https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-4(47)-33-46 EDN: MKEEWQ
УДК 69.01; 69.059.35:693.25; 69.059.35:691.07

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАЦИЙ ИСТОРИЧЕСКОЙ КЛАДКИ

М.К. ИЩУК✉, д-р техн. наук
Е.М. ИЩУК

Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», ул. 2-я Институтская, д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Кирпичная кладка исторических зданий имеет ряд особенностей по сравнению с кладкой из современных материалов. Это относится как к прочностным, так и деформационным характеристикам. Неверная оценка деформационных характеристик кладки стен, столбов и т. д. может привести к некорректной оценке величины усилий, перераспределяемых между ними.

Цель. Получение экспериментальных данных по прочности и деформациям кладки из исторического кирпича, в том числе выполненной на известковом растворе; использование полученных результатов для исследования прочности и деформаций кладки, усиленной различными методами (инъекцией раствора, в том числе в сочетании с косвенным армированием, на участках с вычинкой при восстановлении «старой» кладки «новой», совместной работы забутовки и лицевых слоев).

Материалы и методы. Испытывались на сжатие образцы из исторического кирпича в виде столбов и стенок, выполненные на растворах различной прочности, в том числе на известковом растворе. На центральное сжатие равномерно распределенной нагрузкой и на местное сжатие испытывались также образцы, в которых внутренний слой (забутовка) отличался по прочности и деформациям от лицевых слоев.

Результаты. Получены основные прочностные и деформационные характеристики кладки из исторического кирпича, в том числе на известковом растворе. Результаты исследований использованы при разработке нормативных документов по каменным конструкциям и разработке рекомендаций и проектов усиления каменных конструкций исторических зданий.

Выводы. Упругая характеристика кладки, выполненной на известковом и сложном растворах с добавкой извести, оказалась ниже нормативных значений. Получены коэффициенты поперечного расширения кладки (коэффициент Пуассона) при различных уровнях вертикальных напряжений, отсутствовавшие в нормативных документах. Прочность кладки на сжатие существенно превысила приведенные в нормах значения, чему во многом способствует качество выполняемых работ, а также особенности работы кладки из исторического кирпича.

Ключевые слова: историческая кирпичная кладка, известковый раствор, деформационные характеристики кладки, прочность кладки, испытания, центральное сжатие, местное сжатие, коэффициент Пуассона

Для цитирования: Ищук М.К., Ищук Е.М. Исследования прочности и деформаций исторической кладки. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2025;47(4):33–46. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-4(47)-33-46

Вклад авторов
Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование
Финансирование выполнено за счет: собственных средств лаборатории – 90 %, федерального бюджета – 10 %.

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 01.09.2025
Поступила после рецензирования 17.10.2025
Принята к публикации 23.10.2025

STRESS AND STRAIN STUDIES OF HISTORICAL MASONRY

M.K. ISHCHUK✉, Dr. Sci. (Engineering)
E.M. ISHCHUK

Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract

Introduction. Brick masonry of historical buildings has a number of features compared to masonry made of contemporary materials. This applies to both strength and strain characteristics. Incorrectly assessed strain of masonry walls, pillars, etc. can lead to a faulty estimate of the magnitude of forces redistributed between them.

Aim. To obtain experimental data on the strength and strain of masonry made of historical brick, including that constructed with lime mortar; to use the obtained results for strength and strain studies of masonry reinforced by mortar injection, including in combination with indirect reinforcement, in areas with repairs during the restoration of historical masonry with contemporary one, as well as in locations of combined action of backfill and facing layers.

Materials and methods. Compression tests are carried out on historical brick samples in the form of pillars and walls with mortars of various strengths, including lime mortar. Samples with the inner layer (backfill) different in strength and strain from the facing layers are additionally tested for local compression and central compression with a uniformly distributed load.

Results. The main strength and strain characteristics of masonry made of historical brick, including those with lime mortar, are obtained. The research results are used in the development of regulatory documents on masonry structures, as well as recommendations and projects for strengthening the masonry structures of historical buildings.

Conclusions. The elastic characteristics of masonry with lime and complex lime-admixed mortars are below the standard values. The transverse expansion coefficients of masonry (Poisson's ratio) for various vertical stresses were obtained to be included in regulatory documents. The compressive strength of the masonry significantly exceeds the values specified in the standards, which is largely due to the quality of performed work as well as specifics of historical bricks masonry.

Keywords: historical brick masonry, lime mortar, masonry strain, masonry strength, testing, central compression, local compression, Poisson's ratio

For citation: Ishchuk M.K., Ishchuk E.M. Stress and strain studies of historical masonry. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction.* 2025;47(4):33–46. (In Russian). https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-4(47)-33-46

Authors contribution statement
All authors made equal contributions to the study and the publication.

Funding
Funding was provided by the laboratory own funds and federal budget for 90 and 10%, respectively.

Conflict of interest
The authors declare no conflict of interest.

Received 01.09.2025
Revised 17.10.2025
Accepted 23.10.2025

Введение

При реконструкции и ремонте зданий с каменными конструкциями важно знать как прочностные характеристики кладки, так и деформационные. Неверная оценка деформационных характеристик кладки стен, столбов и т. д. может привести к некорректной оценке величины усилий, перераспределяемых между ними.

В настоящей работе приводятся результаты испытаний 16 образцов. Из них 9 образцов усиливались после первого этапа испытаний и испытывались вновь. Таким образом, количество испытаний образцов составило 25. Результаты испытаний усиленной кладки инъекцией раствора на втором этапе, в том числе в сочетании с косвенным армированием, приведены в работах авторов [1–4].

Было проведено четыре серии испытаний на центральное сжатие равномерно распределенной нагрузкой и на местное сжатие.

Зависимость прочности кладки от прочности кирпича и раствора

Л.И. Онищиком [5] предложена формула зависимости прочности кладки при одноосном сжатии от прочности кирпича и раствора:

$$R_u = AR_1\left(1-\frac{a}{b+R_2/2R_1}\right)\gamma, \tag{1}$$

где R_u – предел прочности кладки на сжатие;

R_1 – предел прочности кирпича на сжатие;

R_2 – предел прочности раствора на сжатие;

$a = 0{,}2$; $b = 0{,}3$; $m = 1{,}25$; $n = 3$ – эмпирические коэффициенты, принимаемые по [5].

Коэффициент γ в (2) применяют при определении прочности кладки на растворах марок 25 и ниже.

A – коэффициент, показывающий степень использования в кладке прочности кирпича на сжатие, принимаемый по наименьшему значению, полученному по (2*а*), (2*б*), (2*в*):

$$A = \min\begin{cases} \dfrac{100+R_1}{100m+nR_1} & (2a) \\[2ex] \dfrac{1{,}2}{1+\dfrac{R_1}{3R_{u,b}}} & (2б) \\[2ex] \dfrac{2{,}2}{1+\dfrac{R_1}{R_{u,sh}}} & (2в) \end{cases},$$

где R_{ub} – предел прочности кирпича при изгибе;

$R_{u,sh}$ – предел прочности кирпича при срезе.

Поскольку между R_{ub} и $R_{u,sh}$ существует корреляционная зависимость, со временем было принято решение отказаться от оценки коэффициента A по формуле (2*в*). Коэффициент γ в (1) применяют при определении прочности кладки на растворах марок М25 и ниже. В нашем случае для кладки из кирпича γ = 1.

В работе В.П. Некрасова [6] показано, что при пластичных глиняных и известковых растворах, сглаживающих неровности растворной постели, влияние качества разравнивания раствора в меньшей степени влияет на прочность кирпичной кладки. Для менее пластичных цементных растворов было предложено ввести понижающий коэффициент 0,7.

В работе американского исследователя Л.Б. Лента [7], напротив, показано, что в случае пластичных известковых растворов качество кладки сказывается в большей степени, чем в случае цементно-известковых.

В работах В.А. Камейко, С.А. Семенцова [8] и Л.И. Онищика [9] показано, что качество изготовления кладки, которое можно оценить коэффициентом $k_{\text{рука кам}}$, может изменяться в пределах от 0,9 для малоквалифицированных каменщиков до 1,55. Начиная с 1949 г. в нормативных документах [10, 11] прочность кладки, определенная по формуле Л.И. Онищика, принята при $k_{\text{рука кам}} = 1$. В работе Л.И. Онищика [12] приведены переводные эмпирические коэффициенты на различные формы и масштабы опытных образцов, которые мы обозначили $k_{\text{м}}$. Подставив в (1) коэффициенты $k_{\text{рука кам}}$ и $k_{\text{м}}$, получим видоизмененную формулу Л.И. Онищика:

$$R_u = k_{\text{рука кам}}\, k_{\text{м}}\, A R_1 \left(1 - \frac{a}{b + \dfrac{0{,}5 R_2}{R_1}} \right) \gamma. \qquad (3)$$

Следует отметить, что неучет качества изготовления кладки, формы и габаритов образцов является типичной ошибкой при проведении многих экспериментальных исследований. Учет этих факторов следует внести и в ГОСТ [13] по испытанию кладки на сжатие.

1. Серии М1 и М1Иэп-тр

1.1. Материалы и методы экспериментальных исследований

Конструкции и материалы экспериментальных образцов

Образцы серий М1 и М1Иэп-тр имели габариты 0,25 × 0,38 × 0,9 м (рис. 1). Образцы выполнялись из кирпича, отобранного с ЦВЗ «Манеж» (далее – «Манеж»), марки М50 на известковом растворе прочностью на сжатие R_2 = 0,8 МПа. При этом предварительно известковое тесто выдерживалось в залитой водой емкости более одного года. На рис. 1 показаны подготовленные к испытаниям образцы серии М1.

Методика проведения испытаний

Образцы испытывались равномерно распределенной нагрузкой на центральное сжатие в гидравлическом прессе (рис. 2). Верхняя плита пресса была оборудована шаровым шарниром, нижняя – заклинена.

Вертикальные и горизонтальные деформации определялись по перемещениям, измеряемым индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Рис. 1. Образцы кладки серии М1
Fig. 1. M1 series masonry samples

Рис. 2. Образец серии М1 в гидравлическом прессе
Fig. 2. M1 series masonry sample in a hydraulic press

Образцы серии М1 испытывались в один этап. Образцы серии М1Иэп-тр, получившие трещины после испытания на первом этапе, усиливались инъекцией. Результаты испытаний усиленных образцов на втором этапе приведены в [2].

1.2. Результаты испытаний образцов кладки серий М1 и М1Иэп-тр

Характер разрушения опытных образцов

Первые трещины появлялись при уровне нагрузки 0,6–0,8 от предельного значения N_u. Трещины были преимущественно вертикальные и проходили по всей высоте образцов. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Прочность кладки

Среднее значение временного сопротивления кладки сжатию R_u у образцов с индексом «с», сложенных первым каменщиком (табл. 1), составило 2,3 МПа, а у образцов с индексом «д», сложенных вторым каменщиком, оно равно 1,9 МПа. При этом оба каменщика работали одновременно и пользовались раствором, замешенным в одной емкости. Таким образом, влияние квалификации каменщика («руки каменщика») составило более 20 %.

Упругие свойства кладки

На рис. 3 приведены зависимости вертикальных деформаций кладки от относительного уровня ее обжатия.

Предельные вертикальные деформации кладки ε_u составили $0{,}47 \times 10^{-2}$. Горизонтальные предельные деформации $\varepsilon_{г,u}$ оказались существенно выше ($-1{,}1 \times 10^{-3}$).

Модуль упругости кладки E_0 при уровне нагрузки $N = 0{,}2N_u$, когда нелинейные деформации еще невелики, составил 636 МПа.

Упругая характеристика кладки α, являющаяся коэффициентом пропорциональности между модулем упругости и временным сопротивлением R_u, равна:

$$A = E_0/R_u = 300. \quad (4)$$

Таблица 1

Результаты испытаний образцов кладки

Table 1

Results of testing masonry samples

№	Серия	№ образца	N_u, МН	Габариты, м	Масштабный коэф. $k_м$ по [12]	Прочность кладки, R_u, МПа	
						единичное	средн.
Образцы из кирпича «Манеж» на известковом растворе							
1	М1	№ 1с	0,245	~0,25 × 0,38	0,91	2,4	2,3
2		№ 2с	0,225			2,2	
3		№ 3с	0,225			2,2	
4		№ 7с	0,243			2,3	
Образцы из кирпича «Манеж» на известковом растворе. После первого этапа усилены инъекцией							
5	М1Иэп-тр	№ 1д	0,184	~0,25 × 0,38	0,91	1,8	1,9
6		№ 2д	0,205			2,0	
Образцы из кирпича «Манеж» испытаны в один этап без усиления							
7	М3	№ 1Ст	0,147	~0,12 × 0,24	0,75	3,8	4,2
8		№ 2Ст	0,191			4,9	
9		№ 3Ст	0,145			3,8	
Образцы из кирпича «Манеж» из комбинированной кладки. После испытания усилены инъекцией							
10	М4-ЦС	№ 1-4д	0,843	~0,38 × 0,51	1,0	4,4	4,0
11		№ 2-5д	0,716			3,7	
12	М5-МС	№ 3-8с	0,343		1,0	–	–
13		№ 4-9с	0,343			–	–
Образцы из кирпича БТ. После первого этапа усилены инъекцией							
14	БТ-Иэп-тр	№ 2-1	0,132	~0,42 × 0,57	1,01	0,6	1,0
15		№ 2-2	0,343			1,4	
16		№ 3-2	0,157	~0,39 × 0,52		0,8	0,8

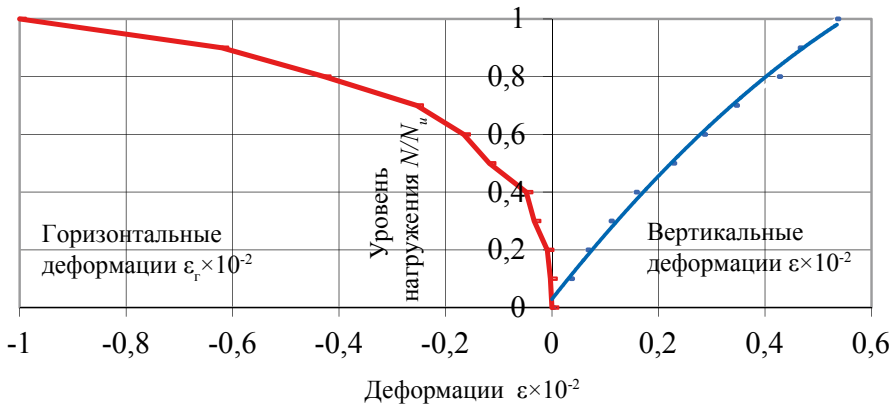

Рис. 3. Образцы серий М1 и М1Иэп-тр. Зависимости вертикальных и горизонтальных деформаций кладки от относительного уровня ее обжатия

Fig. 3. M1 and M1-Iep-tr series masonry samples: dependence of vertical and horizontal strain on relative compression

Значения коэффициента поперечного расширения кладки (коэффициента Пуассона) при различных уровнях нагрузки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициент Пуассона при различных уровнях нагрузки

Table 2

Poisson's ratio at various load levels

Уровень нагрузки, N/N_u	Деформации		Коэф. Пуассона, $\nu = \varepsilon_r/\varepsilon$
	вертик., $\varepsilon \times 10^{-2}$	горизонт., $\varepsilon_r \times 10^{-2}$	
0,2	0,066	0,009	0,14
0,5	0,227	0,118	0,52
0,8	0,426	0,428	1,00

2. Серия М3

2.1. Материалы и методы экспериментальных исследований

Из кирпича «Манеж» М50 на растворе прочностью на сжатие R_2 = 6,6 МПа были изготовлены три образца с габаритами в плане 12 × 24 см (рис. 4).

Методика проведения испытаний была аналогичной для образцов серии М1.

2.2. Результаты испытаний образцов

Характер разрушения опытных образцов

Первые трещины появлялись при уровне нагрузки 0,7–0,9 от предельного значения N_u. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Прочность кладки

Прочность кладки R_u, средняя из испытаний трех образцов, с учетом масштабного коэффициента, равного 0,75, составила 4,16 МПа.

Упругие свойства кладки

Предельные деформации составили в среднем для трех образцов 0,47 × 10^{-2}. Средний для трех образцов модуль упругости E_0 = 1188 МПа, упругая характеристика кладки α = 286.

Рис. 4. Образец серии М3 после испытаний на сжатие
Fig. 4. M3 series masonry sample after compression tests

3. Серия БТ-Иэп-тр

3.1. Материалы и методы экспериментальных исследований

Образцы имели габариты в плане 0,38 × 0,51 × 1,2 м и 0,42 × 0,57 × 1,2 м. Отобранный во время реконструкции здания Большого театра кирпич был двух марок: М100 и М50. Кладка велась на растворах низкой прочности 0,2 МПа без добавки извести. Образцы испытывались на центральное сжатие в гидравлическом прессе (рис. 5*а*).

3.2. Результаты испытаний

На рис. 5*б* приведена фотография образца после первого этапа испытаний (до усиления). Разрушение происходило в результате образования вертикальных трещин, проходящих по кирпичу и вертикальным растворным швам. Первые трещины у образцов из кирпича М100 появлялись при уровне нагрузки, равном 0,1–0,3 от предельного значения N_u. Трещины развивались равномерно по всей высоте образца, разделяя его на отдельные вертикальные столбики. Среднее значение временного сопротивления кладки из кирпича марки М100 составило 1,0 МПа, а из кирпича М50 – 0,8 МПа.

Предельные деформации кладки из кирпича М100 составили $3{,}2 \times 10^{-3} – 4{,}5 \times 10^{-3}$ и из кирпича М50 $2{,}5 \times 10^{-3}$. На рис. 6 приведен средний для трех образцов график зависимости вертикальных деформаций кладки от относительного уровня ее обжатия. Упругая характеристика кладки α составила 818.

а (a)

б (b)

Рис. 5. Образец серии БТ-Иэп-тр: *а* – в процессе испытания; *б* – после испытания
Fig. 5. BT-Iep-tr series masonry sample: *a* – during testing; *b* – after testing

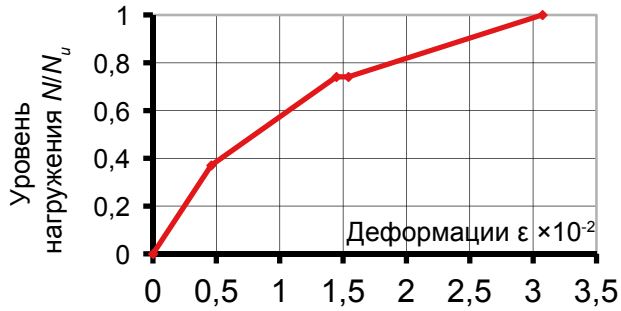

Рис. 6. Образцы серии БТ-Иэп-тр. Зависимость вертикальных деформаций кладки от относительного уровня ее обжатия
Fig. 6. BT-Iep-tr series masonry samples: dependence of vertical and horizontal strain on relative compression

4. Образцы серий М4-ЦС и М5-МС

4.1. Материалы и методы экспериментальных исследований

Конструкции и материалы экспериментальных образцов

Образцы выкладывались из кирпича «Манеж» марки М50. Забутовка (внутренний слой кладки), обычно имеющая меньшую прочность по сравнению с лицевыми слоями, по свойствам была идентична образцам серии М1, выкладывалась на растворе прочностью 0,8 МПа и имела сечение в плане 0,25 × 0,38 м. Лицевые слои по свойствам были идентичны образцам серии М3, выкладывались на растворе прочностью 6,6 МПа и имели толщину по 0,12 м (рис. 7).

Перевязка забутовки и лицевых слоев осуществлялась через пять рядов кладки (рис. 8). Габариты образцов в плане составили 0,38 × 0,50 м, высота – четырнадцать рядов кладки (1,2 м).

Образцы обеих серий испытывались в два этапа. Получившие трещины на первом этапе образцы усиливались инъекцией раствора с добавкой гидравлической извести и косвенным армированием. В настоящей статье приведены результаты испытаний образцов на первом этапе.

Образцы серии М4-ЦС испытывались равномерно распределенной нагрузкой. Индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм измерялись вертикальные перемещения. Образцы серии М5-МС были испытаны на местное сжатие с передачей нагрузки через стальную

Рис. 7. Изготовление образца серии М4-ЦС: *1* – забутовка; *2* – лицевой слой
Fig. 7. Manufacturing of a M4-TsS series masonry sample: *1* – backfill; *2* – facing layer

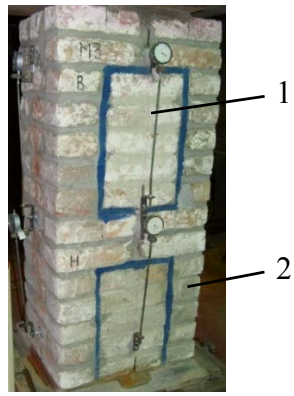

Рис. 8. Образец серии М4-ЦС: *1* – забутовка; *2* – лицевой слой
Fig. 8. M4-TsS series masonry sample: *1* – backfill; *2* – facing layer

Рис. 9. Образец серии М4-ЦС после испытаний на сжатие равномерно распределенной нагрузкой
Fig. 9. M4-TsS series masonry sample after compression tests with a uniformly distributed load

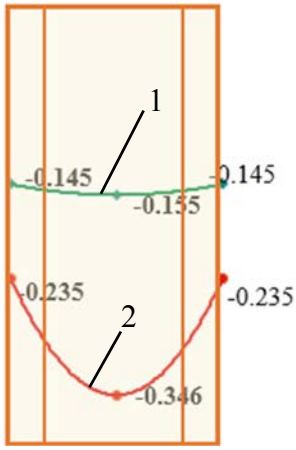

Рис. 10. Эпюры вертикальных деформаций $\varepsilon \times 10^{-2}$ в средней по высоте части образца № 1-4д серии М4-ЦС при уровнях нагрузки: *1* – $N = 0{,}5N_u$; *2* – $N = 0{,}8N_u$
Fig. 10. Diagrams of vertical strain $\varepsilon \times 10^{-2}$ in the middle height part of the M4-TsS series sample No. 1-4d at various load levels: *1* – $N = 0.5N_u$; *2* – $N = 0.8N_u$

плиту шириной 25 см, уложенную по оси симметрии образца. Индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм измерялись вертикальные перемещения в двух уровнях по высоте образцов.

4.2. Результаты испытаний образцов серии М4-ЦС (первый этап)

Характер разрушения опытных образцов серии М4-ЦС

Первые трещины появились на широких гранях по вертикальным швам между забутовкой и лицевыми слоями, а также по вертикальному шву между перевязочными кирпичами в двух верхних рядах кладки при уровне нагрузки 40–50 % от предельного значения. При уровне нагрузки 60–70 % от предельной появились трещины в лицевых слоях. Разрушение происходило в результате образования по всем граням вертикальных трещин (рис. 9).

Прочностные характеристики кладки образцов серии М4-ЦС

Средняя величина предельного вертикального усилия N_u составила 0,8 МН.

Упругие свойства кладки образцов серии М4-ЦС

На рис. 10 приведены эпюры вертикальных деформаций в образце № 1-4д. С ростом нагрузки деформации кладки забутовки все более превышают деформации лицевых слоев.

4.3. Результаты испытаний образцов серии М5-МС (первый этап)

Характер разрушения опытных образцов серии М5-МС

Первые видимые трещины образовались при уровне вертикального усилия $0{,}4N_u$ в вертикальных растворных швах по оси приложения усилия и по границам забутовки в верхней части образца. При уровне усилия $0{,}86N_u$ произошло практически полное отделение лицевых слоев от забутовки, за исключением нижней части образца. Таким образом, по мере роста нагрузки происходило выключение из работы кладки лицевых слоев вследствие их отделения

а (a) б (b)

Рис. 11. Образцы серии М5-МС после испытания на местное сжатие: *а* – № 3-9с; *б* – № 4-8с

Fig. 11. M5-MS series masonry samples after local compression tests: *a* – No. 3-9s; *b* – No. 4-8s

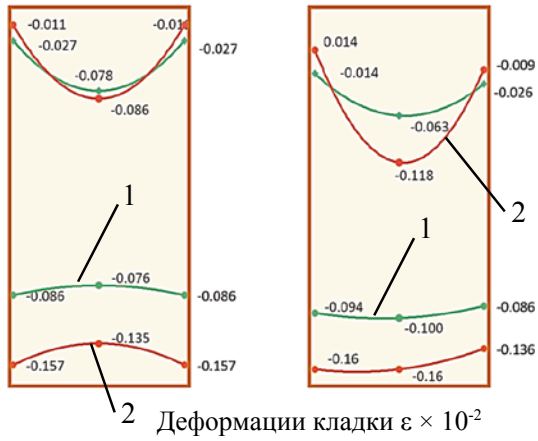

Рис. 12. Эпюры вертикальных деформаций кладки в средней по высоте части образца серии М5-МС: *а* – № 4-8с; *б* – № 3-9с при уровне нагрузки; *1* – $N = 0{,}5N_u$; *2* – $N = 0{,}8N_u$

Fig. 12. Diagrams of vertical strain in the middle-height part of the M5-MS series masonry sample: *a* – No. 4-8s; *b* – No. 3-9s at a load level: *1* – $N = 0.5N_u$; *2* – $N = 0.8N_u$

от забутовки по их границам вертикальными трещинами в верхней части образца (рис. 11). По боковым граням в лицевых слоях в их верхней части произошло раскрытие горизонтальных растворных швов.

Прочностные характеристики кладки

Предельное вертикальное усилие N_u для образцов серии М5-МС на первом этапе испытаний составило 0,34 МН. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Деформации кладки образцов серии М5-МС

После образования трещин между забутовкой и лицевыми слоями деформации кладки лицевых слоев в верхней части образца по боковым граням несколько уменьшились и стали еще более отличаться от деформаций забутовки. В нижней части образца деформации отличались между собой не столь значительно вплоть до разрушения образцов (рис. 12).

5. Анализ результатов исследований

5.1. Сравним несущую способность кладки из исторического кирпича М50 на известковом растворе прочностью $R_2 = 0{,}8$ МПа серии М1 с несущей способностью кладки из современного керамического кирпича той же марки.

Для кладки из кирпича «Манеж» прочностью на сжатие $R_1 = 6{,}2$ МПа и изгиб $R_b = 1{,}4$ МПа конструктивный коэффициент A в (1) принимаем по изгибу (2*б*) как по наименьшему значению, равному 0,48. Коэффициент γ в (1) принимаем равным 1.

Отсюда прочность кладки по (1) равна:

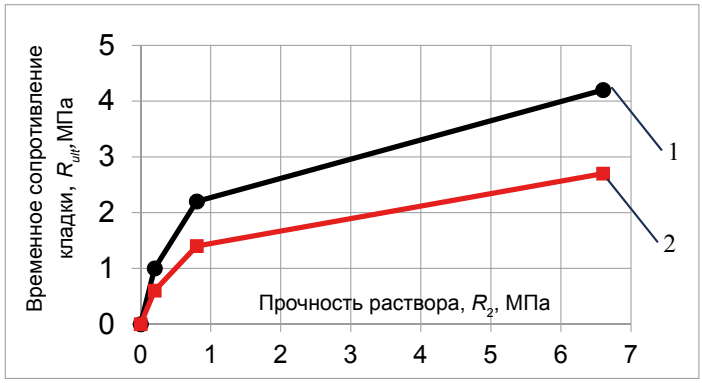

Рис. 13. Зависимости прочности кладки R_u от прочности кладочного раствора R_2: *1* – кладка из исторического кирпича; *2* – кладка из современного кирпича
Fig. 13. Dependencies of the masonry strength R_u on the strength of the masonry mortar R_2: *1* – historical brick masonry; *2* – contemporary brick masonry

$$R_u = 0,48 \times 6,2 \left(1 - \frac{0,2}{0,3 + \frac{0,8}{2 \times 6,2}} \right) 1,0 = 1,3 \text{ МПа}.$$

Это значение в 1,7 раза меньше полученного с учетом масштабного коэффициента $k_м = 0,91$ экспериментального значения $R_u = 2,3$ МПа.

Аналогично подсчитаны по (1) значения прочности кладки для образцов серий М3 и БТ-Иэп-тр. Для образцов серии М3, выполненной на растворе $R_2 = 6,6$ МПа, экспериментальные значения $R_u = 4,2$ МПа превышают приведенные в нормах также в 1,8 раза. Для образцов серии БТ-Иэп-тр, выполненной на растворе $R_2 = 0,2$ МПа, экспериментальные значения $R_u = 1,0$ МПа превышают приведенные в нормах в 1,7 раза, однако в силу ограниченного количества образцов это значение рассматриваем как предварительное.

На рис. 13 показаны графики зависимости прочности кладки R_{ult} из исторического кирпича (кривая 1), полученные из эксперимента, и современного кирпича (кривая 2), подсчитанные по формуле (1), от прочности кладочного раствора R_2.

Принимая в запас максимально возможную величину коэффициента $k_{рука\ кам} = 1,55$, получаем превышение прочности испытанной кладки по отношению к полученной по формуле (3) на 10 %. В этой связи рекомендовано для кладки из исторического кирпича М50 на растворах прочностью М10–М50 ввести повышающий коэффициент 1,1.

5.2. Упругая характеристика кладки α = 300 для образцов из кирпича М50 на известковом растворе прочностью $R_2 = 0,8$ МПа и α = 286 для образцов из кирпича М50 на растворе цементно-известковом прочностью $R_2 = 6,6$ МПа. Таким образом, для практического применения для испытанной кладки из исторического кирпича на растворах прочностью 0,8–6,6 МПа может быть принято α = 300.

5.3. Коэффициент поперечного расширения кладки (коэффициент Пуассона) из исторического кирпича, выполненной на известковом растворе, $\nu = 0,14$ при уровне вертикальных напряжений $\sigma = 0,2R_u$. При уровне напряжений, равном расчетному сопротивлению кладки $R = 0,5R_u$, коэффициент $\nu = 0,52$.

5.4. Упругая характеристика кладки α = 800 для образцов из кирпича М50–М100 на слабом жестком растворе без добавок извести прочностью R_2 = 0,2 МПа, что может иметь место при выветренном растворе на участках ремонта кладки (например, вокруг оконных и дверных проемов).

5.5. При уровне равномерно распределенной нагрузки до 50 % от предельной была обеспечена совместная работа лицевых слоев с забутовкой. При местном приложении нагрузки отделение лицевых слоев от забутовки началось при уровне нагрузки 40 % от предельной.

5.6. Прочность кладки на сжатие целесообразно считать по видоизмененной формуле Л.И. Онищика (3) с введением в нее коэффициентов, учитывающих качество кладки ($k_{\text{рука кам}}$) и влияние габаритов ($k_{\text{м}}$).

Список литературы

1. *Ищук М.К., Фролова И.Г., Ищук Е.М.* Усиление каменных конструкций. Промышленное и гражданское строительство. 2006;(8):28–30.
2. *Ищук М.К., Ищук Е.М., Фролова И.Г.* Усиление кладки методом инъекции эпоксидной смолы. Промышленное и гражданское строительство. 2013;(4):48–51.
3. СТО 36554501-010-2008. Усиление кирпичной кладки методом инъекции эпоксидной смолы GLOBALPOX I-10/138/ВТ. Москва: НИЦ «Строительство»; 2008.
4. *Ищук М.К., Ищук Е.М., Гогуа О.К.* ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство». Методические указания по усилению каменной кладки, в том числе исторических зданий, инъекцией раствором [интернет]. Москва; 2019. Режим доступа: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293720/4293720336.pdf.
5. *Онищик Л.И.* Каменные конструкции. Москва: Стройиздат; 1939.
6. *Некрасов В.П.* Теория прочности каменных кладок. Москва: Стройиздат; 1947.
7. *Лент Л.Б.* Кирпич и кирпичная кладка в США: (Исследования и испытания). Москва; Ленинград: ОНТИ. Глав. ред. строит. лит-ры; 1937.
8. *Камейко В.А., Семенцов С.А.* Состояние и основные направления исследований прочности каменных конструкций. В: Теоретические и экспериментальные исследования каменных конструкций: сб. тр. Москва: Стройиздат; 1978, с. 6–45.
9. *Онищик Л.И.* Пояснительная записка к главе 3. В: Нормы проектирования конструкций: проект. Материалы для урочного положения. 4 ред. Москва: Машстройиздат; 1949, с. 131–152.
10. Глава 3. Нормы проектирования каменных и армокаменных конструкций. В: Нормы проектирования конструкций (проект). Материалы для урочного положения. 4 ред. Москва: Машстройиздат; 1949, с. 37–63.
11. НиТУ 120-55. Нормы и технические условия проектирования каменных и армокаменных конструкций. Киев: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре; 1956.
12. *Онищик Л.И.* Особенности работы каменных конструкций под нагрузкой в стадии разрушения. В: Исследования по каменным конструкциям: сб. ст. Москва, Ленинград: Стройиздат; 1949, с. 5–44.
13. ГОСТ 32047-2012. Кладка каменная. Метод испытания на сжатие. Изм. №1 [интернет]. Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/1200101520.

References

1. *Ishchuk M.K., Frolova I.G., Ishchuk E.M.* Strengthening of Masonry Structures. Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering. 2006;(8):28–30. (In Russian).
2. *Ishchuk M.K., Ishchuk E.M., Frolova I.G.* Strengthening Masonry by Injecting Epoxy Resin. Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering. 2013;(4):48–51. (In Russian).
3. STO 36554501-010-2008. Strengthening Brickwork by Injecting Epoxy Resin GLOBALPOX I-10/138/BT. Moscow: SC Research Center of Construction; 2008. (In Russian).

4. *Ishchuk M.K., Ishchuk E.M., Gogua O.K.* Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction. Guidelines for Strengthening Masonry, Including Historic Buildings, by Injecting Mortar [internet]. Moscow; 2019. (In Russian).
5. *Onishchik L.I.* Stone Structures. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1939. (In Russian).
6. *Nekrasov V.P.* Theory of Masonry Strength. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1947. (In Russian).
7. *Lent L.B.* Brick and Brickwork in the USA: (Research and Testing). Moscow; Leningrad: ONTI. Editor-in-Chief of Construction Literature; 1937. (In Russian).
8. *Kameiko V.A., Semenov S.A.* Status and Main Directions of Research on the Strength of Masonry Structures. In: Theoretical and Experimental Studies of Masonry Structures: collection of works. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1978, pp. 6–45. (In Russian).
9. *Onishchik L.I. Explanatory Note to Chapter 3.* In: Structural Design Standards: draft. Materials for the Standard Position. Fourth edition. Moscow: Mashstroyizdat Publ.; 1949, pp. 131–152. (In Russian).
10. Chapter 3. Design Standards for Masonry and Reinforced Masonry Structures. In: Structural Design Standards: draft. Materials for the Standard Position. Fourth edition. Moscow: Mashstroyizdat Publ.; 1949, pp. 37–63. (In Russian).
11. NiTU 120-55. Design Standards and Technical Conditions for Masonry and Reinforced Masonry Structures. Kyiv: State Publishing House of Literature on Construction and Architecture; 1956. (In Russian).
12. *Onishchik L.I.* Performance of Masonry Structures under Load in the Fracture Stage. Research on Masonry Structures: Collection of Articles. Moscow, Leningrad: Stroyizdat Publ.; 1949, pp. 5–44. (In Russian).
13. State Standard 32047-2012. Masonry. Compression Test Method with Amendment No. 1 [internet]. Available at: https://docs.cntd.ru/document/1200101520. (in Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Карпович Ищук✉**,** д-р техн. наук, заведующий лабораторией реконструкции уникальных каменных зданий и сооружений, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: kamkon@yandex.ru
Mikhail K. Ishchuk✉**,** Dr. Sci. (Engineering), Laboratory Head, Laboratory for the Reconstruction of Unique Stone Buildings and Structures, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: kamkon@yandex.ru

Евгений Михайлович Ищук, заведующий группой лаборатории реконструкции уникальных каменных зданий и сооружений, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: ruskon@inbox.ru
Evgeny M. Ishchuk, Group Head, Laboratory for the Reconstruction of Unique Stone Buildings and Structures, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: ruskon@inbox.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author