

УДК 691.55

Дизайн состава штукатурного раствора для реставрации каменных и кирпичных памятников архитектуры

Т. Ю. Сафонова

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

Для цитирования: Сафонова Т. Ю. Дизайн состава штукатурного раствора для реставрации каменных и кирпичных памятников архитектуры // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 4. — С. 702–711. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-702-711

Аннотация

Цель: Исследовать возможность использования искусственного пуццолана для создания модифицированного гипсоизвесткового раствора, рекомендуемого к реставрации памятников архитектуры. **Методы:** При проведении исследований использовали ГОСТ 125—79 «Вяжущие гипсовые. Технические условия», ГОСТ 23789—79 «Вяжущие гипсовые. Методы испытаний», ГОСТ 10180—90 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам», ГОСТ 24544—81 «Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести», ГОСТ 8735—14 «Песок для строительных работ. Метод испытаний» и ГОСТ 8736—14 «Песок для строительных работ. Технические условия». Установлено экспериментально, что для создания надежной матрицы, совместимой с традиционными материалами исторической кладки, эффективно применение реставрационного состава, включающего метакаолин и доломитовую муку. **Результаты:** Представлен процесс проектирования реставрационного материала для замены поврежденной штукатурки стен и потолков, обсуждаются прочностные характеристики камня различных составов на основе воздушных вяжущих, сделан вывод о необходимости разработки двух типов реставрационных материалов: на семейство известковых штукатурок и на семейство гипсоизвестковых штукатурок. **Практическая значимость:** Полученные результаты могут быть использованы при частичной или полной замене штукатурки, что позволит сохранить архитектурный облик сооружения.

Ключевые слова: Гипс, известь, метакаолин, заполнитель, прочность на сжатие.

Введение

Вопрос совместимости ремонтных растворов с традиционными строительными материалами является приоритетным при реставрации памятников архитектуры. Известно, что как старые, так и новые материалы должны иметь одинаковые характеристики [1]. Культовые сооружения Древнего мира возводились в основном с применением

известкового раствора, что характеризует известь как α -связующее. Большинство строительных растворов памятников архитектуры средневековой Руси (кремлей и крепостей) также является известково-песчаным [2]. Гипсовое вяжущее в классификации воздушных вяжущих можно характеризовать как β -связующее, связующее многоцелевого применения. На Руси использова-

ние гипсового вяжущего подтверждено при возведении Свято-Троицкого монастыря в Муроме. В XVIII–XIX вв. гипс использовался в казенном и дворцовом строительстве в Санкт-Петербурге [3].

Повышение эксплуатационных свойств известковых и гипсоизвестковых покрытий может быть обеспечено путем введения в их рецептуру активных добавок. В качестве добавок, модифицирующих и дополняющих основное вяжущее, используют натуральные и искусственные пуццоланы. Эффективность применения в качестве заполнителя природных карбонатных пород доказана при проектировании составов сухих строительных смесей. Рецептуру смеси для реставрации с заполнителем из доломита и известняка предложили и экономически обосновали ученые Санкт-Петербурга [4]. Согласно исследованиям А. В. Ферронской [5], особенность твердения смешанного воздушного вяжущего с пуццолановой добавкой обусловлена тем, что совместное использование компонентов вяжущего влияет на повышение скорости и степени гидратации добавки. Образующийся при твердении камень включает в себя гидросиликаты кальция, состав которых близок к составу продуктов гидратации портландцемента.

Спектр положительных характеристик метакаолина это: повышение прочности бетонов, обеспечение твердения вяжущего при отрицательных температурах, улучшенное сопротивление бетонов проникновению хлоридов, повышение стойкости бетонов в агрессивных средах, повышение прочности и износостойкости, уменьшение степени эфлюоресценции и

повышение бактерицидных и инсектицидных свойств [6]. Нами предложены: модифицированное метакаолином (в дальнейшем ВМК) гипсоизвестковое вяжущее повышенной прочности и водостойкости [7] и составы известковых строительных растворов с активными минеральными добавками [8]. Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что применение в рецептуре отделочных составов модифицированного вяжущего способствует повышению прочности и водостойкости отделочных покрытий, а также снижению усадки.

В продолжение дальнейших исследований поставлена цель определить физико-механические свойства известкового и гипсового вяжущих, модифицированных ВМК, а также установить возможность приготовления строительных растворов с заданными характеристиками, регулируемые активной добавкой и соотношением «вяжущее — заполнитель».

Материалы

В работе применяли: известь строительную гидратную ГОСТ 9179—77 (Угловский известковый комбинат); гипс марки Г-6Б ООО «Майкопгипсстрой»; кварцевый песок (пос. Лахта, г. Санкт-Петербург) с соотношением фракций 0,63 — 0,315 мм и 0,315 — 0,16 мм соответственно 80 % : 20 %; минеральные добавки: доломитовую муку ОАО «Гипсовик» (Украина), ВМК «Metacem-85» (Индия); суперпластификатор С-3 ООО «Суперпласт» по ТУ 5745-004-43184789-05. Физико-химические характеристики минеральных добавок представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Физико-химические характеристики минеральных добавок

Минеральная добавка	Средний размер частиц, мкм	Удельная поверхность, см ² /г	Пуццолановая активность (мг Ca(OH) ₂ /г)	Содержание оксидов, мас. %				
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	H ₂ O
ВМК	1,5	12 000	1050	56,8	38,4	0,1	0,2	—
Доломитовая мука	15,4	3300	—	1,5	0,91	31,9	16,6	5,8

Влияние ВМК на физико-механические и физико-химические свойства известкового и гипсового вяжущих рассматривалось в Национальном институте прикладных наук (г. Лион, Франция) в конце прошлого столетия [9, 10]. Изменения деформации воздушной усадки камня из известково-доломитового раствора с добавками (метакаолин и микрокремнезем) и без них исследовались в работе [8].

Для придания раствору эластичности, повышения его прочности и износостойкости в известковый раствор добавляют доломитовую муку. Многие российские производители применяют в качестве наполнителя молотый кварцевый песок. Однако ведущие иностранные производители предпочитают фракционированный доломит, кубовидная форма которого способствует повышению адгезии [8].

Авторами [4] доказано, что камень из состава известкового раствора, где в качестве заполнителя выступают молотый известняк и доломит, подходит для реставрационных работ в соответствии с европейскими стандартами и совместим со строительными материалами архитектурного наследия.

Молекулы активного вещества суперпластификаторов первого поколения, к которым относится С-3, снижают прочность межфазовых контактов, однако это компенсируется увеличением абсолютной удельной поверхности новообразований гипсового камня [11]. Таким образом, при введении С-3 в гипсовое вяжущее отмечен диспергирующий эффект.

Методы

Определяли нормальную плотность теста на вискозиметре Сутгарда. Поддерживали водотвердое отношение модифицированного вяжущего постоянным: 0,56 — для гипсового вяжущего; 0,80 — для известкового вяжущего. Вводили в тесто суперпластификатор С-3 в процессе пред-

варительной подготовки вяжущего (рост процентного содержания С-3 в смесях обусловлен высокой удельной поверхностью добавки).

Выдерживали в сушильном шкафу (температура 65 °С) часть образцов (модифицированное гипсовое вяжущее) до достижения постоянной массы. Вторую часть образцов насыщали в воде при температуре 20 °С.

Выдерживали в сушильном шкафу (температура 105 °С) часть образцов (модифицированное известковое вяжущее) в течение суток. Вторую часть образцов насыщали в воде при температуре 20 °С.

Производили испытания на прочность на образцах-балочках размером 40 × 40 × 160 мм в возрасте 28 суток. Устанавливали по экспериментальным данным коэффициент размягчения (показатель водостойкости образцов), исчисляемый как отношение прочности на сжатие образцов, насыщенных водой, к прочности на сжатие сухих образцов.

Определяли прочность образцов составов 1/3 и 1/1 из смесей нормальной водопотребности. В качестве контрольного образца выбран образец из смеси без ВМК (И0). Определяли водотвердое отношение смеси по распылу конуса на встряхивающем столике. Величина распыла составляла 107–115 мм. Образцы-балочки уплотнялись на вибрационном столе в течение 3 минут и хранились в камере нормально-влажного твердения 28 суток.

Результаты и обсуждение

Этапы планирования эксперимента представлены на рис. 1.

На первом этапе были предложены по пять типов известковых и гипсовых смесей с ВМК, мас. %: 0, 10, 20, 30 и 40 соответственно.

При замещении известки ВМК в количестве 10, 20, 30 и 40 мас. % прочность образцов на сжатие повышается на 8, 11, 12 и 14 % по сравнению с

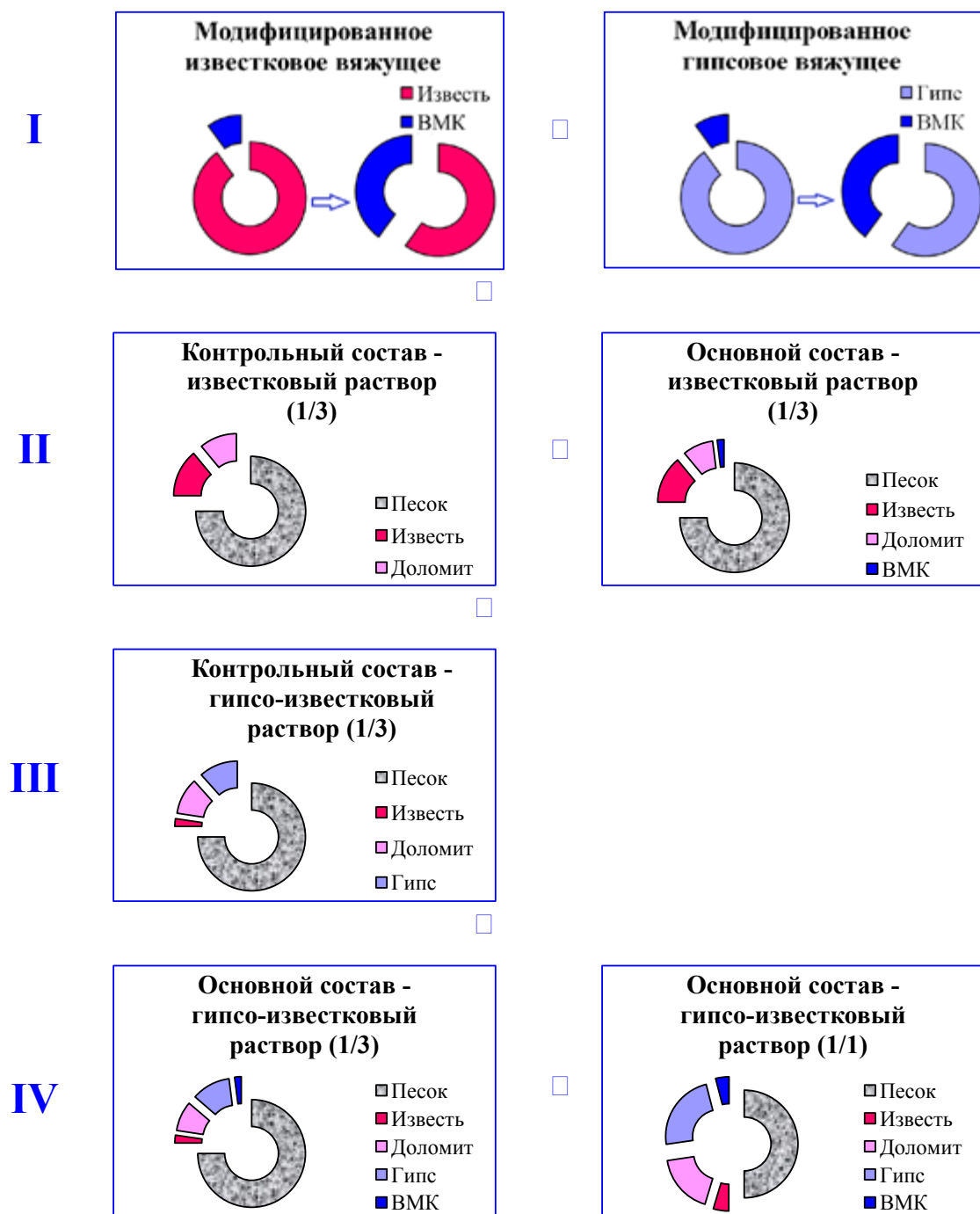


Рис. 1. Этапы планирования эксперимента

контрольным образцом (без ВМК и С-3) соответственно (рис. 2). Прочность на изгиб в тех же смесях уменьшается. Замещение извести ВМК повышает водопотребность смеси. Увеличение дозировки С-3, пропорциональное увеличению

доли ВМК в смеси, позволяет поддерживать водотвердое отношение постоянным. Возрастание доли ВМК в смеси влечет за собой повышение водостойкости камня (рис. 2). Характеризуем известковое вяжущее, модифицированное ВМК [5]:

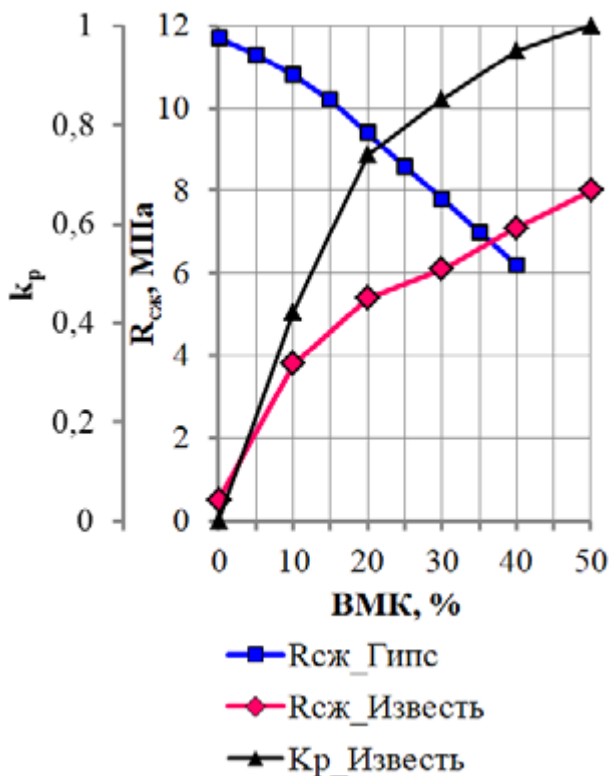


Рис. 2. Зависимости прочности на сжатие камня: а — из гипсового вяжущего от процента замещения гипса ВМК; б — из известкового вяжущего от процента замещения извести ВМК; в — коэффициента размягчения камня из известкового вяжущего от % замещения извести ВМК

при содержании ВМК в смеси менее 20 мас.% — неводостойкое вяжущее;

при содержании ВМК в смеси от 20 до 30 мас.% — вяжущее средней водостойкости;

при содержании ВМК в смеси свыше 30 мас.% — вяжущее повышенной водостойкости.

При замещении гипса ВМК в количестве 10, 20, 30 и 40 мас.% прочность образцов на сжатие понижается на 8, 20, 33 и 47 % по сравнению с контрольным образцом (без метаксаолина и С-3) соответственно (см. рис. 2). Прочность на изгиб в тех же смесях уменьшается на 9, 23, 37 и 51 % по сравнению с контрольным образцом соответственно. Замещение гипса метаксаолином зна-

чительно повышает водопотребность смеси и сокращает сроки схватывания.

На втором этапе определяли прочностные свойства и усадочные деформации камня из известкового строительного раствора на основе вяжущего с ВМК и без него [8].

Для гипсового камня усадка почти незаметна из-за небольшого расширения в раннем возрасте, которое постепенно уменьшается при сушке [5]. На втором этапе нашего эксперимента гипс не присутствует.

Существует прямая зависимость между усадкой, содержанием извести и количеством воды для затворения вяжущего. Испарение этой воды во время сушки создает пустые места в микроструктуре камня, которые напрямую связаны с величиной усадки. Увеличение объема, связанное с образованием кристаллов карбоната кальция из портландита, способствует частичному заживлению этих разрывов, образовавшихся в микроструктуре [12].

Для растворов с воздушной известью и ВМК [13] при сравнении показателя «вяжущее — наполнитель» наибольшая механическая стойкость присуща образцу, полученному при соотношении И : ВМК : П = 1 : 0,5 : 2,5. Увеличение доли наполнителя в растворе приводит к снижению прочностных характеристик. Однако было обнаружено, что эта пропорция дает раствор, весьма подверженный растрескиванию при усадке [14].

Соотношение компонентов опытных составов настоящего эксперимента представлено в табл. 2. Состав ИО, представляющий известково-доломитовую смесь без ВМК, приготовлен на витрувианской пропорции 1/3 (объем пустот просеянного песка составляет около 1/3).

При приготовлении составов И0 и И1 доля извести в известково-доломитовой смеси вяжущего оставалась постоянной. Но соотношение «вяжущее — наполнитель» изменялось. Так,

ТАБЛИЦА 2. Соотношение компонентов опытных составов

Состав	Вяжущее, кг/м ³			Наполнитель (доломитовая мука), кг/м ³	Мелкий заполнитель (песок), кг/м ³
	Известь	Гипс	Метакаолин		
И0	Известковый раствор (состав 1/3)			165	1125
	210	—	—		
И1	Известковый раствор с метакаолином (состав 1/3)			135	1125
	210	—	30		
ГИ0	Гипсоизвестковый раствор (состав 1/3)			135	1125
	35	175	—		
ГИ1	Гипсоизвестковый раствор с метакаолином (состав 1/3)			135	1125
	35	175	30		
ГИ2	Гипсоизвестковый раствор с метакаолином (состав 1/1)			135	375
	35	175	30		

в наших опытах при введении в вяжущее ВМК уменьшалось количество доломитовой муки.

Результаты испытаний камня И1, модифицированного ВМК, показывают увеличение прочности на изгиб в 3,7 и прочности на сжатие в 7,4 раза по сравнению с камнем И0 [8].

На третьем этапе определяли прочностные свойства камня ГИ0 из гипсоизвесткового строительного раствора.

Соотношение компонентов опытного состава принято на основании выводов, сделанных в работе [15]. Авторами доказано, что из трех типов вяжущих смесей с соотношением «гипс — известь», равным 1 : 1; 1 : 0,4 и 1 : 0,2 по весу, смесь с меньшим количеством известкового вяжущего показывает самый высокий прирост прочности с течением времени. Высокая начальная пористость способствует циркуляции потока углекислого газа, обеспечивая оптимальные характеристики растворов с большим образованием кальцита и улучшая прочность.

Результаты испытаний камня ГИ0 нашего эксперимента показывают увеличение прочности на изгиб в 3 раза и прочности на сжатие в 5,2 раза по сравнению с камнем И0.

На четвертом этапе показана возможность приготовления строительных растворов с задан-

ными характеристиками, регулируемые ВМК и соотношением «вяжущее — заполнитель».

Учитывая, что конечные качественные характеристики камня из гипсоизвесткового строительного раствора зависят от времени твердения, соотношения «гипс — известь», вида и количества заполнителя, в исследованиях [15] рассмотрены три соотношения «вяжущее — заполнитель»: 1/1; 1/2 и 1/3 по весу. Доказано, что образцы с меньшим количеством заполнителя показывают более высокие показатели прочности.

Разработка известкового раствора для реставрации старинных сооружений [16] подтвердила, что при соотношении «гипс — известь», равном 1 : 1, и соотношении «вяжущее — заполнитель» 1/0,75 по весу прочность камня на сжатие выше в 4,8 раза по сравнению с прочностью камня, твердеющего из раствора с соотношением «вяжущее — заполнитель» 1/1,5 по весу.

Автором [9] применена смесь вяжущего с соотношением «известь — ВМК», равным 1 : 1, при приготовлении растворов с соотношениями «вяжущее — заполнитель»: 1/0,5; 1/1; 1/2 и 1/3 по весу. Результаты испытаний показывают снижение прочностных характеристик камня с увеличением количества заполнителя в растворе (рис. 3).

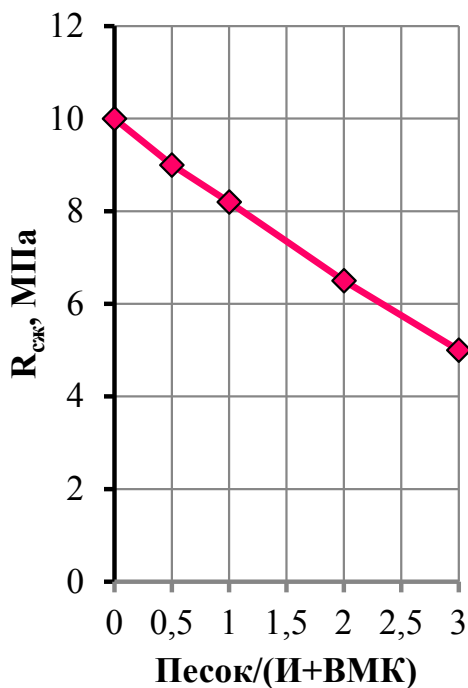


Рис. 3. Зависимость прочности на сжатие камня из известково-метакаолинового раствора [9] от соотношения «заполнитель — вяжущее» по весу

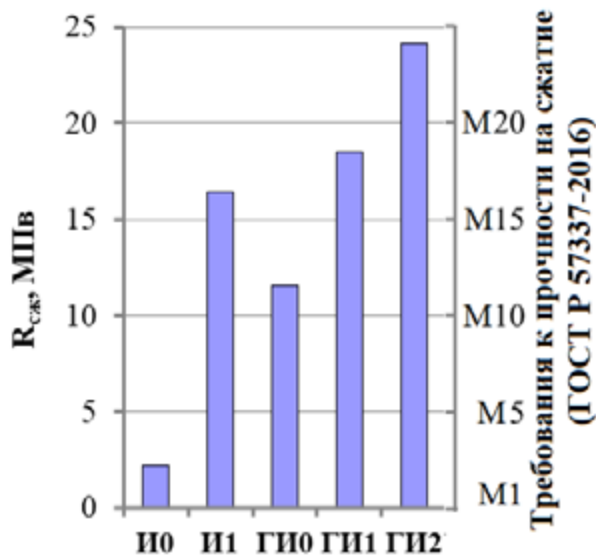


Рис. 4. Сравнение результатов прочности на сжатие со стандартными значениями (ГОСТ Р 57337—2016) для составов строительных растворов

На основании вывода, к которому пришли авторы [9, 15, 16], что прочность камня из раствора на воздушном вяжущем снижается по мере увеличения в нем доли заполнителя, были приготовлены гипсоизвестковые растворы, модифицированные ВМК, составов 1/3 и 1/1 по весу.

Результаты испытаний нашего эксперимента показывают следующее:

- для камня ГИ1 — увеличение прочности на сжатие в 1,6 раза по сравнению с камнем ГИ0;
- для камня ГИ2 — увеличение прочности на сжатие в 1,9 раза по сравнению с камнем ГИ0;
- для камня ГИ1 — незначительное снижение прочности на изгиб по сравнению с камнем ГИ0;
- для камня ГИ2 — снижение прочности на изгиб в 1,1 раза по сравнению с камнем ГИ0.

Прочность на изгиб не является важной характеристикой для отделочных растворов. Однако снижение показателя требует дальнейших исследований и объяснения.

Составы И1, ГИ1 и ГИ2, модифицированные ВМК, подходят для реставрационных работ в соответствии с ГОСТом [17] и совместимы с традиционными строительными материалами архитектурного наследия.

На рис. 4 показано сравнение результатов прочности на сжатие со стандартными значениями [17] для составов строительных растворов.

Выводы

Для камня в возрасте 28 суток:

- при замещении извести метакаолином в количестве 10, 20, 30 и 40 мас.% прочность на сжатие повышается на 8, 11, 12 и 14 % по сравнению с контрольным образцом (без метакаолина), прочность на изгиб снижается;
- при замещении гипса метакаолином в количестве 10, 20, 30 и 40 мас.% прочность на сжатие понижается на 8, 20, 33 и 47 % по сравнению с контрольным образцом (без метакаолина), прочность на изгиб снижается;

- замещение извести метаксаолином в смеси свыше 30 мас.% приводит к образованию камня повышенной водостойкости;
- упрочняющий эффект метаксаолина на известково-доломитовый раствор состава витрувианской пропорции для прочности на изгиб в 3,7 раза, для прочности на сжатие в 7,4 раза по сравнению с бездобавочным образцом;
- упрочняющий эффект метаксаолина на гипсо-известково-доломитовый раствор состава витрувианской пропорции для прочности на сжатие в 1,6 раза по сравнению с бездобавочным образцом;
- упрочняющий эффект метаксаолина на гипсо-известково-доломитовый раствор состава 1 : 1 для прочности на сжатие в 1,9 раза по сравнению с бездобавочным образцом.

Библиографический список

1. Шангина Н. Н. Особенности производства и применения сухих строительных смесей для реставрации памятников архитектуры / Н. Н. Шангина, А. М. Харитонов // *Сухие строительные смеси*. — 2012. — № 3. — С. 35–38.
2. Носов К. С. Строительные растворы русских крепостей XVI–XVII вв. / К. С. Носов // *Российская археология*. — 2009. — № 1. — С. 152–161.
3. Рахимов Р. З. Гипс в строительстве с древних веков до современности / Р. З. Рахимов // *Academia. Архитектура и строительство*. — 2021. — № 4.
4. Пухаренко Ю. В. Оценка применения карбонатных заполнителей в составе сухих смесей для реставрации / Ю. В. Пухаренко, Т. В. Харитонов // *Вестник гражданских инженеров*. — 2018. — № 4(79). — С. 121–125.
5. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение): справочник / Под общ. ред. А. В. Ферронской. — М.: АСВ, 2004. — 488 с.
6. *Lea's Chemistry of cement and concrete* / Ed. by P. C. Hewlett. — Oxford; Burlington (MA): Elsevier Butterworth — Heinemann. — 2005. — XXVI. — 1057 p.
7. Сафонова Т. Ю. Влияние реактивного пуццолана на свойства смешанного воздушного вяжущего / Т. Ю. Сафонова // *Вестник гражданских инженеров*. — 2012. — № 2(31). — С. 174–179.
8. Шангина Н. Н. Влияние минеральных добавок на усадочные деформации камня из известкового раствора / Н. Н. Шангина, Т. Ю. Сафонова // *Вестник гражданских инженеров*. — 2021. — № 2(85). — С. 142–149.
9. Murat M. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related materials: I. Preliminary investigation on metakaolinite / M. Murat // *Cement and concrete research*. — 1983. — Vol. 2(13). — Pp. 259–266.
10. Murat M. Modification of some physical properties of gypsum plaster by addition of clay minerals / M. Murat, A. Attari // *Cement and concrete research*. — 1991. — Vol. 2/3(21). — Pp. 378–387.
11. Шленкина С. С. Влияние пластификаторов на твердение гипсового вяжущего / С. С. Шленкина, М. С. Гаркави, Р. Новак и др. // *Строительные материалы*. — 2007. — № 9. — С. 61–62.
12. Freire M. T. Restoration of ancient gypsum-based plasters: Design of compatible materials / M. T. Freire, M. R. Veiga, A. S. Silva et al. // *Cement and Concrete Composites*. — 2021. — Vol. 120.
13. Veiga M. R. Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings / M. R. Veiga, A. Fragata, A. L. Velosa et al. // *International Journal of Architectural Heritage*. — 2010. — Vol. 4(2). — Pp. 177–195.
14. Veiga M. R. Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Characterization and performance evaluation / M. R. Veiga, A. L. Velosa, A. C. Magalhaes // *Construction and Building Materials*. — 2009. — Vol. 23. — Pp. 318–327.
15. Romera J. I. Assessment of the physico-mechanical behavior of gypsum-lime repair mortars as a function of curing time / J. I. Romera, S. Martinez-Ramirez, P. Lapuente et al. // *Environmental Earth Sciences*. — 2013. — Vol. 70. — Pp. 1605–1618.

16. Абдулмаджид М. Инновационные композитные материалы для укрепления известковых растворов в традиционных каменных конструкциях / М. Абдулмаджид, М. Кассаб, Х. Шукри и др. // Строительные материалы. — 2019. — № 8. — С. 42–47.

17. ГОСТ Р 57337—2016. Растворы строительные кладочные. ТУ.

Дата поступления: 20.09.2022

Решение о публикации: 21.11.2022

Контактная информация:

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

Plaster Mortar Composition Design for the Restoration of Stone and Brick Architecture Monuments

T. Yu. Safonova

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

For citation: Safonova T. Yu. Plaster Mortar Composition Design for the Restoration of Stone and Brick Architecture Monuments // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 4, pp. 702–711. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-4-702-711

Summary

Purpose: To investigate the possibility of using artificial pozzolana to create modified gypsum lime mortar, recommended for architecture monument restoration. **Methods:** At the research pursued, there were used Russia State Standard GOST 125–79 “Plaster Binders. Technical specifications”, GOST 23789–79 “Plaster Binders. Test Methods”, GOST 10180–90 “Concretes. Methods for Determining Strength by Control Samples”, GOST 24544–81 “Concretes. Methods for Determining Shrinkage and Creep Deformations”, GOST 8735–14 “Sand for Construction Works. Test Method” and GOST 8736–14 “Sand for Construction Works. Technical Conditions”. It has been established experimentally that to create reliable matrix, compatible with traditional materials of historical masonry, the use of restoration composition, including metakaolin and dolomite flour, is effective. **Results:** The process of restoration material design to replace damaged plaster of walls and ceilings is presented, strength characteristics of stones of various compositions on the basis of air binders are discussed, conclusion is made on the necessity to develop restoration material two types: for to put on lime plaster family and for — gypsum-lime plaster family. **Practical significance:** The results obtained can be used at partial or complete replacement of plaster that would allow to preserve building architectural appearance.

Keywords: Gypsum, lime, metakaolin, filler, compressive strength.

References

1. Shangina N. N., Kharitonov A. M. Osobennosti proizvodstva i primeneniya sukhikh stroitel'nykh smesey dlya restavratsii pamyatnikov arkhitektury [Features of production and application of dry building mixes for restoration of architectural monuments]. *Sukhie stroitel'nye smesi* [Dry building mixes]. 2012, I. 3, pp. 35–38. (In Russian)

2. Nosov K. S. Stroitel'nye rastvory russkikh krepostey XVI–XVII vv. [Building solutions of Russian fortresses of the XVI–XVII centuries]. *Rossiyskaya arkheologiya* [Russian Archeology]. 2009, I. 1, pp. 152–161. (In Russian)

3. Rakhimov R. Z. Gips v stroitel'stve s drevnikh vekov do sovremennosti [Gypsum in construction from ancient centuries to the present]. *Academia. Arkhitektura i*

stroitel'stvo [Academia. Architecture and construction]. 2021, I. 4. (In Russian)

4. Pukharenko Yu. V., Kharitonova T. V. Otsenka primeneniya karbonatnykh zapolniteley v sostave sukhikh smesey dlya restavratsii [Evaluation of the use of carbonate aggregates in dry mixes for restoration]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2018, I. 4(79), pp. 121–125. (In Russian)

5. *Gipsovye materialy i izdeliya (proizvodstvo i primeneniye): spravochnik. Pod obshch. red. A. V. Ferronskoy* [Gypsum materials and products (production and application). Ed. by A. V. Ferronskoy]. Moscow: ASV Publ., 2004. 488 p. (In Russian)

6. Lea's Chemistry of cement and concrete. Ed. by P. C. Hewlett. Oxford; Burlington (MA): Elsevier Butterworth — Heinemann. 2005, XXVI, 1057 p.

7. Safonova T. Yu. Vliyanie reaktivnogo puttsolana na svoystva smeshannogo vozdušnogo vyazhushchego [The influence of reactive pozzolan on the properties of a mixed air binder]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2012, I. 2(31), pp. 174–179. (In Russian)

8. Shangina N. N., Safonova T. Yu. Vliyanie mineral'nykh dobavok na usadochnye deformatsii kamnya iz izvestkovogo rastvora [The influence of mineral additives on shrinkage deformations of stone from lime mortar]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2021, I. 2(85), pp. 142–149. (In Russian)

9. Murat M. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related materials: I. Preliminary investigation on metakaolinite. *Cement and concrete research*. 1983, vol. 2(13), pp. 259–266.

10. Murat M., Attari A. Modification of some physical properties of gypsum plaster by addition of clay minerals. *Cement and concrete research*. 1991, vol. 2/3(21), pp. 378–387.

11. Shlenkina S. S., Garkavi M. S., Novak R. Vliyanie plastifikatorov na tverdeniye gipsovogo vyazhushchego [The

effect of plasticizers on the hardening of gypsum binder]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials]. 2007, I. 9, pp. 61–62. (In Russian)

12. Freire M. T., Veiga M. R., Silva A. S. Restoration of ancient gypsum-based plasters: Design of compatible materials. *Cement and Concrete Composites*. 2021, vol. 120.

13. Veiga M. R., Fragata A., Velosa A. L. Lime-based mortars: viability for use as substitution renders in historical buildings. *International Journal of Architectural Heritage*. 2010, vol. 4(2), pp. 177–195.

14. Veiga M. R., Velosa A. L., Magalhaes A. C. Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Characterization and performance evaluation. *Construction and Building Materials*. 2009, vol. 23, pp. 318–327.

15. Romera J. I., Martinez-Ramirez S., Lapuente P. Assessment of the physico-mechanical behavior of gypsum-lime repair mortars as a function of curing time. *Environmental Earth Sciences*. 2013, vol. 70, pp. 1605–1618.

16. Abdulmajid M., Kassab M., Shukri H. Innovatsionnye kompozitnye materialy dlya ukrepleniya izvestkovykh rastvorov v traditsionnykh kamennykh konstruktsiyakh [Innovative composite materials for strengthening lime mortars in traditional stone structures]. *Stroitel'nye materialy* [Building Materials]. 2019, I. 8, pp. 42–47. (In Russian)

17. *GOST R 57337—2016. Rastvory stroitel'nye kladochnye. TU* [GOST R 57337—2016. Masonry construction solutions. TU]. (In Russian)

Received: September 20, 2022

Accepted: November 21, 2022

Author's information:

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