

Р.Б. ОРЛОВИЧ¹, А.С. ГОРШКОВ², В.Н. ДЕРКАЧ³, С.С. ЗИМИН⁴, М.В. ГРАВИТ⁴

¹ООО «ПИ Георекострукция», г. Санкт-Петербург, Россия,

²ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», г. Санкт-Петербург, Россия,

³Филиал РУП «Институт БелНИИС» - Научно-технический центр, г. Брест, Республика Беларусь,

⁴ФГАУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Россия

ПРИЧИНЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ПОСЛЕ РЕСТАВРАЦИИ

Аннотация. Выполнен анализ причин возникновения повреждений в каменной кладке исторических зданий после их реставрации. Установлено, что применение растворов повышенной марки и, соответственно, жесткости при ремонтах исторической кладки приводит к росту растягивающих напряжений в кирпиче при температурно-влажностных воздействиях. Мотивацией к применению таких растворов является стремление повысить прочность и долговечность восстанавливаемых участков исторической кладки. В статье на основе результатов численного моделирования показано, что кладочный раствор должен быть достаточно прочным при сжатии и при этом в достаточной мере пластичным. В частности установлено, что применение жестких растворов на основе цементного связующего по сравнению с пластичными на основе известкового связующего увеличивает значение нормальных растягивающих напряжений при температурном перепаде $\Delta T = +10$ °C в среднем в два раза, а при набухании камней из-за их увлажнения – на порядок. Сделан вывод, что для реставрационных работ с кирпичной кладкой следует применять растворы в соответствии с технологией, соответствующей данному историческому периоду, с использованием известки с добавками, которые были выявлены при лабораторных испытаниях образцов, отобранных с исторической каменной кладки. Предпочтение следует отдавать низкомарочным минеральным растворам, обладающим низким модулем упругости, что повышает трещиностойкость кладки при температурно-влажностных воздействиях. Показано, что разрушения каменной кладки также способствует неправильная расшивка кладочных швов, когда образуются участки скопления дождевой воды, приводящие к повышенному увлажнению камней в зонах прямого воздействия дождевых осадков.

Ключевые слова: исторические каменные здания, каменная кладка, кирпич, кладочный раствор, увлажнение, потеря прочности, повреждения, разрушение, физический износ, реставрация.

R.B. ORLOVICH¹, A.S. GORSHKOV², V.N. DERKACH³, S.S. ZIMIN⁴, M.V. GRAWIT⁴

¹ООО «PI Georekonstrukcia», Saint-Petersburg, Russia,

²Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint-Petersburg, Russia,

³Branch office of the RUE "Institute BelNIIS" - Scientific-Technical Center, Brest, Republic of Belarus,

⁴Saint-Petersburg state polytechnical university, Saint-Petersburg, Russia

CAUSES OF DAMAGE TO MASONRY AFTER RESTORATION

Abstract. The article provides the analysis of the causes of damage in the masonry of historical buildings after their restoration. It has been established that the use of mortars of an increased grade and, accordingly, stiffness during repairs of historical masonry leads to an increase in tensile stresses in bricks under temperature and humidity effects. The reasoning behind the use of such mortars is to increase the strength and durability of the restored areas of historical masonry. The results of numerical simulation show that the masonry mortar must be sufficiently strong in compression and, at the same time, sufficiently plastic. It is shown that the use of hard mortars based on a cement binder,

compared with plastic mortars based on a lime binder, on average doubles the value of normal tensile stresses at a temperature difference $\Delta T = +100^\circ\text{C}$. This effect is much higher when stones swell due to their moisture. According to the results, for restoration work with brickwork, one should use mortars in accordance with the technology corresponding to this historical period, i.e., lime with additives that were identified during laboratory tests of samples taken from historical masonry. Low-grade mineral solutions with a low modulus of elasticity are preferable. It increases the crack resistance of the masonry under temperature and humidity effects. The article also shows that improper jointing of masonry joints facilitates the destruction of masonry. It happens when areas of accumulation of rainwater are formed, leading to increased wetting of stones in areas of direct impact of rainfall.

Keywords: historical stone buildings, masonry, brick, masonry mortar, moisture, loss of strength, damage, destruction, physical wear, restoration

Введение

При реставрации исторических зданий часто возникает необходимость в восстановлении каменной кладки в местах ее деструкции после многолетней эксплуатации. Характерными дефектами такой кладки являются: отсутствие ее части, сколы, рыхлость и выбоины кирпичей, разрушение кладочного раствора, трещины, высолы и биологические поражения. Если утраты глубины кирпича в кладке составляют менее 50 %, то заполнение пустот осуществляется путем докомпановки кирпичной кладки, при повреждении более 50 % от своего объема или полного разрушения производится вычинка кладки. В соответствии с требованиями ГОСТ Р 59437 для докомпоновок следует использовать готовые докомпоновочные растворы различных производителей с заданными показателями в соответствии с рекомендациями проекта реставрации и приспособления. Кирпич для выполнения вычинок по физико-механическим характеристикам должен соответствовать материалам подлинной кладки.

При деструкции кладочного раствора осуществляется его реставрация путем расшивки межкирпичного пространства на глубину деструкции растворных швов с последующим их заполнением новой смесью. Практика показывает, что после реставрации в ряде случаев, в течении короткого периода эксплуатации наблюдается разрушение камней в виде выкрашивания их лицевых слоев (рисунок 1).



Рисунок 1 – Выкрашивание керамического кирпича после реставрации исторической кладки

Последнее может быть обусловлено применением камней и кладочных растворов, физико-механические свойства которых не совместимы с исторической кладкой [1]. Чаще всего это касается применения цементных кладочных растворов, модуль упругости и прочность которых в 5-8 раз превышают аналогичные показатели исторических известковых растворов [2] (рисунок 2).

Следует отметить, что согласно требованиям немецких норм DIN 1053-1 для кладки облицовочного слоя стен из глиняного кирпича допускается применение стандартных кладочных растворов MGII-MGIIa, прочность которых на сжатие соответствует отечественным кладочным растворам марок М25–М50. Согласно требованиям ГОСТ Р 59437 ко всем реставрационным материалам предъявляются общие требования по совместимости физико-механических и химических свойств со свойствами подлинных материалов объекта

культурного наследия, а в случае необходимости — идентичности декоративно-художественных свойств. Для зачеканки выветрившихся швов белокаменной кладки рекомендуется применять кладочные растворы на известковом или сложном известково-цементном вяжущем марки по прочности на сжатие не более М75. При этом допускается возможность использования готовых специализированных сухих смесей, разработанных для производства реставрационных работ по камню. При отдельном обосновании могут использоваться растворы, приготовленные по индивидуальной рецептуре. Рецептуру (состав) кладочного раствора и вид готовой кладочной смеси подбирает химик-технолог.

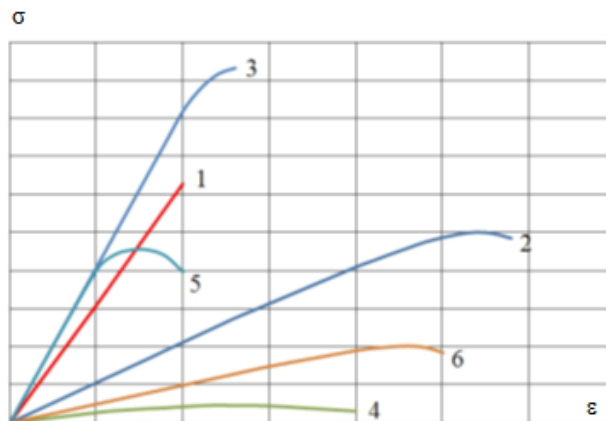


Рисунок 2 – Графики σ - ϵ для различных кладочных материалов и каменной кладки:

1 - машинный глиняный кирпич, 2 - средневековый кирпич, 3 - цементный раствор, 4 – известковый раствор, 5 - кладка на цементном растворе, 6 - кладка на известковом растворе

В исторических зданиях основным вяжущим в строительных растворах являлась известь. Также использовались гипс, глина и другие связующие материалы, а со второй половины XIX века еще и добавки цемента.

Физико-химические свойства строительных растворов определяются рядом факторов, связанных с использованием ингредиентов: извести, песка, пуццолана, керамической пыли и других добавок, в зависимости от региона и местных строительных традиций. На степень пластичности и ее последующую прочность оказывает влияние количество воды, добавляемой в строительные растворы, а также водопоглощающие свойства керамических камней. Трудности с воссозданием исторических строительных смесей заключаются в том, что применяемые в настоящее время материалы не эквивалентны по составу и характеристикам используемым ранее в исторических зданиях. Несмотря на то, что современные методы позволяют в достаточной степени установить состав и свойства исторических строительных растворов, их реализация затруднена из-за утраченных технологий, используемых при их приготовлении и реологических явлений. Как показывает практика, именно применение жестких цементных растворов при реставрации каменной кладки исторических зданий чаще всего приводит к разрушению камней. Мотивацией к применению таких растворов является стремление повысить прочность и долговечность восстанавливаемых участков исторической кладки. В ряде случаев аналогичная мотивация приводит к повреждению каменной облицовки современных зданий, что негативно сказывается на их физическом износе и долговечности [3-10].

Следует однако отметить, что прочность кладки на сжатие f_k в значительно меньшей степени зависит от прочности раствора f_m чем от прочности камней f_b , что наглядно видно в используемой в EN 1996-1-1 зависимости:

$$f_k = K \cdot f_b^{0,7} \cdot f_m^{0,3},$$

которая является преобразованием известной формулы Онищика Л.И. [11].

Кроме того реставрация поврежденных участков каменной кладки путем ее вычинки обычно осуществляется в нагруженном состоянии остальной, – не поврежденной, кладки.

Это исключает возможность обжатия новых растворных швов под собственным весом кладки, в результате которого повышается их сцепление с камнями [11].

Как известно роль растворных швов в каменной кладке сводится к следующим основным функциям:

- податливостью прокладок между ложковыми поверхностями камней, нивелирующих неравномерность контактных сжимающих напряжений между ними;
- соединением между собой камней, обеспечивающим целостность и монолитность кладки;
- созданием уплотнений, предотвращающих проникновение дождевой воды между камнями вглубь кладки;
- паропроницаемостью, способствующей выходу наружу водяных паров и тем самым предотвращающей влагонакопление в камнях.

По сравнению с известковыми, цементные растворы обладают повышенной усадкой при твердении, что особенно заметно проявляется в ненагруженном состоянии восстанавливаемой кладки [12]. Повышенная усадка растворных швов может привести к образованию трещин в зоне их контакта с кирпичами, что способствует утрате сцепления между ними и, как следствие, нарушению монолитности кладки [13]. Кроме того, образовавшиеся трещины способствуют проникновению дождевой воды вглубь кладки, и, как следствие, к ее чрезмерному увлажнению. Низкая паропроницаемость цементных растворных швов по сравнению с известковыми также способствует дополнительному влагонакоплению в камнях, что особенно активно проявляется в холодный период года (из-за значительной разности парциальных давлений водяного пара изнутри и снаружи кладки). Увлажнение каменных стен происходит также в результате воздействия косых дождей, обусловленных сочетанием дождя и ветра [14]. Особенно заметное увлажнение каменной кладки наблюдается в весенний период года, когда интенсивность осадков в виде дождя возрастает, а условия, необходимые для высыхания еще не сформировались. Этому также способствует неправильная расшивка кладочных швов, когда на наружной поверхности стеновой конструкции образуются участки накопления дождевой воды, приводящие к повышенному увлажнению камней в зонах прямого воздействия осадков (рисунок 3).

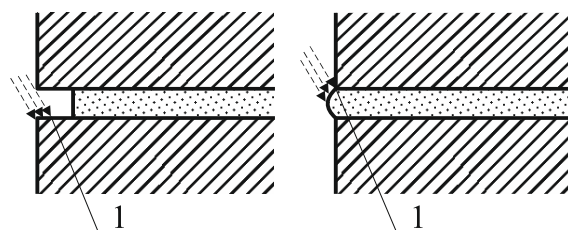


Рисунок 3 – Схема увлажнения кладки при неправильной расшивке кладочных швов:
1 – участки скопления дождевой воды

На деструкцию каменной кладки большое влияние оказывает также количество циклов замораживания и оттаивания именно их поверхностных слоев, а не средняя температура наиболее холодной пятидневки. Это наиболее актуально для северных широт, например, Санкт-Петербурга и Ленинградской области, где количество переходов температуры на наружной поверхности стен через 0 °С только за один зимний сезон может оказаться более 50.

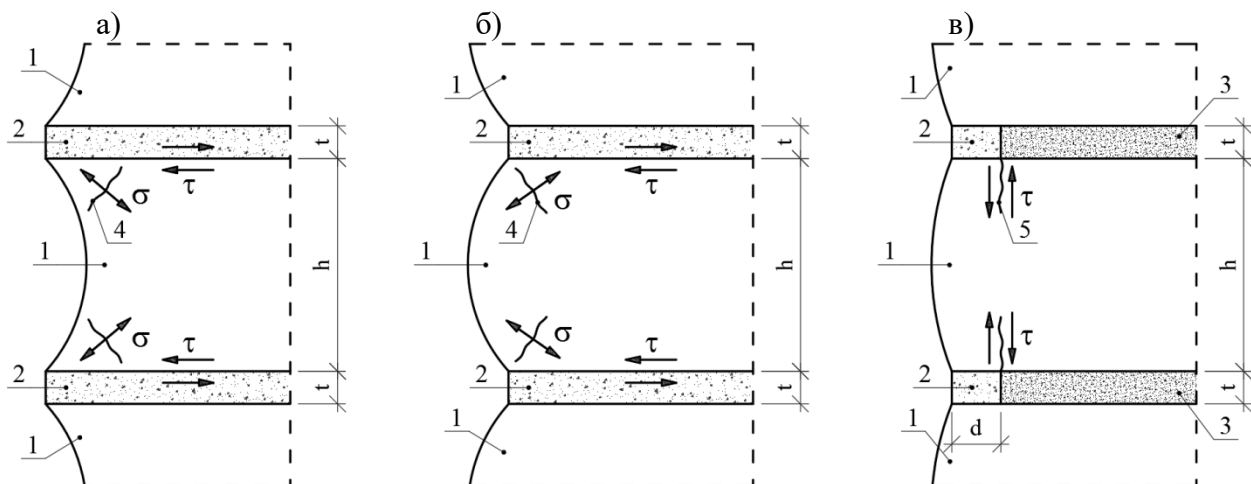
Исследования [15] показали, что при повышении влажности (водонасыщения) кладки, ее механическая прочность уменьшается, например, при весовой равновесной влажности 8 % прочность каменной кладки из керамического кирпича на сжатие уменьшается на 30 % по сравнению с кладкой, находящейся в сухом состоянии (при равновесной весовой влажности, близкой к 0 %).

Следует отметить, что водопоглощение керамических камней исторических зданий из-за их пористой структуры значительно выше, чем у современных керамических каменных изделий машинной формовки. Согласно результатам экспериментальных исследований [16] коэффициент линейного температурного расширения влажной кладки в замороженном состоянии значительно выше, чем у той же кладки в воздушно-сухом состоянии. Например, при влажности 12 % глиняного кирпича коэффициент линейного температурного расширения кладки может возрастать на 39 % по сравнению с ее сухим состоянием. В то же время при положительных температурах влажность кладки не оказывает влияния на ее температурные деформации. Неблагоприятным для целостности камней может оказаться также наличие добавок в растворных смесях (красителей, ускорителей твердения и др.), содержащих соли. Последние при увлажнении камней могут накапливаться в их структуре, проявляясь впоследствии на лицевой поверхности в виде высолов либо приводя к разрушению лицевого слоя в процессе кристаллизации солей [17-20].

Наиболее неблагоприятным для камней исторических зданий является повышенная деформативность цементных растворных швов по сравнению с известковыми при температурных воздействиях [10], а также их высокое сопротивление свободе набухания камней при их увлажнении, что вызывает напряжения сдвига на границе раздела между растворными швами и камнями кладки. Из-за разности коэффициентов температурного расширения цементного раствора и керамических камней в последних могут возникать значительные растягивающие напряжения σ_1 , концентрация которых обычно наблюдается в поверхностных слоях камней (рисунок 4,а).

При увлажнении кладки на жестких цементных растворах последние препятствуют свободному набуханию камней, что также приводит к образованию растягивающих напряжений σ_1 (рисунок 4,б). При восстановлении горизонтальных швов путем их мастиковки цементным раствором на глубину d наряду с растягивающими σ_1 доминирующими могут оказаться в том числе касательные напряжения τ (рисунок 4,в).

Следует отметить, что лицевые слои керамических камней по сравнению с внутренними после многолетней эксплуатации обладают значительно меньшей прочностью при растяжении и скалывании (0,4–0,9 МПа), например, вследствие их постепенного размораживания [6]. В связи с этим напряжения σ_1 и τ могут приводить к образованию перпендикулярных к их направлению трещин (рисунок 4).



1 – керамические камни толщиной h ; 2 – цементные растворные швы толщиной t ; 3 – известковые растворные швы; 4 – трещины вызванные главными растягивающими напряжениями σ_1 ; 5 – трещины вызванные скалывающими напряжениями τ

Рисунок 4 – Напряженно-деформированное состояние лицевых слоев каменной кладки при ее нагревании (а) и увлажнении с однородными (б) и неоднородными (в) на глубину d горизонтальными растворными швами

Метод

С целью более детального анализа напряженного состояния камней в зоне их разрушения авторами выполнены численные исследования в комплексе конечноэлементного моделирования ANSYS в твердотельной пространственной постановке. Моделированию подлежал фрагмент каменной кладки толщиной «в пол кирпича» (рисунок 5). Использована микромодель кладки [21], в которой она рассматривается как неоднородное тело, состоящее из кладочных камней (кирпичей) и растворных швов, характеристики жесткости и прочности которых учитываются отдельно.

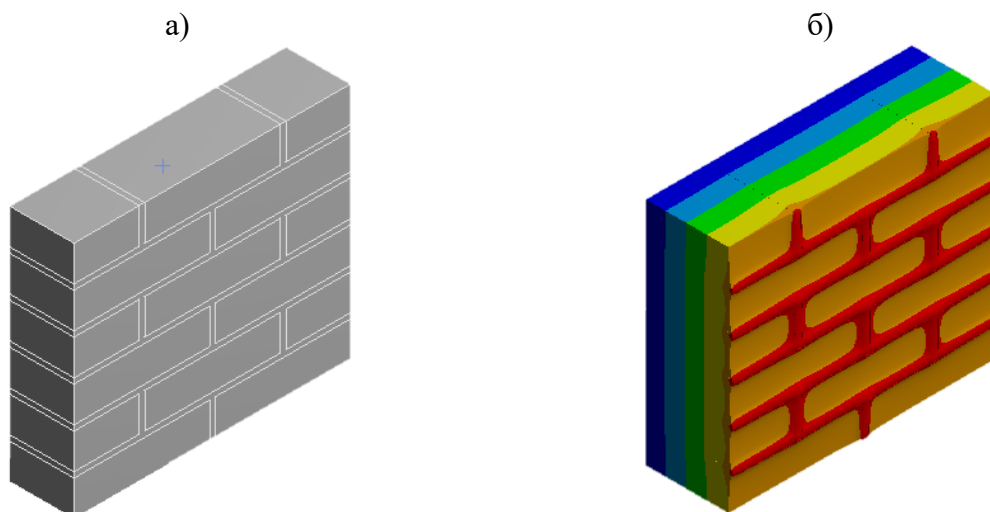


Рисунок 5 – Конечно-элементная расчетная схема фрагмента каменной кладки (а) и его деформирование при нагревании (б)

Горизонтальные и вертикальные растворные швы толщиной 10 мм и камни размером 65×120×250 мм моделировались объемными конечными элементами, жестко объединенных между собой. Предполагалось, что температурные линейные деформации цементного раствора в швах в 2 раза превышают аналогичные деформации кирпича. Коэффициент набухания кирпича $\xi(sh)$ принят равным 0,2 мм/м. При этом влажностное воздействие задавалось с помощью эквивалентной температуры $T(sh)_{экв}$ по известной зависимости $T(sh)_{экв} = \xi(sh)/\alpha_t$, где α_t – коэффициент линейного температурного расширения, принимаемый в соответствии с СП 15.13330 равным $5 \cdot 10^{-6}$ град.⁻¹. Варьируемым параметром являлось соотношение модулей упругости растворных швов E_p и керамических камней E_k : $E_p/E_k = (0,25 \div 4)$. При этом значение 0,25 соответствует известковому раствору, значение 4 – цементному.

Результаты и обсуждение.

На рисунке 6 представлены траектории и изополя главных растягивающих напряжений σ_1 , действующие в камнях при их нагревании на 10 °С.

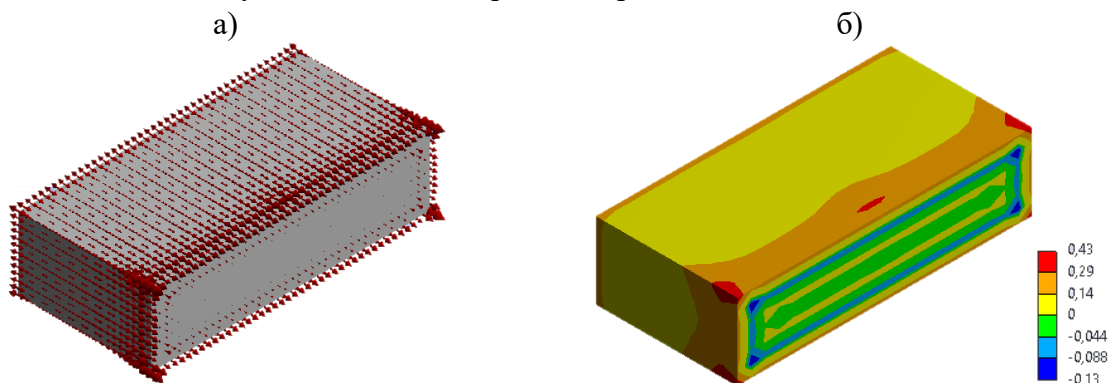


Рисунок 6 – Напряженно-деформированное состояние отдельного камня кладки при температурном перепаде $\Delta T = +10^\circ \text{C}$ (а – траектория главных растягивающих напряжений σ_1 ; б – изополе главных растягивающих напряжений σ_1 (МПа))

На рисунке 7,а приведена аппроксимирующая результаты расчетов зависимость максимальных значений главных растягивающих напряжений σ_1 от соотношения модулей упругости растворных швов E_p и кирпича E_k при температурном перепаде $\Delta T = +10^\circ \text{C}$. Из анализа полученной зависимости следует, что с увеличением жесткости растворных швов напряжения σ_1 в камнях существенно возрастают. На рисунке 7,б приведена полученная расчетным путем зависимость $\sigma_1 - E_p/E_k$ при набухании камней из-за их увлажнения, из которых также следует увеличение максимальных растягивающих напряжений σ_1 при возрастании модуля упругости кладочного раствора. Следует отметить, что суммарное действие указанных напряжений способствует выкрашиванию лицевых слоев камней, прочностные характеристики которых при увлажнении являются пониженными [15]. Как показывает практика наиболее интенсивное разрушение лицевых слоев каменной кладки (рисунок 1) наблюдается в весенний период при повышенных температурах, когда при накоплении в зимний период в кладке избыточной влаги и увеличении интенсивности осадков в виде дождя, условия, необходимые для высыхания кладки еще не сформировались.

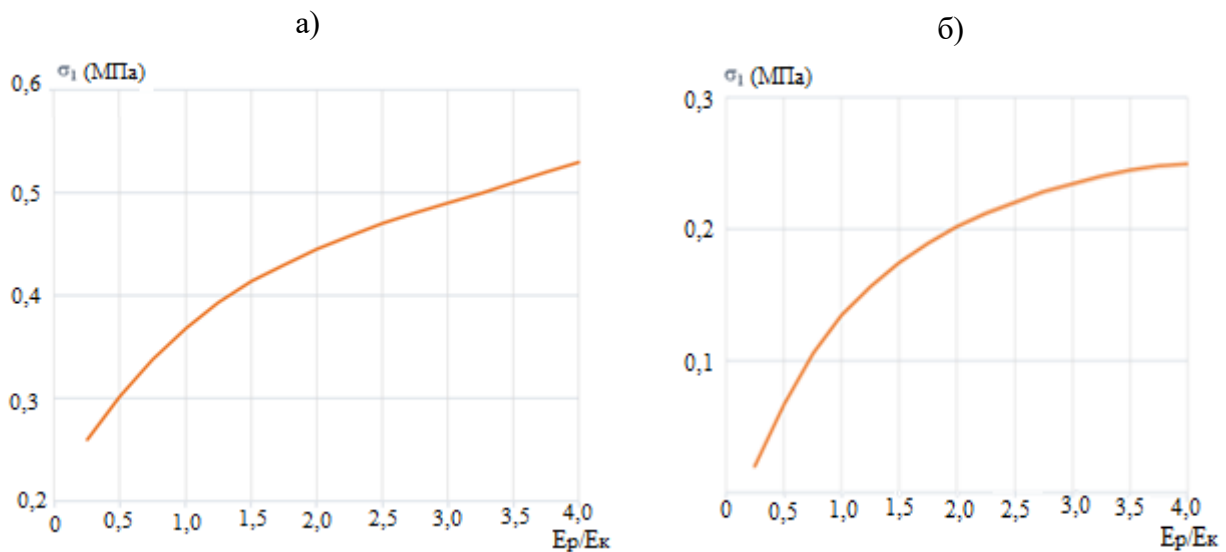


Рисунок 7 – График зависимости главных растягивающих напряжений σ_1 в камнях на границе их сопряжения с горизонтальным растворным швом от отношения E_p/E_k (а – при температурном перепаде $\Delta T = +10^\circ \text{C}$; б – при набухании увлажненных камней)

Приведенные выше зависимости отражают случай, когда при вычинке исторической кладки применяются жесткие строительные растворы на всю ее толщину. В практике часто возникает необходимость в восстановлении или расшивке деградированных растворных швов на небольшую глубину. Очевидно, что применение в этих целях жестких цементных растворов с точки зрения влияния их температурных деформаций на трещинообразование камней будет менее опасным, чем при набухании увлажненных камней (рисунок 4,в). На рисунке 8 представлено напряженно-деформированное состояние отдельного керамического камня в результате его набухания при увлажнении для случая, когда ремонт деградированных растворных швов выполнен жестким цементным раствором на глубину $d = 10$ мм (рисунок 4,в). Данные получены при соотношении $E_p/E_k = 0,25$ применительно для известкового раствора и $E_p/E_k = 4$ – для цементного. Из рисунка 8б следует, что наибольшая концентрация скалывающих напряжений τ имеет место на границе нового цементного и исторического известкового растворов. Причем величина максимальных значений τ уменьшается с увеличением глубины d (рисунок 9). Одновременно в тех же сечениях наряду с касательными напряжениями действуют и растягивающие напряжения σ_1 (рисунок 8,а). Совместное действие указанных напряжений, близких к прочности исторических

керамических камней на растяжение и скалывание, является одной из основных причин отслоения лицевых участков камней, показанных на рисунке 1.

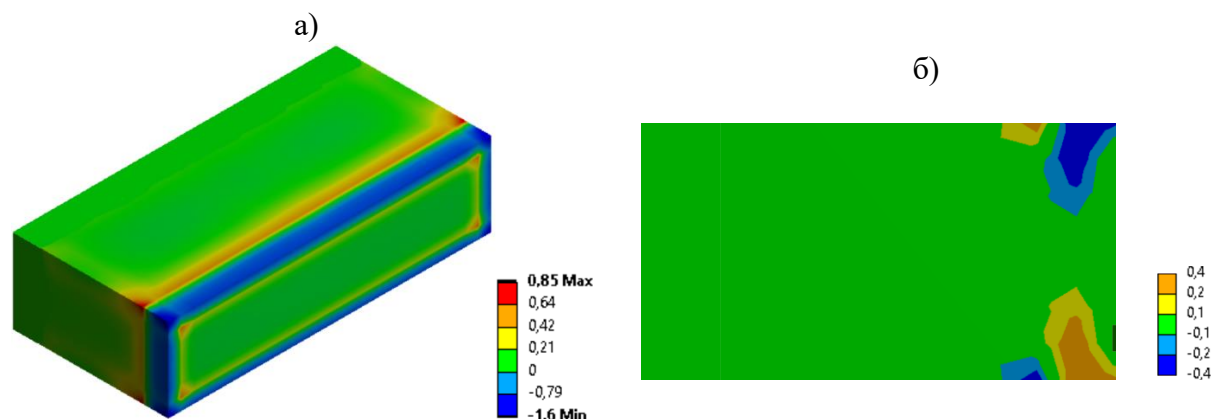


Рисунок 8 – Напряженно-деформированное состояние керамического камня в результате его увлажнения при реставрации кладочных швов жестким цементным раствором на глубину $d = 10$ мм (а – изополе главных растягивающих напряжений σ_1 (МПа), б – изополе скалывающих напряжений τ (МПа) в поперечном сечении керамического камня)

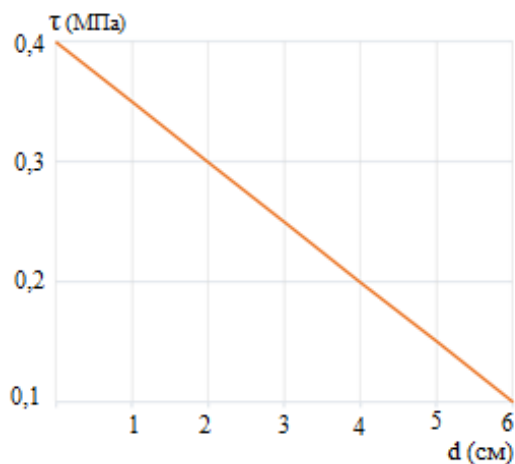


Рисунок 9 – График зависимости максимальных касательных напряжений τ при увлажнении камней от глубины d восстановления деградированного известкового кладочного шва цементным раствором

Выводы.

В исторических зданиях недопустимо применять методы ремонта каменной кладки с применением растворов с высоким содержанием цемента. Повышенная адгезия цементного раствора к основанию, его высокая прочность и низкая деформативность могут приводить к появлению трещин в кладке. Для реставрационных работ следует применять растворы в соответствии с технологией, соответствующей данному историческому периоду, а именно с использованием извести с добавками, которые были выявлены при лабораторных испытаниях образцов, отобранных с исторической каменной кладки. При этом кладочный раствор для восстановления швов должен быть достаточно прочным при сжатии и в достаточной мере пластичным. Низкомарочные растворы обладают низким модулем упругости, что исключает разрушение лицевых слоев камней кладки при температурно-влажностных воздействиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Domacłowski W., Lewandowska M., Łukaszewicz V. Badania nad konserwacją murów ceglanych. Toruń, 2004. 210 s.
2. Горчаков Г.И. Коэффициенты температурного расширения и температурные деформации строительных материалов. М. : Изд-во Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совмине СССР, 1968. 165 с.
3. Орлович Р.Б., Горшков А.С., Зимин С.С. Применение камней с высокой пустотностью в облицовочном слое многослойных стен // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 8 (43). С. 14-23. doi: 10.5862/MCE.43.3.
4. Серикхалиев С.Б., Зимин С.С., Орлович Р.Б. Дефекты защитно-декоративной кирпичной облицовки фасадов каркасных зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 5 (20). С. 28-38. doi: 10.18720/CUBS.20.3.
5. Горшков А.С. Модель физического износа строительных конструкций // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2014. № 12 (191). С. 34-37.
6. Кнатько М.В., Ефименко М.В., Горшков А.С. К вопросу о долговечности и энергоэффективности современных ограждающих стеновых конструкций жилых, административных и производственных зданий // Инженерно-строительный журнал. 2008. № 2 (2). С. 50-53. doi: 10.18720/MCE.2.8.
7. Горшков А.С. Оценка долговечности стеновой конструкции на основании лабораторных и натурных испытаний // Строительные материалы. 2009. № 8. С. 12-17.
8. Горшков А.С., Кнатько М.В., Рымкевич П.П. Лабораторные и натурные исследования долговечности (эксплуатационного срока службы) стеновой конструкции из автоклавного газобетона с облицовочным слоем из силикатного кирпича // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 8 (10). С. 20-26. doi: 10.18720/MCE.10.3.
9. Горшков А.С., Кнатько М.В., Рымкевич П.П. Оценка долговечности ограждающих конструкций зданий // Стройпрофиль. 2009. № 3. С. 7-8.
10. Деркач В.Н., Демчук И.Е., Орлович Р.Б. Механизм повреждаемости несущей облицовки многослойных каменных стен // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 3(54). С. 63-70. doi: 10.18720/CUBS.54.5.
11. Онищик Л.И. Каменные конструкции / Л.И. Онищик. М.: Стройиздат, 1939. 208 с.
12. Поляков С.В., Сафаргалиев С.М. Монолитность каменной кладки. Алма-Ата: Гылым, 1991. 210 с.
13. Поляков С.В. К вопросу сцепления в кирпичной кладке // «Исследования по каменным конструкциям»: сб. статей под научн. ред. Л.И. Онищика. М.: ЦНИИСК, 1957. С. 298-301.
14. Гурьев В.В., Никитин В.И., Кофанов В.А. Влияние косоугольного дождя на влагосодержание ограждающих конструкций из силикатных материалов // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 5. С. 15-21.
15. Улыбин А.В., Старцев С.А., Зубков С.В. Контроль влажности при обследовании каменных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 7. С. 32-39. doi: 10.5862/MCE.42.5.
16. Мурыш М.А. Температурные деформации влажной кирпичной кладки // Вестник ТГАСУ. 2008. №1. С. 79-85.
17. Корниенко С.В. Характеристики состояния влаги в материалах ограждающих конструкций зданий // Строительные материалы. 2007. № 4. С. 74-78.
18. Корниенко С.В. Потенциал влажности для определения влажностного состояния материалов наружных ограждений в неизотермических условиях // Строительные материалы. 2006. № 4. С. 88-89.
19. Корниенко С.В., Ватин Н.И., Горшков А.С. Оценка влажностного режима стен с фасадными теплоизоляционными композиционными системами // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 6 (45). С. 34-54. doi: 10.18720/CUBS.45.2.
20. Корниенко С.В., Ватин Н.И., Петриченко М.Р., Горшков А.С. Оценка влажностного режима многослойной стеновой конструкции в годовом цикле. // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 6 (33). Рр. 19-33. doi: 10.18720/CUBS.33.2.
21. Lourenco P.B. Computational strategies for masonry structures: PhD Dissertation. Delfi: Delfi University Press, 1996. 210 p.

REFERENCES

1. Domacłowski W., Lewandowska M., Łukaszewicz V. Badania nad konserwacją murów ceglanych [Research on the preservation of brick walls]. Toruń, 2004. 210 p. (pol).
2. Gorchakov G.I. Koefficienty temperaturnogo rasshireniya i temperaturnye deformacii stroitel'nykh materialov [Coefficients of thermal expansion and thermal deformation of building materials]. M. : Izd-vo Komiteta standartov, mer i izmeritel'nykh priborov pri Sovmine SSSR, 1968. 165 p. (rus).

3. Orlovich R.B., Gorshkov A.S., Zimin S.S. Primenenie kamnej s vysokoj pustotnost'yu v oblicovochnom sloe mnogoslojnyh sten [Application of stones of high voidage in the facing layer of the multilayer walls]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 8 (43). Pp. 14-23. doi: 10.5862/MCE.43.3. (rus).
4. Serikhaliev S.B., Zimin S.S., Orlovich R.B. Defekty zashchitno-dekorativnoj kirpichnoj oblicovki fasadov karkasnyh zdaniy [The defects of protective facing masonry of frame buildings]. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2014. No. 5 (20). Pp. 28-38. doi: 10.18720/CUBS.20.3. (rus).
5. Gorshkov A.S. Model' fizicheskogo iznosa stroitel'nyh konstrukcij [Physical deterioration model of building structures]. *Building materials, equipment, technologies of the XXI century*. 2014. No. 12 (191). Pp. 34-37. (rus).
6. Knat'ko M.V., Efimenko M.N., Gorshkov A.S. K voprosu o dolgovechnosti i energoeffektivnosti sovremennyh ograzhdayushchih stenovyh konstrukcij zhilyh, administrativnyh i proizvodstvennyh zdaniy [On the issue of durability and energy efficiency of modern enclosing wall structures of residential, administrative and industrial buildings]. *Magazine of Civil Engineering*. 2008. No. 2 (2). Pp. 50-53. doi: 10.18720/MCE.2.8. (rus).
7. Gorshkov A.S. Ocenka dolgovechnosti stenovoj konstrukcii na osnovanii laboratornyh i naturnykh ispytaniy [Assessment of operating life of wall structure on the basis of laboratory and full-scale tests]. *Construction materials*. 2009. No. 8. Pp. 12-17. (rus).
8. Gorshkov A.S., Knat'ko M.V., Rymkevich P.P. Лабораторные и натурные исследования долговечности (эксплуатационного срока службы) стеновой конструкции из автоклавного газобетона с облицовочным слоем из силикатного кирпича [Laboratory and full-scale studies of durability (operational service life) of a wall structure from autoclaved aerated concrete with a facing layer from silicate brick] // *Magazine of Civil Engineering*. 2009. No. 8 (10). Pp. 20-26. doi: 10.18720/MCE.10.3. (rus).
9. Gorshkov A.S., Knat'ko M.V., Rymkevich P.P. Ocenka dolgovechnosti ograzhdayushchih konstrukcij zdaniy [Assessment of the durability of building envelopes]. *Strojprofile*. 2009. No. 3. Pp. 7-8. (rus).
10. Derkach V.N., Demchuk I.E., Orlovich R.B. Mekhanizm povrezhdaemosti nenesushchej oblicovki mnogoslojnyh kamennyh sten [The mechanism of damage non-bearing facing multilayered masonry walls]. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2017. No. 3 (54). Pp. 63-70. doi: 10.18720/CUBS.54.5. (rus).
11. Onishchik L.I. Kamennye konstrukcii [Stone structures]. M.: Strojizdat, 1939. 208 p. (rus).
12. Polyakov S.V., Safargaliev S.M. Monolitnost' kamennoj kladki [Monolithic of masonry]. Alma-Ata: Gylym, 1991. 210 p. (rus).
13. Polyakov S.V. K voprosu scepheniya v kirpichnoj kladke [On the issue of adhesion in brickwork]. "Issledovaniya po kamennym konstrukciyam": sb. statej pod nauchn. red. L.I. Onishchika ["Research on stone structures": coll. of articles under scientific. ed. L.I. Onishchik]. M.: CNISK, 1957. Pp. 298 – 301. (rus).
14. Gur'ev V.V., Nikitin V.I., Kofanov V.A. Vliyanie kosogo dozhdya na vlagosoderzhanie ograzhdayushchih konstrukcij iz silikatnyh materialov [Influence of slanting rain on the moisture content of building envelopes made of silicate materials]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2016. No. 5. Pp. 15-21. (rus).
15. Ulybin A.V., Starcev S.A., Zubkov S.V. Kontrol' vlazhnosti pri obsledovanii kamennyh konstrukcij [Humidity control in the inspection of masonry structures]. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 7. Pp. 32-39. doi: 10.5862/MCE.42.5. (rus).
16. Muryj M.A. Temperaturnye deformacii vlazhnoj kirpichnoj kladki [Temperature deformations of wet brickwork]. *Vestnik TGASU*. 2008. No. 1. Pp. 79-85. (rus).
17. Kornienko S.V. Harakteristiki sostoyaniya vlagi v materialah ograzhdayushchih konstrukcij zdaniy [Characteristics of the state of moisture in the building envelope materials]. *Construction materials*. 2007. No. 4. Pp. 74-78. (rus).
18. Kornienko S.V. Potencial vlazhnosti dlya opredeleniya vlazhnostnogo sostoyaniya materialov naruzhnyh ograzhdenij v neizotermicheskikh usloviyah [Humidity potential for determining the moisture condition of external fencing materials in non-isothermal conditions]. *Construction materials*. 2006. No. 4. Pp. 88-89. (rus).
19. Kornienko S.V., Vatin N.I., Gorshkov A.S. Ocenka vlazhnostnogo rezhima sten s fasadnymi teploizolyacionnymi kompozicionnymi sistemami [Assessment of moisture conditions of walls with facade's thermo-insulation composite]. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2016. No. 6 (45). Pp. 34-54. doi: 10.18720/CUBS.45.2. (rus).
20. Kornienko S.V., Vatin N.I., Petrichenro M.R., Gorshkov A.S. Ocenka vlazhnostnogo rezhima mnogoslojnoj stenovoj konstrukcii v godovom cikle [Evaluation of hygrothermal performance of multilayered wall design in annual cycle]. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2015. No. 6 (33). Pp. 19-33. doi: 10.18720/CUBS.33.2. (rus).
21. Lourenco P.B. Computational strategies for masonry structures: PhD Dissertation. Delfi: Delfi University Press, 1996. 210 p.

Информация об авторах:

Орлович Роман Болеславович

ООО «ПИ Георекострукция», г. Санкт-Петербург, Россия,
доктор технических наук, профессор, научный консультант.
E-mail: orlowicz@mail.ru

Горшков Александр Сергеевич

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»,
г. Санкт-Петербург, Россия,
доктор технических наук, профессор кафедры Интеллектуальных систем и защиты информации.
E-mail: alsgor@yandex.ru

Деркач Валерий Николаевич

Филиал РУП «Институт БелНИИС» - Научно-технический центр, г. Брест, Республика Беларусь,
доктор технических наук, директор.
E-mail: v-derkatch@yandex.ru

Зимин Сергей Сергеевич,

ФГАУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
г. Санкт-Петербург, Россия,
кандидат технических наук, доцент Инженерно-строительного института.
E-mail: zimin_sergei@mail.ru

Гравит Марина Викторовна

ФГАУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
г. Санкт-Петербург, Россия,
кандидат технических наук, доцент Инженерно-строительного института.
E-mail: kit451@mail.ru

Information about authors:

Orlovich Roman B.

ООО « PI Georekonstrukcia», Saint-Petersburg, Russia,
doctor of technical science, Professor, Scientific consultant.
E-mail: orlowicz@mail.ru

Gorshkov Alexander S.

Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint-Petersburg, Russia,
doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Intelligent Systems and Information Security.
E-mail: alsgor@yandex.ru

Derkach Valery N.

Branch office of the RUE "Institute BelNIIS" - Scientific-Technical Center, Brest, Republic of Belarus,
doctor of Technical Sciences, Director.
E-mail: v-derkatch@yandex.ru

Zimin Sergey S.

Saint-Petersburg state polytechnical university, Saint-Petersburg, Russia,
candidate of technical sciences, Associate Professor of the Institute of Civil Engineering.
E-mail: zimin_sergei@mail.ru

Grawit Marina V.

Saint-Petersburg state polytechnical university, Saint-Petersburg, Russia,
candidate of technical sciences, Associate Professor of the Institute of Civil Engineering.
E-mail: kit451@mail.ru