

УДК 693.22

УСИЛЕНИЕ КАМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ ВНУТРЕННЕГО АРМИРОВАНИЯ КАМЕННОЙ КЛАДКИ

В. Н. Деркач¹, А. В. Галалиук², С. О. Бурак³

¹ Д. т. н., профессор, директор, филиал «Научно-технический центр» РУП «СТРОЙТЕХНОРМ», Брест, Беларусь, e-mail: v-derkach@yandex.ru

² К. т. н., начальник управления, филиал «Научно-технический центр» РУП «СТРОЙТЕХНОРМ», Брест, Беларусь, e-mail: Halaliuk@mail.ru

³ Инженер-конструктор, филиал «Научно-технический центр» РУП «СТРОЙТЕХНОРМ», Брест, Беларусь, e-mail: ntc@stn.by

Реферат

Приведен анализ методов ремонта и усиления системами внутреннего армирования поврежденной трещинами каменной кладки из кирпича и природного камня. Отмечено, что эффективность внутреннего армирования каменной кладки зависит от значений, действующих в конструкции начальных напряжений. Указано на недостаточную изученность эффективности данного метода для усиления каменных кладок из эффективных стеновых материалов, в частности кладок из ячеистобетонных блоков автоклавного твердения, в которых часто возникают трещины, вызванные усадочными деформациями кладки, а также прогибами поддерживающих перекрытий. Выполнены экспериментальные исследования эффективности усиления системой внутреннего армирования спиралевидными стержнями, поврежденной трещинами каменной кладки из ячеистобетонных блоков на тонкослойных швах. Исследования выполнялись на модели, представляющей замкнутую стальную раму с жесткими узлами, заполненную каменной кладкой из ячеистобетонных блоков с дверным проемом. В надпроемной области кладки стержни устанавливались «насухо» путем завинчивания в пилотные отверстия, которые просверливались в створе проема. На остальных участках заполнения стержни устанавливались в прорезанные фрезой пазы глубиной 50–80 мм с последующим их заполнением специальным полимерцементным раствором. Установлено, что армирование каменной кладки из ячеистобетонных блоков спиральными стержнями является эффективным средством повышения ее жесткости и трещиностойкости. Стержни рекомендуется располагать в направлении ожидаемых траекторий действия главных растягивающих напряжений. Значения главных напряжений и их траектории устанавливаются расчетом конструкции методом конечных элементов. Испытания показали низкую эффективность механического соединения «насухо» спиральных стержней с кладкой из ячеистобетонных блоков.

Ключевые слова: каменная кладка, трещины, внутреннее армирование, спиралевидные стержни, ячеистобетонные блоки.

REINFORCEMENT OF MASONRY STRUCTURES USING INTERNAL MASONRY REINFORCEMENT SYSTEMS

V. N. Derkach, A. V. Halaliuk, S. O. Burak

Abstract

An analysis of the methods of repair and reinforcement by internal reinforcement systems of cracked masonry made of brick and natural stone is given. It is noted that the effectiveness of internal reinforcement of masonry depends on the values of the initial stresses acting in the structure. It is pointed out that the effectiveness of this method has not been sufficiently studied to strengthen masonry made of effective wall materials, in particular, masonry made of autoclave-hardened cellular concrete blocks, in which cracks often occur caused by shrinkage deformations of the masonry, as well as deflections of the supporting floors. Experimental studies of the effectiveness of strengthening a cracked stone wall made of cellular concrete blocks on thin-layer joints using an internal reinforcement system with spiral rods have been carried out. The studies were carried out on a model representing a closed steel frame with rigid joints filled with masonry made of cellular concrete blocks with a doorway. In the area above the opening of the masonry, the rods were installed "dry" by screwing into pilot holes that were drilled into the opening. In other filling areas, the rods were installed in grooves cut by a milling cutter with a depth of 50–80 mm, followed by their filling with a special polymer-cement mortar. It has been established that reinforcing masonry made of cellular concrete blocks with spiral rods is an effective means of increasing its stiffness and crack resistance. It is recommended to position the rods in the direction of the expected trajectories of the main tensile stresses. The values and trajectories of principal stresses are determined through structural analysis using finite element methods. Tests have shown low efficiency of mechanical connection of spiral rods "dry" with masonry made of cellular concrete blocks.

Keywords: masonry, cracks, internal reinforcement, spiral rods, cellular concrete blocks.

Введение

Наиболее распространенными дефектами и повреждениями каменных конструкций являются трещины, которые не только ухудшают эстетичный вид стен, но и оказывают негативное влияние на их звукоизоляционные и теплотехнические характеристики, а также огнестойкость и долговечность. Одним из методов усиления поврежденных трещинами каменных стен является внутреннее армирование каменной кладки, которое выполняют с помощью арматурных стержней из оцинкованной или нержавеющей стали, а также из композитной арматуры. Задача внутреннего армирования заключается в соединении разделенных трещинами частей каменной кладки, восприятию растягивающих напряжений и повышению жесткости поврежденной конструкции. Внутреннее армирование кладки повышает ее прочность на растяжение по перевязанному сечению, а также на сдвиг и на сжатие [1, 2]. Поэтому данный метод усиления рекомендуется использовать для повышения сопротивления каменных конструкций растяжению, изгибу, сдвигу и сжатию. Такая необходимость часто возникает

при реконструкции каменных зданий из-за передачи дополнительных нагрузок на несущие стены. Системы внутреннего армирования широко применяют для усиления каменной кладки из кирпича, которая характерна для исторических зданий. При этом армирующие стержни обычно размещаются в пазах, выпиленных по горизонтальным швам кладки и заполненных предварительно дозированным в заводских условиях специальным раствором.

Актуальными остаются вопросы усиления системой внутреннего армирования каменных кладок из эффективных стеновых материалов, в частности кладок из ячеистобетонных блоков автоклавного твердения, в которых часто возникают трещины, вызванные усадочными деформациями кладки, а также прогибами поддерживающих перекрытий [3, 5]. Однако экспериментальных исследований поврежденных трещинами стен из ячеистобетонных блоков, усиленных системой внутреннего армирования, выполнено недостаточно, чтобы сделать однозначные выводы об эффективности применения данного метода усиления.

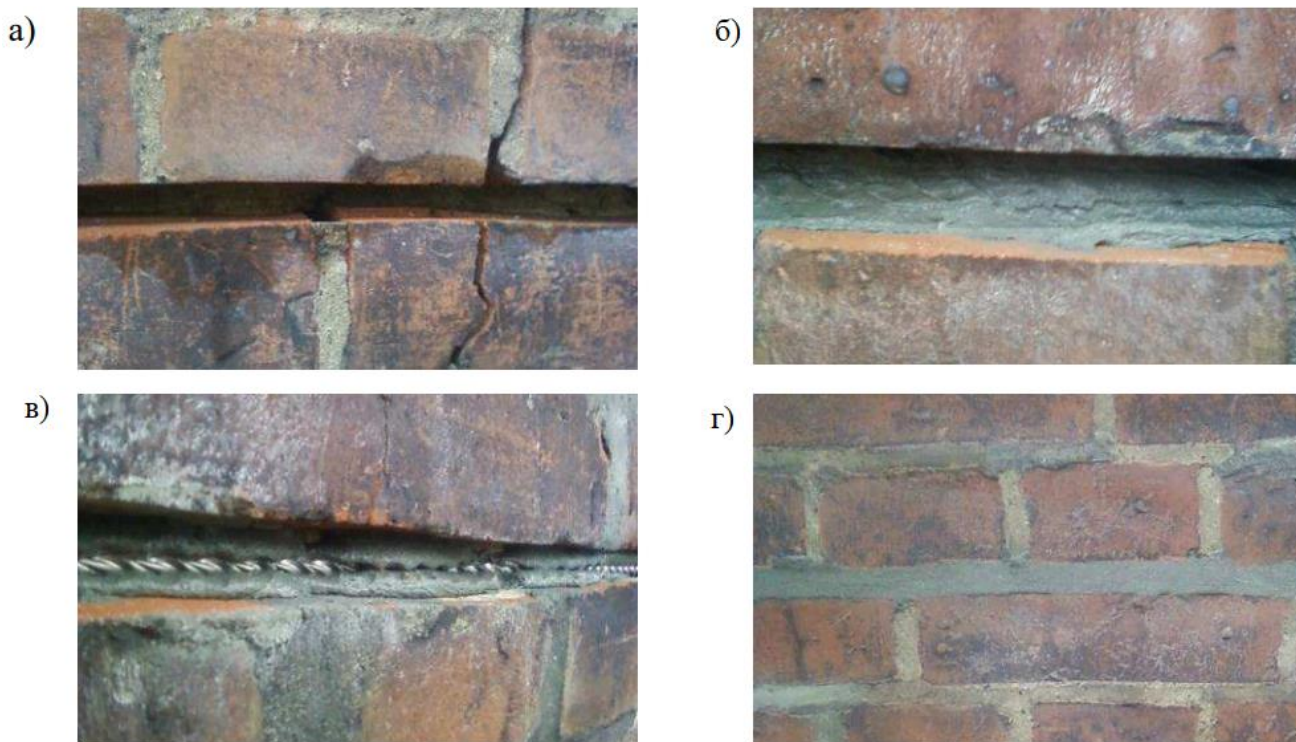
Армирование горизонтальных швов кладки из кирпича

Технология производства работ по армированию горизонтальных швов каменной кладки включает следующие этапы:

- удаление из горизонтальных швов кладки затвердевшего раствора на глубину 4÷6 см (рисунок 1а);
- заполнение образовавшихся пазов специальным ремонтным раствором (рисунок 1б);
- установка в раствор армирующих стержней (рисунок 1в);
- окончательного заполнения раствором пазов с установленными армирующими стержнями (рисунок 1г).

После прорезки в растворе пазов, перед его заполнением раствором паз следует продуть сжатым воздухом и смочить водой.

Для усиления каменной кладки толщиной в один кирпич обычно применяют одностороннее армирование растворных швов (рисунок 2а). В стены большей толщины армирующие стержни рекомендуют устанавливать с двух сторон (рисунок 2б). Иногда, кроме армирования горизонтальных швов, кладку армируют в поперечном направлении. Такое комбинированное армирование применяют в слоистых стенах или в колодцевой каменной кладке с засыпным утеплителем (рисунок 2в). Поперечные армирующие стержни устанавливают в заранее просверленные отверстия, заполненные раствором, или в их качестве используют химические анкера. В продольных в растворных швах пазы армирующие стержни могут устанавливаться попарно (рисунок 2г). В этом случае глубина паза должна составлять не менее 6 см и не более 1/3 толщины кладки.



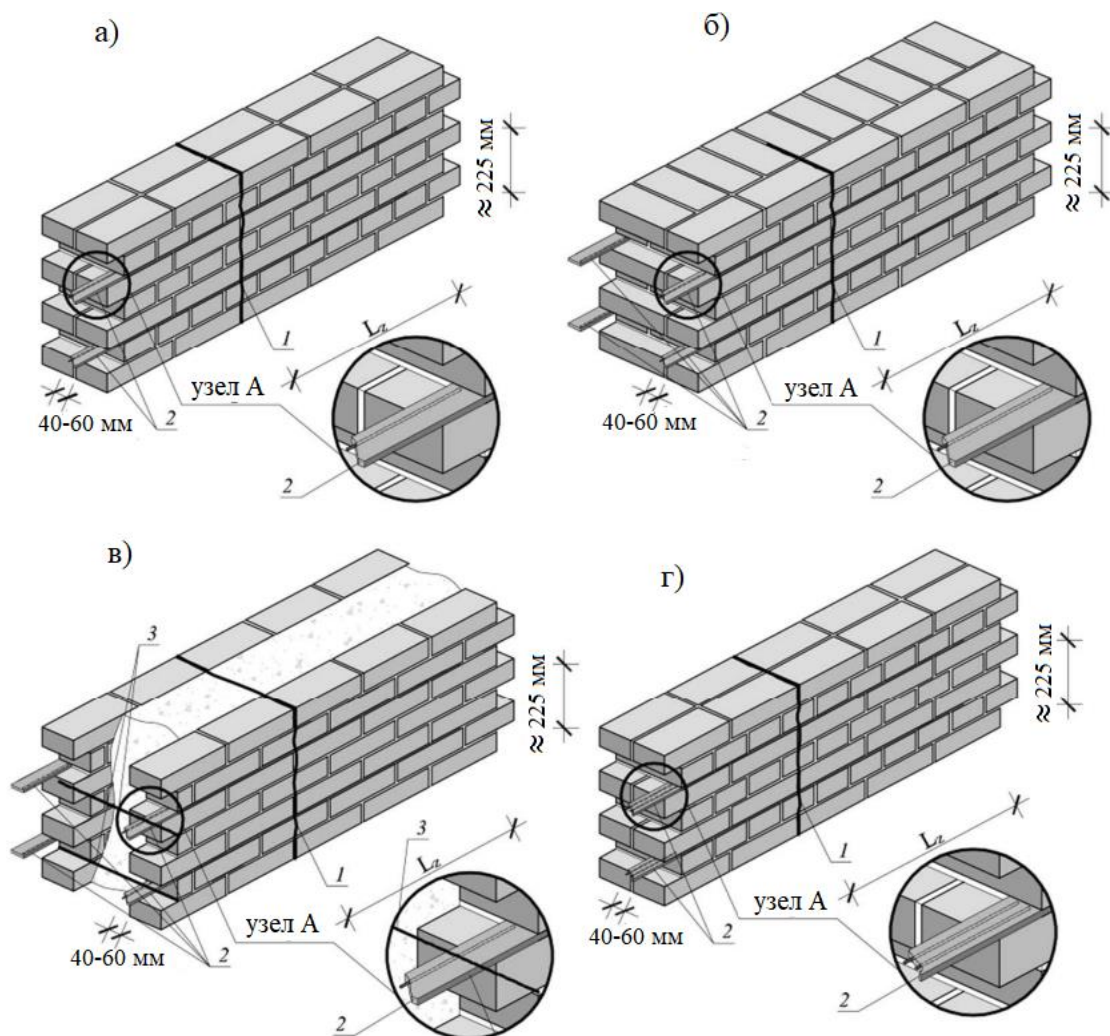
а) удаление раствора из горизонтальных швов кладки; б) заполнение пазов специальным раствором; в) установка армирующих стержней; г) окончательное заполнение пазов раствором, расшивка швов

Рисунок 1 – Этапы производства работ по армированию каменной кладки [6]

Рекомендуется использовать армирующие стержни небольшого диаметра, обычно от 3 до 6 мм, чтобы была обеспечена требуемая толщина защитного слоя раствора. Кроме того, при применении стержней больших диаметров, подвергающихся растяжению, на концах участка их анкеровки имеет место всплеск касательных напряжений, что может приводить к появлению вторичных трещин в каменной кладке. Для армирования каменной кладки чаще всего применяют спиралевидные стержни из аустенитной нержавеющей стали марок 304 или 316 согласно СТБ EN 10088-2. Система внутреннего армирования каменной кладки при помощи спиралевидных (винтовых) стержней, известная под названием «bed joint reinforcement», что в переводе с английского означает «армирование горизонтального шва», получила широкое распространение в странах Европы с конца 90-х годов прошлого века. Уникальная форма спиралевидных стержней при высокой прочности их сцепления с раствором обеспечивает более высокую деформативность системы армирования по сравнению с обычными стержнями, что положительно сказывается на ее взаимодействии с каменной кладкой. В Республике Беларусь данная система усиления применяется сравнительно недавно. Спиралевидные стержни изготавливают согласно техническим условиям ТУ БУ 291429877.001-2017, а усиление каменных конструкций осуществляют в соответствии с рекомендациями [7]. Для заполнения проделанных в растворных швах пазов

в работе [8] рекомендуется использовать цементные растворы. Это связано с тем, что усилие, воспринимаемое армирующими стержнями, определяется адгезией между раствором и камнем, при этом при использовании цементного раствора и длине анкеровки более 500 мм в полной мере реализуется прочность арматуры на растяжение. Следует иметь в виду, что в случае каменной кладки, выполненной на податливых известковых растворах, использование жесткого цементного раствора может привести к вторичным повреждениям. Поэтому при внутреннем армировании каменной кладки исторических зданий в работе [9] было рекомендовано использовать цементно-известковый раствор.

В системах армирования со спиралевидными стержнями используется специальный полимерцементный раствор. Раствор получают путем смешивания сухой смеси с жидким компонентом непосредственно перед выполнением ремонта. Раствор обладает хорошими тиксотропными свойствами, что позволяет полностью заполнять пазы, обеспечивая хорошее сцепление армирующих стержней с каменной кладкой. Специальные растворы быстро твердеют, достигая прочности на сжатие (25 МПа через один день, 45 МПа через неделю и 60 МПа через две недели). При использовании данного раствора в случае усиления каменной кладки, поврежденной трещинами, длина анкеровки арматуры принимается не менее 500 мм по каждую сторону от берега трещины.



1 – трещина, 2 – армирование горизонтальных швов, 3 – поперечные связи; а) одностороннее армирование; б) двухстороннее армирование; в) комбинированное армирование; г) попарная установка армирующих стержней

Рисунок 2 – Схемы установки армирующих стержней [6]

Необходимую площадь внутреннего армирования каменной кладки определяют по формуле:

$$A_s \geq \frac{\sigma_t \cdot S \cdot t}{n \cdot f_{yd}} \quad (1.1)$$

где A_s – площадь армирующего стержня;

σ_t – значение главных растягивающих напряжений в каменной кладке, устанавливаемое на основании расчетов каменной конструкции методом конечных элементов;

s – расстояние между армирующими стержнями, принимаемое не более 500 мм (в кладке из кирпича стержни рекомендуется устанавливать через три ряда);

t – толщина каменной кладки;

n – количество стержней, устанавливаемых в поперечном сечении усиливаемой конструкции;

f_{yd} – расчетное значение предела текучести стали арматурного стержня.

Длину анкеровки арматурных стержней l_b , по каждую сторону от берега образующей трещины определяют по формуле

$$l_b \geq \frac{\sigma_t \cdot S \cdot t}{n \cdot u_a \cdot f_{zd}} \quad (1.2)$$

где σ_t – значение главных растягивающих напряжений в каменной кладке;

s – расстояние между стержнями;

t – толщина каменной кладки;

f_{zd} – расчетное значение прочности сцепления стержня с ремонтным раствором или ремонтного раствора с каменной кладкой;

u_a – длина периметра контакта стержня с ремонтным раствором или ремонтного раствора с каменной кладкой.

Значения f_{zd} устанавливают на основании испытаний или принимают по данным производителя системы армирования. При расчете длины анкеровки арматурных стержней рассматривается два случая:

- потеря сцепления между стержнем и ремонтным раствором;
- потеря сцепления между ремонтным раствором и каменной кладкой.

Лабораторные испытания кирпичных кладок с искусственно созданными трещинами и усиленными системой внутреннего армирования [10–15] подтверждают высокую эффективность данного метода усиления. При этом необходимо отметить, что все известные испытания проводились на образцах, усиление которых выполнялось до нагружения каменной кладки. В реальности каменная кладка перед усилением, как правило, воспринимает определенную нагрузку, поэтому эффективность внутреннего армирования может быть разной, зависящей от значений, действующих в конструкции начальных напряжений. Кроме того, в технической литературе отсутствуют данные о эффективности описанного метода усиления каменных конструкций, работающих в условиях сложного напряженного состояния.

Армирование швов каменной кладки из природного камня

В каменной кладке из природного камня, которая широко применялась при возведении исторических зданий, растворные швы расположены нерегулярно, поэтому осуществить ее армирование стержневыми элементами не представляется возможным. При необходимости усиления такой кладки используют стальные тросы с небольшим поперечным сечением и высокой прочностью на разрыв, а также анкеры, состоящие из стальных стержней с резьбой на концах, гайки и фиксаторы армирующих тросов. Тросы устанавливают в швы каменной кладки после удаления раствора на глубину 6–8 см таким образом, чтобы они образовывали сетку с ячейками примерно квадратной формы (рисунок 3). Фиксация положения узлов сетки обеспечивается за счет использования анкеров, закрепленных в кладке. Эта система внутреннего армирования известна за рубежом под наименованием «Reticolatus» [16–21].

Технология производства работ по армированию каменной кладки системой «Reticolatus» включает следующие этапы:

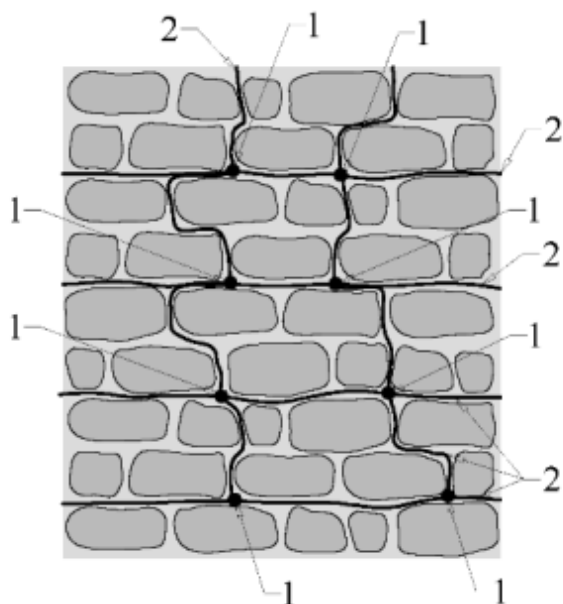
- удаление раствора из швов кладки шва на глубину 6–8 см, продувка сжатым воздухом и смачивание образовавшихся в швах кладки пазов. Эту операцию следует выполнять за несколько часов до нанесения раствора;

- сверление отверстий под анкеры, обычно четыре отверстия на квадратный метр, заполнение их клеем составом на основе эпоксидной смолы и установка анкеров. Рекомендуется устанавливать анкеры на всю толщину кладки или не менее чем на 2/3 ее толщины;

- заполнение пазов раствором, установка высокопрочных стальных тросов, их фиксация при помощи анкеров и натяжение тросов затяжкой гаек;

- окончательное заполнение швов кладки раствором, чтобы полностью покрыть элементы системы армирования, расшивка растворных швов.

Благодаря небольшому диаметру проволок троса, около 1 мм, и форме его сечения, полученной сплетением 3–4 отдельных проволок, трос хорошо взаимодействует с окружающим его раствором. Это обеспечивает хорошие механические свойства соединения камень – раствор – трос [16–18]. Лабораторные испытания подтвердили, что использование системы «Reticolatus» увеличивает прочность каменной кладки на сжатие, сдвиг и растяжение. Следует отметить, что в настоящее время отсутствует расчетная методика, позволяющая учитывать влияние армирования каменной кладки системой «Reticolatus». Решение данной задачи возможно на основе расчетного анализа конечно-элементных моделей армированной кладки [20, 21].



1 – армирующие тросы, 2 – анкера

Рисунок 3 – Система внутреннего армирования каменной кладки «Reticolatus» [6]



Эффективность армирования каменной кладки из ячеистобетонных блоков

С целью анализа эффективности усиления каменных стен из ячеистобетонных блоков системой внутреннего армирования в филиале НТЦ РУП «СТРОЙТЕХНОРМ» были выполнены экспериментальные исследования модели, представляющей замкнутую стальную раму с жесткими узлами, заполненную каменной кладкой из ячеистобетонных блоков. Для минимизации влияния масштабного фактора размеры заполнения ($l \times h = 4 \times 2,5$ м) принимались близкими к размерам реальных конструкций. Кладка выполнялась из блоков класса прочности на сжатие B2,5, плотностью D500 толщиной 250 мм на тонкослойных растворных швах. Горизонтальная, возрастающая ступенями нагрузка F , передавалась на раму в уровне центральной продольной оси ее верхнего ригеля с помощью гидравлического домкрата, размещенного между рамой и металлическим подкосом (рисунок 4а). Подробное описание конструкции опытной модели рамы с каменным заполнением и методики эксперимента приведено в [22].

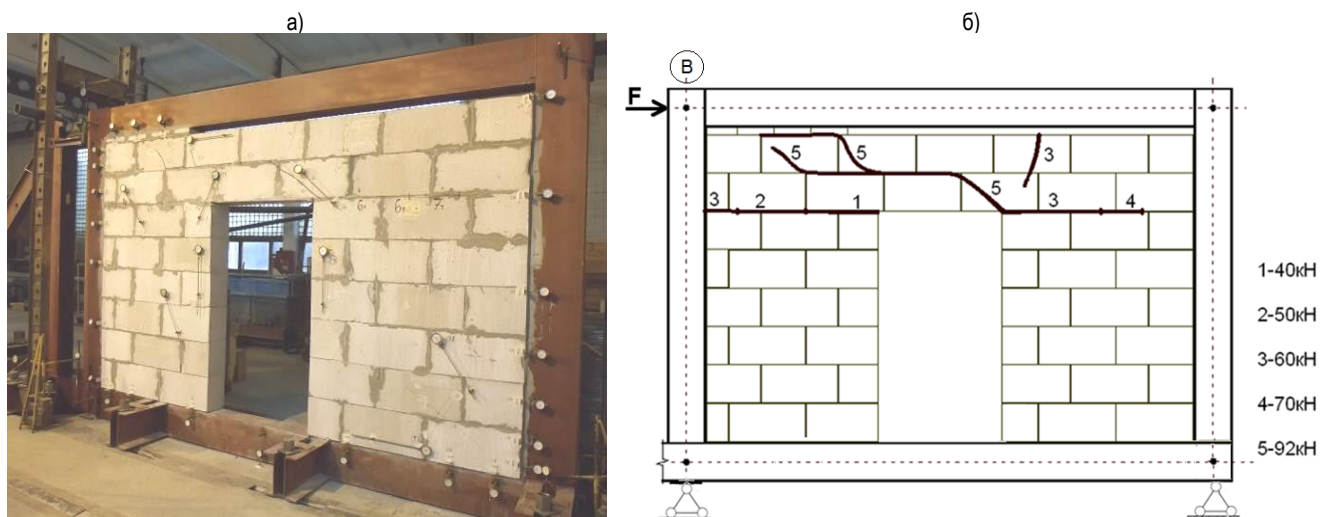
Первоначально была испытана рама с неармированным заполнением, содержащим центральный дверной проем размером $l_{\text{орен}} \times h_{\text{орен}} = 1000 \times 1830$ мм. Заполнение доводилось до разрушения.

Разрушение неармированного заполнения произошло хрупко по наклонной трещине, возникшей в надпроемном поясе кладки при нагрузке на раму 92 кН. Последовательность трещинообразования каменного заполнения и характер его разрушения приведены на рисунке 4б.

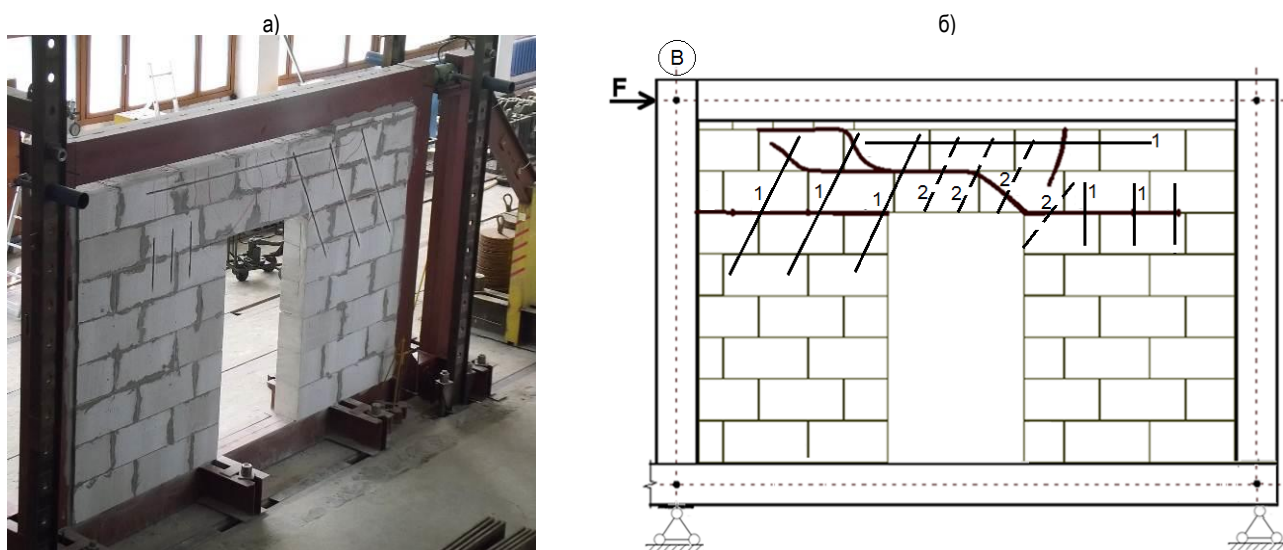
После снятия нагрузки было выполнено усиление заполнения спиральными стержнями диаметром 6 мм. Установка стержней производилась перпендикулярно траекториям образовавшихся трещин. В надпроемной области кладки стержни устанавливались «насухо» путем завинчивания в пилотные отверстия, которые просверливались в створе проема. На остальных участках заполнения стержни устанавливались в прорезанные фрезой пазы глубиной 50–80 мм с последующим их заполнением специальным полимерцементным раствором. Общий вид и схема усиления заполнения показаны на рисунке 5.

По истечении семи суток после усиления были проведены испытания рамы с заполнением на действие горизонтальной нагрузки.

По результатам испытаний получена зависимость величины горизонтальной деформации Δ верхнего узла рамы от сдвигающей нагрузки F , которая сопоставлялась с аналогичной зависимостью, установленной в предыдущих испытаниях (рисунок 6).



а) общий вид рамы с заполнением; б) последовательность трещинообразования
Рисунок 4 – Трещинообразование и разрушение неармированного каменного заполнения



1 – стержни, установленные в пазы, заполненные раствором; 2 – стержни, установленные «насухо» в пилотные отверстия
а) общий вид; б) схема усиления каменного заполнения

Рисунок 5 – Общий вид и схема усиления каменного заполнения с дверным проемом

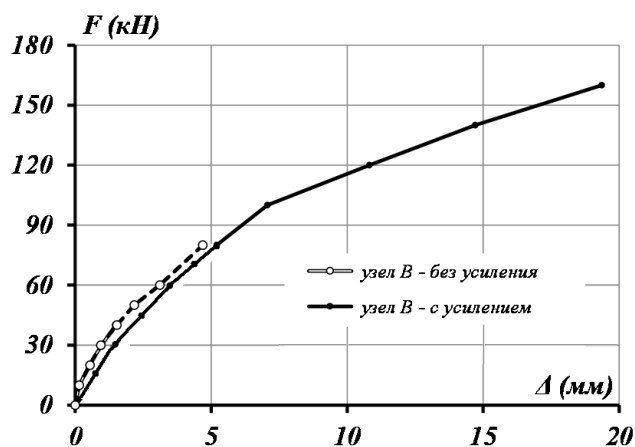


Рисунок 6 – Диаграмма горизонтального перемещения верхнего узла рамы с заполнением до и после усиления

Из рисунка 3 следует, что после усиления заполнения при сравнимой нагрузке $F = 40$ кН перемещение узла В составило 1,8 мм, что на 20 % больше, чем при испытаниях неповрежденного трещинами заполнения.

После выполненного усиления ширина раскрытия ранее образовавшихся трещин была в три-четыре раза ниже, чем при испытаниях неармированного заполнения. Следует отметить, что лучше в совместную работу с кладкой заполнения включались стержни, установленные с помощью раствора. До разрушения заполнения потери их анкеровки не наблюдалось. Увеличение нагрузки сопровождалось возникновением новых трещин в надпроемном поясе кладки, которые были ориентированы перпендикулярно плоскости горизонтальных швов. Ширина указанных трещин не превышала 0,5 мм (рисунок 7).

При нагрузке $F \approx 100$ кН было зафиксировано продергивание стержней, установленных в пилотные отверстия, которое сопровождалось раскрытием магистральной трещины и заметным падением сдвиговой жесткости рамы (см. рисунок 3). При этом наблюдалось разрушение материала стеновых блоков под витками спиральной арматуры. При максимальной нагрузке на раму $F_{\max} = 160$ кН ширина раскрытия магистральной трещины составляло около 5 мм. При этом хрупкого разрушения заполнения не произошло.



Рисунок 7 – Характер трещинообразования в заполнении

Проведенные испытания показали, что армирование каменной кладки из ячеистобетонных блоков спиральными стержнями является эффективным средством повышения ее жесткости и трещиностойкости. Стержни следует располагать в направлении ожидаемых траекторий действия главных растягивающих напряжений, которые устанавливаются расчетом конструкции методом конечных элементов. Испытания показали низкую эффективность механического соединения «насухо» спиральных стержней с кладкой из ячеистобетонных блоков.

Заключение

Применение систем внутреннего армирования является эффективным методом повышения и восстановления несущей способности и эксплуатационной пригодности как исторических каменных кладок из кирпича и природного камня, так и каменных кладок из ячеистобетонных блоков автоклавного твердения. Установку армирующих стержней в кладку из ячеистобетонных блоков следует производить с применением специального полимерцементного раствора в направлении ожидаемых траекторий действия главных растягивающих напряжений, которые определяют расчетом конструкции методом конечных элементов. Назначению схемы армирования поврежденной трещинами каменной кладки должен предшествовать анализ причин образования трещин, а выбранный метод ремонта и усиления должен в первую очередь устранить или, по крайней мере, минимизировать эти причины.

Список цитированных источников

1. Malyszko, L. Konstrukcje murowe. Zarysowania i naprawy / L. Malyszko, R. Orłowicz. – Olsztyn : Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińskiego-Mazurskiego, 2000. – 153 s.
2. Critical review of retrofitting and reinforcement techniques related to possible failure // NIKER, New Integrated Knowledge Based Approaches To The Protection Of Cultural Heritage From Earthquake-Induced Risk. – Italy : Università di Padova, 2010. – P. 35–90.
3. Деркач, В. Н. Каменные и армокаменные конструкции. Оценка технического состояния, ремонт и усиление / В. Н. Деркач. – Минск : Строймедиапроект, 2021. – 255 с.
4. Деркач, В. Н. Актуальные вопросы применения ячеистобетонных кладочных изделий в жилищном строительстве / В. Н. Деркач // Архитектура и строительство. – 2020. – № 4. – С. 46–49.
5. Деркач, В. Н. Проблемы трещиностойкости стенового заполнения каркасных зданий из ячеистобетонных блоков / В. Н. Деркач, А. С. Горшков, Р. Б. Орлович // Строительные материалы. – 2019. – № 3. – С. 52–56.
6. Drobiec, Ł. Naprawy i wzmocnienia konstrukcji murowych / Ł. Drobiec // XXXVIII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Prac Projektanta Konstrukcji. – Wisła, 2024. – Tom 3. – S. 41–141.

7. Рекомендации по усилению каменных конструкций спиральными стержнями Sure Twist из аустенитной нержавеющей стали: Р 5.02168-2017. – Введ. 10.01.2017. – Минск : РУП Стройтехнорм, 2017. – 36 с.
8. Janowski, Z. Remonty i wzmocnianie murów oraz sklepień w obiektach zabytkowych / Z. Janowski // XIII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Prac Projektanta Konstrukcji, Ustroń 25–27 luty 1999 r. – Tom 1, cz. 1. – S. 223–252.
9. Stawiski, B. Konstrukcje murowe. Naprawy i wzmocnienia / B. Stawiski. – Warszawa : Polcen, 2014. – 320 s.
10. Piekarczyk, A. Uszkodzenia i naprawy niekonstrukcyjnych elementów budynków / A. Piekarczyk // XXX Jubileuszowe Ogólnopolskie Warsztaty Prac Projektanta Konstrukcji. – Szczyrk, 2015. – S. 233–290.
11. Drobiec, L. Investigation of efficiency stitch boss on capacity of cracked masonry wallets / L. Drobiec, R. Jasiński, J. Kubica // 12th International Brick / Block Masonry Conference, Madrid, Spain, 25–28 June 2000. – Vol. 3. – P. 953–970.
12. Drobiec, L. Strengthening of cracked compressed masonry using different types of reinforcement located in the bed joints / Ł. Drobiec, R. Jasiński, J. Kubica // ACEE Architecture, Civil Engineering, Environment. – 2008. – Vol. 1, Iss. 4. – P. 39–48.
13. Static cyclic in-plane shear response of damaged masonry walls retrofitted with NSM FRP strips – An experimental evaluation / K. M. C. Konthesingha, M. J. Masia, R. B. Peterse [et al.] // Engineering Structures. – 2013. – Vol. 50. – P. 126–136.
14. Ismail, N. In-situ and laboratory based out-of-plane testing of unreinforced clay brick masonry walls strengthened using near surface mounted twisted steel bars / N. Ismail, J. M. Ingham // Construction and Building Materials. – 2012. – Vol. 36. – P. 119–128.
15. Diagonal shear behaviour of unreinforced masonry wallets strengthened using twisted steel bars / N. Ismail, R. B. Petersen, M. J. Masia, J. M. Ingham // Construction and Building Materials. – 2011. – Vol. 25. – P. 4386–4393.
16. Repair and investigation techniques for stone masonry walls / L. Binda, C. Modena, G. Baronio, S. Abbaneo // Construction and Building Materials. – 1997. – Vol. 11 (3). – P. 133–142.
17. Borri, A. Mur z kamienia łamanego wzmocniony za pomocą systemu „reticolatus” / A. Borri, M. Corradi, E. Speranzini, A. Giannantoni // Journal of Heritage Conservation. – 2009. – Vol. 26. – P. 110–125.
18. A reinforced repointing grid for strengthening historic stone masonry walls / A. Borri, M. Corradi, E. Speranzini, A. Giannantoni // 8th International Masonry Conference 2010 in Dresden. – 2010. – S. 1851–1860.
19. Jasieńko, J. Conservation of the structure and materials of historic masonry walls / J. Jasieńko, Ł. Bednarz, D. Bajno // Key Engineering Materials. – 2015. – Vol. 624. – P. 354–362.
20. Paradiso, M. «Reticolatus»: An innovative reinforcement for irregular masonry. A numeric model / M. Paradiso, A. Borri, D. Sinicropi // Structures and Architecture: 2nd International Conference on Structure. – London : Taylor & Francis Group, 2013. – P. 841–848.
21. Borri, A. Un modello per lo studio del comportamento meccanico della muratura rinforzata con la tecnica del Reticolatus / A. Borri, M. Corradi, E. Speranzini // Conference: XIV Convegno Nazionale L'ingegneria Sismica in Italia – ANIDIS 2011. – 9 p.
22. Деркач, В. Н. Экспериментальные исследования влияния каменного заполнения на сдвиговую жесткость каркасов зданий / В. Н. Деркач, Р. Б. Орлович // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 11. – С. 53–57.

References

1. Malyszko, L. Konstrukcje murowe. Zarysowania i naprawy / L. Malyszko, R. Orłowicz. – Olsztyn : Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińskiego-Mazurskiego, 2000. – 153 s.
2. Critical review of retrofitting and reinforcement techniques related to possible failure // NIKER, New Integrated Knowledge Based Approaches To The Protection Of Cultural Heritage From Earthquake-Induced Risk. – Italy : Università di Padova, 2010. – P. 35–90.

3. Derkach, V. N. Kamennye i armokamennye konstrukcii. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya, remont i usilenie / V. N. Derkach. – Minsk : Strojmediaproekt, 2021. – 255 s.
4. Derkach, V. N. Aktual'nye voprosy primeneniya yacheistobetonnyh kladochnyh izdelij v zhilishchnom stroitel'stve / V. N. Derkach // Arhitektura i stroitel'stvo. – 2020. – № 4. – S. 46–49.
5. Derkach, V. N. Problemy treshchinostojkosti stenovogo zapolneniya karkasnyh zdaniy iz yacheistobetonnyh blokov / V. N. Derkach, A. S. Gorshkov, R. B. Orlovich // Stroitel'nye materialy. – 2019. – № 3. – S. 52–56.
6. Drobiec, Ł. Naprawy i wzmocnienia konstrukcji murowych / Ł. Drobiec // XXXVIII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji. – Wisła, 2024. – Tom 3. – S. 41–141.
7. Rekomendacii po usileniyu kamennyh konstrukcij spiralevidnymi sterzhnyami Sure Twist iz austenitnoj nerzhaveyushchej stali: R 5.02168-2017. – Vved. 10.01.2017. – Minsk : RUP Strojtekhnorm, 2017. – 36 s.
8. Janowski, Z. Remonty i wzmocnianie murów oraz sklepień w obiektach zabytkowych / Z. Janowski // XIII Ogólnopolska Konferencja Warsztat Pracy Projektanta Konstrukcji, Ustroń 25–27 luty 1999 r. – Tom 1, cz. 1. – S. 223–252.
9. Stawiski, B. Konstrukcje murowe. Naprawy i wzmocnienia / B. Stawiski. – Warszawa : Polcen, 2014. – 320 s.
10. Piekarczyk, A. Uszkodzenia i naprawy niekonstrukcyjnych elementów budynków / A. Piekarczyk // XXX Jubileuszowe Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. – Szczyrk, 2015. – S. 233–290.
11. Drobiec, L. Investigation of efficiency stitch boss on capacity of cracked masonry wallets / L. Drobiec, R. Jasiński, J. Kubica // 12th International Brick / Block Masonry Conference, Madrid, Spain, 25–28 June 2000. – Vol. 3. – P. 953–970.
12. Drobiec, L. Strengthening of cracked compressed masonry using different types of reinforcement located in the bed joints / Ł. Drobiec, R. Jasiński, J. Kubica // ACEE Architecture, Civil Engineering, Environment. – 2008. – Vol. 1, Iss. 4. – P. 39–48.
13. Static cyclic in-plane shear response of damaged masonry walls retrofitted with NSM FRP strips – An experimental evaluation / K. M. C. Konthesingha, M. J. Masia, R. B. Peterse [et al.] // Engineering Structures. – 2013. – Vol. 50. – P. 126–136.
14. Ismail, N. In-situ and laboratory based out-of-plane testing of unreinforced clay brick masonry walls strengthened using near surface mounted twisted steel bars / N. Ismail, J. M. Ingham // Construction and Building Materials. – 2012. – Vol. 36. – P. 119–128.
15. Diagonal shear behaviour of unreinforced masonry wallets strengthened using twisted steel bars / N. Ismail, R. B. Petersen, M. J. Masia, J. M. Ingham // Construction and Building Materials. – 2011. – Vol. 25. – P. 4386–4393.
16. Repair and investigation techniques for stone masonry walls / L. Binda, C. Modena, G. Baronio, S. Abbaneo // Construction and Building Materials. – 1997. – Vol. 11 (3). – P. 133–142.
17. Borri, A. Mur z kamienia łamanego wzmocniony za pomocą systemu „reticolatus” / A. Borri, M. Corradi, E. Speranzini, A. Giannantoni // Journal of Heritage Conservation. – 2009. – Vol. 26. – P. 110–125.
18. A reinforced repointing grid for strengthening historic stone masonry walls / A. Borri, M. Corradi, E. Speranzini, A. Giannantoni // 8th International Masonry Conference 2010 in Dresden. – 2010. – S. 1851–1860.
19. Jasieńko, J. Conservation of the structure and materials of historic masonry walls / J. Jasieńko, Ł. Bednarz, D. Bajno // Key Engineering Materials. – 2015. – Vol. 624. – P. 354–362.
20. Paradiso, M. «Reticolatus»: An innovative reinforcement for irregular masonry. A numeric model / M. Paradiso, A. Borri, D. Sinicropi // Structures and Architecture: 2nd International Conference on Structure. – London : Taylor & Francis Group, 2013. – P. 841–848.
21. Borri, A. Un modello per lo studio del comportamento meccanico della muratura rinforzata con la tecnica del Reticolatus / A. Borri, M. Corradi, E. Speranzini // Conference: XIV Convegno Nazionale L'ingegneria Sismica in Italia – ANIDIS 2011. – 9 p.
22. Derkach, V. N. Eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya kamennogo zapolneniya na sdvigovuyu zhestkost' karkasov zdaniy / V. N. Derkach, R. B. Orlovich // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. – 2014. – № 11. – S. 53–57.

Материал поступил 17.06.2025, одобрен 13.07.2025, принят к публикации 14.07.2025