

УДК 624.166.8:624.04

АРМИРОВАНИЕ КАК СПОСОБ УСИЛЕНИЯ СЖАТЫХ КИРПИЧНЫХ СТОЛБОВ

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

Рассматриваются вопросы прочности кладки, применение для ее усиления поперечного армирования сетками в виде плоских спиралей. Изложена последовательность образования трещин. Представлены в обобщенной форме данные результатов проведенных исследований. Показаны преимущества использования спиральных сеток для поперечного армирования по сравнению с традиционно применяемыми сетками из пересекающихся стержней и сетками «зигзаг». Армирование спиральными сетками дает возможность использования арматуры больших диаметров, уменьшения концентраторов напряжений. Применение спиралеобразных сеток будет целесообразно не только для железобетона, но и для армокаменных конструкций. Даже при одинаковой стоимости производства спиралеобразных сеток и сеток с квадратной ячейкой использование спиралеобразных сеток позволит повысить прочность каменной кладки за счет уменьшения толщин армируемых швов.

Введение. В мире существует огромное многообразие материалов, применяемых для каменной кладки. В зависимости от того, какой критерий положен в основу классификации, камни могут классифицироваться по происхождению (естественные и искусственные); материалу (силикатные, бетонные, керамические и т.п.); размерам (кирпич, камень, блоки, бут и т.п.); прочности (характеризуется марками); морозостойкости (характеризуется марками); плотности (тяжелые, легкие); теплотехническим характеристикам (теплоизоляционные, конструктивные, полнотелые, эффективные); способу монтажа (для ручной кладки массой до 31 кг, крупные блоки, фасадные изделия); форме (лекальные, правильной формы, многоугольные и т.п.).

В настоящее время чаще других пользуются искусственными каменными материалами.

Получением керамики, в частности обожженной, человечество занимается со времени своего зарождения. По всему миру при проведении археологических раскопок обнаруживают различные строительные сооружения. При этом для определения возраста находок пользуются различными методами.

Так, еще в прошлом столетии о времени строительства судили по глубине залегания находки. Более точно дату археологических находок стали определять с помощью радиоуглеродного метода, изобретенного американским физиком-атомщиком Уиллардом Ф. Либби (1908 – 1980).

Первые поселения человека возникли в период между X и VIII тысячелетием до н.э. (неолит, новый каменный век). До этого периода человечество вело кочевой образ жизни. Ведение оседлого образа жизни потребовало возведения жилых, защитных и культовых сооружений, для чего необходимо было иметь строительные материалы. Первые поселения возникли еще до изобретения керамики (обожженной глины), но уже тогда стали применять кирпич-сырец (отформованный вручную и высушенный на воздухе и солнце).

Самые древние кирпичи были найдены в 1952 году при раскопках международной археологической экспедицией в Иерихоне на берегу Йордана. Руины древнего города представляли собой высокий холм. При раскопках обнаружен кирпич-сырец двух видов. Первый вид был размером 260×100×100 мм, второй – 400×150×100 мм. Раствором для кладки служила обычная глина. Возраст находок составляет от VIII до VII тысячелетия до н.э. Хотя в Иерихоне и были обнаружены самые древние кирпичные постройки, но материалом их строительства был простой необожженный кирпич. Революционное же изменение произошло с началом производства обожженной керамики. Первые обожженные кирпичи были изготовлены через 5000 лет после появления высушенных на воздухе кирпичей и через 4000 лет после появления первой керамики. Древнейшая керамика в Европе и на Ближнем Востоке датируется эпохой от VII до VI тысячелетия до н.э.

Основная часть. Каменные конструкции работают преимущественно на сжатие, поскольку именно при сжатии наиболее полно используются прочностные свойства камня. Если рассматривать кладку идеально выполненной (все кирпичи имеют одинаковые геометрические размеры, однородны по прочности и плотности; раствор в швах разослан однородно), то прочность ее даже при очень прочном растворе всегда будет меньше прочности кирпича на сжатие.

Казалось бы, простое предположение о том, что при использовании более прочного камня получаем более прочную кладку, должно подтверждаться на практике. Однако многочисленные эксперименты показывают совершенно иную картину. Часто опытные образцы, выполненные из кирпича меньшей

прочности, разрушаются при больших нагрузках. Поэтому многие эмпирические формулы (формулы Боме, Графа, Крейгера), используемые до 40-х годов прошлого столетия, выражающие прочность кладки от прочности кирпича и раствора, оказываются несостоятельными [1, с. 9]. Максимальная прочность кладки при прочности раствора, стремящейся к бесконечности ($R_2 = \infty$) называется конструктивной прочностью кладки R_k :

$$R_k = AR_1,$$

где R_1, R_2 – соответственно пределы прочности камня и раствора (марки); A – конструктивный коэффициент меньше единицы, зависящий от прочности камня и его вида. Основные факторы, влияющие на значение коэффициента A , – это прочность кирпича на изгиб и срез.

Фактическая же прочность кладки значительно меньше конструктивной. При этом необходимо отметить, что кладка, выполненная даже на песке или на свежешелом растворе, обладает минимальной прочностью R_{min} . После проведения многочисленных опытов в 30 – 40-х годах прошлого века профессором Л.И. Онищикою была предложена зависимость прочности кладки от прочности камня и раствора. Она выражается гиперболической зависимостью:

$$R = AR_1 \left(1 - \frac{a}{b + \frac{R_2}{2R_1}} \right) \eta,$$

где a и b – эмпирические коэффициенты, зависящие от вида кладки; η – поправочный коэффициент для кладок на низких марках раствора.

Большое влияние на прочность кладок конструктивного коэффициента A , зависящего от прочности кирпича на изгиб и срез, объясняется работой составляющих материалов. Неоднородность растворных швов приводит к тому, что работу кирпича в кладке можно представить пластиной, опертой на множество опор различной жесткости и нагруженных различными по значению сжимающими усилиями. Фактически кладка представляется двухкомпонентным материалом, состоящим в основном из камней и растворных швов. При сжатии помимо осевых деформаций всегда появляются поперечные. Жесткий кирпич сдерживает деформации менее жестких растворов, в результате более жесткий материал оказывается растянутым, а менее жесткий – сжатым.

Соответственно увеличив сопротивляемость растворных швов растяжению, можно увеличить в конечном итоге и прочность кладки. Для этих целей используют различные виды армирования.

С древнейших времен использовалась солома в египетских кирпичах и постройках древней Хивы в Средней Азии, растительные волокна – в керамике древних майя, тростник – в глиняных постройках индусов и вавилонян, бревна – в крепостных стенах ассирийцев, железные связи – в церковных сводах Древней Руси.

Идея армирования бетона поперечной арматурой возникла в начале прошлого столетия. Опытным путем было установлено, что поперечное расположение арматуры в бетоне весьма эффективно при действии осевой сжимающей силы. В связи с этим были предложены различные способы поперечного армирования. Так, в 1900 году М. Консидер предложил арматуру в виде непрерывной спиральной обмотки; в 1904 году Н. Абрамов – зигзагообразную арматуру между продольными стержнями; в 1907-м В.П. Некрасов рекомендовал применять проволочные сетки, а Р. Залигер – кольца и хомуты [2, с. 5].

Работы данных авторов и их последователей заложили основу для использования поперечного армирования, т.е. создания конструкций, работающих с «эффектом обоймы». Достоинством данного эффекта является то, что у сжатых элементов ограничиваются поперечные деформации, замедляется процесс трещинообразования, а материал в обойме работает обычно в трехосном напряженном состоянии, что, соответственно, отодвигает момент разрушения конструкции и повышает предельную сжимаемость.

Учитывая данный положительный эффект, оказываемый косвенным армированием, его стали применять не только для железобетонных, но и для каменных конструкций.

Так, в 1926 году В.П. Некрасов предложил укладывать в горизонтальные растворные швы кладки арматуру в виде сеток из пересекающихся стержней.

Лабораторией каменных конструкций ЦНИПС за период 1936 – 1938 годов были проведены исследования прочности кирпичной кладки с косвенным сетчатым армированием [1].

В задачу испытаний входило:

1) определение влияния процента армирования, диаметра арматуры и размера ячейки сетки на эффективность косвенного армирования кирпичной кладки при центральном сжатии;

2) определение влияния качества кирпича и прочности неармированной кладки на эффективность косвенного армирования при центральном сжатии (опыты 1937 г.);

3) определение эффективности косвенного сетчатого армирования при внецентренном сжатии и продольном изгибе (четвертая серия испытаний – опыты 1938 г.).

Данные исследования стали основой для разработки нормативных документов по применению поперечного армирования.

По действующему СНиП эффективность косвенного сетчатого армирования зависит от шага сеток, процента объемного армирования, вида работы конструкции, прочностных и деформационных свойств применяемых материалов. Такой вид армирования в качестве рабочего рекомендуется использовать в конструкциях с малой гибкостью ($\lambda_s \leq 53$), сжатых центрально, либо с эксцентриситетом в пределах «ядра сечения» ($e_0 \leq 0,17h$), на растворах марки не ниже 50 при высоте ряда кладки не более 150 мм.

Процент объемного армирования μ должен быть более 0,1 % и не превышать значения, определяемого по формуле [3, 4]:

$$\mu = 50 \frac{R}{(1 - \frac{2e_0}{y})R_s} \geq 0,1 \%,$$

где R – расчетное сопротивление кладки сжатию; e_0 – эксцентриситет расчётной силы N относительно центра тяжести сечения; y – расстояние от центра тяжести сечения элемента до его края в сторону эксцентриситета; R_s – расчетное сопротивление арматуры.

По предложению В.А. Камейко [2] в опытах 1936 – 1938 годов были использованы для поперечного армирования сетки из стержней одного направления, так называемые сетки типа «зигзаг». Этот тип арматуры, как показали исследования, обладает рядом преимуществ:

- не имеет узлов пересечения отдельных прутьев сеток, что имеет место при сетках с квадратной ячейкой;

- дает возможность сохранять нормальную толщину шва.

При применении же сеток с квадратной ячейкой из проволоки, к примеру, 6 мм толщина горизонтального шва будет не менее 16 мм (слой раствора, отделяющий арматуру от кирпича, должен быть не менее 2 мм). К тому же очевидным фактом является то, что каменщику сложно, а иногда и невозможно создать слой раствора, отделяющий арматуру от кирпича, толщиной 2 мм, как того требуют нормативные документы. Повышение толщины шва отрицательно влияет на несущую способность конструкций. Чем толще шов, тем труднее достичь равномерной его плотности и тем в большей степени кирпич работает в кладке на изгиб и срез.

Так, В.Д. Гопчий, Р.А. Гребенник, В.Г. Клименко предложили вводить при оценке фактической несущей способности обследуемой конструкции коэффициенты снижения несущей способности в случае наличия даже 3 – 4 швов увеличенной толщины на один метр высоты кладки [3]. Применение же в сетках арматуры меньше $\varnothing 3$ мм, несмотря на увеличение прочности кладки за счет увеличения площади сцепления с раствором, при одинаковом проценте армирования не допускается из-за возможной коррозии стали.

В Германии нашли применение арматурные сетки в виде бесконечной металлической фермы (проволочный каркас «Mufbor»), образуемой металлическими стержнями и, так же как сетки типа «зигзаг», не имеющие узлов пересечения стержней. Ширина арматурного каркаса соответствует ширине кладки. Каркасы в стенах укладывают в шве внахлестку, при этом кирпичная кладка с арматурой работает на изгиб в обоих направлениях, что позволяет повысить прочность и трещиностойкость стен, особенно воспринимающих горизонтальные нагрузки [4].

В последнее время были исследованы железобетонные колонны, армированные спиралевидными однослойными сетками. Изготовление таких сеток на универсальных станках «Универформ» [5], по данным авторов, значительно снизит трудоемкость, энергоёмкость и материалоемкость производства по сравнению с традиционно применяемыми сетками с квадратной ячейкой, изготавливаемыми с помощью контактной сварки.

Все вышесказанное позволяет сделать следующее предположение – применение спиралеобразных сеток будет целесообразно не только для железобетона, но и для армокаменных конструкций. Даже при одинаковой стоимости производства спиралеобразных сеток и сеток с квадратной ячейкой использование спиралеобразных сеток позволит повысить прочность каменной кладки за счет уменьшения толщин армируемых швов.

Для подтверждения данных предпосылок в лаборатории кафедры «Строительные конструкции» Полоцкого государственного университета с 2003 года проводятся отдельные исследования образцов-столбов со спиральным сетчатым армированием.

В ходе первого эксперимента для испытаний были изготовлены три опытных образца в виде колонн сечением 510×510 мм:

- образец № 1 изготавливался неармированным как эталонный;
- образцы № 2 и № 3 конструировались с сетчатой арматурой с квадратной ячейкой и со спиральной арматурой соответственно, с одинаковым коэффициентом армирования.

Колонны испытывались на центральное сжатие.

Армирование кладки спиралеобразными сетками в 1,44 раза уменьшило поперечные относительные деформации, соответствующие трещинообразованию, и в 1,18 раза увеличило прочность образца, по сравнению с армированием сетками с квадратной ячейкой.

Данные, полученные в эксперименте, подтвердили, что теоретические предположения верны. Национальный центр интеллектуальной собственности выдал Полоцкому государственному университету патент на колонну с поперечным сетчатым армированием.

Данные эксперимента 2003 года подтвердили эффективность армирования каменных конструкций спиралеобразными сетками при центральном сжатии.

Целью следующего эксперимента явилось исследование элементов, армированных спиральной арматурой, при внецентренном сжатии. В ходе исследований для испытаний были изготовлены также три опытных образца в виде колонн сечением 1,5×1,5 кирпича:

- образец № 1 изготавливался неармированным как эталонный;
- образцы № 2 и 3 конструировались с сетчатой арматурой с квадратной ячейкой и со спиральной арматурой соответственно, с одинаковым коэффициентом армирования ($\mu = 0,2 \%$).

Колонны испытывались на внецентренное сжатие.

Величина эксцентриситета была принята предельно возможной – на границе ядра сечения.

Результаты испытаний представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов на внецентренное сжатие

№ образца	Разрушающая нагрузка, R_u , кН	Нагрузка, при которой образовались первые трещины, R_{trc} , кН	Расчетная нагрузка по СНиП, кН
1	990	450	250
2	1145	706	297
3	1530	785	297

Относительные поперечные деформации до момента образования первых трещин для образца № 2 (колонна К2), армированного сеткой с квадратной ячейкой, были меньше. Однако после превышения нагрузки трещинообразования поперечные деформации колонны начали быстро расти, в то время как рост поперечных деформаций образца № 3, армированного спиралеобразной сеткой, был в два-три раза меньше. В момент разрушения поперечные деформации образца № 2 были в два с половиной раза больше деформаций образца № 3. Армирование колонн не оказало существенного влияния на величину продольных деформаций.

В 2008 году в испытательной лаборатории Полоцкого государственного университета проведено испытание трех серий образцов кладки с различными видами армирования:

- первая серия изготовлена как эталонная – без армирования;
- во второй исследовались деформационные и прочностные свойства столбиков с традиционно применяемыми сетками из перекрестных стержней;
- третья серия образцов была выполнена с армированием сетками в виде спиралей.

Схемы используемых сеток представлены на рисунке 1. Процент армирования столбов второй и третьей серии принят одинаковым ($\mu = 0,4 \%$).

Испытания проведены на центральное сжатие на гидравлическом прессе ПР-500 через 28 суток после изготовления. Загрузка велась поэтапно с приращением нагрузки не более 10 % от разрушающей и выдерживанием на каждом этапе около 10 мин.

Для кладки использовались керамический кирпич полусухого прессования марки М150, раствор М75, проволока класса S500 (Вр-I). Высота образцов – 1220 мм (шестнадцать рядов кладки) – определялась размерами поперечного сечения 1,5×1,5 кирпича таким образом, чтобы исключить влияние сил трения с плитами прессового оборудования.

В ходе испытаний конструкций кирпичных столбов фиксировались:

- средние продольные и поперечные деформации на поверхностях боковых граней индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм;
- усилия трещинообразования;
- несущая способность по шкале силоизмерителя пресса;
- продольные деформации горизонтальных швов тензотрами Гугенбергера.

Для учета работы арматурных стержней в сетках на них были установлены датчики сопротивления. Появление трещин фиксировалось визуально, ширину раскрытия в необходимых случаях находили микроскопом МПБ-2.

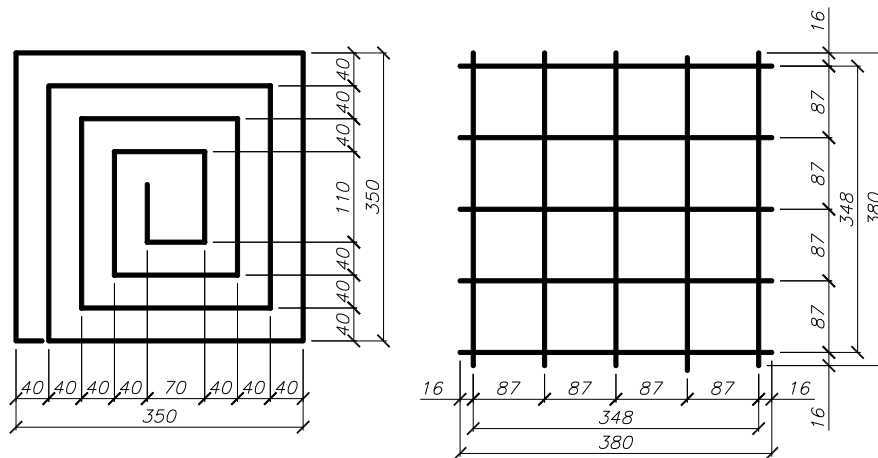


Рис. 1. Схемы и размеры армирующих сеток

Отдельные сведения о прочностных и деформационных характеристиках испытанных образцов представлены в таблице 2 и на рисунке 2.

Таблица 2

Результаты испытаний образцов

Серия, № образца	R_u , кН	$R_{сгс}$, кН	Продольные деформации, $\xi_{сгс}$	Поперечные деформации, $\xi_{сгс}$	
Серия I Неармированная	K1	650	250	0,000586	0,00004
	K2	630	250	0,000389	0,00001
Серия II Армирование обычной сеткой	K3	1640	750	0,00186	0,0004125
	K4	1450	600	0,001486	0,00017
	K5	1625	700	0,001105	0,00018
Серия III Армирование спиральной сеткой	K6	1500	700	0,00175	0,00045
	K7	1675	700	0,001471	0,00039
	K8	1675	800	0,001467	0,000173

Примечание. R_u – разрушающая нагрузка; $R_{сгс}$ – нагрузка трещинообразования; $\xi_{сгс}$ – относительные деформации трещинообразования.

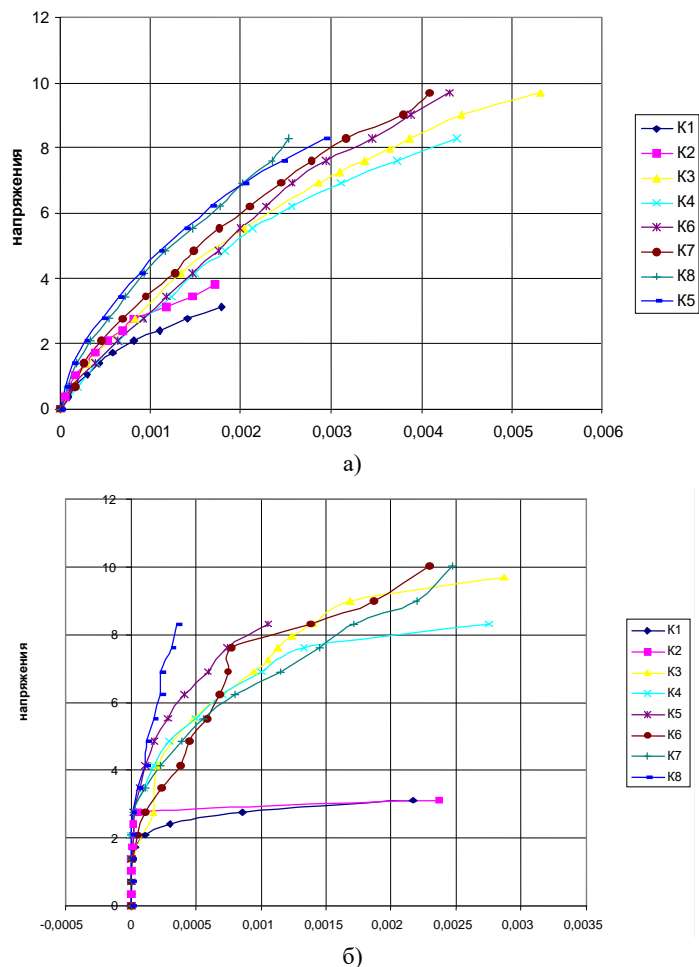


Рис. 2. Диаграммы деформирования опытных образцов:
 а – относительные продольные деформации; б – относительные поперечные деформации

Анализируя полученные результаты испытаний можно сделать отдельные предварительные **выводы**:

- 1) поперечное армирование каменных столбов позволяет увеличить их прочность практически в 2,5 раза за счет создания сетчатым армированием эффекта «обоймы». Арматура воспринимает растягивающие напряжения растворного шва, которые при отсутствии косвенного армирования передаются на кирпич;
- 2) армирование кладки спиральными сетками уменьшило поперечные деформации в среднем на 30 % по сравнению с образцами, армированными обычными сетками;
- 3) пересечения стержней сеток являются жесткими опорами и концентраторами напряжений, что приводит к более раннему появлению трещин;
- 4) армирование спиральными сетками дает возможность использования арматуры больших диаметров и уменьшения концентраторов напряжений, кроме того отсутствует необходимость укладки сеток поочередно с поворотом на 90° (по сравнению с сетками «зигзаг»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Экспериментальные исследования каменных конструкций: сб. ст. / Гос. изд-во строит. лит.; под ред. Л.И. Онищика. – Л., 1939.
2. Гнедовский, В.И. Косвенное армирование железобетонных конструкций / В.И. Гнедовский. – Л.: СИ, 1981.
3. Реконструкции промышленных предприятий: справ. строителя: в 2-х т. / под ред. В.Д. Топчия, Р.А. Гребенника. – М.: Стройиздат, 1990. – Т. 1.
4. Гринёв, В.Д. Каменные конструкции: учеб. пособие / В.Д. Гринёв. – Новополоцк: ПГУ, 2001.
5. Довгалюк, В.И. Новый вид косвенного армирования железобетонных колонн / В.И. Довгалюк, М.Х. Кац // Строительство и архитектура. Сер. 8: Строительные конструкции. – ВНИИИС Госстроя СССР, 1985.

Поступила 29.10.2008