

Деркач В. Н.

ОЦЕНКА АНИЗОТРОПИИ ПРОЧНОСТИ ПРИ СЖАТИИ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ЗДАНИЙ СТАРОЙ ПОСТРОЙКИ

Введение. Большинство каменных конструкций (стены, междуоконные простенки, столбы) воспринимают сжимающие усилия, направленные перпендикулярно плоскости горизонтальных растворных швов. Прочность каменной кладки в этом случае определяется прочностью кладочных изделий, f_B и кладочных растворов, f_m .

Согласно СНиП II-22-81 прочность кладки при сжатии f_u устанавливается по эмпирической зависимости, предложенной Л. И. Онищиком:

$$f_u = A \cdot f_B \left(1 - \frac{a}{f_m}\right) \cdot \gamma, \quad (1)$$

$$b + \frac{f_m}{2f_b}$$

где f_B , f_m – прочность при сжатии кладочного изделия и кладочного раствора соответственно;

A – конструктивный коэффициент, зависящий от вида кладочного изделия;

a , b – эмпирические коэффициенты, зависящие от вида кладки;

γ – поправочный коэффициент для кладки на низких растворах.

Характеристическое значение прочности при сжатии каменной кладки на растворе общего назначения в соответствии с Еврокодом 6 определяют по формуле (2).

$$f_k = K \cdot f_b^{0,7} \cdot f_m^{0,3}, \quad (2)$$

где K – константа, зависящая от вида кладочного изделия;

f_b – приведенная (нормализованная) прочность при сжатии кладочного изделия;

f_m – прочность при сжатии кладочного раствора.

При эксплуатации каменных зданий могут возникнуть ситуации, когда в каменной кладке возникают сжимающие усилия, направленные под углом к плоскости горизонтальных растворных швов. Например, в стенах-диафрагмах жесткости при действии на них горизонтальных усилий вдоль плоскости стены или при неравномерной деформации основания фундаментов каменных стен. В данных случаях исчерпание несущей способности стен, кладка которых выполнена из керамического полнотелого кирпича, как правило, происходит в результате действия главных растягивающих или касательных напряжений. Вместе с тем, в зданиях старой постройки имеется множество каменных конструкций, несущая способность которых определяется прочностью каменной кладки при сжатии под углами к растворным швам. Это различного рода сводчатые конструкции, надпроемные каменные перемычки арочного или стрельчатого очертания. Угол наклона сжимающего усилия к растворным швам каменной кладки в указанных конструкциях зависит от их формы, отношения пролета к стреле подъема и находится в пределах $10-40^\circ$.

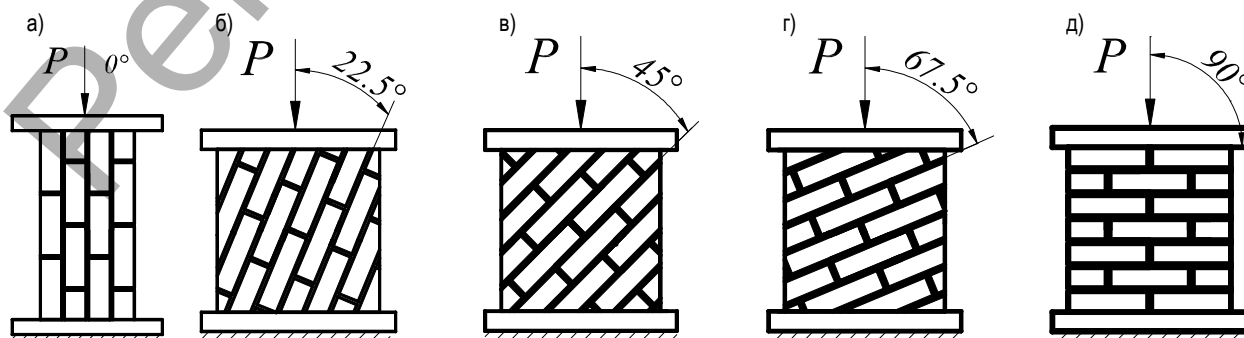
Проверка предельного состояния несущей способности кирпичных сводов или арок производится из условия, согласно которому значения главных сжимающих напряжений в каменной кладке не должны превышать значений ее прочности при сжатии в соответствующем направлении. Значения главных сжимающих напряжений и углы наклона их траекторий устанавливаются, как правило, расчетом конструкции методом конечных элементов (МКЭ) [1–3].

Проблема заключается в отсутствии в нормативных документах данных о прочности при сжатии каменной кладки под углами к ее главным осям анизотропии, которые совпадают с направлением вертикальных и горизонтальных растворных швов.

Результаты экспериментально-теоретических исследований анизотропии прочности при сжатии каменной кладки. С целью получения данных об анизотропии прочности при сжатии каменной кладки в филиале РУП «БелНИИС» – НТЦ были проведены испытания образцов, выполненных из полнотелого керамического кирпича, подверженных действию сжимающей нагрузки под различными углами к горизонтальным растворным швам. Всего было испытано двадцать пять опытных образцов каменной кладки, изготовленных из полнотелого керамического кирпича М150 на известково-цементном растворе прочностью $f_m=7,9$ МПа (рисунок 1) [4–6].

Установлено, что прочность каменной кладки при сжатии и характер ее разрушения, в значительной степени определяется углом приложения сжимающей нагрузки к горизонтальным растворным швам. Минимальные значения прочности при сжатии кладки имели место при направлении сжимающего усилия F_c под углами к горизонтальным швам кладки $\theta = 25^\circ-40^\circ$. При указанных углах наклона разрушение опытных образцов кладки происходило вследствие сдвига в плоскости горизонтальных растворных швов. Объясняется это тем, что при действии сжимающего усилия под углами $0^\circ < \theta < 90^\circ$ на характере разрушения каменной кладки отражаются возникающие в ней касательные напряжения, значения которых возрастают с уменьшением угла направления F_c к горизонтальным швам каменной кладки. Характер разрушения опытных образцов показан на рисунке 2.

Кроме экспериментальных исследований анизотропии прочности каменной кладки, было выполнено численное моделирование испытаний на основе решения МКЭ в среде BK ANSYS нелинейных контактных задач с трением и сцеплением между раствором и кладочными изделиями. КЭ модели каменной кладки представляли собой конструкцию из кирпича, растворных швов и контактных поверхностей между ними. В КЭ моделях кирпич и раствор рассматривались как изотропный материал и моделировались с использованием КЭ SOLID65. Данный КЭ позволял учитывать нелинейные свойства материала, а также образование трещин при растяжении (в трех ортого-



а – $\theta = 0^\circ$; б – $\theta = 22,5^\circ$; в – $\theta = 45^\circ$; г – $\theta = 67,5^\circ$; д – $\theta = 90^\circ$

Рисунок 1 – Схема испытаний образцов кладки сжимающей нагрузкой под углами θ к горизонтальным растворным швам



а – $\Theta = 0^\circ$; б – $\Theta = 22,5^\circ$; в – $\Theta = 45^\circ$; г – $\Theta = 67,5^\circ$;
д – $\Theta = 90^\circ$

Рисунок 2 – Характер разрушения опытных образцов каменной кладки

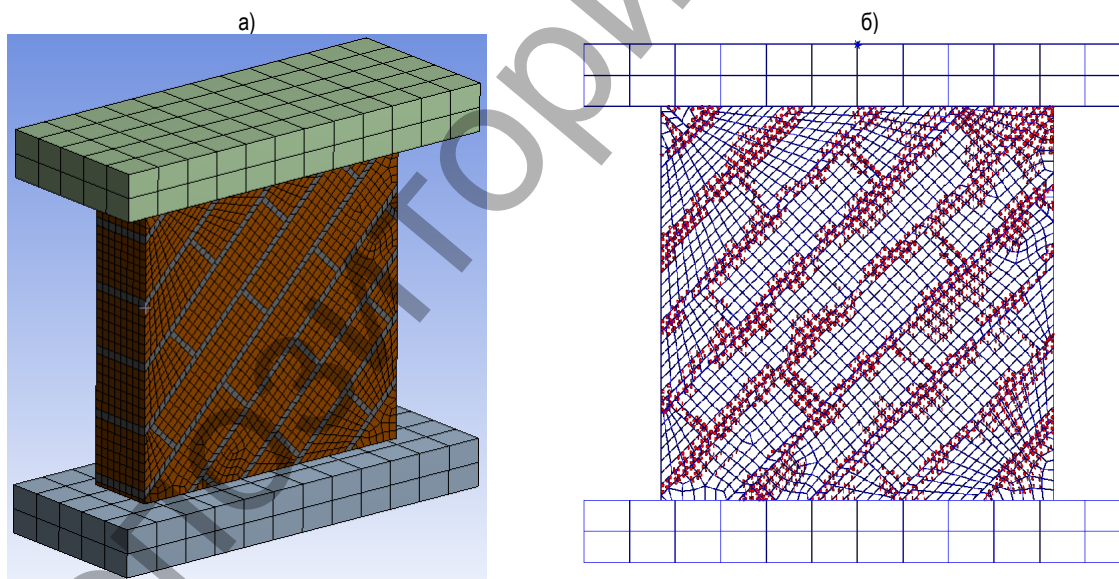


Рисунок 3 – КЭ модель опытного образца каменной кладки $\Theta = 45^\circ$ (а) и характер разрушения образца (сдвиг кладки с раздроблением кирпича) (б)

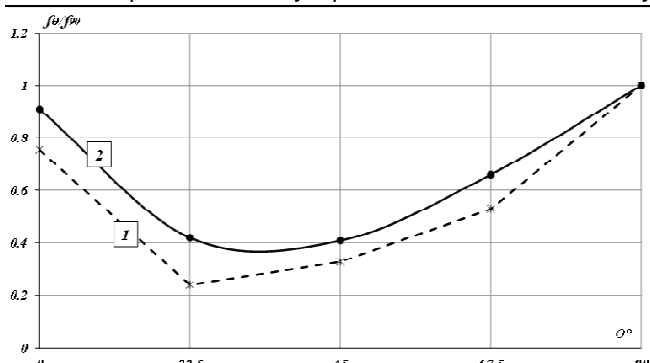
нальных направлениях), раздробление материала при сжатии, пластическое деформирование, ползучесть, большие деформации, изменение жесткости при приложении нагрузок (рисунок 3).

Необходимые для расчета прочностные и деформационные характеристики материала кирпича и раствора были получены на основании испытаний, а значения прочности касательного сцепления и угла внутреннего трения заимствованы из работы [7].

На рисунке 4 приведены графики зависимости отношения прочностей при сжатии каменной кладки под углом к горизонтальным растворным швам Θ^0 (f_Θ) и 90° (f_{cy}) от угла направления сжимающей нагрузки Θ^0 , полученные на основании экспериментальных и численных исследований.

Из рисунка 4 следует, что графики зависимости « $\frac{f_\Theta}{f_{cy}} - \Theta^0$ »

опытных образцов кладки, установленные на основании физических и численных экспериментов, имеют удовлетворительное качественное и количественное согласование. Более высокие значения прочности, полученные расчетным методом, объясняются тем, что в идеализированной расчетной модели не учтены дефекты, которые имеют место при выполнении кладочных работ. Для практических целей полученные расчетом значения прочности кладки при сжатии при $\Theta < 90^\circ$ следует уменьшать на 30%.



1 – экспериментальные исследования, 2 – численные исследования f_{cy} – прочность кладки при сжатии перпендикулярно плоскости горизонтальных растворных швов

Рисунок 4 – Графики зависимости « $\frac{f_{\theta}}{f_{cy}} - \theta^{\circ}$ »

Таким образом, установив по результатам обследования каменной конструкции необходимые исходные данные (прочностные показатели кирпича и раствора, а также значения прочности касательного сцепления и угла внутреннего трения), можно МКЭ рассчитать прочность каменной кладки при сжатии под любым углом к плоскости горизонтальных растворных швов.

Определение прочностных показателей кладочных материалов при обследовании каменных конструкций. Прочность при сжатии кирпича и раствора, отобранных из тела каменной конструкции, можно определить в соответствии со стандартной методикой, изложенной в [8]. Получив значения прочности при сжатии кладочных материалов, прочностные показатели их при сдвиге и растяжении, а также деформационные характеристики допускается устанавливать по известным эмпирическим зависимостям, связывающим прочность при растяжении, сдвиге и модуль упругости кирпича и раствора с их прочностью на сжатие.

Сложнее обстоит вопрос с определением значения прочности касательного сцепления кладочного раствора с кирпичом и угла внутреннего трения. Указанные значения можно получить, воспользовавшись методом, предложенным в работе [9]. Данный метод основан на испытании цилиндрических образцов показанных на рисунке 5.

Образец выбурируется перпендикулярно плоскости кладки таким образом, чтобы его сечение включало два сегмента кирпича с раствором швом между ними. Испытание образцов проводится в жест-

ких стальных обоймах внутренним диаметром, равным диаметру цилиндрического образца. При испытаниях плоскость горизонтальных растворных швов располагается под углом $0^{\circ} < \alpha < 90^{\circ}$ к направлению действия сжимающего усилия F . Варьируя величиной угла α , предоставляется возможность изменять значения сдвигающих f_v и сжимающих σ_c напряжений, которые определяются по формулам (3, 4).

$$f_v = \frac{F}{d \cdot b} \cos \alpha; \quad (3)$$

$$\sigma_c = \frac{F}{d \cdot b} \sin \alpha, \quad (4)$$

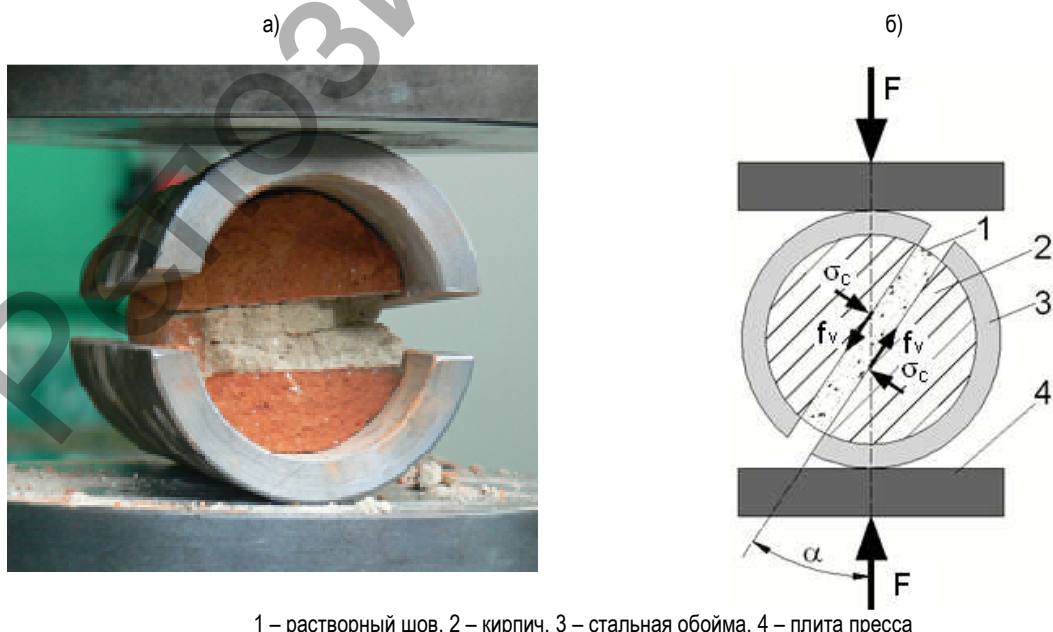
где F – разрушающая нагрузка;
 d, b – соответственно диаметр и длина образца;
 α – угол между направлением действия сжимающей нагрузки и раствором швом.

Зная величину касательных напряжений f_v при разрушающей нагрузке F и соответствующие ей значения сжимающих напряжений σ_c , можно построить график зависимости « $f_v - \sigma_c$ », по которому определить начальное сопротивление сдвигу f_{v0} (прочность касательного сцепления) и угол внутреннего трения C_j .

Получив по результатам обследований необходимые прочностные и деформационные характеристики кладочных материалов, а также значения прочности касательного сцепления и угла внутреннего трения, на основании расчета МКЭ стандартных образцов каменной кладки можно построить график, связывающий значения ее прочности при сжатии от угла наклона сжимающего усилия.

Заключение. На основании изложенного можно сделать следующее заключение:

1. Прочность каменной кладки при сжатии и характер ее разрушения зависят от угла приложения сжимающей нагрузки к горизонтальным растворным швам. По результатам экспериментальных исследований установлено, что минимальные значения прочности при сжатии кладки из керамического кирпича на стандартном известково-цементном растворе имели место при направлении сжимающего усилия под углами к горизонтальным швам кладки $\theta = 25^{\circ} - 40^{\circ}$.
2. Численный расчет МКЭ микромоделей опытных образцов каменной кладки на основе решения нелинейных контактных задач в среде BK ANSYS показал удовлетворительное качественное и количественное согласование теоретических и экспериментальных значений прочности каменной кладки при сжатии под различными углами к растворным швам.



1 – растворный шов, 2 – кирпич, 3 – стальная обойма, 4 – плита пресса

Рисунок 5 – Цилиндрический образец (а) и схема его испытаний на сдвиг при действии сжимающего усилия под углом к растворному шву (б)

3. Предложена методика оценки анизотропии прочности при сжатии каменной кладки на основании исходных данных о прочностных характеристиках кладочных материалов и прочности сцепления раствора с кладочными изделиями, устанавливаемыми при обследовании каменных конструкций.
 5. Деркач, В. Н. Исследование прочности каменной кладки при действии сжимающего усилия параллельно горизонтальным растворным швам / В. Н. Деркач // Вестник БрГТУ: Строительство и архитектура. – 2011. – № 1(67) – С. 43–47.
 6. Галалюк, А. В. Прочность каменной кладки при сжатии под различными углами к горизонтальным растворным швам / А. В. Галалюк // Строительная наука – 2014: теория, образование, практика, инновации (посвящается 55-летию ИСиА САФУ) : сборник трудов Междунар. научно-техн. конф., г. Архангельск, 22–23 мая 2014 г. под ред. Лабудина Б. В. – Архангельск : Изд-во ООО «Типография «ТОЧКА», 2014. – С. 68–73.
 7. Демчук, И. Е. Прочность и деформативность при сдвиге каменных кладок из керамических кладочных элементов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / И. Е. Демчук // Научно-исследовательское республиканское унитарное предприятие по строительству "Институт БелНИИС". – Брест, 2018. – 31 с.
 8. Рекомендации по обследованию и оценке технического состояния крупнопанельных и каменных зданий. – М.: ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, 1988. – 57 с.
 9. Орлович, Р. Б. Оценка прочности кладочных растворов при обследовании каменных зданий / Р. Б. Орлович, В. Н. Деркач // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 7(25). – С. 3–10.
- СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**
1. Зимин, С. С. Сводчатые конструкции исторических зданий / С. С. Зимин, О. Д. Кокоткова, В. В. Беспалов // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – № 2(29). – С. 57–62.
 2. Деркач, В. Н. Несущая способность кирпичных сводов исторических зданий / В. Н. Деркач, А. В. Галалюк, В. В. Беспалов // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: материалы VIII Международной научно-практической конференции. 13 октября 2017 г. – СПб. : Изд-во политехн. ун-та, 2017. – С. 63–70.
 3. Галалюк, А. В. Учет анизотропии прочности каменной кладки при оценке несущей способности исторических распорных конструкций / А. В. Галалюк, В. Н. Деркач // Актуальные проблемы исследований материалов, конструкций, технологий и организации строительства в трансграничном аспекте: сборник статей II Международной научной конференции. – Брест : Издательство БрГТУ. – 2017. – С. 26–31.
 4. Деркач, В. Н. Анизотропия прочности каменной кладки при сжатии / В. Н. Деркач // Научно-технические ведомости СПбГПУ – Наука и образование. – 2011. – № 3(130). – С. 181–186.

Материал поступил в редакцию 15.04.2019

DERKACH V. N. Evaluation of anisotropy of compressive strength of masonry in the inspection of old buildings

The article presents the results of experimental and numerical studies of the anisotropy of the compressive strength of masonry from ceramic solid brick. A satisfactory agreement between the experimental and theoretical values of the masonry strength in compression at different angles to the horizontal mortar joints is shown. It has been established that the minimum compressive strength of masonry from ceramic brick on a standard lime-cement mortar is observed when the direction of the compressive force is at 25–40 degrees to the horizontal mortar joints. A method for determining the strength of the tangential adhesion of masonry mortar and the angle of internal friction based on tests of cylinder specimens drilled from a body of masonry is presented. The method for evaluation of anisotropy of compressive strength of masonry according to the values of compressive characteristics of masonry materials and adhesion strength of mortar observed at inspection of masonry buildings is proposed.

УДК 624.01

Матчан В. А., Лапина А. И.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ШАРНИРОВ ПРИ РАСЧЕТЕ БЕЗБАЛОЧНЫХ ПЛИТ С НЕРЕГУЛЯРНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ОПОР ПО МЕТОДУ ПРЕДЕЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ

В последнее время при строительстве жилых и общественных зданий все чаще используют безбалочные монолитные железобетонные перекрытия. Рассчитывают такие конструкции обычно по методу конечных элементов без учета пластической стадии работы, что приводит к значительному перерасходу арматурной стали и увеличению трудоемкости [1]. Выполнение расчета безбалочных монолитных железобетонных перекрытий по методу предельного равновесия позволило бы решить эту проблему. Еще одним преимуществом метода предельного равновесия является простой математический аппарат, что дает возможность проводить расчеты без применения дорогостоящих программных комплексов. Так же метод открывает широкие возможности для сравнения вариантов проектных решений и их оптимизации. Наиболее сложным этапом расчета является построение линейных пластических шарниров в особенности для конструкций с нерегулярным расположением опор.

Теория предельного равновесия рассматривает конструкцию в момент, непосредственно предшествующий разрушению, когда пластические шарниры объединяются в непрерывные линии. Эти линии разделяют плиту на отдельные звенья, которые формируют механизм разрушения, называемый схемой излома. Согласно закону

сохранения энергии, перед разрушением работа, затраченная на перемещение нагрузки, равна работе, затраченной на поворот конструкции в линиях пластических шарниров, то есть:

$$E = D, \quad (1)$$

где E – работа внешних сил, затраченная на перемещение нагрузки; D – работа внутренних сил, затраченная на поворот в линиях пластических шарниров.

Применив принцип суперпозиции, получим:

$$\sum_{i=1}^n N_i \cdot \delta_i = \sum_{i=1}^n m \cdot l_i \cdot \theta_i, \quad (2)$$

где N_i – равнодействующая нагрузки, приложенной к i -му звену, кН; δ_i – перемещение центра тяжести i -го звена, м; m – предельный изгибающий момент сопротивления в линиях пластических шарниров, кН; l_i – проекция длин линии пластического шарниров i -го звена на ось вращения этого звена, м; θ_i – угол поворота i -го звена, рад. n – количество звеньев.

Матчан Виктор Александрович, к. т. н., доцент кафедры архитектуры Брестского государственного технического университета.
Лапина Анна Ивановна, ст. преподаватель кафедры архитектуры Брестского государственного технического университета.
Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.