493, г. Симферополь, ул. Киевская, д. 181; РИНЦ ID: 891109, Scopus: 57205434653, ResearcherID: AAD-2526-2019, ORCID: 0000-0002-7095-7946; t.bakhtina83@gmail.com.

REFERENCES

1. Eklou S.O. A review on effects of curing, sheltering, and CO₂ concentration upon natural carbonation of concrete. *Construction and Building Materials*. 2016; 127:306-320. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.056
2. Ruan S., Unluer C. Influence of mix design on the carbonation, mechanical properties and microstructure of reactive MgO cement-based concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2017; 80:104-114. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.03.004
3. Possan E., Thomaz W.A., Aleandri G.A., Felix E.F., C.P. dos Santos A. CO₂ uptake potential due concrete carbonation: A case study. *Case Studies in Construction Materials*. 2017; 6:147-161. DOI: 10.1016/j.cscm.2017.01.007
4. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry.

Cement and Concrete Research. 2018; 114:2-26. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015

5. Gartner E. Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement and Concrete Research*. 2004; 34(9):1489-1498. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.01.021

6. Jang J.G., Kim G.M., Kim H.J., Lee H.K. Review on recent advances in CO₂ utilization and sequestration technologies in cement-based materials. *Construction and Building Materials*. 2016; 127:762-773. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.017

7. Khokhryakov O.V., Khozin V.G., Kharchenko I.Ya., Gazdanov D.V. Low water demand cements — way of efficient use of clinker and mineral fillers in concretes. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2017; 12(10):109:1145-1152. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.10.1145-1152 (rus.).

8. Schneider M., Romer M., Tschudin M., Bolio H. Sustainable cement production — present and future. *Cement and Concrete Research*. 2011; 41(7):642-650. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.03.019

9. Panesar D.K., Mo L. Properties of binary and ternary reactive MgO mortar blends subjected to CO₂ curing. *Cement and Concrete Composites*. 2013; 38:40-49. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.03.009

10. Maddalena R., Roberts J.J., Hamilton A. Can portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 186:933-942. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.138

11. Poellmann H. Mineralogical strategies to reduce CO₂ in the fabrication of alternative cements. *Journal Cement and its Applications*. 2016; 2:89-101.

12. Shi C., Jimenez A.F., Palomo A. New cements for the 21st century: the pursuit of an alternative to portland cement. *Cement and Concrete Research*. 2011; 41(7):750-763. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.03.016

13. Vandeperre L., Liska M., Al-Tabbaa A. Microstructures of reactive magnesia cement blends. *Cement and Concrete Composites*. 2008; 30(8):706-714. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.05.002

14. Unluer C., Al-Tabbaa A. Enhancing the carbonation of MgO cement porous blocks through improved curing conditions. *Cement and Concrete Research*. 2014; 59:55-65. DOI: 10.1016/j.cemconres.2014.02.005

15. Harrison A.J.W. The properties of reactive magnesia — portland cement — pozzolan blends. *Concrete in the Third Millenium : proceedings CIA Conference*. CIA : Brisbane, Australia, 2003. URL: <https://www.tececo.com.au/files/conference%20papers/PropertiesofMagnesiaPortlandCementPozzolanBlends8thIntSemConcreteandBuildMatNewDelhi181103.pdf>

16. Liska M., Al-Tabbaa A. Performance of magnesia cements in pressed masonry units with natural aggregates: Production parameters optimization. *Construction and Building Materials*. 2008; 22(8):1789-1797. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.05.007

17. Cherubini F., Rauge M., Ulgiati S. LCA of magnesium production. *Resources, Conservation and Recycling*. 2008; 52(8-9):1093-1100. DOI: 10.1016/j.resconrec.2008.05.001

18. Unluer C., Al-Tabbaa A. Impact of hydrated magnesium carbonate additives on the carbonation of reactive MgO cements. *Cement and Concrete Research*. 2013; 54:87-97. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.08.009

19. Dung N.T., Lesimple A., Hay R., Celik K., Unluer C. Formation of carbonate phases and their effect on the performance of reactive MgO cement formulations. *Cement and Concrete Research*. 2019; 125:105894. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105894

20. Unluer C. Carbon dioxide sequestration in magnesium-based binders. *Carbon dioxide sequestration in cementitious construction materials*. 2018; 129-173. DOI: 10.1016/B978-0-08-102444-7.00007-1

21. Ruan S., Unluer C. Influence of supplementary cementitious materials on the performance and environmental impacts of reactive magnesia cement concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 159:62-73. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.05.044

22. Dung N.T., Unluer C. Development of MgO concrete with enhanced hydration and carbonation mechanisms. *Cement and Concrete Research*. 2018; 103:160-169. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.10.011

23. Al-Tabbaa A. Reactive magnesia cement. *Eco-Efficient Concrete*. 2013; 523-543. DOI: 10.1533/9780857098993.4.523

24. Shen W., Cao L., Li Q., Wen Z., Wang J., Liu Y. et al. Is magnesia cement low carbon? Life cycle carbon footprint comparing with portland cement. *Journal of Cleaner Production*. 2016; 131:20-27. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.05.082

25. Lyubomirskiy N.V., Fedorkin S.I., Bakhtin A., Bakhtina T. Structuring of composite systems based on lime harden through carbonation and secondary limestone raw materials. *Malaysian Construction Research Journal*. 2017; 23(3):15-26.

26. Lyubomirskiy N., Bakhtin A., Bakhtina T. Alternative approach to the organization of hardening of dolomite binding materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 365:032032. DOI: 10.1088/1757-899X/365/3/032032

27. Lyubomirskiy N., Bakhtina T., Bakhtin A., Fedorkin S. The carbonate-hardening lime construction material properties formation during their long-term storage and use under normal conditions. *Materials Science Forum*. 2019; 974:187-194. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.974.187

Received October 17, 2019.

Adopted in a revised form on November 19, 2019.

Approved for publication December 28, 2019.

B I O N O T E S: **Tamara A. Bakhtina** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Academy of Construction and Architecture of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “V.I. Vernadsky Crimean Federal University” (ACA Vernadsky CFU)**; 181 Kievskaya st., Simferopol, 295493, Russian Federation; RISC ID: 840822, Scopus: 57202813160, ResearcherID: N-8860-2016, ORCID: 0000-0002-5241-0074; t.bakhtina83@gmail.com;

Nikolay V. Lyubomirskiy — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Academy of Construction and Architecture of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “V.I. Vernadsky Crimean Federal University” (ACA Vernadsky CFU)**; 181 Kievskaya st., Simferopol, 295493, Russian Federation; RISC ID: 779436, Scopus: 57202812296, ResearcherID: Y-4548-2019, ORCID: 0000-0001-6298-5077; niklub.ua@gmail.com;

Aleksandr S. Bakhtin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Academy of Construction and Architecture of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “V.I. Vernadsky Crimean Federal University” (ACA Vernadsky CFU)**; 181 Kievskaya st., Simferopol, 295493, Russian Federation; RISC ID: 846523, Scopus: 57191596769, ResearcherID: N-9489-2016, ORCID: 0000-0001-6255-8948; aleserba@gmail.com;

Vitaliy V. Nikolaenko — senior lecturer at the Department of Construction Engineering and Materials Science; **Academy of Construction and Architecture of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “V.I. Vernadsky Crimean Federal University” (ACA Vernadsky CFU)**; 181 Kievskaya st., Simferopol, 295493, Russian Federation; RISC ID: 891109, Scopus: 57205434653, ResearcherID: AAD-2526-2019, ORCID: 0000-0002-7095-7946; t.bakhtina83@gmail.com.