

Строительные материалы и изделия Building materials and products

Научная статья

УДК 691.5

DOI: 10.14529/build250205

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ИЗВЕСТИ В ПРИСУТСТВИИ ПУЦЦОЛАНОВОЙ ДОБАВКИ

В.И. Логанина[✉]

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
Пенза, Россия*

[✉] *loganin@mail.ru*

Аннотация. Приведены сведения о прочности образцов на основе гидравлической извести в присутствии пуццолановой добавки диатомита. Установлено, что замена гидравлической извести диатомитом приводит к повышению прочности при сжатии в возрасте 28 суток твердения в воздушно-сухих условиях. При замене 20 % гидравлической извести диатомитом прочность при сжатии составляет 35 кгс/см², а при замене 10 % диатомитом – 30 кгс/см². Индекс пуццолановой прочности составляет 1,07–1,25 в зависимости от содержания диатомита. Методом дифференциально-термического анализа выявлено меньшее содержание портландита, кальцита и большее содержание гидросиликата кальция в структуре образцов с добавкой диатомита. Реакция карбонизации образцов на основе гидравлической извести NHL5 имеет более высокую скорость на ранней стадии затвердевания по сравнению с образцами с применением диатомита.

Ключевые слова: известь, пуццолановые добавки, прочность, структурообразование

Для цитирования. Логанина В.И. Структурообразование гидравлической извести в присутствии пуццолановой добавки // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2025. Т. 25, № 2. С. 37–42. DOI: 10.14529/build250205

Original article

DOI: 10.14529/build250205

STRUCTURE FORMATION OF HYDRAULIC LIME IN THE PRESENCE OF A POZZOLANIC ADDITIVE

V.I. Loganina[✉]

Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia

[✉] *loganin@mail.ru*

Abstract. The article presents data on the strength of samples based on hydraulic lime in the presence of the pozzolanic diatomite additive. It establishes that the replacement of hydraulic lime with diatomite increases the compressive strength at the age of 28 days of hardening in air-dry conditions. When 20% of hydraulic lime are replaced with diatomite, the compressive strength is 35 kgf/cm², and when 10% are replaced with diatomite, this value is 30 kgf/cm². The pozzolanic strength index is 1.07–1.25 depending on the diatomite content. The differential thermal analysis method revealed a lower content of portlandite and calcite and a higher content of calcium hydrosilicate in the structure of samples with the addition of diatomite. The carbonation reaction of the samples based on NHL5 hydraulic lime has a higher rate at an early stage of hardening compared to the samples with the addition of diatomite.

Keywords: lime, pozzolanic additives, strength, structure formation

For citation. Loganina V.I. Structure formation of hydraulic lime in the presence of a pozzolanic additive. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2025;25(2):37–42. (in Russ.). DOI: 10.14529/build250205

Введение

Для реставрации зданий исторической застройки широкое применение находят известковые составы. Однако отделочные покрытия на основе известковых составов обладают недостаточной стойкостью к воздействию окружающей внешней среды. Для повышения срока службы в рецептуру известковых составов вводят различные модифицирующие добавки [1–5].

В качестве альтернативы воздушной извести, применяемой в растворах и штукатурках как в новом строительстве, так и при ремонте и обслуживании исторических зданий, служит гидравлическая известь NHL [6–9]. Растворы на основе гидравлической извести сочетают некоторые преимущества раствора на основе цемента (время схватывания и набор прочности) с преимуществами растворов на основе воздушной извести. Гидравлическая известь обладает как гидравлическими свойствами, так и свойствами твердения на воздухе.

Гидравлическая известь (NHL) является одним из вяжущих, применяемых в отделочных композициях для защиты зданий и сооружений исторической застройки [10]. Растворы на основе гидравлической извести обладают высокой совместимостью с древними зданиями по физическим, химическим и механическим свойствам. Однако относительно низкая устойчивость к окружающей среде (особенно устойчивость к кислотной эрозии, щелочестойкость и сульфатостойкость) растворов на основе гидравлической извести NHL сдерживает широкое распространение таких отделочных составов в реставрации.

Реакция гидратации NHL может быть улучшена путем использования пуццоланового материала, так как некарбонизированный портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в структуре известкового камня, взаимодействуя с пуццолановой добавкой, способствует образованию компактной структуры с C-S(A)-H, что способствует повышению устойчивости к окружающей среде [11–16].

Целью данной работы является исследование структурообразования композитов на основе гидравлической извести в присутствии пуццолановых добавок.

Материалы и методы исследования

В качестве гидравлической извести применяли гидравлическую известь «Тамасли» NHL5. Гидравлический модуль извести составляет $M = 2,69$.

Учитывая, что гидравлическая известь образует менее пластичный раствор по сравнению с воздушной известью, целесообразно совместить вяжущие с тем, чтобы смешанное вяжущее сочетало в себе достоинство обоих материалов. В качестве добавки к гидравлической извести применяли гашеную известь (пушонка) истинной плотностью 2230 кг/м^3 , насыпной плотностью 280 кг/м^3 , актив-

ностью 83 %, с удельной поверхностью $S_{уд}$ $559 \text{ м}^2/\text{кг}$.

В качестве пуццолановой добавки в работе применяли диатомит марки NDP-D-230. Технические характеристики диатомита приведены в табл. 1.

Таблица 1
Технические характеристики диатомита NDP-D-230

Наименование показателей	Значения
Цвет	бежевый
Влажность, %	2,5–3
Истинная плотность, кг/м^3	2060
Средняя плотность, кг/м^3	200–230
Пористость, %	89,1
Удельная поверхность, $\text{см}^2/\text{г}$, определяемая на приборе ПСХ-10	30 000–33 000

Гидравлическая известь была заменена диатомитом по весу (10 и 20 %). Кроме того, были изготовлены образцы на основе гидравлической извести, при этом 25 % гидравлической извести было заменено на воздушную известь и 5 % диатомита. Составы изготавливались с водоизвестковым отношением В/И, равным 1,2. Образцы твердели в воздушно сухих условиях.

Прочность при сжатии образцов устанавливали с помощью испытательной машины типа ИР 5057–50 и определяли по формуле

$$R_{сж} = \frac{P}{F}, \quad (1)$$

где P – разрушающая сила, Н; F – площадь поперечного сечения образца до испытания, м^2 .

Коэффициент удельной прочности, R , определялся как вклад в прочность композита от единицы минеральной добавки:

$$R = \frac{R_{сж}}{p}, \quad (2)$$

где $R_{сж}$ – прочность композита на сжатие; p – процент минеральной добавки в композите.

Индекс пуццолановой прочности, K , определяли как отношение прочности образца на основе гидравлической извести с добавкой диатомита ($R_{сж.м}$) к прочности при сжатии образцов на основе гидравлической извести ($R_{сж}$):

$$K = \frac{R_{сж.м}}{R_{сж}}, \quad (3)$$

где $R_{сж.м}$ – прочность образца на основе гидравлической извести с добавкой диатомита.

Процентное значение вклада пуццоланового эффекта P в прочность определяли по формуле

$$P = \frac{R_p}{R_{сж.м}}. \quad (4)$$

Вклад пуццоланового эффекта в прочность на сжатие из-за минеральной добавки R_p определяли по формуле

$$R_p = R_{сж.м} - R_{сж}. \quad (5)$$

Результаты исследований

На рис. 1 приведены результаты оценки прочности известкового камня на основе гидравлической извести. Установлено, что прочность при сжатии образцов на основе 100%-ной гидравлической извести в возрасте 28 суток воздушно-сухого твердения составляет 2,8 МПа. Замена гидравлической извести диатомитом приводит к повышению прочности при сжатии. Так, при замене 20 % гидравлической извести диатомитом прочность при сжатии в возрасте 28 суток составляет 3,5 МПа, а при замене 10 % диатомитом – 3,0 МПа.

Замена гидравлической извести воздушной известью в количестве 25 % приводит к снижению прочности при сжатии, составляющей 1,4 МПа. Однако совместное введение с воздушной изве-

стью диатомита в количестве 10 % способствует увеличению прочности при сжатии до 2,2 МПа.

Результаты исследования, приведенные в табл. 2, свидетельствуют, что наличие диатомита в составе способствует пуццолановой реакции, что приводит к повышению прочности при сжатии. Индекс пуццолановой прочности K составляет 1,07–1,25 в зависимости от содержания диатомита. Так как пуццолановая реакция идет медленнее по сравнению с гидравлической реакцией, то в более позднем возрасте будет наблюдаться больший эффект от введения диатомита. Также при наличии доступной воды эффект будет проявляться в большей степени. Следовательно, следует ожидать увеличения числового значения индекса пуццолановой прочности K у составов с применением воздушной извести в более позднем возрасте.

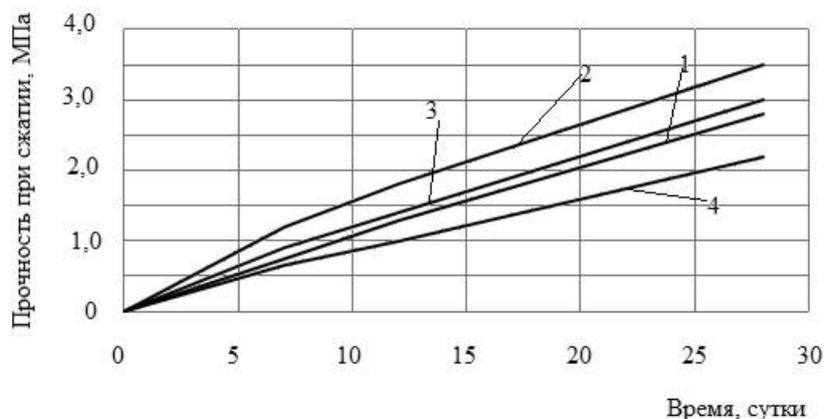


Рис. 1. Изменение прочности при сжатии образцов гидравлической извести в зависимости от условий твердения: 1 – на основе гидравлической извести; 2 – замена 20 % гидравлической извести диатомитом; 3 – замена 10 % гидравлической извести диатомитом; 4 – замена 25 % гидравлической извести воздушной известью и 10 % – диатомитом

Таблица 2

Прочность при сжатии образцов на основе гидравлической извести

Состав	Прочность образца на основе гидравлической извести, МПа	Индекс пуццолановой прочности, K	Вклад пуццоланового эффекта в прочность на сжатие раствора из-за минеральной добавки R_p , МПа	Процентное значение вклада пуццоланового эффекта P в прочность
На основе гидравлической извести	2,8	–	–	–
Замена гидравлической извести диатомитом (20 %)	3,5	1,25	0,7	0,2
Замена гидравлической извести диатомитом (10 %)	3,0	1,07	0,2	0,066
Замена гидравлической извести воздушной известью (25 %) и диатомитом (10 %)	2,2	0,785	–0,6	–0,027

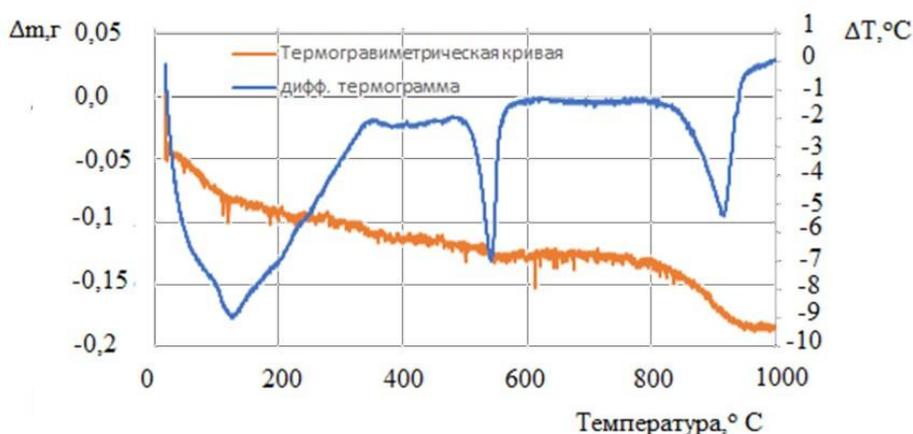


Рис. 2. Кривые дифференциально-термического анализа образцов на основе гидравлической извести в возрасте 28 суток твердения

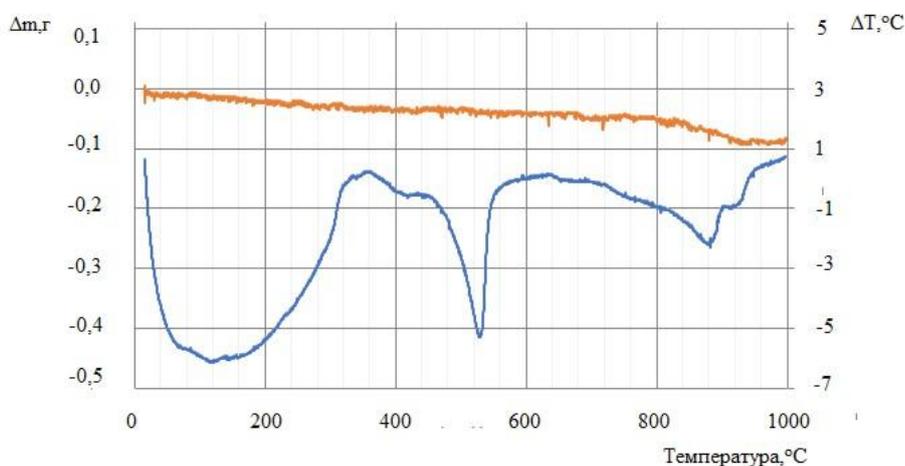


Рис. 3. Кривые дифференциально-термического анализа образцов на основе гидравлической извести с добавкой диатомита в возрасте 28 суток твердения

Методом ДТА образца композита на основе гидравлической извести выявлено, что эндотермический эффект при температуре 93–173 °С (рис. 2), составляющий 33,45 Дж/г, связан с удалением адсорбированной воды, а также частичным обезвоживанием гидроалюминатов кальция, которое сопровождается потерей массы в образце, составляющей 0,03 г (9,36 %). Экзоэффект, составляющий 1,589 Дж/г (см. рис. 2), вызван наличием выделившейся в процессе гидратации гелеобразной массы.

Интенсивный эндоэффект на термограмме в интервале 486,4–576,1 °С связан с дегидратацией портландита, а также удалением первоначально химически связанной воды. Эндоэффект в интервале температур 820,5–963 °С (см. рис. 2) обусловлен диссоциацией кальция и составляет 129,88 Дж/г, потеря массы составляет 0,04 г (12,49 %).

При сравнении термограмм образцов на основе гидравлической извести и на основе гидравлической извести с применением диатомита установлено, что эндотермический эффект при температуре 705,5–982,7 °С у образцов с применением диатомита больше и составляет 151,39 Дж/г (рис. 3).

Более высокое значение эндотермического эффекта, на наш взгляд, обусловлено большим количеством гидросиликатов кальция вследствие взаимодействия портландита с диатомитом. Диоксид углерода расщепляет гидратированный силикат кальция на карбонат кальция, увеличивая его содержание. Об этом свидетельствуют данные потери массы, составляющие 0,09 г (47,54 %).

Реакция карбонизации образцов на основе гидравлической извести NHL5 имеет более высокую скорость на ранней стадии затвердевания (до 28 суток) по сравнению с образцами с применением диатомита, что очевидно обусловлено более плотной структурой образцов с применением диатомита вследствие протекания пуццолановой реакции и образования дополнительного количества гидрата силиката кальция (C-S-H).

Выводы

Установлено, что введение в рецептуру составов на основе гидравлической извести пуццолановой добавки диатомита способствует повышению прочности образцов за счет формирования более

плотной структуры вследствие образования дополнительного количества гидрата силиката кальция. Вклад пуццоланового эффекта наблюдается при замене гидравлической известки диатомитом

в количестве 20 %. Сравнительный дифференциально-термический анализ выявил большее содержание гидросиликата кальция в структуре образцов с добавкой диатомита.

Список литературы

1. Балмасов Г.Ф., Прохоренко М.А., Душин Н.А. Современные добавки для производства сухих строительных смесей // *Строительные материалы*. 2005. № 4. С. 36–38.
2. Логанина В.И., Фролов М.В. Тонкодисперсный наполнитель на основе силикатов кальция для известковых смесей // *Вестник гражданских инженеров*. 2015. № 5 (52). С. 144–147.
3. Логанина В.И., Давыдова О.А., Симонов Е.Е. Исследования закономерностей влияния золя кремниевой кислоты на структуру и свойства диатомита // *Строительные материалы*. 2011. № 12. С. 62–65.
4. Оптимизация состава композитов общестроительного назначения, модифицированных наноразмерными добавками / В.И. Логанина, Л.В. Макарова, Р.В. Тарасов, О.А. Давыдова // *Региональная архитектура и строительство*. 2010. № 2. С. 53–57.
5. Реставрация исторических объектов с применением современных сухих строительных смесей / Ю.В. Пухаренко, А.М. Харитонов, Н.Н. Шангина, Т.Ю. Сафонова // *Вестник гражданских инженеров*. 2011. № 1. С. 98–103.
6. Traditional organic additives improve lime mortars: new old materials for restoration and building natural stone fabrics / L. Ventola, M. Vendrell, P. Giraldez, L. Merino // *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25 (8), pp. 3313–3318.
7. New natural hydraulic lime mortars—physical and microstructural properties in different curing conditions / J. Grilo, P. Faria, R. Veiga et al. // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 54 (8), pp. 378–384.
8. Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete / P. Maravelaki-Kalaizaki, A. Bakolas, I. Karatasios, V. Kilikoglou // *Cement and Concrete Research*. 2005. Vol. 35 (8), pp. 1577–1586.
9. Шелихов Н.С., Рахимов Р.З. Гидравлическая известь и романцемент из минерального сырья Татарстана // *Строительный вестник Татарстана*. 2002. № 2. С. 48–53.
10. Низкообжиговые гидравлические вяжущие. Проблемы и решения / Н.С. Шелихов, Р.Р. Сагдиев, Р.З. Рахимов, О.В. Стоянов // *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. Т. 17, № 2. С. 59–65.
11. Silva B.A., Ferreira Pinto A.P., Gomes A. Natural hydraulic lime versus cement for blended lime mortars for restoration works // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 94, pp. 346–360.
12. The environmental credentials of hydraulic lime-pozzolan concretes / E.R. Grist, K.A. Paine, A. Heath et al. // *Journal of Cleaner Production*. 2015. Vol. 93, pp. 26–37.
13. Determination of cement hydration and pozzolanic reaction extents for flyash cement pastes / Q. Zeng, K. Li, T. Fen-chong, P. Dangla // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 27(1), pp. 560–569.
14. Arizzi A., Cultrone G. Aerial lime-based mortars blended with a pozzolanic additive and different admixtures: a mineralogical, textural and physical-mechanical study // *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 31 (1), pp. 135–143.
15. Xu S.Q., Ma Q.L., Wang J.L. Combined effect of isobutyltriethoxysilane and silica fume on the performance of natural hydraulic lime-based mortars // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 162, pp. 181–191.
16. Xu S., Wang J., Sun Y. Effect of water binder ratio on the early hydration of natural hydraulic lime // *Materials and Structures*. 2015. Vol. 48(10), pp. 3431–3441.

References

1. Balmasov G.F., Prokhorenko M.A., Dushin N.A. [Modern additives for the production of dry building mixe]. *Stroitel'nye materialy* [Building Materials], 2004, no. 4, pp. 36–38. (in Russ.)
2. Loganina V.I., Frolov M.V. [Finely dispersed filler based on calcium silicates for lime mixtures]. *Vestnik grajdanskih injenerov* [Bulletin of Civil Engineers], 2015, no. 5 (52), pp. 144–147. (in Russ.)
3. Loganina V.I., Davydova O.A., Simonov E.E. [Studies of the patterns of the effect of silicic acid sol on the structure and properties of diatomite]. *Stroitelnie materialy* [Building Materials], 2011, no. 12, pp. 62–65. (in Russ.)
4. Loganina V.I., Makarova L.V., Tarasov R.V., Davydova O.A. [Optimization of the composition of composites for general construction purposes modified with nanoscale additives]. *Regional architecture and construction* [Regional Architecture and Construction], 2010, no. 2, pp. 53–57. (in Russ.)
5. Pukharensko Yu.V., Kharitonov A.M., Shangina N.N., Safonova T.Yu. [Restoration of historical sites using modern dry building mixes]. *Vestnik grajdanskih injenerov* [Bulletin of Civil Engineers], 2011, no. 1, pp. 98–103. (in Russ.)

6. Ventolà L., Vendrell M., Giraldez P., Merino L. Traditional organic additives improve lime mortars: new old materials for restoration and building natural stone fabrics. *Construction and Building Materials*, 2011, vol. 25 (8), pp. 3313–3318.
7. Grilo J., Faria P., Veiga R., Silva A.S., Silva V., Velosa A. New natural hydraulic lime mortars – physical and microstructural properties in different curing conditions. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 54 (8), pp. 378–384.
8. Maravelaki-Kalaitzaki P., Bakolas A., Karatasios I., Kilikoglou V. Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cement and Concrete Research*, 2005, vol. 35 (8), pp. 1577–1586.
9. Shelikhov N.S., Rakhimov R.Z. [Hydraulic lime and roman cement from the mineral raw materials of Tatarstan]. *Stroitel'nyi vestnik Tatarstana* [Construction Bulletin of Tatarstan], 2002, no. 2, pp. 48–53. (in Russ.)
10. Shelikhov N.S., Sagdiev P.P., Rakhimov R.Z., Stoyanov O.V. [Low-ignition hydraulic binders. Problems and solutions]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2014, vol. 17, no. 2, pp. 59–65. (in Russ.)
11. Silva B.A., Ferreira Pinto A.P., Gomes A. Natural hydraulic lime versus cement for blended lime mortars for restoration works. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 94, pp. 346–360.
12. Grist E.R., Paine K.A., Heath A., Norman J., Pinder H. The environmental credentials of hydraulic lime-pozzolan concretes. *Journal of Cleaner Production*, 2015, vol. 93, pp. 26–37.
13. Zeng Q., Li K., Fen-chong T., Dangla P. Determination of cement hydration and pozzolanic reaction extents for flyash cement pastes. *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 27 (1), pp. 560–569.
14. Arizzi A., Cultrone G. Aerial lime-based mortars blended with a pozzolanic additive and different admixtures: a mineralogical, textural and physical-mechanical study. *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 31 (1), pp. 135–143.
15. Xu S.Q., Ma Q.L., Wang J.L. Combined effect of isobutyltriethoxysilane and silica fume on the performance of natural hydraulic lime-based mortars. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 162, pp. 181–191.
16. Xu S., Wang J., Sun Y. Effect of water binder ratio on the early hydration of natural hydraulic lime. *Materials and Structures*, 2015, vol. 48 (10), pp. 3431–3441.

Информация об авторе:

Логанина Валентина Ивановна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление качеством», Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия; loganin@mail.ru

Information about the author:

Valentina I. Loganina, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Quality Management and Technology of Construction Production, Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia, loganin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29.01.2025, принята к публикации 10.02.2025.

The article was submitted 29.01.2025, approved after reviewing 10.02.2025.