УДК 691.554

© Ю. В. Пухаренко, д-р техн. наук, профессор

© Т. В. Харитоновна, аспирант

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: tsik@spbgasu.ru tani2005@list.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-4-121-125

© Y. V. Pukharens, Dr. Sci. Tech., Professor

© T. V. Kharitonova, post-graduate student

(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: tsik@spbgasu.ru tani2005@list.ru

ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ КАРБОНАТНЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ СУХИХ СМЕСЕЙ ДЛЯ РЕСТАВРАЦИИ

EVALUATION OF USAGE OF CARBONATE AGGREGATES IN THE DRY MIXTURES FOR RESTORATION

Применение в качестве заполнителя растворов карбонатных горных пород технически и экономически обосновано при производстве реставрационных сухих смесей на известковом вяжущем. В работе рассмотрено влияние замены части кварцевого песка в известковом растворе отсевом дробления известняка и доломитовой мукой на прочность при сжатии, адгезию к керамическому кирпичу и паропроницаемость. Предложена матрица планирования экспериментов, позволяющая повысить информативность результатов исследований, сократить количество опытов при поиске оптимальных решений. Показана эффективность замены кварцевого заполнителя отходами добычи карбонатных горных пород при производстве сухих смесей для реставрации.

Ключевые слова: воздушная известь, известняковый заполнитель, доломит, реставрационная сухая смесь.

The usage of carbonate rocks as mortar aggregates has been technically and economically substantiated in the production of lime dry mixtures for restoration. The paper considers the effect of replacing a part of quartz sand in lime mortar by the removal of limestone sand and dolomite filler on the compressive strength, adhesion to ceramic brick and vapor permeability. A matrix of planning experiments is proposed. This matrix allows increasing the information content of the research results and reducing the number of experiments in the search for optimal solutions. The efficiency of replacement of quartz aggregate by the carbonate rocks waste in the production of dry mixtures for restoration is shown.

Keywords: lime, limestone aggregate, dolomite, dry mix for restoration.

Основным вяжущим веществом в составе реставрационных растворов является воздушная известь. Это обусловлено соблюдением принципа историзма в отношении данных материалов, а также конструктивными особенностями памятников архитектуры — объектов культурного наследия. Высокая деформативность и паропроницаемость составов на основе извести, а также их хорошая адгезия к керамическому кирпичу обуславливают эксплуатационную надежность штукатурных и кладочных растворов при возведении и отделке массивных конструкций из искусственного и природного камня.

Современная практика реставрации характеризуется активным развитием направления сухих смесей, производимых в соответствии с тре-

бованиями, предъявляемыми к реставрационным материалам, — аутентичности вещественного состава и физико-механических свойств. Следует отметить, что, помимо необходимости обеспечения принципов реставрации, при производстве сухих смесей также важно учитывать экономическую составляющую (минимизацию себестоимости продукции) и высокую актуальность повышения долговечности материалов [1, 2].

В условиях изменившихся сырьевой базы и технологий производства в индустрии строительных материалов основной задачей при проектировании составов сухих смесей для реставрации является выбор компонентов, удовлетворяющих следующим требованиям: низкая

стоимость, круглогодичная доступность, техническая и историческая обоснованность применения в составе реставрационных растворов.

Исходя из вышесказанного, в первую очередь представляется целесообразным рассмотреть в качестве заполнителя известковых сухих смесей для реставрации отсева дробления карбонатных горных пород, известняка и доломита.

Разрабатываемые месторождения известняков и доломитов широко распространены на территории Российской Федерации и, в частности, в Северо-Западном регионе. Отсевы дробления мало востребованы, по сути представляют собой отходы промышленности, поэтому доломит и известняк можно отнести к доступному и недорогому потенциальному сырью. Тем не менее, для технологии сухих смесей требуются сушка и классификация, но данные операции также необходимы и для традиционного заполнителя — кварцевого песка.

С точки зрения соблюдения принципа историзма в отношении вещественного состава использование карбонатных пород в составе заполнителя строительных растворов отмечалось рядом исследователей [3–6]. Особенно характерно наличие карбонатных пород в составах исторических растворов для таких регионов и городов, как Ингушетия, Смоленск, Серпухов, Вязьма и др.

Обоснованность широкого применения карбонатных заполнителей в составе известковых сухих смесей заключается в сродстве матричной части и зерен заполнителя, меньшей плотности карбонатных пород в сравнении с кварцевым песком (что сопровождается снижением расхода смеси, например, на оштукатуривание одного квадратного метра поверхности). Исторические кладочные и штукатурные смеси, как правило, характеризуются маркой по прочности от М25 до М75. В этой связи использование известняка не ограничивается его меньшей прочностью в сравнении с кварцевым песком.

Таким образом, применение в качестве заполнителя реставрационных сухих смесей отсева дробления карбонатных горных пород представляется обоснованным как с исторической, так и технико-экономической стороны.

Цель настоящих исследований заключалась в оценке влияния на свойства известковой

сухой смеси известняка и доломита, вводимых взамен части кварцевого песка. В ходе исследований применялась гидратная известь-пушонка компании «Росизвесть» (г. Россошь), известняк Угловского месторождения фракции 0–2,5, песок кварцево-полевошпатовый, доломитовая мука Кикеринского карьера (размере зерен 0,01–0,1 мм).

Количественная оценка влияния замены кварцевого песка карбонатными заполнителями осуществлялась на основе трехуровневого двухфакторного эксперимента. Уровни варьирования факторов при проведении экспериментов представлены в табл. 1.

Особенностью настоящих исследований является разработанная матрица планирования полнофакторного эксперимента, которая позволяет не только получить уравнения регрессии, но и дифференцированно оценить влияния отдельных факторов на каждом уровне варьирования. Тем самым достигается большая информативность полученных результатов при минимальном количестве выполненных экспериментов (табл. 2).

В качестве функций отклика определялись предел прочности при сжатии ($R_{сж}$, МПа), адгезия к кирпичу (Ад, МПа), а также паропроницаемость (Пр, мг/м²·ч·Па). Кроме этого, оценивалось изменение подвижности растворных смесей при погружении конуса, так как все замесы проводились при постоянном водотвердом отношении, равном В/Т=19 %. Расход известии-пушонки во всех составах составлял 15 % от массы смеси.

Использование карбонатных заполнителей вызывает пропорциональное снижение подвижности составов. Полная замена кварцевого песка смесью известняка (80 %) и доломита (20 %) сопровождается уменьшением величины погружения конуса с 8,5 мм до 1,5 см. Замена песка на 20 % только доломитом снижает подвижность на 2,5 см, а смесь с 60 % кварцевого песка и 40 % известняка характеризуется уменьшением подвижности на 1,8 см (рис. 1). Таким образом, применение доломитовой муки связано с более интенсивным снижением подвижности.

По мере снижения доли кварцевого песка в составе заполнителя наблюдается рост прочности известкового раствора. Так, при введении 10 % доломита и 80 % известняка взамен квар-

Таблица 1

Уровни планирования эксперимента

Наименование факторов	Коды	Уровни варьирования			Шаг варьирования
		-1	0	1	
Расход известняка, % от массы заполнителя	X_1	0	40	80	40
Расход доломита, % от массы заполнителя	X_2	0	10	20	10

Таблица 2

Матрица планирования полнофакторного эксперимента типа 3²

№ п/п	X_1	X_2	№ п/п	X_1	X_2	№ п/п	X_1	X_2
График при X_2 на нижнем уровне			График при X_2 на среднем уровне			График при X_2 на верхнем уровне		
1	-1	-1	7(5)	-1	0	13(6)	-1	1
2	0	-1	8	0	0	14(12)	0	1
3	1	-1	9	1	0	15	1	1
График при X_1 на нижнем уровне			График при X_1 на среднем уровне			График при X_1 на верхнем уровне		
4(1)	-1	-1	10(2)	0	-1	16(3)	1	-1
5	-1	0	11(8)	0	0	17(9)	1	0
6	-1	1	12	0	1	18(15)	1	1

Примечание. В скобках указаны повторяющиеся эксперименты для повышения корректности определения дисперсии. Количество параллельных опытов — 6.

Рис. 1. Влияние расхода известняка и доломита на подвижность растворов смесей

Рис. 2. Влияние расхода известняка и доломита на предел прочности при сжатии раствора

цевого песка прочность увеличивается в 2 раза. Такой же результат может быть достигнут при ведении 20 % доломита и 40 % известняка взамен песка (рис. 2).

Определение адгезии к кирпичу производилось с применением полнотелого керамического кирпича марки 125 с водопоглощением по массе 10 %. Поверхность кирпича предварительно шлифовалась, а сам кирпич перед нанесением составов выдерживался в воде до полного насыщения.

Повышение доли карбонатных пород в составе заполнителя положительно сказывается на прочности сцепления с основанием (рис. 3). Наибольший прирост адгезии имеет место при максимальном содержании известняка (80 % от доли заполнителя). В составах без доломита увеличение адгезии наблюдается в 3 раза, в составах с 10 % доломита — в 2 раза, а в составах с 20 % доломита — в 1,7 раза.

Необходимо отметить, что при значениях прочности сцепления с основанием до 0,06 МПа

Рис. 3. Влияние расхода известняка и доломита на адгезию раствора к керамическому кирпичу

характер отрыва материала от кирпича адгезионный, а при больших значениях прочности сцепления — когезионный.

В отношении паропроницаемости исследованных составов не удалось выявить однозначные зависимости. Можно утверждать, что не прослеживается влияние вида заполнителя на паропроницаемость растворов, а отмеченные колебания численных значений связаны с погрешностью метода определения (рис. 4). Данный вывод подтверждается высокой дисперсией значений в каждой серии экспериментов.

Для демонстрации преимуществ предлагаемой матрицы планирования экспериментов для поиска наилучших решений рассмотрим уравнение регрессии в отношении предела прочности при сжатии исследованных составов. С учетом проверки значимости коэффициентов уравнение регрессии полнофакторного эксперимента

Рис. 4. Влияние расхода известняка и доломита на паропроницаемость раствора

типа 3^2 для оценки предела прочности имеет следующий вид:

$$R_{сж} = 0,82 + 0,2 \cdot X_1 + 0,16 \cdot X_2.$$

Анализ уравнения регрессии показывает, что прочность образцов возрастает с увеличением доли как известняка, так и доломита в составе заполнителя. Влияние факторов на прочность, судя по коэффициентам, практически одинаково. Максимум прочности достигается при значениях факторов, соответствующих верхнему уровню. Близкие выводы были получены ранее при анализе графиков зависимостей прочности при фиксированном значении одного фактора и вариации другого (см. рис. 2). Такой графический анализ можно использовать при поиске рациональных составов, сокращая затраты на эксперименты за счет поэтапного проведения исследования. В случае раннего выявления отсутствия требуемого результата поиски в намеченном направлении можно просто прекратить, не проводя эксперимент в полном объеме.

Кроме этого, можно отметить еще одно преимущество использования графического анализа результатов эксперимента. При построении математической модели в виде уравнения регрессии происходит сглаживание результатов — модель не совсем точно повторяет эксперимент. Практически невозможно воспроизвести то семейство зависимостей, которые получены экспериментально. В частности, в рассматриваемом случае из результатов эксперимента следует, что максимум прочности на самом деле получен при значениях факторов, когда один из них находится на верхнем уровне, а второй — на основном (нулевом).

Таким образом, применение в качестве заполнителя известковых растворов (сухих смесей) известняка и доломита позволяет повысить предел прочности при сжатии в 2 раза, прочность сцепления с керамическим кирпичом в 3 раза. При этом паропроницаемость остается неизменной и характеризуется высокими значениями (около 0,15 мг/м²·ч·Па).

Библиографический список

1. Пухаренко Ю. В., Шангина Н. Н., Сафонова Т. А. Реставрация исторических объектов с применением

современных сухих строительных смесей // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 1 (26). С. 98–103.

2. Pukharens Yu., Shangina N., Kharitonova T., Kharitonov A. Dry mixes for the restoration: basic principles of design MATEC Web of Conferences 106, 03021 (2017).

3. Медникова Е. Ю., Раппопорт П. А., Селиванова Н. Б. Древнерусские строительные растворы // Советская археология. 1983. № 2. С. 152–161.

4. Белановская Е. В., Федорчук Н. М., Грызлов В. С. Рентгеноструктурное исследование кирпича и строительного раствора зданий Кирилло-Белозерского монастыря // Вестник ЧГУ. 2005. № 2. С. 44–48.

5. Гацунаев К. Н. Основные подходы к изучению древнерусских строительных материалов и технологий // Вестник МГСУ. 2011. № 4. С. 111–115.

6. Лобзова Р. В., Носов К. С. Петрографическая характеристика строительных растворов русских крепостей XVI–XVII // Вестник РУДН. Сер.: «Инженерные исследования». 2009. № 1. С. 91–98.

References

1. Pukharens Yu. U., Shangina N. N., Safonova T. A. *Restavratsiya istoricheskikh ob'ektov s primeneniem sovremennykh sukhikh stroitel'nykh smesey* [Historical objects' restoration with the application of dry building

mixtures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2011, no. 1(26), pp. 98–103.

2. Pukharens Yu., Shangina N., Kharitonova T., Kharitonov A. Dry mixes for the restoration: basic principles of design. *MATEC Web of Conferences*, 106, 03021 (2017).

3. Mednikova E. Yu., Rappoport P. A., Selivanova N. B. *Drevnerusskie stroitel'nye rastvory* [Old Russian construction mortars]. *Sovetskaya arkheologiya – Soviet archeology*, 1983, no. 2, pp. 152–161.

4. Belanovskaya E. V., Fedorchuk N. M., Gryzlov V. S. *Rentgenostrukturnoe issledovanie kirpicha i stroitel'nogo rastvora zdaniy Kirillo-Belozerskogo monastyrja* [X-ray diffraction research of brick and construction mortar of buildings of Kirillo-Belozersky Monastery]. *Vestnik ChGU – Bulletin of ChSU*, 2005, no. 2, pp. 44–48.

5. Gatsunaev K. N. *Osnovnye podkhody k izucheniyu drevnerusskikh stroitel'nykh materialov i tekhnologiy* [Main approaches to studying of Old Russian construction materials and technologies]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2011, no. 4, pp. 111–115.

6. Lobzova R. V., Nosov K. S. *Petrograficheskaya kharakteristika stroitel'nykh rastvorov russkikh krepostey XVI-XVII vekov* [Petrographic characteristics of construction mortars of Russian fortresses of XVI–XVII centuries]. *Vestnik RUDN. Ser. Inzhenernye issledovaniya – Bulletin of RUDN. Ser. Engineering research*, 2009. no. 1, pp. 91–98.