

## СОПРОТИВЛЕНИЕ СЖАТИЮ КАМЕННЫХ И АРМОКАМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Лазовский Д. Н., Хаткевич А. М.

**Введение.** Сжатые каменные элементы, изготовленные из каменной кладки, широко используются при возведении зданий и сооружений различного назначения. Благодаря применению продольного и поперечного армирования, а также создания комплексных сечений за счет включения железобетона, существенно повышается прочность, как при сжатии, так и при растяжении, что позволяет использовать армокаменные элементы во внецентренно сжатых конструкциях с достаточно большими эксцентриситетами.

Известные методы расчета сжатых каменных и армокаменных элементов базируются на применении упрощенных моделей и обладают рядом несовершенств: рассматривается лишь стадия разрушения, не учитываются нелинейность деформирования кладки под нагрузкой и ее сопротивление растяжению, фактическая высота сжатой части сечения с криволинейными нормальными напряжениями заменяется эквивалентной с равномерно распределенными напряжениями, не в полной мере учитывается перераспределение усилий в комплексных армокаменных элементах. К примеру, прочность кладки в комплексных элементах с железобетоном уменьшается введением постоянного, не зависящего от объемного соотношения кладки и железобетона, коэффициента 0,85; в комплексных и внецентренно сжатых армокаменных элементах вводятся ограничения по проценту продольного армирования, к сопротивлению арматуры также вводятся коэффициенты условий работы. Данные мероприятия необходимы для учета неполного использования прочностных свойств, вызванного разными деформационными характеристиками составляющих сечение сжатого элемента материалов.

Указанные упрощения не позволяют получать достоверные данные о напряженно-деформированном состоянии как в стадии разрушения сжатого элемента, так и на промежуточных стадиях нагружения, что может приводить как к перерасходу материалов, так и к недостаточной надежности проектных решений.

**Основная часть.** Предлагается методика расчета сопротивления сжатию каменных и армокаменных элементов на основе метода сечений и общей деформационной модели, позволяющая определять их параметры напряженно-деформированного состояния на любой стадии деформирования [1, 2]. Она позволяет рассчитывать в том числе элементы, поперечное сечение которых состоит из материалов с разными физико-механическими характеристиками, учет которых в настоящее время основан на применении эмпирических правил и коэффициентов.

Предпосылки и допущения предлагаемой методики:

- рассматриваемый сжатый элемент изготовлен из сплошного однородного материала – каменной либо армокаменной с поперечным армированием кладки с осредненными физико-механическими свойствами;
- стальная продольная арматура работает совместно с кладкой на всех стадиях деформирования под нагрузкой вплоть до разрушения;
- поперечное сечение сжатого элемента рассматривается как совокупность  $k$  элементарных площадок площадью  $A_{mi}$  и  $n$  стержней продольной арматуры с площадью поперечного сечения  $j$ -го стержня  $A_{sj}$ . В пределах элементарных площадок напряжения считаются равномерно распределенными;
- распределение относительных деформаций  $(\varepsilon_{mi}, \varepsilon_{sj})$  по поперечному сечению армокаменного элемента принимается линейным исходя из условия соблюдения гипотезы плоских сечений. Для  $i$ -го элементарного слоя сечения элемента и  $j$ -го арматурного стержня продольной арматуры:

$$\begin{cases} \varepsilon_{mi} = \frac{1}{r_y}(y_{mi} - y_0) + \frac{1}{r_x}(x_{mi} - x_0) + \varepsilon_N \\ \varepsilon_{sj} = \frac{1}{r_y}(y_{sj} - y_0) + \frac{1}{r_x}(x_{sj} - x_0) + \varepsilon_N, \end{cases} \quad (1)$$

где  $1/r_y$ ,  $1/r_x$  - кривизна элемента соответственно в направлении осей  $y$  и  $x$ ;

$\varepsilon_N$  - относительная деформация армокаменного элемента от продольного усилия  $N$ :

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sum_{i=1}^k E_{mi} A_{mi} + \sum_{j=1}^n E_{sj} A_{sj}}; \quad (2)$$

- каждая элементарная площадка испытывает сжатие или растяжение в соответствии с диаграммой деформирования кладки или арматуры. На любом уровне нагружения напряжения в кладке и арматуре  $\sigma_{mi}$  и  $\sigma_{sj}$  связаны с относительными деформациями каменной кладки  $\varepsilon_{mi}$  и арматуры  $\varepsilon_{sj}$  секущим модулем деформаций  $E'_{mi}$  и  $E'_{sj}$  соответственно:

$$\begin{cases} \sigma_{mi} = f(\varepsilon_{mi}) = E'_{mi} \varepsilon_{mi} \\ \sigma_{sj} = f(\varepsilon_{sj}) = E'_{sj} \varepsilon_{sj}. \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, используя уравнения равновесия, условия распределения относительных деформаций в соответствии с гипотезой плоских сечений и диаграммы деформирования каменной кладки и продольной арматуры система разрешающих уравнений для общего случая косоугольного сжатия для расчета параметров напряженно-деформированного состояния армокаменных элементов имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} & \varepsilon_N \left( \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} \right) + \frac{1}{r_x} \left( \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (x_{sj} - x_0) \right) + \\ & + \frac{1}{r_y} \left( \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (y_{sj} - y_0) \right) - N = 0 \\ & \varepsilon_N \left( \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (x_{sj} - x_0) \right) + \\ & + \frac{1}{r_x} \left( \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0)^2 + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (x_{sj} - x_0)^2 \right) + \\ & + \frac{1}{r_y} \left( \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0)(z_{mi} - z_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (y_{sj} - y_0)(x_{sj} - x_0) \right) - N \cdot e_x = 0 \\ & \varepsilon_N \left( \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (y_{sj} - y_0) \right) + \\ & + \frac{1}{r_x} \left( \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0)(x_{mi} - x_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (x_{sj} - x_0)(y_{sj} - y_0) \right) + \\ & + \frac{1}{r_y} \left( \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0)^2 + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (y_{sj} - y_0)^2 \right) - N \cdot e_y = 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Напряжение элементарной площадки больше сопротивления кладки на растяжение свидетельствует об образовании трещин, жесткость данной площадки в работе сечения принимается нулевой, т.е.  $E'_{mi} A_{mi} = 0$ .

Диаграммы деформирования продольной арматуры при сжатии и растяжении принимаются одинаковыми. Для арматуры, имеющей физический предел текучести принимается упро-

шенная диаграмма Прандтля, для арматуры с условным пределом текучести принимается билинейная диаграмма с двумя базовыми точками.

В качестве диаграммы деформирования каменной кладки, устанавливающей связь между напряжениями и деформациями, принимается нелинейная диаграмма состояния каменной кладки с ниспадающей ветвью, рисунок 1.

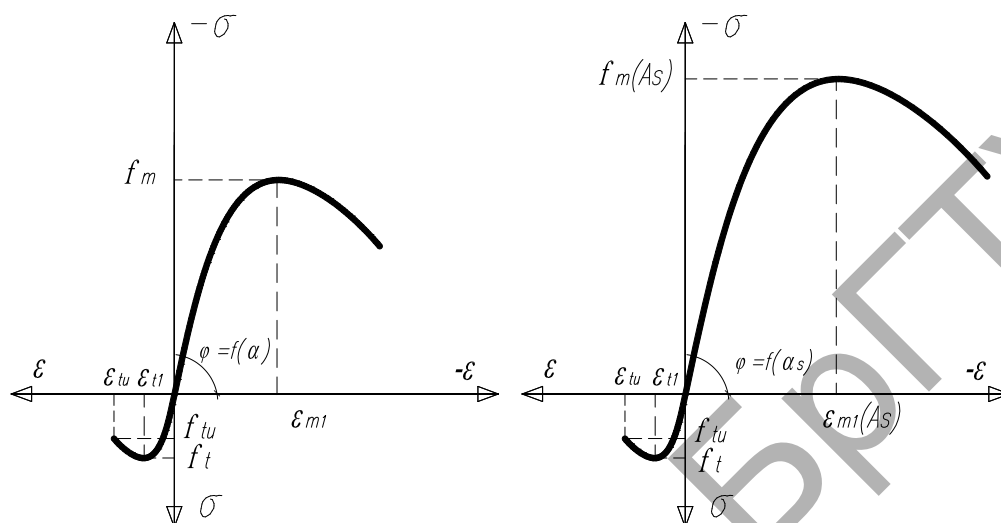


Рисунок 1 – Диаграммы деформирования каменной кладки и каменной кладки с поперечным армированием горизонтальных швов

Параметры базовых точек диаграммы состояния каменной кладки:

- при сжатии  $[\varepsilon_{m1}; f_m]$ ;
- при растяжении  $[\varepsilon_{t1}; f_t]$  и  $\varepsilon_{tu}$ .

Угол наклона  $\varphi$  диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ », характеризующий модуль деформаций, определяется упругой характеристикой кладки  $\alpha$ , зависящей от вида кладки и прочности кладочного раствора при сжатии. Относительные деформации кладки, соответствующие основным базовым точкам, также определяются исходя из значений упругой характеристики.

Ординаты в вершинах диаграммы представляют собой максимальные напряжения, возникающие при испытании образцов каменной кладки при осевом сжатии или растяжении, которые помимо испытаний могут быть вычислены на основании прочностных характеристик исходных кладочных материалов.

Поперечное армирование горизонтальных швов кладки приводит к повышению сопротивления сжатию и увеличению сжимаемости. Диаграмма состояния, как и для неармированной кладки принимается нелинейной с ниспадающей ветвью, при этом изменяется базовая точка при сжатии  $[\varepsilon_{m1}(As); f_m(As)]$ , рисунок 1.

Традиционно используемые для поперечного армирования горизонтальных швов армокаменных элементов сетки из-за наличия узлов пересечения зачастую приводят к раннему трещинообразованию. В литературе имеются противоречивые сведения об эффективности поперечного армирования [3]. В связи с этим экспериментально было проверено влияние вида сеток поперечного армирования на напряженно-деформированное состояние армокаменных элементов. Для армирования использовались сетки из перекрестных стержней и спиралеобразные сетки.

Характер разрушения образцов кладки с поперечным армированием горизонтальных швов показал, что в расчетах необходимо деление поперечного сечения армокаменных с поперечным армированием элементов на два характерных участка с площадью  $A_{eff}$  и  $A_0$ , рисунок 2, которым соответствуют разные сопротивления сжатию кладки –  $f_m(As)$  и  $f_m$  соответ-

венно, что учитывается предлагаемой методикой расчета путем использования разных диаграмм деформирования.

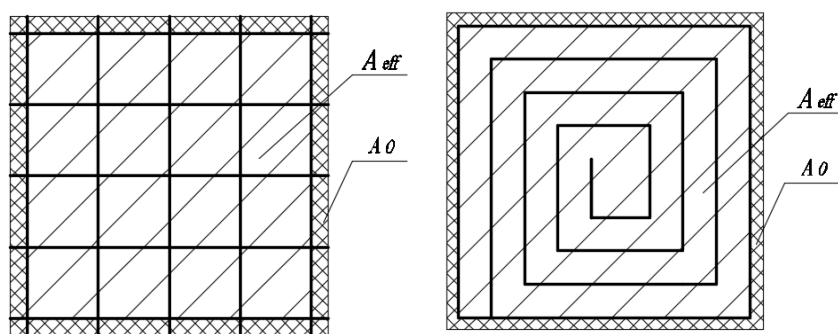


Рисунок 2 – Деление поперечного сечения образцов на  $A_{eff}$  и  $A_0$ , армированных сетками из перекрестных стержней и спиральными сетками соответственно

Предпосылка методики в виде соблюдение гипотезы плоских сечений для осредненных продольных деформаций (с «достаточной для практики точностью») подтверждено рядом экспериментальных исследований [4, 5, 6]. Сохранение плоскостности поперечных сечений при расчете каменных и армокаменных с продольным армированием элементов является общим положением расчета в ряде нормативных документов – в частности ТКП EN 1996-1-1 [7], ТКП 45-5.03-308-2017 [8].

Возможность применения гипотезы для расчета армокаменных элементов с поперечным армированием сетками в виде плоских спиралей проверена экспериментально, рисунок 3.

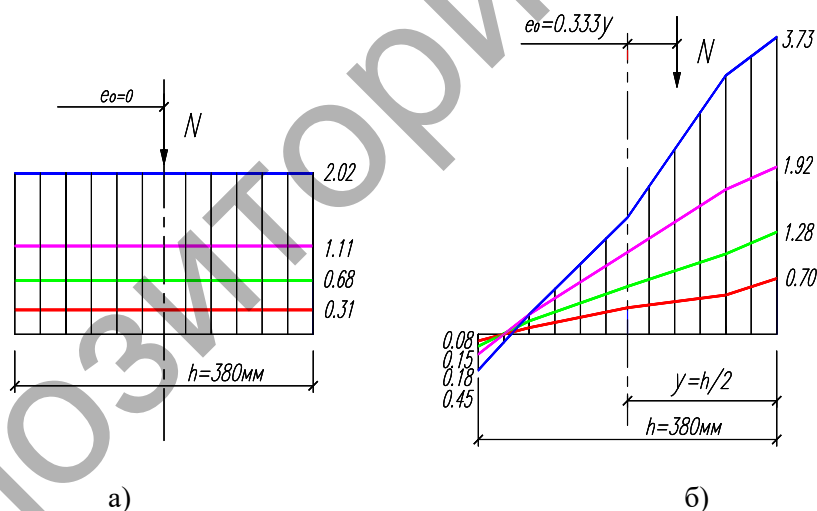


Рисунок 3 – Распределение деформаций  $\varepsilon \cdot 10^{-3}$  по среднему сечению опытных образцов при центральном и внецентренном сжатии соответственно. Эпюры построены для уровня нагрузок, составляющих 0,2, 0,4, 0,6 и 0,85 от разрушающей  $N_u$

Измерением относительных деформаций проволоки с помощью предварительно наклеенных тензорезисторов установлено уменьшение напряжений в отдельных витках сеток в виде плоских спиралей по мере приближения витков к центральной части поперечного сечения опытных образцов. Установлено, что эффективность использования прочностных свойств арматуры во внутренних витках уменьшается до 7,5 раз по сравнению с внешними, что явилось основанием для усовершенствования сеток (патент на полезную модель № 9295 «Сетка для поперечного армирования каменной кладки» [9]), позволяющего более эффективно расходовать арматуру путем рационального размещения в плане витков спиральной сетки, рисунок 4.

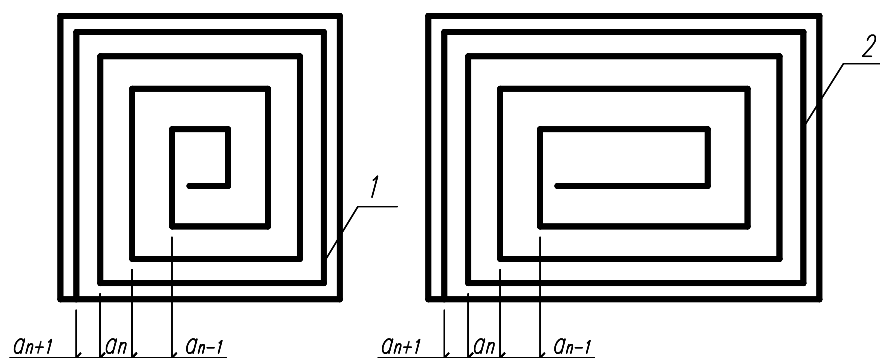


Рисунок 4 – Схемы усовершенствованных сеток в виде квадратной (1) и прямоугольной (2) плоской спирали с переменным шагом витков  $a_n$

За сопротивление сжатию в предельной стадии по прочности в предлагаемой методике принимается максимальное усилие, при котором соблюдаются условия равновесия и площадь эпюры сжатой зоны максимальна.

Данный критерий разрушения отличается от распространенного в настоящее время ограничения предельных деформаций сжатия и обладает преимуществом за счет возможности учета перераспределения усилий в сечении сжатых элементов, состоящих из нескольких материалов, либо подвергающихся усилению. К тому же многочисленные исследования показывают, что при внецентренном сжатии деформации кладки могут увеличиваться до четырех раз по сравнению с центральным, что превышает нормируемые предельные значения сжимаемости.

Предлагаемая методика реализована в программном комплексе «Beta» (разработка д.т.н. Д.Н. Лазовского и к.т.н. Д.О. Глухова). Она позволяет учитывать истинные деформационные свойства составляющих сечение материалов, позволяет выявить неполное использование прочностных свойств арматуры, каменной кладки и проводить расчеты без введения эмпирических коэффициентов.

Проверка достоверности разработанной методики расчета сопротивления сжатию каменных и армокаменных элементов выполнена путем сопоставления результатов расчета с данными из сформированной выборки результатов экспериментальных результатов проведенных ранее исследований.

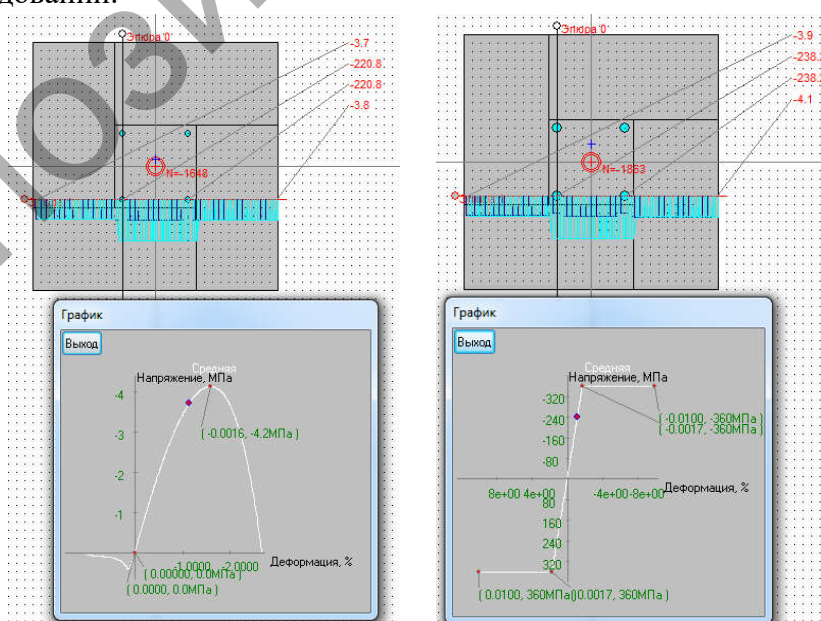


Рисунок 5 – Распределение напряжений в сечениях сжатых комплексных элементов, напряжения в кирпичной кладке и продольной арматуре в предельной стадии по прочности

В выборку включены четыре группы элементов – каменные, армокаменные с продольным армированием, армокаменные с поперечным армированием, комплексные элементы из каменной кладки и железобетона. Сравнивая рассчитанные параметры напряженно-деформированного состояния сечений, включая сопротивление сжатию в предельной стадии по прочности, с экспериментальными, установлена их хорошая сходимость, что позволяет рекомендовать применение разработанной методики.

На рисунке 5 в качестве примера показаны отдельные результаты расчета сопротивления сжатию сечений комплексных элементов из каменной кладки с железобетонным сердечником. Напряжения в каменной кладке (3,8 МПа) не достигают предела прочности (4,2 МПа), что вызвано ее большей деформативностью по сравнению с железобетоном. Напряжения в сжатой продольной арматуре также не достигают предела текучести. Таким образом методика позволяет описать истинное напряженно-деформированное состояние поперечного сечения без использования эмпирических коэффициентов.

**Выводы.** Разработана на основе общей деформационной модели для элементов любой формы поперечного сечения с произвольными эксцентриситетами приложения продольных сил методика расчета сопротивления сжатию каменных и армокаменных элементов, позволяющая получать параметры их напряженно деформированного состояния на любой стадии деформирования под нагрузкой. Предпосылка общей деформационной модели в виде гипотезы плоских сечений применительно к армокаменным элементам с поперечным армированием в виде плоских спиралей подтверждена экспериментально.

Предложена новая усовершенствованная конструкция спиральной сетки для поперечного армирования армокаменных элементов с уменьшением шага витков от оси поперечного сечения к его краю, благодаря чему повышается эффективность использования поперечного армирования, имеется возможность снижения расхода арматуры при изготовлении сеток до 10% без потери прочности армокаменного элемента.

#### Список источников

1. Лазовский Д.Н. Расчет сопротивления сжатию каменных и армокаменных элементов с учетом физической нелинейности / Д.Н. Лазовский, А.М. Хаткевич // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. Ф. – 2017. - № 16. – С. 41-50.
2. Глухов, Д.О. Метод расчета прочности сжатых каменных элементов по сечениям, нормальным к продольной оси / Д.О. Глухов, А.М. Хаткевич // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. Ф. – 2016. - № 8. – С. 73-79.
3. Drobiec, L. MASONRY WALLS AND COLUMNS WITH BED JOINT REINFORCEMENT SUBJECTED TO VERTICAL LOADS – PROPOSITION OF DESIGN METHOD / L. Drobiec and J. KUBICA // 14th International Brick & Block Masonry Conference [Electronic resource]. - 2008. - Sydney, Australia. – Mode of access: [http://www.hms.civil.uminho.pt/ibmac/2008/14IBMAC\\_117.pdf](http://www.hms.civil.uminho.pt/ibmac/2008/14IBMAC_117.pdf). – Date of access: 13.07.2017.
4. Каменная кладка из пильных известняков / С.В. Поляков [и др.]. – Кишинев: Изд-во «Картя Молдовеняскэ», 1973. – 344 с.
5. Пильдиш, М.Я. Каменные и армокаменные конструкции зданий / М.Я. Пильдиш, С.В. Поляков. – 2-е изд. – Москва: Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1955. – 400 с.
6. Экспериментальные исследования каменных конструкций: сб. статей / Народный комиссариат по строительству СССР. Центральный научно-исследовательский институт промышленных сооружений «ДНИПС»; науч. ред. Л.И. Онищик. - М.-Л.: Государственное издательство строительной литературы, 1939. - 160 с.
7. Еврокод 6. Проектирование каменных конструкций. Ч. 1-1 : Общие правила для армированных и неармированных конструкций : СТБ EN 1996-1-1-2008. – Введ. 1.07.2009. – Минск : Госстандарт, 2009. – 128 с.
8. Каменные и армокаменные конструкции. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-5.03-308-2017 (33020). – Введ. 01.01.2018. – Минск.: Минстройархитектуры, 2017. – 112 с.
9. Сетка для поперечного армирования каменной кладки: полез. модель ВУ 9295 / А.М. Хаткевич, В.Д. Гринев. – Опубл. 30.06.2013.