



УДК 691.55

Направления обеспечения качества гипсоизвестковых вяжущих при реставрации

Т. Ю. Сафонова

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Сафонова Т. Ю. Направления обеспечения качества гипсоизвестковых вяжущих при реставрации // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 543–552. DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-543-552

Аннотация

Цель: рассмотреть вопросы, связанные со стандартным определением прочностных характеристик воздушного вяжущего и цементного вяжущего. Показать технологическое решение проблемы регулирования прочности камня из воздушного вяжущего с помощью стабилизации ухода в период схватывания и твердения. **Методы:** при проведении исследований использовали ГОСТ 23789-2018 «Вяжущие гипсовые. Методы испытаний». **Результаты:** отличительная особенность реставрационных штукатурных растворов состоит в том, что структурообразование и набор прочности происходят только в воздушно-сухой среде. В итоге наличие утвержденных и применяемых стандартов на изготовление и применение реставрационных штукатурных растворов не гарантирует в полной мере создания надежной и безопасной среды для жизни памятника архитектурного наследия. Установлено, что механические характеристики (пределы прочности на сжатие и изгиб), а также упругие параметры должны быть одинаковыми или меньшими в исторических и реставрационных растворах, чтобы избежать изменений в распределении напряжений. **Практическая значимость:** разработанные с учетом комплексного ухода за твердеющим камнем гипсоизвестковые вяжущие могут иметь широкий спектр применения. Их можно использовать в качестве строительных растворов для консервации архитектурного наследия и при реконструкции современных зданий, самонесущих перегородок, элементов противопожарной защиты или гипсокартонов (в таких местах, где ожидается более высокая механическая нагрузка).

Ключевые слова: контроль качества, гипсовое вяжущее, известь, цементное вяжущее, предел прочности при изгибе, предел прочности при сжатии, твердение

Введение

Ремонтные растворы, применяемые к зданиям архитектурного наследия для сохранения, обслуживания, реставрации и укрепления, должны быть тщательно изучены с точки зрения множества различных проблем совместности. В случае ремонтного вмешательства особенно важно учитывать такой аспект, как состав раствора, который может сильно влиять на явления усадки на этапах схватывания и за-

твердевания, а также должен иметь прочностные характеристики затвердевшего камня, не превышающие аналогичные характеристики реставрируемой поверхности. Актуальность выбора ремонтно-восстановительного раствора (выбор раствора с механическими и физико-химическими характеристиками, близкими к оригинальным), правильный уход во время схватывания и твердения, уход в сложных

экологических условиях — все это факторы, снижающие риски возникновения дефектов на разных уровнях [1].

Известь и гипс были наиболее распространенными растворами в древности и вплоть до начала XIX века. Характеристики известковых растворов зависят от местных природных ресурсов и региональной практики. Гипсовые растворы широко применялись в регионах, богатых месторождениями гипса. Их быстрое схватывание и адгезионная способность были важны для их использования в сводчатых конструкциях [2].

До сих пор гипс использовался почти исключительно во внутренних частях зданий в качестве штукатурных растворов или защитных плит с улучшенной сохранностью тепла, теплоизоляцией, звукопоглощением и огнестойкостью. Это достаточно дешевый и легкодоступный материал. Несмотря на неоспоримые преимущества, более широкое применение гипса во внешних частях зданий остается ограниченным из-за его высокой растворимости во влажной среде (около 2,5 г/л [3]) и относительно низких механических свойств по сравнению с традиционными строительными материалами.

Гипс относится к наиболее экологически чистым строительным материалам. Благодаря более низкому углеродному следу и потреблению энергии гипс может стать устойчивой альтернативой цементу в качестве связующего материала. Материалы с использованием гипса выделяют в 5–6 раз меньше углекислого газа, чем цемент [4].

Использование известки в качестве строительного и ремонтного материала в последнее время приобретает все большее значение, поскольку сохранение исторических сооружений стало проблемой. Применение известковых растворов не снижает воздухо-

проницаемость существующих конструкций. Известковые растворы обычно вступают в реакцию с присутствующим в атмосфере углекислым газом. Однако время реакции достаточно велико, поэтому возникают вопросы поиска метода ускорения процесса поглощения углекислого газа [5].

Исторический центр Санкт-Петербурга, широко известный во всем мире как Северная Венеция и являющийся объектом Всемирного наследия, возведен с использованием строительных растворов на основе гипса. Для устройства штукатурной отделки исторических зданий, как фасадной, так и интерьерной, широко применялись и гипсоизвестковые составы [6].

Учет качества реставрационных материалов является важным аспектом сохранения архитектурного наследия, деградация которого ускорилась из-за загрязнения окружающей среды, а также природных факторов, таких как температурные циклы, осадки, ветер, иные метеорологические переменные.

Сравнение данных по методам определения прочностных характеристик камня из вяжущего трех типов

Для каждого типа вяжущего существует стандарт, в котором изложены и методы испытаний (МИ). Определение предела прочности при изгибе (ППИ) и предела прочности при сжатии (ППС), начиная с момента приготовления смеси нормальной консистенции и завершая представлением окончательного результата (для гипсового и цементного вяжущих, а также известки строительной), изложено в табл. 1 (цветом выделены различия методов, сроков, температуры приготовления проб, условий хранения образцов до проведения испытаний и прочих факторов).

ТАБЛИЦА 1. Методы определения ППИ и ППС образцов, приготовленных из гипсового вяжущего, строительной извести, цемента

1	2	3
ГОСТ 23789-2018. Вяжущие гипсовые. МИ	ГОСТ 22688-2018. Известь строительная. МИ (только для гидравлической извести)	ГОСТ 310.4-81. Цементы. Методы определения ППИ и ППС*
* ППИ и ППС определяют испытанием образцов (из смеси нормальной консистенции — НК) призматической формы 160 × 40 × 40 мм		
Подготовка проб		
Вяжущее (1–1,6 кг) добавляют в воду, взятую в количестве, необходимом для приготовления смеси НК, перемешивают, заливают в призматическую форму, уплотняют ударами формы о поверхность стола	Известь и песок смешивают в соотношении 1:3. Добавляют воду (0,5 от общего объема). Смесь остужают до 25–30 °С, добавляют остальную воду для получения раствора с распылом конуса 110–115 мм, заливают в призматическую форму	1,5 кг песка, 0,5 кг цемента смешивают. Добавляют 0,2 воды, необходимой для раствора НК. Форму-конус устанавливают на встряхивающий столик. Раствор заливают поэтапно в два слоя. Каждый слой штыкуется. Далее форму-конус снимают, цементный же конус встряхивают 30 раз, а его основание измеряют для фиксации величины распыла НК (106–115 мм). Призматическую форму на включенном встряхивающем столике заполняют порционно в течение 5 минут
Условия ухода за образцами		
Образцы из гипсового вяжущего по завершении схватывания извлекают из формы, выдерживают при температуре 23 °С и относительной влажности 50%	Образцы выдерживают в емкости с гидравлическим затвором над водой 5–6 суток, далее — 21 сутки в воде	Образцы, оставляя их в форме, выдерживают в емкости с гидравлическим затвором 24 часа. Затем достают из емкости, извлекают из форм и помещают в емкость с водой при температуре 20 °С. Вода покрывает образцы. Ее заменяют в бассейне раз в две недели. После 28 суток твердения образцы извлекают из ванной. Испытания проводят максимум за час
Возраст образцов после контакта с водой при проведении испытания		
2 часа	28 суток	28 суток
Скорость нарастания нагрузки при определении ППИ		
(50 ± 10) Н/с	(0,05 ± 0,01) кН/с	
Определение ППИ		
Среднее арифметическое значение результатов испытания трех образцов	Среднее арифметическое значение двух наибольших результатов испытания трех образцов	
Скорость нарастания нагрузки при определении ППС		
(50 ± 10) Н/с	(2,0 ± 0,5) МПа/с	
Определение ППС		
Среднее арифметическое результатов шести испытаний без наибольшего и наименьшего результатов	Среднее арифметическое значение четырех наибольших результатов испытания шести образцов	

Материалы и методы

В качестве сырья, используемого в эксперименте, присутствуют гидратная известь, гипсовое вяжущее и суперпластификатор. Известь строительная гидратная представ-

ляет собой порошок, основной минеральной фазой которого является $\text{Ca}(\text{OH})_2$ производства ОАО «Угловский известковый комбинат». Гипс марки Г-6Б — ООО «Майкопгипсстрой». Использована добавка-пластификатор

C-3 (ООО «СУПЕРПЛАСТ»)), которая была разведена в воде затворения в % по массе относительно количества вяжущего. Добавка успешно применяется в строительных работах, сырьем для нее является конденсат нафталинформальдегидной смолы. Пластификатор снижает потребность в воде, имеет хорошую совместимость с различными цементом [7].

Оценено влияние процентного содержания извести на прочностные характеристики камня из гипсового вяжущего нормально-влажного твердения. ППИ и ППС образцов определены способами, рекомендованными ГОСТ 23789-2018, в связи с тем, что содержание гипса в гипсоизвестковом вяжущем составляет 76–100 мас.%.

В воду затворения (при водотвердом отношении (В/Т), равном 0,56) вводили смешанное вяжущее, перемешивали, разливали в призматические формы. Были приготовлены 21 образец из вяжущего с содержанием извести от 0 до 24 мас.% со временем отверждения 28 суток и девять образцов из вяжущего с содержанием извести 12 мас.% со временем отверждения, равным 7, 14 и 21 суткам. Образцы по достижении заданного возраста в камере нормально-влажного твердения (относительная влажность воздуха 95%, температура 20 °С) выдерживали до постоянной массы в сушильном шкафу (температура 65 °С).

ППИ определен как среднее арифметическое значение двух наибольших результатов испытания из трех образцов. Половинки образцов-призм испытаны на сжатие на прессе ИП-100М. ППС отдельного образца вычислен как частное от деления величины разрушающей нагрузки на рабочую площадь пластины (на 25 см²).

Результаты и обсуждение

При проведении эксперимента определено, что с возрастанием доли извести в смешанном вяжущем до 24 мас.% (для камня возраста 28 суток):

- содержание C-3 в смеси возрастает;
- ППИ снижается на 81% по сравнению с контрольным образцом (гипсовый камень);
- ППС снижается на 57%.

ППС гипсового камня превышает ППИ в 3,2 раза. При содержании извести в смешанном вяжущем более 12 мас.% разница в аналогичных показателях составляет 7,5 раза и более. От содержания извести просматривается зависимость: **меньше — лучше**.

Полученные данные представлены на рис. 1.

Аналогичные данные представлены на рис. 2 для камня возраста 2 часа из гипсового вяжущего и на рис. 3 для камня возраста 28 суток из вяжущего нормально-твердеющего цементного.

От марки гипсового вяжущего и цементного вяжущего прослеживается обратная зависимость: марка **выше** — разница в показателях **больше**. ППС камня из гипсового вяжущего марки Г-25 превышает ППИ в 3,1 раза, аналогичный показатель для вяжущего марки Г-2 составляет 1,7 раза. ППС камня из цементного вяжущего марки М600 превышает ППИ в 8,2 раза, аналогичный показатель для вяжущего марки М300 составляет 5,1 раза.

Представлен анализ зависимостей ППИ от ППС камня, полученного при твердении вяжущего трех типов (гипсоизвесткового, гипсового и цементного), на основании экспериментальных данных автора и значений, представленных в нормативных документах.

Авторами [8] разработан торкрет-бетон с увеличенным (35 мас.%) содержанием

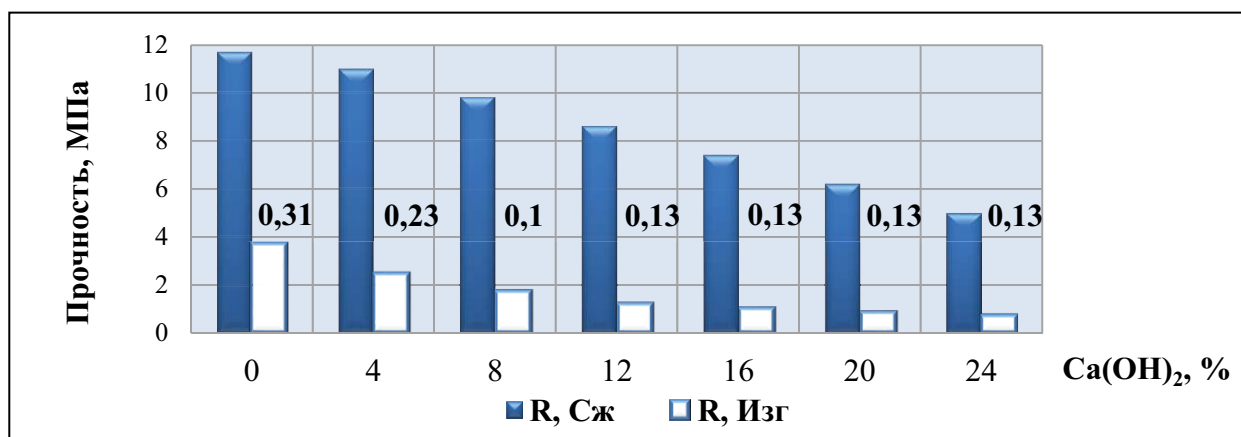


Рис. 1. Влияние увеличения количества извести в смеси вяжущего на прочность гипсоизвесткового камня возраста 28 суток

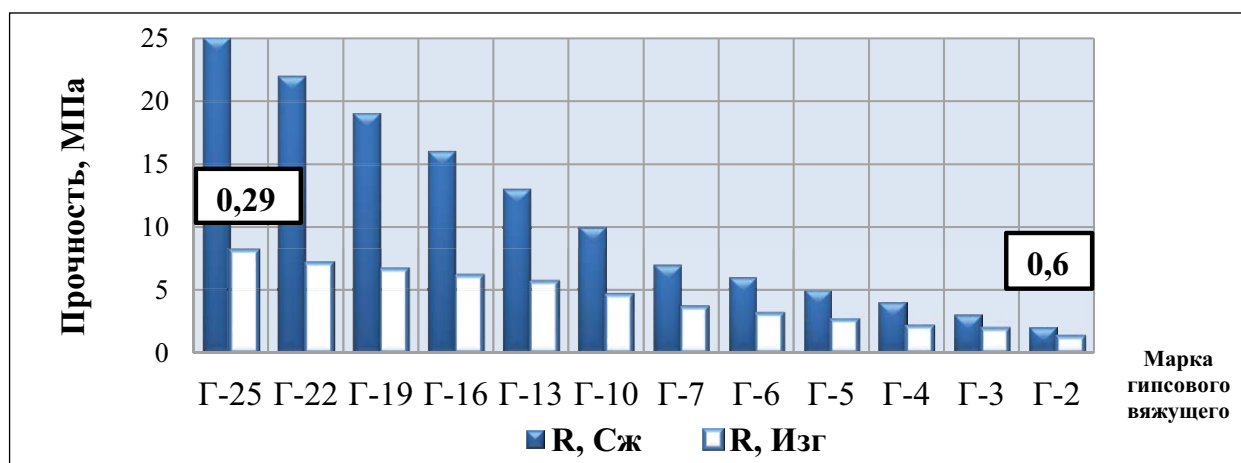


Рис. 2. Марка гипсового вяжущего в зависимости от показателей прочности камня возраста 2 часа, согласно ГОСТ 23789-2018

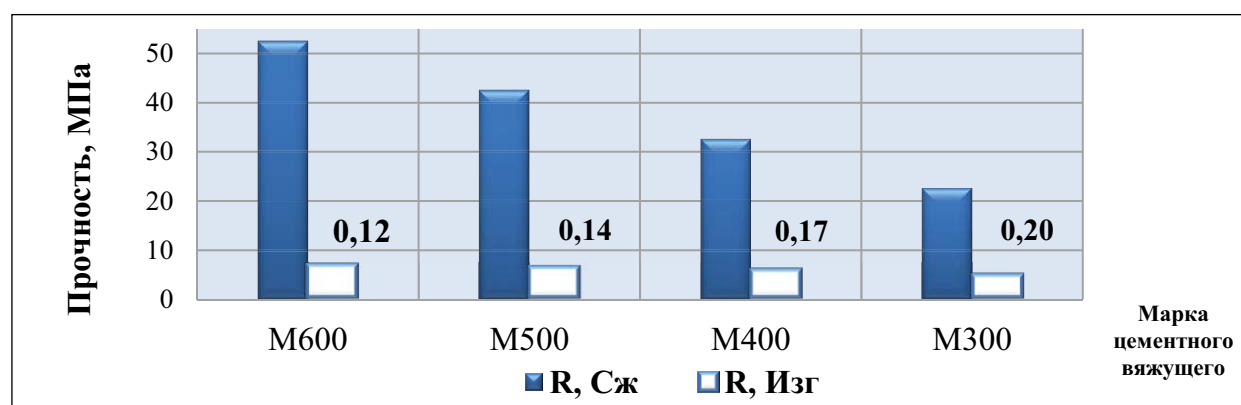


Рис. 3. Марка нормально-твердеющего цементного вяжущего в зависимости от показателей прочности камня возраста 28 суток

алюмосиликатной составляющей (АСС), полученной из золошлаковых смесей ГРЭС, в полиминеральном вяжущем. По результатам испытаний прочность торкрет-бетона на композиционном вяжущем имеет тенденцию к возрастанию с увеличением содержания АСС. Более того, отношение ППИ к ППС позволяет предположить, что увеличение АСС и снижение В/Т за счет применения С-3 улучшает характеристики раствора на композиционном вяжущем. Отношение ППИ к ППС в разном возрасте для разработанного состава превосходит значения контрольного состава. Показатели прочности торкрет-бетона возраста 28 суток представлены на рис. 4.

Отношение ППИ к ППС цементных бетонов рассмотрено в работе [9]. Создана матрица данных из прочностных показателей бездобавочных бетонов и бетонов, содержащих минеральные добавки. Сделан вывод, что в утвержденных стандартах присутствует ряд вопросов по согласованию соотношения классов бетона по ППИ и ППС.

Анализ литературных источников не выявил наличия теории, выражающей зависимости ППИ от ППС камня из воздушного вяжущего. С учетом того что прочность реставрационного состава не должна превы-

шать прочность реставрируемого материала, прочностные прогнозируемые характеристики камня из реставрационного раствора являются показателем качества гипсоизвесткового вяжущего.

Скорость нарастания прочности камня с увеличением количества извести в смеси вяжущего снижается, так как процесс уплотнения коллоидных систем гидроксида кальция — процесс, требующий длительного времени, искусственной карбонизации или присутствия активной добавки. Результат испытаний образцов разного возраста из гипсоизвесткового вяжущего с содержанием извести 12 мас.% представлен на рис. 5. Зеленым маркером отмечено значение ППС камня возраста 2 часа из гипсового вяжущего.

Было замечено [10], что небольшие добавки негашеной извести ухудшают механические и микроструктурные свойства смешанного воздушного вяжущего, приводят к снижению прочности камня (рис. 6). Но совместимые консервационные материалы можно легко разработать так, чтобы они соответствовали свойствам оригинальных исторических штукатурок. Условия ухода за образцами по достижении ими предельного возраста имеют ряд отличий от требований

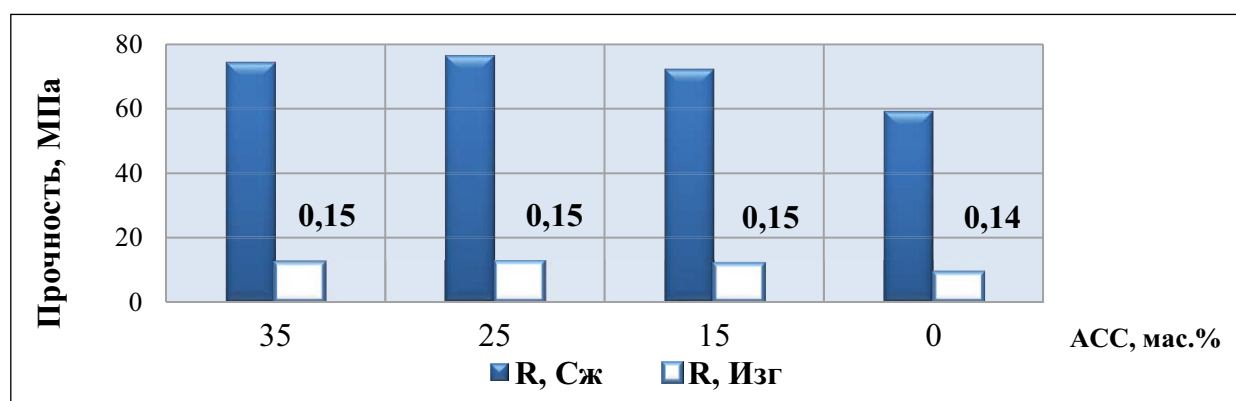


Рис. 4. Влияние увеличения количества АСС в композиционном вяжущем на прочность торкрет-бетона возраста 28 суток

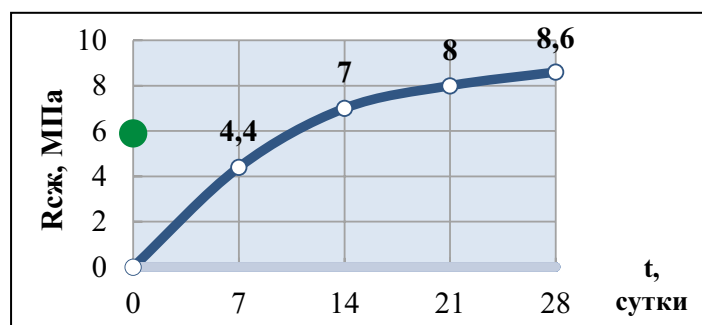


Рис. 5. Изменение ППС камня из гипсоизвесткового вяжущего

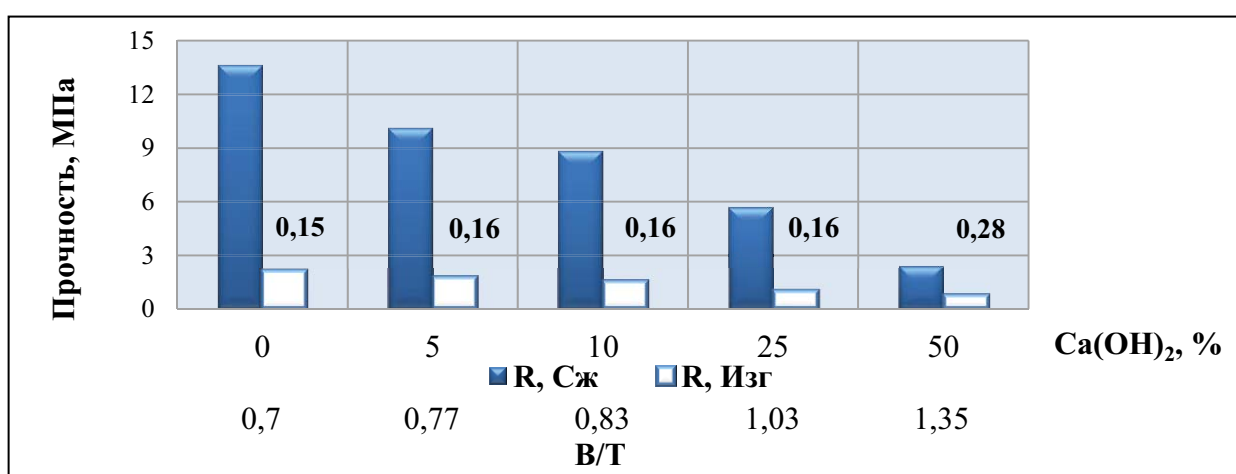


Рис. 6. Влияние увеличения количества извести в смеси вяжущего на прочность гипсоизвесткового камня возраста 28 суток [10]

ГОСТ 23789-2018. Достижение равной подвижности смесей скорректировано изменением В/Т, что показано на рис. 6.

ППС камня из гипсового вяжущего превышает ППИ в 6,8 раза. При содержании извести в гипсоизвестковом вяжущем 50 мас.% разница в аналогичных показателях составляет 3,5 раза. От содержания извести просматривается зависимость: больше — лучше, что противоречит данным нашего исследования (меньше — лучше). Выявленный аспект можно пояснить следующими факторами:

— присутствие пластификатора для регулирования В/Т смесей (в настоящем исследовании);

— различия в химическом составе гипсоизвесткового вяжущего;

— различия в подготовке проб гипсоизвесткового вяжущего;

— условия ухода за образцами в период набора прочности.

Исследования [11] показали, что небольшая добавка воздушной или гидравлической извести (15 мас.%) приводит к повышению прочности гипсового камня, что представлено на рис. 7. Приготовлены смеси **разной** подвижности с **одинаковым** В/Т, равным 0,5:

1 — из гипсового вяжущего;

2 — из гипсового вяжущего и воздушной извести;

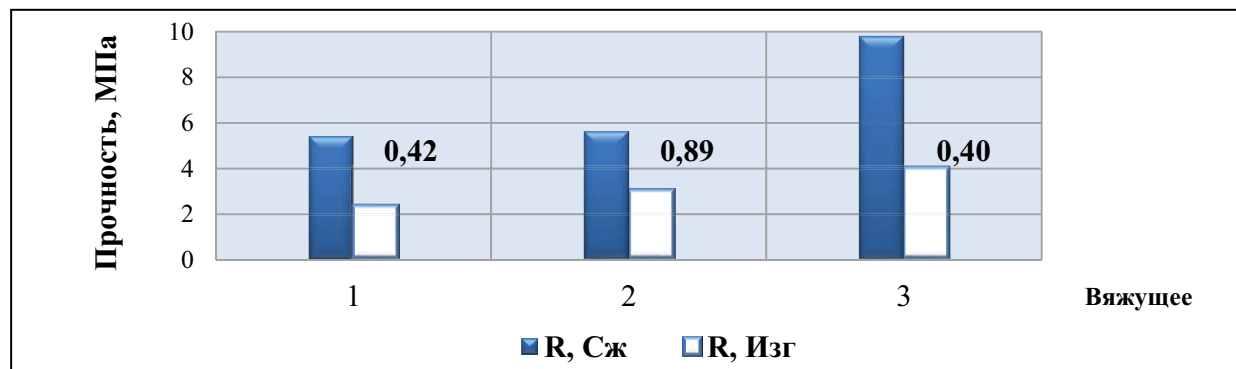


Рис. 7. Влияние добавки извести на прочность гипсового камня возраста 28 суток [11]

3 — из гипсового вяжущего и извести гидравлической.

Условия ухода за образцами по достижении ими предельного возраста имеют ряд отличий от требований ГОСТ 23789-2018.

В этом исследовании не рассматривается зависимость прочности при изгибе от прочности при сжатии, так как выявлен ряд аспектов, несогласованных со стандартами на гипсовое вяжущее. Но можно отметить, что отношение рассматриваемого показателя существенно отличается от данных, полученных автором работы.

Выводы

Контроль качества гипсоизвесткового вяжущего, предназначенного для реставрационных работ, — это соответствие (аутентичность) физико-механических свойств исторического штукатурного раствора и раствора реставрационного.

К проектированию реставрационных растворов следует подходить с консервативной точки зрения, что считается необходимым для сохранения целостности архитектурного наследия и продвижения действительно устойчивых мер. Для замены поврежденных внутренних покрытий стен и потолков следует соблюдать общие

правила совместимости применяемых компонентов, а именно:

1) механические характеристики — ППИ и ППС, а также упругие параметры должны быть одинаковыми или меньшими, чтобы избежать изменений в распределении напряжений;

2) составы реставрационных штукатурных растворов не должны блокировать проход воды или водяного пара, циркулирующих внутри этих компонентов.

Библиографический список

1. Субботин О.С. Особенности использования строительных материалов в реставрации архитектурно-градостроительного наследия // Строительные материалы и изделия. 2019. Т. 2. № 3. С. 85–89. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-3-85-89.
2. Vitti P. Lime and Gypsum Mortars in Historic Construction // Encyclopedia of Archaeology (Second Edition). 2024. Vol. 2B. P. 531–543. DOI: 10.1016/B978-0-323-90799-6.00064-1.
3. Conversion of calcium sulfate dihydrate into calcium phosphates as a route for conservation of gypsum stuccoes and sulfated marble / E. Sassoni [et al.] // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 170. P. 290–301. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.075.
4. Fort J., Cerny R. Carbon footprint analysis of calcined gypsum production in the Czech Republic //

Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 177. P. 795–802. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.002.

5. Athira V. S., Manohar S. Carbonation of air lime mortars under natural and accelerated conditions — a systematic review // *Materials today: Proceedings*. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.082.

6. Рахимов Р.З. Гипс в строительстве с древних веков до современности // *Academia. Архитектура и строительство*. 2021. № 4. С. 120–124. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-4-120-124.

7. Барабанщиков Ю.Г., Комаринский М.В. Суперпластификатор С-3 и его влияние на технологические свойства бетонных смесей // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2014. № 6 (21). С. 58–69.

8. Панарин И.И., Федюк Р.С., Меркулов Д.С. Усиление конструкций подземных сооружений торкрет-бетоном // *Строительные материалы и изделия*. 2022. Т. 5. № 6. С. 5–18. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-6-5-18.

9. Несветаев Г.В., Кузьменко Т.Г. О соотношении пределов прочности цементных бетонов на рас-

тяжение при изгибе и сжатии // *Инженерный вестник Дона*. 2023. № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8605.

10. The effect of lime addition on weathering resistance and mechanical strength of gypsum plasters and renders / K. Elert [et al.] // *Cement and Concrete Composites*. 2023. Vol. 139. P. 105012. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105012.

11. Characterization and chromatic evaluation of gypsum-based pastes for construction and heritage restoration / M. Paz Saez-Perez [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 307. P. 124981. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124981.

Дата поступления: 13.06.2024

Решение о публикации: 10.08.2024

Контактная информация:

САФОНОВА Татьяна Юрьевна — старший преподаватель; tusafonova@list.ru

Directions for ensuring the quality of gypsum-lime binders during restoration

T. Yu. Safonova

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint-Petersburg, 190031, Russia

For citation: *Safonova T. Yu. Directions for ensuring the quality of gypsum-lime binders during restoration // Proceedings of Petersburg Transport University*. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 543–552. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2024-03-543-552

Abstract

Purpose: to consider issues related to the standard definition of the strength characteristics of an air binder and a cement binder. To show a technological solution to the problem of regulating the strength of an air binder stone by stabilizing care during setting and hardening. **Methods:** during the research, GOST 23789-2018 “Gypsum binders. Test methods”. **Results:** a distinctive feature of restoration plaster solutions is that structure formation and strength gain occur only in an air-dry environment. As a result, the availability of approved and applied standards for the manufacture and use of restoration plaster solutions does not fully guarantee the creation of a reliable and safe environment for the life of an architectural heritage monument. It has been established that the mechanical characteristics (compressive and bending strength limits), as well as elastic parameters should be the same or lower in historical and restoration solutions

in order to avoid changes in stress distribution. **Practical significance:** developed taking into account the comprehensive care of hardening stone, gypsum-lime binders can have a wide range of applications. They can be used as mortars for the preservation of architectural heritage and in the reconstruction of modern buildings, self-supporting partitions, fire protection elements or drywall (in places where a higher mechanical load is expected).

Keywords: quality control, gypsum binder, lime, cement binder, flexural strength, compressive strength, hardening

References

1. Subbotin O. S. Osobennosti ispol'zovaniya stroitel'ny'x materialov v restavracii arhitekturno-gradostroitel'nogo naslediya // *Stroitel'ny'e materialy' i izdeliya*. 2019. T. 2. № 3. S. 85–89. DOI: 10.34031/2618-7183-2019-2-3-85-89. (In Russian)
2. Vitti P. Lime and Gypsum Mortars in Historic Construction // *Encyclopedia of Archaeology* (Second Edition). 2024. Vol. 2B. P. 531–543. DOI: 10.1016/B978-0-323-90799-6.00064-1.
3. Conversion of calcium sulfate dihydrate into calcium phosphates as a route for conservation of gypsum stuccoes and sulfated marble / E. Sassoni [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 170. P. 290–301. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.075.
4. Fort J., Cerny R. Carbon footprint analysis of calcined gypsum production in the Czech Republic // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 177. P. 795–802. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.002.
5. Athira V. S., Manohar S. Carbonation of air lime mortars under natural and accelerated conditions — a systematic review // *Materials today: Proceedings*. 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.082.
6. Raximov R. Z. Gips v stroitel'stve s drevnix vekov do sovremennosti // *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo*. 2021. № 4. S. 120–124. DOI: 10.22337/2077-9038-2021-4-120-124. (In Russian)
7. Barabanshnikov Yu. G., Komarinskij M. V. Superplastifikator S-3 i ego vliyanie na texnologicheskie svoystva betonny'x smesey // *Stroitel'stvo unikal'ny'x zdaniy i sooruzhenij*. 2014. № 6 (21). S. 58–69. (In Russian)
8. Panarin I. I., Fedjuk R. S., Merkulov D. S. Usilenie konstrukcij podzemny'x sooruzhenij torkret-betonom // *Stroitel'ny'e materialy' i izdeliya*. 2022. T. 5. № 6. S. 5–18. DOI: 10.58224/2618-7183-2022-5-6-5-18. (In Russian)
9. Nesvetaev G. V., Kuz'menko T. G. O sootnoshenii predelov prochnosti cementny'x betonov na raspyazhenie pri izgibe i szhatii // *Inzhenerny'j vestnik Dona*. 2023. № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2023/8605. (In Russian)
10. The effect of lime addition on weathering resistance and mechanical strength of gypsum plasters and renders / K. Elert [et al.] // *Cement and Concrete Composites*. 2023. Vol. 139. P. 105012. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105012.
11. Characterization and chromatic evaluation of gypsum-based pastes for construction and heritage restoration / M. Paz Saez-Perez [et al.] // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 307. P. 124981. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124981.

Received: 13.06.2024

Accepted: 10.08.2024

Author's information:

Tatyana Yu. SAFONOVA — Senior Lecturer;
tusafonova@list.ru