

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.012.82

### ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ КАМЕННЫХ И АРМОКАМЕННЫХ СТОЛБОВ ПРИ ЦЕНТРАЛЬНОМ СЖАТИИ

*А.М. ХАТКЕВИЧ, канд. техн. наук, доц. В.Д. ГРИНЕВ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассматриваются вопросы разрушения хрупких материалов. Приведены результаты экспериментальной работы по исследованию свойств каменных и армокаменных столбов с традиционно применяемым и новым видом сетчатого армирования в виде плоских спиралей, используемого для поперечного армирования железобетонных колонн. Представлен анализ последовательности образования, развития трещин и последующего разрушения опытных элементов. Определен характер разрушения неармированных образцов, образцов, армированных сетками из перекрестных стержней, и образцов с новым армированием в виде плоских спиралей. Спиралеобразные сетки изготавливаются из цельного прута арматуры и лежат в одной плоскости, что позволяет использовать большие диаметры арматуры при равномерной передаче нагрузки горизонтальным растворным швом. Изготовление таких сеток менее энергоемко (нет необходимости в сварке стыков), а также менее трудоемко (автоматизированные станы) и ресурсоемко (отсутствие обрезков). Полученные данные о действительной работе кладки с армированием спиральными сетками под нагрузкой будут полезны при проектировании и строительстве.*

**Введение.** Для проектирования конструкций из хрупких материалов (бетон, керамика, природные камни, некоторые полимерные материалы и др.) необходимо иметь представление об их действительной работе под нагрузкой. Такое представление может быть получено изучением напряженно-деформированного состояния как объекта целиком, так и опытных образцов на всех стадиях работы вплоть до разрушения.

Под разрушением понимается непрерывный процесс нарушения сплошности материала в результате сдвига и отрыва, который сопровождается образованием объемов сдвижения типа пирамид и конусов с трещинами у их вершин. Сдвигаемые объемы создаются концентраторами напряжений в виде малосжимаемых включений или уплотненных сгустков материала, а также начальных трещин, пор, капилляров.

Плоскости сдвига (скольжения) расположены под углом  $\alpha$  к поверхности, перпендикулярной действию нагрузки. Величина угла зависит от свойств исследуемого материала. Угол сдвига больше  $45^\circ$  наблюдали О.Я. Берг, А. Надаи, Б.Г. Скрамтаев в опытах с бетонными и каменными материалами.

Установлены три основные схемы разрушения [1]:

- с появлением явно видимых пирамид сдвига, образованных соединением микротрещин отрыва;
- появление одной плоскости сдвига, ее можно рассматривать как частный случай первой схемы;
- образование почти вертикальных трещин при наличии у вершин малых пирамид сдвижения.

Возникающие в процессе нагружения микротрещины в материале параллельны направлению действия сжимающей нагрузки, а в совокупности они группируются по направлению плоскостей сдвига. Характер и схема разрушения зависит от геометрических размеров образца. Так, каменный или бетонный образец (кубик, призма, цилиндр) разрушаются от сдвига и отрыва вследствие нарастания касательных и растягивающих внутренних усилий. Между подушками пресса и торцевыми поверхностями образца развиваются силы трения, направленные внутрь и препятствующие развитию поперечных деформаций. С увеличением отношения высоты призмы к размеру поперечного сечения предел прочности призм уменьшается и становится почти стабильным при отношении  $h/a = 3...4$ . Поперечное армирование приводит к иному характеру разрушения. Арматура, воспринимающая растяжение, сдерживает деформации в поперечном направлении и способствует более полному использованию прочностных свойств материала. При этом характер разрушения (рис. 1) косвенно армированных элементов зависит от вида и степени армирования, шага сеток по высоте [2].

**Основная часть.** В настоящее время разработано большое количество способов поперечного армирования каменной кладки, к которым относятся: сетчатое из проволоки; армирование стеклопластиком и стеклохолстом; армирование просечно-вытяжными сетками из тонколистовой стали; кольца; спиральное армирование; буройнъекционные шпильки [3 – 7] и др.

Как зигзагообразная арматура, отличающаяся положительными свойствами по сравнению с сетками из перекрестных стержней, так и плоские спирали будут целесообразны для армирования каменных конструкций, обладая при этом рядом преимуществ [8 – 12].

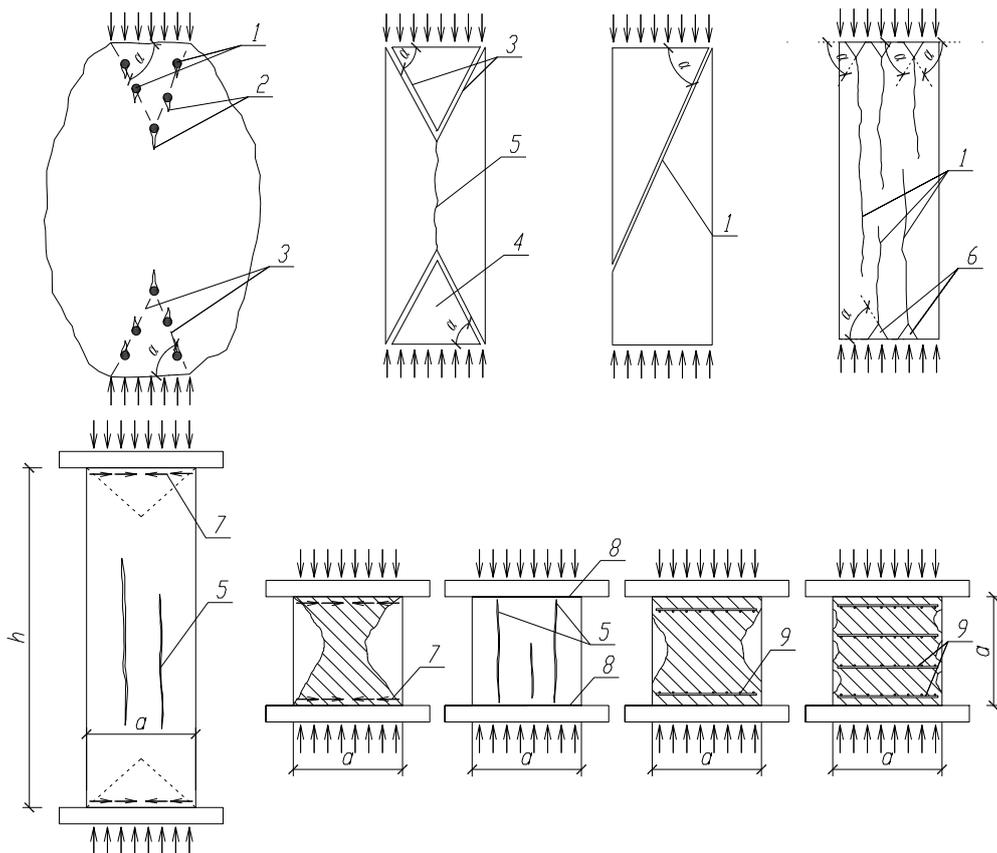


Рис. 1. Формы разрушения хрупких материалов при сжатии:  
 1 – концентраторы напряжений; 2 – трещины отрыва; 3 – плоскости скольжения (сдвижения);  
 4 – большие пирамиды сдвига; 5 – трещины отрыва; 6 – малые пирамиды сдвига; 7 – силы трения;  
 8 – смазка между опорной поверхностью и образцом; 9 – сетки поперечного армирования

Для исследования свойств кладки с поперечным сетчатым армированием выполнена экспериментально-теоретическая работа, основой которой явилось натурное испытание кратковременной ступенчатой статической нагрузкой опытных элементов. Образцы выполнялись в виде призм сечением  $1,5 \times 1,5$  кирпича высотой шестнадцать рядов (крупномасштабная модель). Отношение высоты к размеру поперечного сечения принято  $h/a=3,2$ , поскольку в этом интервале предел прочности становится стабильным за счет снижения влияния сил трения между образцом и подушками пресса, при этом можно не учитывать влияние продольного изгиба. Часть образцов выполнялась неармированными (эталонные), другая часть армировалась сетками двух типов. Размеры сеток подобраны с одинаковой длиной стержней для создания равнозначного по процентному содержанию армирования (рис. 2).

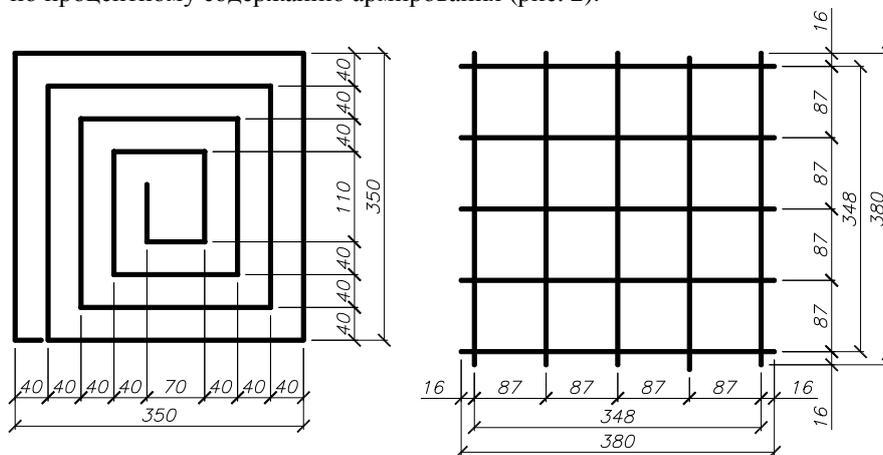


Рис. 2. Схемы армирующих сеток

Сетки изготавливались из широко используемой в строительной практике низкоуглеродистой холодноотянутой арматурной проволоки с вмятинами класса S500 (Вр-1) диаметром 4 мм. Диаметр проволоки Ø4 мм принят максимальным из условия изготовления сеток из перекрестных стержней с сохранением толщины горизонтального шва в 12 мм.

Для кладки опытных образцов была принята марка кирпича М150 КПУП «Обольский керамический завод» и М200 производства ОАО «Керамика» г. Витебска. Кирпич марки М 150 полусухого прессования имеет гладкие поверхности тычков и ложков. На постели расположены четыре выступа в виде бугров диаметром около 15 мм и высотой до 5 мм. Кирпич марки М 200 в кладке колонн серий CIV-CVI пластического прессования с шероховатой поверхностью. Следует отметить, что геометрические размеры кирпича обладают значительным разбросом. Так, высота кирпичей марки М150 в одной партии отличалась до 3 мм, кирпич марки М200 часто имел клиновидную форму: разница по высоте с обеих сторон также достигала значения 3 мм. Марка раствора во всех сериях испытаний использовалась одинаковая – М75, что на одну позицию выше минимально требуемой – М50. В качестве заполнителя применен природный просеянный через сито песок с крупностью заполнителя не более 4 мм. Вяжущим материалом служил портландцемент марки ПЦ 400 по СТБ ЕН 197-1-2000, ГОСТ 10178-85 ПРУП «Кричевцементошифер».

В процессе изготовления образцов выполнялся отбор проб для контроля марок раствора и кирпича.

Всего изготовлено и испытано 16 опытных образцов на центральное сжатие, из которых 4 образца были изготовлены без поперечного армирования и по 6 образцов – с армированием спиральными сетками и сетками из перекрестных стержней (таблица).

Характеристики опытных образцов, испытанных на центральное сжатие

Серия	I	II	III	IV	V	VI
Количество образцов	2	3	3	2	3	3
Обозначение	K1, K2	K3, K4, K5	K6, K7, K8	K9, K10	K11, K12, K13	K14, K15, K16
Марка кирпича	M150	M150	M150	M200	M200	M200
Марка раствора	M75	M75	M75	M75	M75	M75
Процент армирования, %	0	0,407	0,407	0	0,19	0,19
Шаг сеток по высоте	–	Один ряд кладки		–	Два ряда кладки	

Испытание конструкций проводились в соответствии с разработанной программой и с учетом СТБ 1376-2002 [13]. Схема испытания предусматривала создание работы конструкции как стойки с центральным приложением статического кратковременного усилия. Нагрузка создавалась гидравлическим прессом ПР-500 этапами с равными ступенями и приращением нагрузки не более 10 % от предполагаемой разрушающей вплоть до достижения предела прочности. Выдерживание на каждом этапе длилось  $10 \pm 2$  мин. Центральная установка образцов выполнялась совмещением геометрических осей прессы и образца. Верхний торцевой участок выравнивался постелью из тонкого слоя цементно-песчаного раствора состава 1 : 1, что обеспечивало равномерную передачу нагрузки. Равномерность передачи нагрузки от нижней подушки прессы достигалась с помощью металлического поддона, на котором выполнялась кладка опытных образцов. Образование первых трещин происходило на уровне  $0,4...0,7 R_u$  от предела прочности, при этом в армированных образцах они возникали несколько позже, чем в неармированных. Необходимо также отметить, что появление первой трещины не приводило к ускоренному росту поперечных деформаций и возникновению новых, а являлось, скорее, свидетельством неравномерной плотности горизонтального шва. По результатам наблюдений можно утверждать, что первые трещины не имели тенденции к дальнейшему быстрому развитию без увеличения нагрузки. Ширина раскрытия ограничивалась на начальных этапах величиной 0,3...0,5 мм, в дальнейшем происходил ее рост, и в момент разрушения она могла достигать 5 мм и более. Первые трещины в неармированных образцах серии CI образовались при уровне нагрузки  $0,4R_u$ , серии CIV –  $0,5R_u$ , что можно объяснить меньшей прочностью на изгиб кирпича марки М150 по сравнению с кирпичом марки М200.

Неармированные образцы K1, K2, K9, K10 разрушались «классически» [5, 6, 14]: появление первых трещин в отдельных кирпичах над вертикальными швами, их постепенное объединение по высоте и разделение кладки на столбики, кратные сечению в полкирпича. Разрушение неармированных столбов происходило вследствие отрыва с образованием и развитием вертикальных магистральных трещин, чему способствовало наличие «конструктивных дефектов»: вертикальные швы, четырехрядная перевязка. Общий вид испытанного неармированного опытного образца «K2» приведен на рисунке 3.

Наличие в кладке двух материалов, обладающих разными деформативными свойствами в поперечном направлении, приводит к образованию растягивающих напряжений в кирпиче и сжимающих в растворе горизонтального шва. Раствор же вертикальных швов воспринимает деформации растяжения, обладая при этом по сравнению с кирпичом меньшей прочностью.

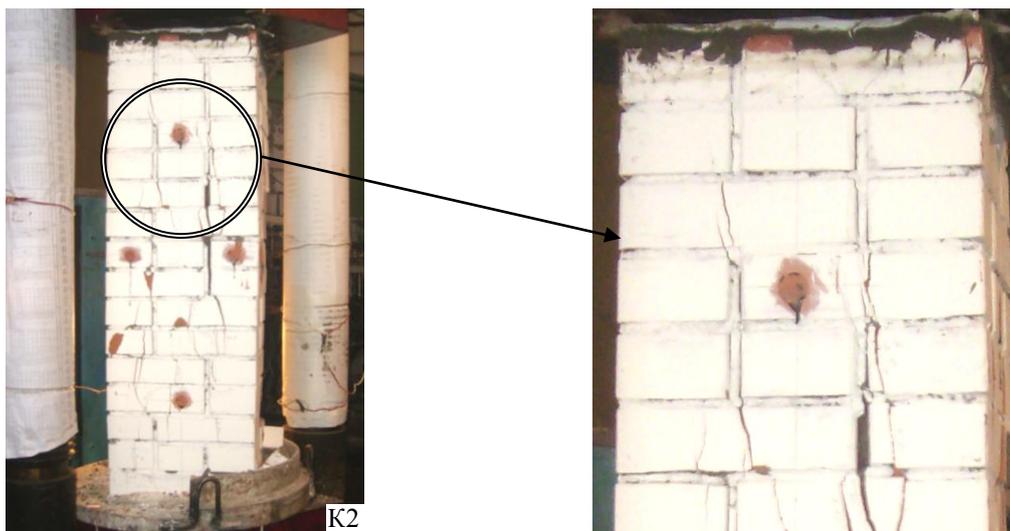


Рис. 3. Характер разрушения неармированных образцов серий CI и CIV

Появлению трещин в кладке способствуют также неравномерная плотность и прочность растворной постели, твердые включения, «клиновидность» кладочных камней. Анализируя данные опыта, можно утверждать, что появление первых трещин происходило от напряжений изгиба и среза отдельных кирпичей, дальнейшее же развитие обуславливалось поперечным расширением кладки. Пирамиды сдвижения (скольжения) подобно пирамидам в бетонных образцах не образовывались, что можно объяснить большой неоднородностью каменной кладки как материала, ее структурой и работой составляющих материалов.

Характер разрушения армированных столбов существенно отличался от неармированных. Так, помимо того, что первые трещины появлялись несколько позже, их объединение по вертикали не происходило. То есть деления кладки на столбики, кратные размеру полкирпича, у армированных образцов фактически не наблюдалось. По мере роста нагрузки число трещин увеличивалось, а с поверхности кирпичей откалывались лещадки у наружных граней между армированными горизонтальными швами. Это позволяет говорить о наличии ядра сечения, ограниченного крайними стержнями сеток. Общий вид испытанных армированных образцов кладки K4 и K6 представлен на рисунке 4.



Рис. 4. Характер разрушения армированных образцов серий CII, CIII, CV и CVI

Наблюдалось также существенное различие в характере развития трещин между образцами серий, армированных сетками из перекрестных стержней (CII, CIV) и сетками в виде плоской спирали (CIII, CVI). Трещины в образцах серий CII и CIV образовывались в области пересечения стержней сеток.

Объяснить данное явление можно тем, что тонкий слой раствора (по нормативным документам минимум 2 мм) не способен равномерно передавать давление в месте пересечения стержней. Так называемые «подпирающие точки» [16] являются концентраторами напряжений и приводят к появлению трещин. На рисунке 5 представлена одна из наружных граней колонны К4, армированной сетками из перекрестных стержней (черными точками обозначены концы стержней). Отчетливо видно наличие и объединение трещин по высоте между стержнями сеток. Разрушение происходило при скалывании лещадок у наружных граней колонн в средней части опытных образцов по высоте и раздавливании рядов кирпича (см. рис. 4).

Сетка в виде плоской спирали, не имея узлов пересечения, лежит в одной плоскости толщиной, равной диаметру арматуры (4 мм). Поэтому в образцах серий СIII и CVI защитный слой между кирпичом и наружной гранью арматурного стержня был больше, давление от одного ряда кладки к другому передавалось более равномерно. Вертикальные трещины, возникающие в одном ряду кладки, не развивались по высоте и не имели тенденцию к последующему объединению (рис. 5).

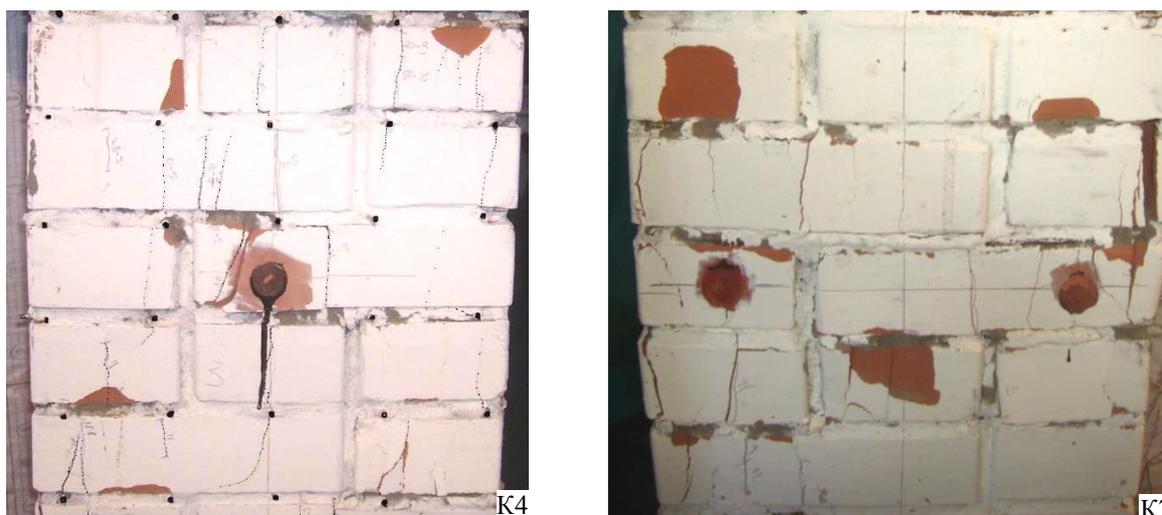


Рис. 5. Характер разрушения армированных образцов серий СII, СIII, CV и CVI

Существенного различия между образцами, армированными одинаковым видом сеток через один либо два ряда кладки, установлено не было. Во всех случаях разрушение происходило от раздавливания рядов кирпича при скалывании лещадок у наружных граней колонн в средней части высоты опытных образцов (см. рис. 4).

**Заключение.** Каменная кладка – монолитный квазиоднородный упругопластический строительный материал, особенностью работы которого является наличие сложного напряженного состояния камня и раствора. Опытные неармированные образцы в виде кирпичных призм разрушались в результате возникновения, развития и объединения по высоте трещин отрыва, параллельных (или близких) к направлению приложения усилий. Объединение трещин по высоте происходило по вертикальным швам как наиболее слабым участкам. При этом целостный образец делился на отдельные ветви сечением, кратным полкирпича. Разрушались образцы при «выключении» отдельных ветвей (потере устойчивости) и сжатии уменьшенного сечения. Прочность кирпича на сжатие в неармированных элементах использовалась всего на 25...30 %.

Весьма эффективным способом усиления кладок является поперечное армирование. Проведенные испытания позволили получить данные о характере разрушения кирпичных столбов с новым видом армирования – сетками в виде плоских прямоугольных спиралей. Основным отличием таких сеток является изготовление из цельного прута и расположение в одной плоскости без узлов пересечения. Наличие таких узлов в сетках из перекрестных стержней, являющихся концентраторами напряжений, приводит к более раннему появлению трещин, при этом их расположение можно предвидеть – над выступающими за наружную грань стержнями арматурных сеток.

Горизонтальные швы, армированные спиральными сетками, позволили более равномерно передавать сжимающую нагрузку от одного ряда к другому, что привело к более позднему появлению трещин в каменной кладке. Применение таких сеток позволяет также сохранить рекомендуемую толщину шва при использовании арматуры больших диаметров.

Разрушение опытных столбов, армированных обоими видами сеток, происходило при скалывании лещадок у наружных граней колонн в средней части опытных образцов по высоте и раздавливании горизонтальных рядов кирпича (см. рис. 4).

Применение сетчатого армирования позволило увеличить использование прочности кирпича до 37 % при армировании сетками из перекрестных стержней и до 39 % при армировании спиральными сетками для процента объемного армирования  $\mu = 0,19$ , а для  $\mu = 0,407$  до 74 и 76 % соответственно.

Проведенные экспериментально-теоретические исследования по изучению характера разрушения столбов с новым видом армирования позволяет сделать следующий **вывод**: спиралеобразные сетки улучшают работу армокаменных конструкций под нагрузкой за счет расположения в одной плоскости и равномерной передачи армированным горизонтальным швом сжимающих усилий от одного ряда кладки к другому при минимальной толщине горизонтальных швов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Долговечность строительных конструкций и материалов / редкол.: И.А. Рохлин [и др.]; НИИСК Госстроя СССР, Харьковский ПромстройНИИпроект, 1978. – 80 с.
2. Подольский, И. Железобетонные конструкции. Систематический курс. Расчет разных специальных железобетонных сооружений / И. Подольский. – М.: Моск. ин-т инженерного трансп., 1929. – Ч. 2. – 386 с.
3. Довгалюк, В.И. Новый вид косвенного армирования железобетонных колонн / В.И. Довгалюк, М.Х. Кац // Строительство и архитектура. Сер. 8. Строительные конструкции (отечеств. производств. опыт). – М., 1985. – С. 2 – 5.
4. Довгалюк, В.И. Соединение сборных железобетонных каркасных конструкций зданий / В.И. Довгалюк. – М.: ВНИИТПИ Госстроя СССР, 1989. – 62 с. – (Строительство и архитектура. Обзорная информация. Сер. Строительные конструкции. Вып. 5 / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т проблем науч.-техн. прогресса и информации в строительстве).
5. Андреев, С.А. Каменные конструкции: учеб. пособие / С.А. Андреев. – М., Л.: Изд-во М-ва коммун. хоз-ва РСФСР, 1948. – 216 с.
6. Розенблюмас, А.М. Каменные конструкции / А.М. Розенблюмас. – Каунас: Высш. шк., 1964. – 304 с.
7. Шоршнев, Г.Н. Уточнение методики расчета армокаменных элементов, армированных с использованием полосовой стали, прошедшей обработку перфорацией / Г.Н. Шоршнев, А.Л. Рябинин // Промышленное и гражданское строительство. – 2008. – № 3. – С. 38 – 39.
8. Гринев, В.Д. Армирование как способ усиления сжатых кирпичных столбов / В.Д. Гринев, А.М. Хаткевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2008. – № 12. – С. 41 – 46.
9. Гринев, В.Д. Спиральные сетки для поперечного армирования каменной кладки / В.Д. Гринев, В.В. Гринев, Я.С. Яско // Архитектура и строительство. – 2003. – № 1. – С. 62 – 63.
10. Хаткевич, А.М. Усиление каменных конструкций различными видами поперечного армирования / А.М. Хаткевич // Evropská věda XXI století. – 2008: Materiály IV mezinárodní vědecko-praktická konf., 16 – 31 května 2008 roku. – Praha: Publishing House «Education and Science» s.r.o., 2008. – С. 37 – 40.
11. Гринев, В.Д. Поперечное армирование сжатых армокаменных конструкций / В.Д. Гринев, А.М. Хаткевич // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Респ. Беларусь: сб. науч. тр. XVI междунар. науч.-метод. семинара; под ред. П.С. Пойты, В.В. Тура. – Брест: БрГТУ, 2009. – Ч. 1. – С. 117 – 121.
12. Камейко, В.А. Прочность на сжатие кирпичной кладки с косвенным сетчатым армированием / В.А. Камейко // Экспериментальные исследования каменных конструкций: сб. ст. / ЦНИПС; под ред. Л.И. Онищика. – М.-Л., 1939. – С. 65 – 89.
13. Каменные и армокаменные конструкции. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, трещиностойкости и деформативности: СТБ 1376-2002. – Введ. 18.31.02. – Минск: М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2003. – 12 с.
14. Hendry, A.W. Design of Masonry Structures / A.W. Hendry, B.P. Sinha, S.R. Davies. – Third edition. – London, Weinheim, New York, Tokyo, Melbourne, Madras: An Imprint of Chapman & Hall, 2004.
15. Бедов, А.И. Проектирование, восстановление и усиление каменных и армокаменных конструкций: учеб. пособие / А.И. Бедов, А.И. Габитов. – М.: Изд-во АСВ, 2008. – 568 с.
16. Камейко, В.А. Прочность на сжатие кирпичной кладки с косвенным сетчатым армированием / В.А. Камейко // Экспериментальные исследования каменных конструкций: сб. ст. / ЦНИПС; под ред. Л.И. Онищика. – М.-Л., 1939. – С. 65 – 89.

Поступила 15.10.2009