

УДК 692.214

ТОНКИХ ГЕННАДИЙ ПАВЛОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,  
5059144@mail.ru

Научно-исследовательский

Московский государственный строительный университет,  
129337, г. Москва, Ярославское ш., 26,

ОСИПОВ ПАВЕЛ ВЛАДИМИРОВИЧ, канд. техн. наук,  
posipov@nccrussia.com

ООО «Нанотехнологический центр композитов»,  
109316, г. Москва, Волгоградский пр., 42, корп. 5,

ТЕМИРАЛИУЛЫ ГАНИ, аспирант,

sss\_gany@mail.ru

ФЕДОРОВ СТАНИСЛАВ КОНСТАНТИНОВИЧ, магистрант,  
f. vitos@mail.ru

Научно-исследовательский

Московский государственный строительный университет,  
129337, г. Москва, Ярославское ш., 26

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАМЕННОЙ КЛАДКИ, УСИЛЕННОЙ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА**

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния усиления образцов каменной кладки композитными материалами на основе углеродных волокон на несущую способность и деформативность при действии статической нагрузки. Определены механизм работы усиленных образцов и влияние усиления на изменение несущей способности каменной кладки. Проведен анализ влияния количества слоев композитного материала на повышение несущей способности. Представлены зависимости определения повышения несущей способности усиленных образцов каменной кладки.

**Ключевые слова:** углеродное волокно; композитный материал; усиление композитными материалами; образцы из каменной кладки; углеродная лента; углеродная ткань; углеродная сетка; внешнее армирование; несущая способность.

GENNADY P. TONKIKH, DSc, Professor,  
5059144@mail.ru

National Research Moscow State University of Civil Engineering,  
26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia

PAVEL V. OSIPOV, PhD,

posipov@nccrussia.com

ООО Nanotechnology Centre of Composites,

42, Volgogradsky Ave., Bdg. 5, 109316, Moscow, Russia,

GANI TEMIRALIULY, Research Assistant,

sss\_gany@mail.ru

STANISLAV K. FEDOROV, Undergraduate Student,  
f.vitos@mail.ru  
National Research Moscow State University of Civil Engineering,  
26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF CARBON FIBER-REINFORCED MASONRY

The paper presents investigations of carrying capacity and deformability of carbon fiber-reinforced masonry subjected to static load. The behavior of fiber-reinforced masonry is described as well as the improvement of the carrying capacity of the composite material layers. The dependences are constructed for the bearing capacity of reinforced masonry samples.

**Keywords:** carbon fiber; composite material; composite material reinforcement; masonry samples; carbon-fiber tape; carbon fabrics; carbon-fiber grid; external reinforcement; bearing capacity.

Целью настоящей работы является проведение экспериментально-теоретических исследований образцов из каменной кладки, усиленных композитными материалами на основе углеродного волокна, при действии статических нагрузок.

Для выполнения данной цели были решены следующие основные задачи:

- проведены экспериментальные исследования физико-механических характеристик материалов, использованных при изготовлении каменных образцов;
- выполнено сравнение несущей способности каменной кладки при разных системах перевязки;
- проанализировано влияние на несущую способность клея между элементом усиления и поверхностью образцов каменной кладки;
- проведено исследование несущей способности каменных образцов, усиленных углеродными лентами и тканями, квадроаксиальными тканями и углеродными сетками на ремонтном составе;
- проведена оценка влияния количества слоев усиления на несущую способность каменных образцов;
- выполнена проверка имеющейся зависимости по определению несущей способности каменной кладки, усиленной композитными материалами на основе углеродного волокна;
- проведён сравнительный анализ полученных результатов с результатами ранее выполненных исследований [1].

Для экспериментально-теоретических исследований были изготовлены образцы из каменной кладки с размерами 1060×1060×250 мм. Все образцы выполнялись из сплошной кладки с цепной системой перевязки, кроме двух образцов, которые были выполнены с пятирядной системой перевязки. При этом все швы, как горизонтальные, так и вертикальные, полностью заполнялись раствором. Для кладки использовался полнотелый кирпич марки М125, завод-производитель – ООО «Производственная строительная компания Донской кирпичный завод», г. Донской Тульской области. В качестве кладочного раствора использовалась готовая сухая смесь – цементно-песчаный раствор марки М150 компании МАКС.



Серия КУ-2 – образцы, усиленные углеродной однонаправленной лентой FibArm Tape 230/300 шириной 300 мм, наклеенной посередине образца с одной стороны в три слоя при помощи двухкомпонентного эпоксидного связующего FibArm Resin 230+.

Серия КУ-3 – образцы, усиленные углеродной однонаправленной лентой FibArm Tape 530/300 шириной 300 мм, наклеенной в средней части образца с двух сторон в два слоя при помощи двухкомпонентного эпоксидного связующего FibArm Resin 530+.

Серия КУ-4 – образцы, усиленные по высоте тремя углеродными однонаправленными лентами FibArm Tape 230/300 шириной 300 мм, наклеенными с одной стороны в три слоя при помощи двухкомпонентного эпоксидного связующего FibArm Resin 230+. Расстояние между лентами составляет 270–300 мм.

Серия КУ-5 – образцы, усиленные с одной стороны углеродной сеткой FibArm Grid 600/1000 с пропиткой, шириной 1000 мм, на ремонтном составе FibArm Repair FS.

Серия КУ-6 – образцы, усиленные квадроаксиальной тканью шириной 1000 мм, наклеенной с одной стороны при помощи двухкомпонентного эпоксидного связующего FibArm Resin 530+.

Серия КУ-7 – образцы, усиленные с двух сторон углеродной тканью FibArm Tape 450/600 шириной 1000 мм, наклеенной при помощи двухкомпонентного эпоксидного связующего FibArm Resin 530+ с четырьмя углеродными анкерными жгутами FibArm Anchor длиной 560 мм, установленными вдоль диагоналей.

Серия КУ-8 – образцы, усиленные с двух сторон квадроаксиальной тканью шириной 1000 мм, наклеенной при помощи двухкомпонентного эпоксидного связующего FibArm Resin 530+ с четырьмя углеродными анкерными жгутами FibArm Anchor длиной 560 мм, установленными вдоль диагоналей.

Экспериментальные исследования проводились как продолжение ранее выполненной работы [1]. В связи с этим для анализа влияния усиления композитным материалом на основе углеродного волокна на несущую способность каменной кладки использовались результаты настоящих и ранее проведенных испытаний. Методики проведения испытаний в обеих работах были полностью аналогичны. Отличия заключались только в количестве слоев усиления, материале усиления и способе наклейки углеродного волокна на каменную кладку. В работе [1] были исследованы образцы каменной кладки 7 серий по 3 шт. в каждой, а именно:

Серия К-I – эталонные образцы без усиления.

Серия К-II – образцы, усиленные одной углеродной однонаправленной лентой FibArm Tape 230/300 шириной 300 мм, наклеенной с одной стороны при помощи двухкомпонентного эпоксидного связующего FibArm Resin 230+.

Серия К-III – образцы, усиленные одной углеродной однонаправленной лентой FibArm Tape 530/300 шириной 300 мм, наклеенной с одной стороны при помощи двухкомпонентного эпоксидного связующего FibArm Resin 530+.

Серия К-IV – образцы, усиленные по высоте тремя углеродными однонаправленными лентами FibArm Tape 230/300 шириной 300 мм, наклеенными с одной стороны при помощи двухкомпонентного эпоксидного связующего FibArm Resin 230+.

Серия К-V – образцы, усиленные с одной стороны углеродной двунаправленной тканью FibArm Tape 240 шириной 1000 мм, наклеенной с одной стороны при помощи двухкомпонентного эпоксидного связующего FibArm Resin 230+.

Серия К-VI – образцы, усиленные с двух сторон тремя углеродными однонаправленными лентами FibArm Tape 230/300 шириной 300 мм, наклеенными при помощи двухкомпонентного эпоксидного связующего FibArm Resin 230+.

Серия К-VII – образцы, усиленные с двух сторон углеродной двунаправленной тканью FibArm Tape 240 шириной 1000 мм, наклеенной при помощи двухкомпонентного эпоксидного связующего FibArm Resin 230+.

При проведении настоящих испытаний нагрузка на образцы прикладывалась ступенями по 10 % от разрушающей нагрузки на начальной стадии нагружения и по 5 % – на стадии, близкой к разрушению. Усилие выдерживалось на каждой ступени в течение 2 мин с последующей фиксацией деформаций. Для измерения деформаций использовались индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм, на базе 800 мм, установленные вдоль диагоналей. Индикаторы часового типа устанавливались как на кирпичной поверхности, так и на поверхности с усилением аппликацией из композитных материалов. Крепление индикаторов осуществлялось с помощью уголков. Деформации измерялись в продольном и поперечном направлении. Количество индикаторов часового типа – 4 шт. Все приборы и оборудование, применяемые в эксперименте, аттестованы и поверены в установленном порядке.

На первом этапе испытаний определялись физико-механические характеристики материалов образцов. Марка кирпича определялась испытаниями на изгиб и сжатие согласно ГОСТ 8462–85 «Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе». Испытания раствора проводились согласно ГОСТ 5802–86 «Растворы строительные. Методы испытаний».

По результатам испытаний установлено, что прочность кирпича соответствует марке М100, а прочность раствора кладки менялась в пределах 2,25–6,40 МПа. В связи с этим анализ результатов испытаний проводился по приведенной разрушающей нагрузке, которая определялась с учетом коэффициента пересчета, определяемого в свою очередь по изменению расчетного сопротивления кладки главным растягивающим напряжениям  $R^{tw}$  [5].

Анализ результатов проведенных и ранее выполненных испытаний осуществлялся по величине сдвигающего усилия  $Q$ , определяемого как проекция разрушающей вертикальной нагрузки на грань образца. Результаты испытаний раствора, образцов и пересчета приведенной разрушающей нагрузки представлены в табл. 1.

По результатам испытаний эталонные образцы КЭ-1 и КЭ-2, выполненные из сплошной кладки с цепной системой перевязки, и образцы КЭ-3 и КЭ-4, выполненные из кладки с многорядной системой перевязки, разрушились практически при одинаковой нагрузке. Разрушение образцов серии КЭ происходило хрупко, по перевязанному сечению кладки вдоль сжатой диагонали с образованием одной трещины, т. е. по достижении каменной кладкой предельных значений по главным растягивающим напряжениям.

Таблица 1

## Результаты испытаний образцов на статические нагрузки

| Условный номер (серии) образца | Предел прочности раствора на сжатие $R$ , МПа | Сопротивление главным растягивающим напряжениям $R^{cw} = 0,8R^t$ | Коэффициент пересчета $K_p = R_{tw}/R_{twi}$ | Разрушающая нагрузка $P_p$ , тс | Приведенная разрушающая нагрузка | Среднее значение разрушающей нагрузки, тс | Несущая способность $Q$ ср, тс | Увеличение, % |
|--------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|---------------|
| КЭ-1-1                         | 4,76                                          | 2,6015                                                            | 1,00                                         | 31,1                            | 31,10                            | 31,00                                     | 21,71                          | 0,00          |
| КЭ-1-2                         | 4,7                                           | 2,6181                                                            | 0,99                                         | 31,1                            | 30,90                            |                                           |                                |               |
| КЭ-1-3                         | 5,21                                          | 2,7391                                                            | 0,95                                         | 33,04                           | 31,75                            |                                           |                                |               |
| КЭ-1-4                         | 4,51                                          | 2,5484                                                            | 1,02                                         | 31,1                            | 31,75                            |                                           |                                |               |
| КУ 2-1                         | 2,25                                          | 1,8000                                                            | 1,45                                         | 27,8                            | 40,18                            | 43,37                                     | 30,37                          | 39,89         |
| КУ 2-2                         | 3,05                                          | 2,0957                                                            | 1,24                                         | 31,1                            | 38,61                            |                                           |                                |               |
| КУ 2-3                         | 3,79                                          | 2,3362                                                            | 1,11                                         | 46,08                           | 51,31                            |                                           |                                |               |
| КУ 3-1                         | 3,4                                           | 2,2127                                                            | 1,18                                         | 42,2                            | 49,62                            | 53,26                                     | 37,30                          | 71,79         |
| КУ 3-2                         | 3,3                                           | 2,1799                                                            | 1,19                                         | 46,08                           | 54,99                            |                                           |                                |               |
| КУ 3-3                         | 3,67                                          | 2,2989                                                            | 1,13                                         | 48,75                           | 55,17                            |                                           |                                |               |
| КУ 4-1                         | 5,44                                          | 2,7989                                                            | 0,93                                         | 31,1                            | 28,91                            | 43,00                                     | 30,11                          | 38,71         |
| КУ 4-2                         | 3,12                                          | 2,1196                                                            | 1,23                                         | 38,4                            | 47,13                            |                                           |                                |               |
| КУ 4-3                         | 1,62                                          | 1,5274                                                            | 1,70                                         | 31,1                            | 52,97                            |                                           |                                |               |
| КУ 5-1                         | 2,96                                          | 2,0646                                                            | 1,26                                         | 37,15                           | 46,81                            | 38,48                                     | 26,95                          | 24,13         |
| КУ 5-2                         | 2,69                                          | 1,9681                                                            | 1,32                                         | 27,03                           | 35,73                            |                                           |                                |               |
| КУ 5-3                         | 6,4                                           | 3,0358                                                            | 0,86                                         | 38,4                            | 32,91                            |                                           |                                |               |
| КУ 6-1                         | 3,82                                          | 2,3454                                                            | 1,11                                         | 34,83                           | 38,63                            | 35,37                                     | 24,77                          | 14,10         |
| КУ 6-2                         | 4,77                                          | 2,6208                                                            | 0,99                                         | 34,83                           | 34,57                            |                                           |                                |               |
| КУ 6-3                         | 3,68                                          | 2,3020                                                            | 1,13                                         | 33,04                           | 37,34                            |                                           |                                |               |
| КУ 7-1                         | 5,27                                          | 2,7548                                                            | 0,94                                         | 44,5                            | 42,02                            | 46,42                                     | 32,51                          | 49,73         |
| КУ 7-2                         | 5,83                                          | 2,8974                                                            | 0,90                                         | 55                              | 49,38                            |                                           |                                |               |
| КУ 7-3                         | 5,02                                          | 2,6886                                                            | 0,97                                         | 49,45                           | 47,85                            |                                           |                                |               |
| КУ 8-1                         | 4,1                                           | 2,4298                                                            | 1,07                                         | 57                              | 61,03                            | 53,71                                     | 37,61                          | 73,23         |
| КУ 8-2                         | 5,78                                          | 2,8850                                                            | 0,90                                         | 50                              | 45,09                            |                                           |                                |               |
| КУ 8-3                         | 4,7                                           | 2,6015                                                            | 1,00                                         | 55                              | 55,00                            |                                           |                                |               |

Окончание табл. 1

| Условный номер (серии) образца  | Предел прочности раствора на сжатие $R$ , МПа | Сопротивление главным растягивающим напряжениям $R^{tw} = 0,8R'$ | Коэффициент пересчета $K_p = R_{tw}/R_{twi}$ | Разрушающая нагрузка $P_p$ , (тс) | Приведенная разрушающая нагрузка | Среднее значение разрушающей нагрузки, тс | Несущая способность $Q$ ср, тс | Увеличение, % |
|---------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|---------------|
| Результаты испытаний работы [1] |                                               |                                                                  |                                              |                                   |                                  |                                           |                                |               |
| (K-I) КО-2                      | 11,08                                         | 3,99                                                             | 0,65                                         | 50,06                             | 32,60                            | 32,82                                     | 22,98                          | 5,87          |
| (K-I) КО-3                      | 10,14                                         | 3,82                                                             | 0,68                                         | 48,54                             | 33,04                            |                                           |                                |               |
| (K-II) У-1-230-1                | 9,98                                          | 3,79                                                             | 0,69                                         | 60,70                             | 41,65                            | 43,07                                     | 30,16                          | 38,94         |
| (K-II) У-1-230-2                | 10,62                                         | 3,91                                                             | 0,67                                         | 65,26                             | 43,41                            |                                           |                                |               |
| (K-II) У-1-230-3                | 11,25                                         | 4,02                                                             | 0,65                                         | 68,30                             | 44,14                            |                                           |                                |               |
| (K-III) У-1-530-1               | 10,06                                         | 3,81                                                             | 0,68                                         | 66,78                             | 45,64                            | 46,44                                     | 32,52                          | 49,81         |
| (K-III) У-1-530-2               | 11,50                                         | 4,07                                                             | 0,64                                         | 74,38                             | 47,54                            |                                           |                                |               |
| (K-III) У-1-530-3               | 8,55                                          | 3,51                                                             | 0,74                                         | 62,22                             | 46,13                            |                                           |                                |               |
| (K-IV) У-3-230-1                | 6,12                                          | 2,97                                                             | 0,88                                         | 43,98                             | 38,54                            | 39,43                                     | 27,61                          | 27,22         |
| (K-IV) У-3-230-2                | 6,45                                          | 3,05                                                             | 0,85                                         | 47,02                             | 40,13                            |                                           |                                |               |
| (K-IV) У-3-230-3                | 7,05                                          | 3,19                                                             | 0,82                                         | 48,54                             | 39,63                            |                                           |                                |               |
| (K-V) У-С-240-1                 | 6,97                                          | 3,17                                                             | 0,82                                         | 53,10                             | 43,60                            | 43,60                                     | 30,53                          | 40,66         |
| (K-V) – С-240-2                 | 7,15                                          | 3,21                                                             | 0,81                                         | 54,62                             | 44,28                            |                                           |                                |               |
| (K-V) У-С-240-3                 | 7,19                                          | 3,22                                                             | 0,81                                         | 53,10                             | 42,93                            |                                           |                                |               |
| (K-VI) 2У-3-230-1               | 6,94                                          | 3,16                                                             | 0,82                                         | 62,22                             | 51,20                            | 51,25                                     | 35,89                          | 65,35         |
| (K-VI) 2У-3-230-2               | 7,30                                          | 3,24                                                             | 0,80                                         | 65,26                             | 52,36                            |                                           |                                |               |
| (K-VI) 2У-3-230-3               | 6,53                                          | 3,07                                                             | 0,85                                         | 59,18                             | 50,20                            |                                           |                                |               |
| (K-VII) 2У-С-240-1              | 7,11                                          | 3,20                                                             | 0,81                                         | 65,26                             | 53,05                            | 52,82                                     | 36,99                          | 70,40         |
| (K-VII) 2У-С-240-2              | 7,22                                          | 3,22                                                             | 0,81                                         | 66,78                             | 53,87                            |                                           |                                |               |
| (K-VII) 2У-С-240-3              | 6,85                                          | 3,14                                                             | 0,83                                         | 62,22                             | 51,53                            |                                           |                                |               |

Анализ результатов проведенных испытаний показал, что несущая способность каменной кладки, при усилении углеродным волокном, увеличивается от 14,1 до 73,2 %. При использовании коэффициента пересчета для работы [1] повышение несущей способности для усиленных образцов составило от 27,2 до 70,4 % (табл. 1).

В результате эксперимента выявлено, что разрушение всех усиленных образцов происходило аналогично эталонным образцам хрупко, практически мгновенно после достижения максимальной нагрузки. При этом происходил отрыв элемента усиления вместе с ремонтным составом от поверхности кладки, что свидетельствует о недостаточном сцеплении ремонтного состава с каменной кладкой (рис. 2). В то же время отслоение углеродного волокна от поверхности ремонтного состава FibArm Repair FS, приклеенного при помощи клея FibArm Resin 230+ и FibArm Resin 530+, не происходило. Кроме этого, по результатам анализа исследований [1] установлено, что отсоединение углеродной ленты, приклеенной непосредственно на каменную кладку, происходило с отрывом поверхностного слоя кирпича (рис. 3). Полученные результаты свидетельствуют о том, что примененная технология приклеивания углеродного волокна на каменную кладку, предварительно выровненную ремонтным составом, нуждается в дополнительной проработке.



Рис. 2. Поверхность усиливаемых элементов при использовании ремонтного состава FibArm Repair FS



Рис. 3. Элемент усиления с поверхностным слоем кирпича и раствора

По результатам статических испытаний построены обобщенные диаграммы деформирования кладки в относительных величинах (рис. 4). Из диаграммы видно, что деформации сжатия и растяжения усиленных образцов, по сравнению с деформациями образцов эталонной серии, возросли. При этом деформации сжатия в среднем увеличились в 2,75 раза, а деформации растяжения в 6 раз.

Для определения теоретического значения несущей способности образцов, усиленных композитным материалом на основе углеродного волокна, предлагается использовать физическую характеристику  $k$ , учитывающую прочностные характеристики углеволокна, площадь усиления относительно общей площади поверхности конструкции, ширину, толщину и количество слоев:

$$k = \frac{A_{ai}}{A_k} b_{fib} \cdot \delta_{fib} \cdot R_{fib} \cdot n \text{ [безразмерная величина]}, \quad (1)$$



где  $A_{a_i}$  – площадь аппликации (усиления) из композитного материала,  $\text{м}^2$ ;  $A_k$  – площадь поверхности каменной кладки,  $\text{м}^2$ ;  $b_{fib}$  – ширина углеволокна в расчетном сечении кладки, м;  $\delta_{fib}$  – толщина ленты одного слоя, м;  $R_{fib}$  – среднее значение прочности углеволокна на растяжение, Па;  $n$  – количество слоев углеволокна.

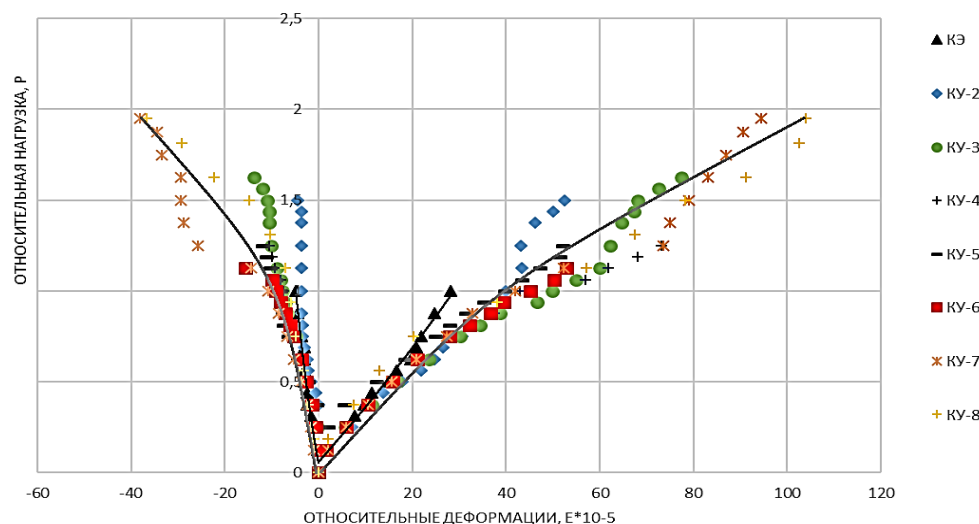


Рис. 4. Диаграмма деформирования (сжатия и растяжения) образцов из каменной кладки

В настоящих исследованиях впервые обобщены сведения о влиянии количества слоев композитного материала на несущую способность каменной кладки. Выявлено, что в образцах серий К-II, К-III и К-IV композитный материал приклеивался в один слой и показал повышение несущей способности на 40, 50 и 27 % соответственно [1]. В текущих испытаниях при тех же конструктивных решениях усиления, но с двойным и тройным количеством слоев образцы серии КУ-2, КУ-3 и КУ-4 повысили несущую способность по сравнению с эталонными образцами на 40, 72 и 39 % соответственно. Следует обратить внимание, что несущая способность образцов серии КУ-3 выше на 21,29 % при двойном слое использования материала FibArm Tape 530, чем при одном слое в образцах серии К-III, а для серии КУ-4 повышение составило 11,5 %, т. е. можно предположить, что второй и третий слой FibArm Tape 230 показал повышение по 5,75 %. В то же время в образцах серии КУ-2 при тройном слое усиления материалом FibArm Tape 230 отсутствует разница в повышении несущей способности, по сравнению с одним слоем в образцах серии К-II (табл. 2).

В результате сравнительного анализа влияния количества слоев композитного материала на несущую способность было установлено, что при двойном или тройном количестве слоев усиления несущая способность по отношению к одному слою усиления увеличивается незначительно. Таким образом, исходя из результатов испытаний предлагается к физической характеристике  $k$

ввести поправочный коэффициент, учитывающий повышение несущей способности для второго и третьего слоев усиления, равный соответственно 0,2 и 0,1. Так при трёх слоях усиления количество слоев следует принимать равным  $n = 1 + 0,2 + 0,1 = 1,3$ , а при двух слоях усиления  $n = 1 + 0,2 = 1,2$ .

Таблица 2

**Влияние количества слоев на несущую способность**

| Ранее проведенные испытания |               |                      | Текущие испытания    |               |                      | Разница между сериями, % | Разница на 1 слой, % |
|-----------------------------|---------------|----------------------|----------------------|---------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| Условный номер серии        | Превышение, % | Количество слоев $n$ | Условный номер серии | Превышение, % | Количество слоев $n$ |                          |                      |
| (К-II) У-1-230              | 39,83         | 1                    | КУ-2                 | 39,89         | 3                    | 0,06                     | 0,03                 |
| (К-III) У-1-530             | 49,81         | 1                    | КУ-3                 | 71,72         | 2                    | 21,29                    | 21,29                |
| (К-IV) У-3-230              | 27,21         | 1                    | КУ-4                 | 38,71         | 3                    | 11,5                     | 5,75                 |

Кроме этого, для углеродной сетки FibArm Grid 600/1000 (серия КУ-5) к значению ширины сетки  $b_{fib}$  в расчетном сечении образца (по диагонали) при определении физической характеристики  $k$  предлагается также вводить поправочный коэффициент, равный 0,3, учитывающий среднюю ширину волокна сетки в направлении основы и утка, которая составляет соответственно 40 и 20 % от ширины сетки.

Результаты определения физической характеристики  $k$  с учетом предлагаемых поправочных коэффициентов приведены в табл. 3. Следует отметить, что значения поправочных коэффициентов являются предварительными и нуждаются в дополнительных исследованиях.

Таблица 3

**Прочностные характеристики углеволокна и значения  $k$  в зависимости от усиления**

| Серия | $A_{a_i}$ – площадь аппликации из композитного материала, $m^2$ | $A_k$ – площадь поверхности каменной кладки, $m^2$ | $b_{fib}$ – ширина углеволокна, м | $\delta_{fib}$ – толщина ленты одного слоя, м | $R_{fib}$ – среднее значение прочности углеволокна на растяжение, Па | $n$ – количество слоев углеволокна | $k$ – физическая характеристика |
|-------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| КЭ    | –                                                               | 1,1236                                             | –                                 | –                                             | –                                                                    |                                    | –                               |
| КУ-2  | 0,4047                                                          | 1,1236                                             | 0,3                               | $0,128 \cdot 10^{-3}$                         | $3,6 \cdot 10^6$                                                     | 1,3*                               | 64,74                           |
| КУ-3  | 0,8094**                                                        | 1,1236                                             | 0,3                               | $0,294 \cdot 10^{-3}$                         | $3,6 \cdot 10^6$                                                     | 1,2*                               | 274,5                           |
| КУ-4  | 0,7041                                                          | 1,1236                                             | 0,9                               | $0,128 \cdot 10^{-3}$                         | $3,6 \cdot 10^6$                                                     | 1,3*                               | 337,83                          |

Окончание табл. 3

| Серия | $A_{ai}$ – площадь аппликации из композитного материала, м <sup>2</sup> | $A_k$ – площадь поверхности каменной кладки, м <sup>2</sup> | $b_{\text{руб}}$ – ширина углеволокна, м | $\delta_{\text{руб}}$ – толщина ленты одного слоя, м | $R_{\text{руб}}$ – среднее значение прочности углеволокна на растяжение, Па | $n$ – количество слоев углеволокна | $k$ – физическая характеристика |
|-------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| КУ-5  | 1,1236                                                                  | 1,1236                                                      | $1,5 \cdot 0,3 = 0,45^*$                 | $0,334 \cdot 10^{-3}$                                | $3,6 \cdot 10^6$                                                            | 1                                  | 541,08                          |
| КУ-6  | 1,1236                                                                  | 1,1236                                                      | 1,5                                      | $0,445 \cdot 10^{-3}$                                | $3,6 \cdot 10^6$                                                            | 1                                  | 2403,0                          |
| КУ-7  | 2,2472**                                                                | 1,1236                                                      | 1,5                                      | $0,250 \cdot 10^{-3}$                                | $3,6 \cdot 10^6$                                                            | 1                                  | 2700,0                          |
| КУ-8  | 2,2472**                                                                | 1,1236                                                      | 1,5                                      | $0,445 \cdot 10^{-3}$                                | $3,6 \cdot 10^6$                                                            | 1                                  | 4806,0                          |

\* С учетом поправочных коэффициентов, учитывающих количество слоев усиления и ширину волокна в сетке.

\*\* Площадь с учетом наклейки композитного материала с двух сторон образца.

Для сравнительного анализа одностороннего и двустороннего усиления каменной кладки были выбраны серии КУ-6 и КУ-8, серии К-IV и К-VI, а также серии К-V и К-VII. По результатам проведенных экспериментов установлено, что повышение несущей способности при двухстороннем усилении композитным материалом для серии КУ-8 составило 73 %, а для аналогичного типа усиления при одностороннем приклеивании для КУ-6 – 14 %. При этом следует обратить внимание, что в образцах серии КУ-8, при двухстороннем использовании композитного материала, дополнительно использовались сквозные углеродные жгуты. Для серии К-VI повышение несущей способности составило 65 %, а при одностороннем усилении для К-IV – 27 %. Образцы серии К-V при двухстороннем усилении повысили несущую способность на 70 %, а образцы серии К-VII при одностороннем – на 40 %.

Таким образом, эффект повышения несущей способности при двухстороннем усилении каменной кладки в среднем в 2 и более раз выше, чем при одностороннем. Влияние углеродных жгутов на повышение несущей способности требует проведения дополнительных исследований.

По результатам испытаний были построены графические зависимости изменения прочности каменной кладки от значений физической характеристики  $k$  (рис. 5). Установлено, что разная величина повышения несущей способности объясняется, прежде всего, различиями в технологии приклеивания композитного волокна. В качестве выравнивающего состава для настоящих испытаний применялся ремонтный состав FibArm Repair FS [2], тогда как в работе [1] выравнивающий слой между кладкой и композитным материалом не использовался. То есть композитный материал, приклеенный к каменной кладке через выравнивающий ремонтный состав, имеет меньшее сцепление, чем композитный материал, приклеенный непосредственно на поверхность каменной кладки.

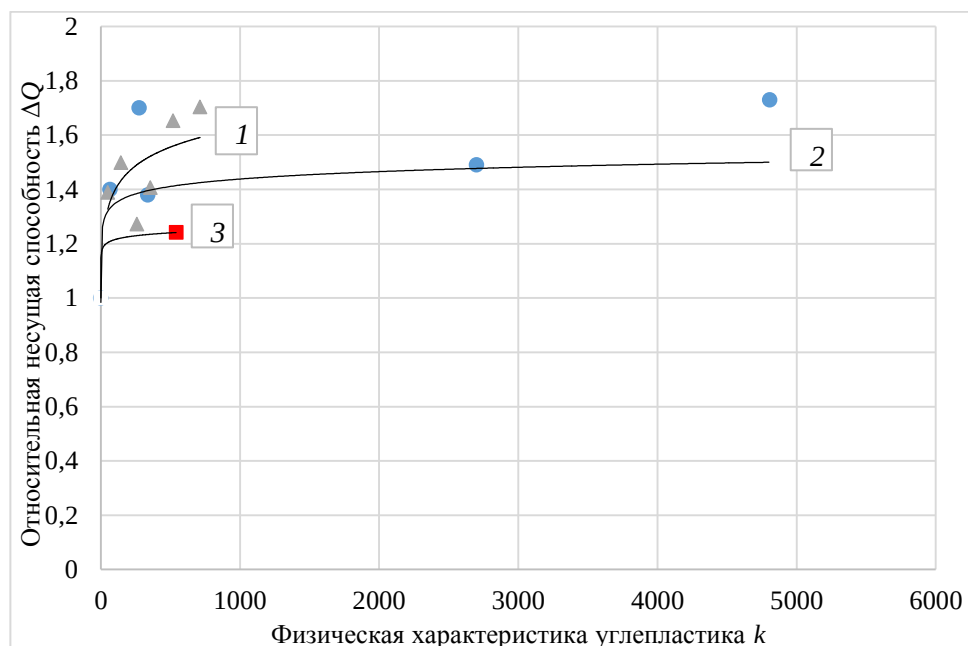


Рис. 5. Зависимость относительной несущей способности от физической характеристики  $k$ :

1 – для испытаний [1]; 2 – для образцов серий КУ-2 – КУ-4 и КУ-6 – КУ-8; 3 – для образцов серии КУ-5

В результате анализа проведенных испытаний предлагаются следующие аналитические зависимости для определения повышения сдвигающего усилия  $Q$  кладки по отношению к эталону  $Q_0$ :

– для кладки, усиленной углеродными лентами и тканями без использования выравнивающего состава, несущую способность предлагается определять по зависимости

$$Q = (0,35 \ln(k + 80) - 0,53)Q_0; \quad (2)$$

– для кладки, усиленной углеродными лентами и тканями с использованием выравнивающего состава, несущую способность предлагается определять по зависимости

$$Q = (0,0394 \ln(k) + 1,1659)Q_0; \quad (3)$$

– для кладки, усиленной углеродной сеткой на выравнивающем составе, несущую способность предлагается определять по зависимости

$$Q = (0,0209 \ln(k) + 1,0915)Q_0, \quad (4)$$

где  $Q_0$  – несущая способность каменной кладки без усиления, определяемая в соответствии с указаниями [8, 9] по формуле

$$Q_0 \leq \frac{R_{tq} h l}{\nu}, \quad (5)$$

где  $h$  – толщина стены;  $l$  – длина усиливаемого участка стены;  $\nu$  – коэффициент неравномерности касательных напряжений в сечении. Для прямоугольных

сечений  $v$  допускается принимать 1,5;  $R_{lq}$  – расчетное сопротивление скалыванию кладки.

Сравнение результатов испытаний с предложенными зависимостями составляет от 10 до 40 % в сторону запаса несущей способности.

### Выводы

1. Эталонные образцы, выполненные из сплошной кладки с цепной системой перевязки, и образцы, выполненные из кладки с многорядной системой перевязки, разрушились практически при одинаковой нагрузке.

2. Использование для усиления каменной кладки системы внешнего армирования на основе углеволокна FibArm приводит к увеличению несущей способности от 14 до 73 %.

3. При технологии нанесения адгезива (связующего) непосредственно на каменную кладку сцепление композитного материала с поверхностью каменной кладки выше, чем при технологии с использованием выравнивающего состава FibArm Repair FS. При этом несущая способность усиленных образцов повышается до 20 %.

4. В случае использования при усилении каменной кладки 2 или 3 слоев композитного материала предлагается при определении физической характеристики  $k$  введение поправочных коэффициентов к количеству слоев, равных соответственно 0,2 и 0,1.

5. Для углеродной сетки FibArm Grid 600/1000 серии КУ-5 к значению ширины сетки, при определении физической характеристики  $k$ , предлагается вводить поправочный коэффициент, равный 0,3, учитывающий среднюю ширину волокна сетки в направлении основы и утка, которая составляет соответственно 40 и 20 % от ширины сетки.

6. Предложенные аналитические зависимости определения сдвигающего усилия  $Q$ , с физической характеристикой  $k$ , учитывающей прочностные характеристики углеволокна, площадь усиления относительно общей площади поверхности конструкции, ширину, толщину и количество слоев, с достаточной для практических расчётов точностью, позволяют определять повышение несущей способности каменной кладки за счёт применения системы внешнего армирования на основе углеродного волокна.

7. Поправочные коэффициенты к значениям показателей, учитывающих количество слоев усиления и ширину углеродной сетки при определении физической характеристики композитного материала  $k$ , являются предварительными и нуждаются в дополнительных исследованиях.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Экспериментальные исследования сейсмоусиления каменной кладки системой внешнего армирования на основе углеволокна* / Г.П. Тонких, О.В. Кабанцев, А.В. Грановский, О.А. Симаков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 6. – С. 57–69.
2. *Компания ХК «Композит»* [официальный сайт]. – Условия доступа : <http://www.hccomposite.com/>
3. *ТУ 2257-047-61664530-2014. Эпоксидное двухкомпонентное связующее FibArm Resin 230+ для пропитки систем внешнего армирования FibArm.* – ЗАО «Препрег-СКМ».

4. ТУ 2257-048-61664530-2014. Эпоксидное двухкомпонентное связующее FibArm Resin 530+ для пропитки систем внешнего армирования FibArm. – ЗАО «Препрег-СКМ».
5. Тонких, Г.П. Итоговый отчет по результатам испытаний каменной кладки, усиленной композитными материалами на основе углеродного волокна при действии статических нагрузок / Г.П. Тонких, Г. Темиралиулы. – М. : НИУ МГСУ, 2016.
6. Тонких, Г.П. Экспериментальные исследования несущей способности каменной кладки при главных нагрузках / Г.П. Тонких, О.В. Кабанцев, В.В. Кошаев // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2007. – № 6. – С. 26–31.
7. Экспериментальные исследования сейсмоусиления каменной кладки наружными бетонными аппликациями / Г.П. Тонких, О.В. Кабанцев, О.А. Симаков, С.М. Баев // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2011 – № 2. – С. 35–41.
8. СП 15.13330.2012. Каменные и армокаменные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-22-81\*.
9. Пособие по оценке сейсмостойкости и сейсмоусилению общевоисковых зданий с несущими стенами из каменной кладки / О.В. Кабанцев, Г.П. Тонких [и др.]. – М. : 26 ЦНИИ МО РФ, 2002.

## REFERENCES

1. Tonkikh G.P., Kabantsev O.V., Granovskii A.V., Simakov O.A. Eksperimental'nye issledovaniya seismousileniya kamennoi kladki sistemoi vneshnego armirovaniya na osnove uglevolokna [Experimental study of seismic retrofitting using externally bonded fiber reinforced polymers]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 6. Pp. 57–69. (rus)
2. HC Composite. Available at: [www.hccomposite.com/](http://www.hccomposite.com/)
3. TS 2257-047-61664530-2014. Epoksidnoe dvukhkomponentnoe svyazuyushchee FibArm Resin 230+ dlya propitki sistem vneshnego armirovaniya FibArm [Two-component epoxide compound FibArm Resin 230+ for externally bonded reinforcement]. Composite Holding Company. (rus)
4. TS 2257-048-61664530-2014. Epoksidnoe dvukhkomponentnoe svyazuyushchee FibArm Resin 530+ dlya propitki sistem vneshnego armirovaniya FibArm [Two-component epoxide compound FibArm Resin 530+ for externally bonded reinforcement]. Composite Holding Company. (rus)
5. Tonkikh G.P., Temiraliuly G. Itogovyy otchet po rezul'tatam ispytaniy kamennoi kladki, usilennoi kompozitnymi materialami na osnove uglevodnogo volokna pri deystvii staticheskikh nagruzok. [The final report on the results of tests of masonry, reinforced composite materials based on carbon fibers by the action of static loads]. Moscow: MGSU Publ., 2016.
6. Tonkikh G.P., Kabantsev O.V., Koshaev V.V. Eksperimental'nye issledovaniya nesushchei sposobnosti kamennoi kladki pri glavnykh nagruzkakh [Experimental studies of masonry bearing capacity under basic loads]. *Seismostoiroe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 2007. No. 6. Pp. 26–31. (rus)
7. Tonkikh G.P., Kabantsev O.V., Simakov O.A., Baev S.M. Eksperimental'nye issledovaniya seismousileniya kamennoi kladki naruzhnymi betonnyimi aplikatsiyami [Experimental study of masonry seismic reinforcement using exterior concrete applications]. *Seismostoiroe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*. 2011. No. 2. Pp. 35–41. (rus)
8. SNiP 15.13330.2012. Kamennye i armokamennye konstruksii [Masonry and reinforced masonry structures]. Actualized SNiP II-22-81 (rus)
9. Kabantsev O.V., Tonkikh G.P., et al. Posobie po otsenke seismostoičnosti i seismousileniyu obshchevoiskovykh zdaniy s nesushchimi stenami iz kamennoi kladki [Manual for evaluation of seismic stability of buildings with masonry bearing walls]. Moscow: Central Research Institute of the Ministry of Defence of the Russian Federation Publ., 2002. (rus)