

Р.Б. ОРЛОВИЧ¹, С.С. ЗИМИН², В.Н. ДЕРКАЧ³

¹ООО «ПИ Геореконструкция», г. Санкт-Петербург, Россия

²ФГАУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
г. Санкт-Петербург, Россия

³Филиал РУП «Институт БелНИИС» - Научно-технический центр, г. Брест, Республика Беларусь

ЭФФЕКТИВНОСТЬ АРМИРОВАНИЯ КАМЕННЫХ СВОДОВ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Аннотация. Рассматриваются каменные своды исторических зданий, которые из-за снижения несущей способности требуют ремонтно-восстановительных работ. Дается анализ механизмов разрушения цилиндрических сводов в зависимости от соотношения их высоты к пролету. Анализируются преимущества усиления сводов с помощью армирования композитными материалами. Дается описание технологии поверхностного армирования каменных конструкций с помощью композитных материалов на полимерцементной матрице FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix). Приводится методика экспериментальных исследований моделей армированных и не армированных сводов. На основе эксперимента показано, что эффективность армирования сводов предопределяется особенностями их напряженно-деформированного состояния и механизмов разрушения. В частности, эффективность армирования возрастает с увеличением отношения высоты сводов к его пролету. Данные результаты обоснованы тем, что в высоких сводах доминирующее значение имеет соотношение изгибающих моментов и продольных сил, а в случае пологих сводов в их сечениях доминируют продольные и поперечные силы, а разрушение происходит в виде скалывания по наклонным сечениям. Также эффективность армирования возрастает при их несимметричном нагружении относительно середины пролета. По результатам исследования построены графики зависимости максимальных вертикальных перемещений сводов, показывающих существенное влияние армирования на увеличение их жесткости. Кроме этого подчеркивается, что к настоящему моменту существует необходимость в устойчивой теории прочности сложных каменных конструкций – криволинейных, сводчатых и других, находящихся в сложном напряженном состоянии. Ее появление может существенно упростить и унифицировать расчеты, производимые при обследовании каменных зданий, составлении проектов их реставрации и реконструкции, решить проблемы прочности кладки современных фасадных систем.

Ключевые слова: каменные своды, цилиндрические своды, несущая способность сводов, усиление каменных сводов, армирование композитными материалами.

R.B. ORLOVICH¹, S.S. ZIMIN², V.N. DERKACH³

¹ООО «PI Georekonstrukcia», Saint-Petersburg, Russia

²Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia,

³Branch office of the RUE "Institute BelNIIS" - Scientific-Technical Center, Brest, Republic of Belarus

THE EFFICIENCY OF REINFORCING STONE VAULTS WITH COMPOSITE MATERIALS

Abstract. The stone vaults of historical buildings are considered, which, due to a decrease in bearing capacity, require repair and restoration work. An analysis is given of the mechanisms of destruction of cylindrical vaults depending on the ratio of their height to the span. The advantages of strengthening the vaults with the help of reinforcement with composite materials are analyzed.

A description is given of the technology of surface reinforcement of stone structures using composite materials on a polymer cement matrix FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix). The technique of experimental studies of models of reinforced and non-reinforced vaults is given. On the basis of the experiment, it is shown that the effectiveness of the reinforcement of the vaults is determined by the features of their stress-strain state and failure mechanisms. In particular, the effectiveness of reinforcement increases with an increase in the ratio of the height of the vaults to its span. These results are substantiated by the fact that in high arches the ratio of bending moments and longitudinal forces is dominant, and in the case of flat arches, longitudinal and transverse forces dominate in their sections, and destruction occurs in the form of shearing along inclined sections. Also, the effectiveness of reinforcement increases with their asymmetric loading relative to the middle of the span. According to the results of the study, graphs of the dependence of the maximum vertical displacements of the vaults were constructed, showing a significant effect of reinforcement on increasing their rigidity. In addition, it is emphasized that by now there is a need for a stable theory of the strength of complex stone structures - curvilinear, vaulted and others that are in a complex stress state. Its appearance can significantly simplify and unify the calculations made when examining stone buildings, drawing up projects for their restoration and reconstruction, and solve the problems of the strength of the masonry of modern facade systems.

Keywords: stone vaults, cylindrical vaults, load-bearing capacity of vaults, detection of stone vaults, reinforcement with composite materials.

Введение

Каменные своды имеют более чем тысячелетнюю историю и являются одними из основных конструктивных элементов зданий исторической застройки. Однако их специфика их работы до сих пор является актуальной при оценке технического состояния, ремонтах, реконструкции и модернизации зданий. Часто наблюдаемыми дефектами сводов являются трещины, деструкция и расслоение кладки и даже вывалы ее отдельных фрагментов (рисунок 1), причиной которых могут быть эксплуатационный износ, перегрузки, динамические воздействия, техногенные и другие факторы [1-5]. Особенно неблагоприятным является деградация растворных швов, которые в зданиях старой застройки обычно выполнялись на слабых известковых растворах. В результате нарушения сцепления между растворными швами и камнями снижается прочность кладки на растяжение и сдвиг по неперевязанным сечениям. Восстановление работоспособности поврежденных сводов обычно осуществляется путем их усиления либо вычинки наиболее поврежденных фрагментов каменной кладки.

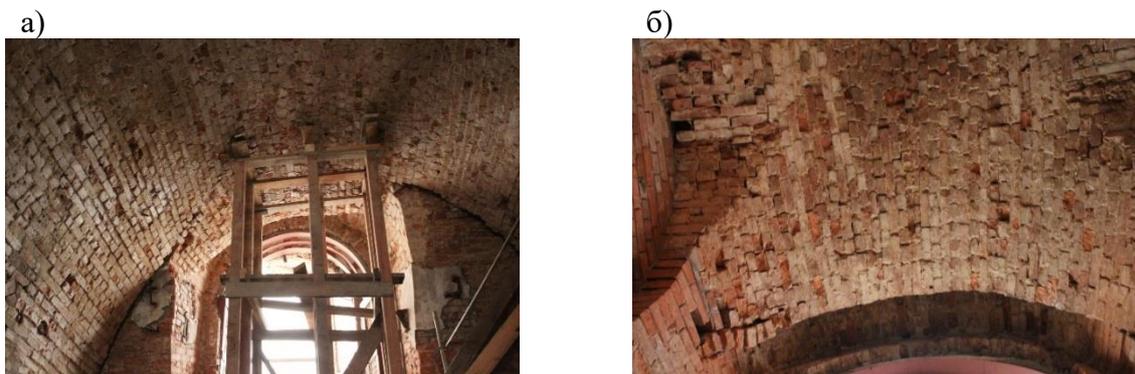


Рисунок 1 - Примеры повреждений цилиндрических сводов в результате образования трещин (а) и вывалов каменной кладки (б)

В настоящее время для усиления каменных сводов все большее применение получает поверхностное армирование с помощью композитных материалов на полимерцементной матрице FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix), технология которого относительно проста и не требует больших трудозатрат [6-12].

По этой технологии увлажнённая поверхность кладки покрывается тонким слоем раствора из неорганических минеральных материалов с модифицированными полимерными

добавками, в который втапливается армирующая сетка из композитных материалов. Затем наносят защитный штукатурный слой толщиной 8-10 мм, и уже его поверхность подвергается финишной обработке. При необходимости в защитный слой может утапливаться вторая сетка, обеспечивающая повышенную прочность усиления [10]. Одна из разновидностей технологии FRCM является система Ruredilx Mesh. В них используются сетки из углеволокон, обладающие следующими механическими свойствами: прочность на растяжение – 4800 МПа; модуль упругости – 240 ГПа; деформативность при разрыве – 1,8%. Используются также сетки из арамидных и стекловолокон. В последнее время в России начали использоваться сетки из базальтовых волокон.

Рассматриваемый способ обладает следующими достоинствами:

- простой технологией;
- высокой сцепляемостью армирующего штукатурного слоя к поверхности каменной кладки;
- высокой совместимостью армирующего слоя с кирпичной кладкой, т.е. сближенными деформационными характеристиками, такими как модули упругости, коэффициенты температурного расширения;
- высокой огнестойкостью, коррозионной стойкостью, водостойкостью и паропроницаемостью, что позволяет производить армирование каменных конструкций как изнутри, так и снаружи зданий.

К достоинствам рассматриваемого способа следует отнести его универсальность и возможность использования для любых форм и очертаний конструкций, в том числе для сводчатых.

Такое армирование возможно с внутренней и наружной стороны сводов как по всей их поверхности так и на наиболее напряженных участках (рисунок 2). Композитный армирующий слой в виде сеток в полимерцементной матрице обладает высокой прочностью на растяжение, хорошим сцеплением с каменной кладкой, удерживает камни от выпадения, является паропроницаемым и имеет схожие с каменной кладкой показатели по линейному расширению.

а)



б)



**Рисунок 2 - Армирование каменных сводов композитными материалами
(а - внешней поверхности; б - внутренней поверхности)**

Обширные результаты исследований в этой области посвящены сравнительному анализу процессов разрушения и несущей способности армированных и не армированных каменных конструкций [13-21]. Применительно к каменным сводам исследуемыми факторами являлись характер нагружения, локализация и степень армирования, способ анкеровки композитных сеток на опорах и др. Экспериментальные исследования чаще всего осуществлялись на моделях в виде арок шириной сечения $b = 25-100$ см и толщиной $h = 12$ см (1/2 кирпича). Теоретические исследования в основном базировались на численном анализе методом конечных элементов с использованием современного программного обеспечения. В большинстве своем анализировалась работа наиболее распространенных

цилиндрических сводов полукруглого очертания с соотношением высоты их подъема к пролету $f/L=0,5$. В то же время крайне мало исследований эффективности армирования посвящено сводам двойной кривизны, а также пологим сводам с малыми соотношением f/L , которые широко известны как каменное заполнение между металлическими балками перекрытий.

Эффективность армирования сводов предопределяется особенностями их напряженно-деформированного состояния и механизмов разрушения. В высоких сводах доминирующее значение имеет соотношение изгибающих моментов и продольных сил. При этом оптимальным является очертание свода, совпадающее с линией давления. Глубокие трещины, расчленяющие свод на несколько крупных соприкасающихся блоков, соответствуют шарнирам расчетных схем и образуют как устойчивые одно-трехшарнирные, так и мгновенно изменяемые многшарнирные схемы [1]. Образование шарниров обусловлено выходом кривой давления за пределы ядра сечения, в результате чего после образования трещин от растягивающих напряжений в сечении превалирует сжимающие напряжения (рисунок 3).

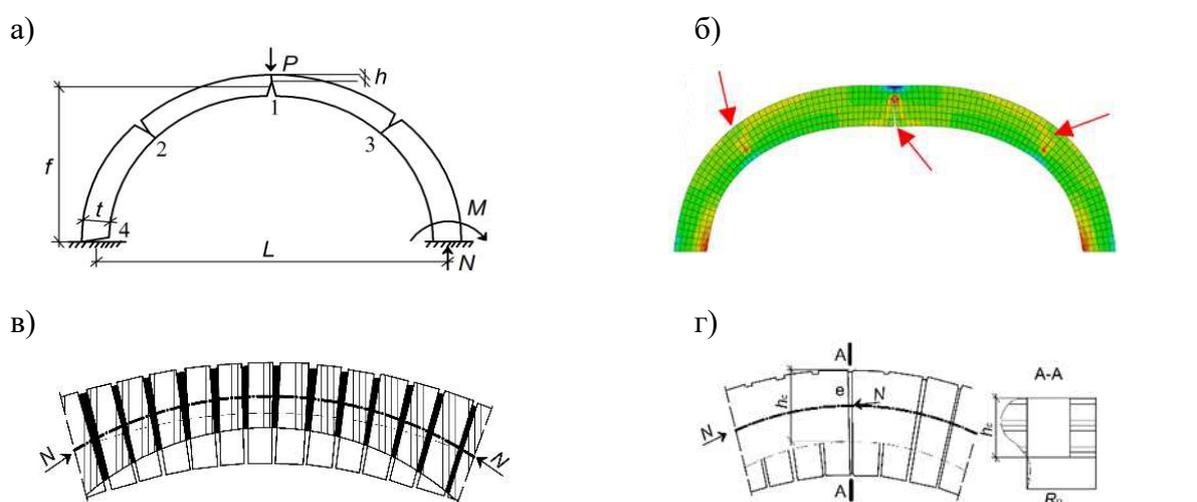


Рисунок 3 – Механизм разрушения высоких сводов с соотношением $f/L = 0,5$
 (а - схема образования шарниров в сечениях сводов с трещинами; б – расчетная модель образования трещин; в – фрагмент свода с трещинами в растянутой зоне; г – напряженное состояние сечения с трещиной [1])

В случае пологих сводов в их сечениях доминируют продольные и поперечные силы, а разрушение происходит в виде скалывания по наклонным сечениям (рисунок 4).

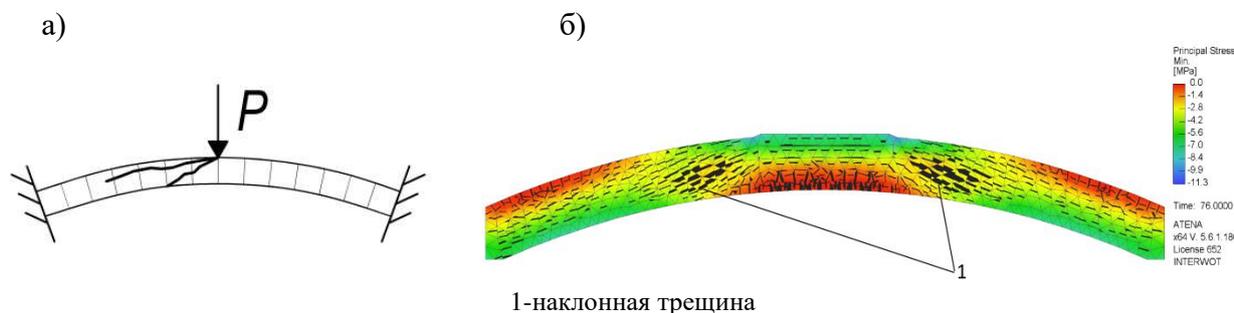
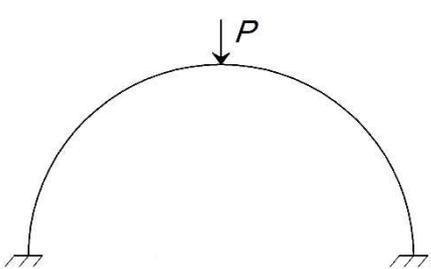
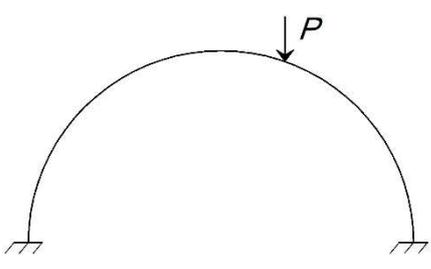
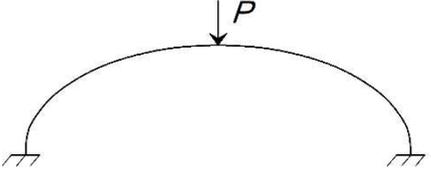
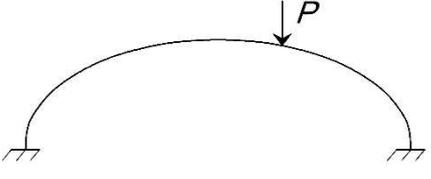


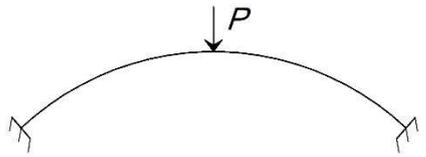
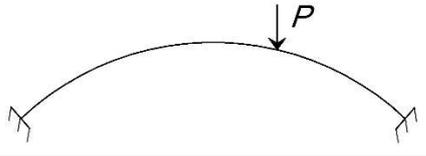
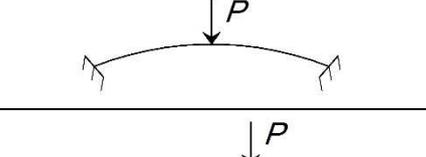
Рисунок 4 - Механизм разрушения пологих сводов с соотношением $f/L = 0,1$
 (а – схема образования трещин; б - расчетная модель образования наклонных трещин)

Следует отметить, что теоретический анализ предельных состояний неармированных сводов не представляет трудностей и реализуется современными численными методами с использованием соответствующих критериев прочности. Задача существенно усложняется

при учете влияния армирования, когда переходу в предельное состояние сводов сопутствуют сложные процессы разрушения армирующей матрицы, например, в виде ее отслоения от поверхности каменной кладки или выпрямления гибких армирующих сеток на участках их искривления. Последнее связано с осуществляемой вручную технологией затопления сеток в полимерную матрицу, когда расстояние между сетками и поверхностью каменной кладки является переменным в отличие, например, от толщины защитного слоя в железобетонных конструкциях, который фиксируется с помощью дистанционных прокладок между стальной арматурой и опалубкой. Кроме того, существенное влияние на эффективность армирования оказывает неоднородность касательного сцепления армирующей матрицы с каменным сводом. В связи с этим, не умаляя значимости исследований аналитическими методами [7,8], моделирование указанных факторов предпочтительнее осуществлять численными методами. Однако и в этом случае выявлены значительные расхождения между расчетными данными и результатами экспериментальных исследований [9]. В связи с этим авторами были проведены лабораторные испытания моделей сводов с различным соотношением их высоты f к пролету L (таблица 1).

Таблица 1– Геометрические параметры экспериментальных образцов сводов и их несущая способность

Схема нагружения свода [см]	Пролет L , высота f и размеры сечения $A=b \times h$ образцов [см]	Разрушающая нагрузка [кН]		P_z/P_b
		Без армирования P_b	Армиро- ванных P_z	
A1 	$L = 150$ $f = 75$ $A = 25 \times 12,5$ $f / L = 0,5$	2	54	27
A2 	$L = 150$ $f = 75$ $A = 25 \times 12,5$ $f / L = 0,5$	0,5	28	56
B1 	$L = 150$ $f = 40$ $A = 25 \times 12,5$ $f / L = 0,27$	15	65	4,3
B2 	$L = 150$ $f = 40$ $A = 25 \times 12,5$ $f / L = 0,27$	6	55	9,2

Окончание таблицы 1					
B1		$L = 150$ $f = 15$ $A = 25 \times 12,5$ $f / L = 0,1$	166	170	1,1
B2		$L = 150$ $f = 15$ $A = 25 \times 12,5$ $f / L = 0,1$	90	143	1,6
Г1		$L = 90$ $f = 8$ $A = 25 \times 6,5$ $f / L = 0,09$	71	76	1,1
Г2		$L = 90$ $f = 8$ $A = 25 \times 6,5$ $f / L = 0,09$	45	78	1,7

Методика исследований.

Опытные образцы изготавливались из глиняных камней марки М150 на известково-цементном растворе марки М50. Для сопоставления их несущей способности половина образцов испытывалась без армирования, а другая половина с армированием композитными сетками Maregrid G 220 из стекловолокна фирмы Marei с пределом прочности на разрыв 45 кН/м и удлинением при разрыве около 3%. Сетки крепились к внешней и внутренней поверхности образцов по всей их длине на цементно-полимерном растворе Planitor HDM фирмы Marei (рисунок 5).

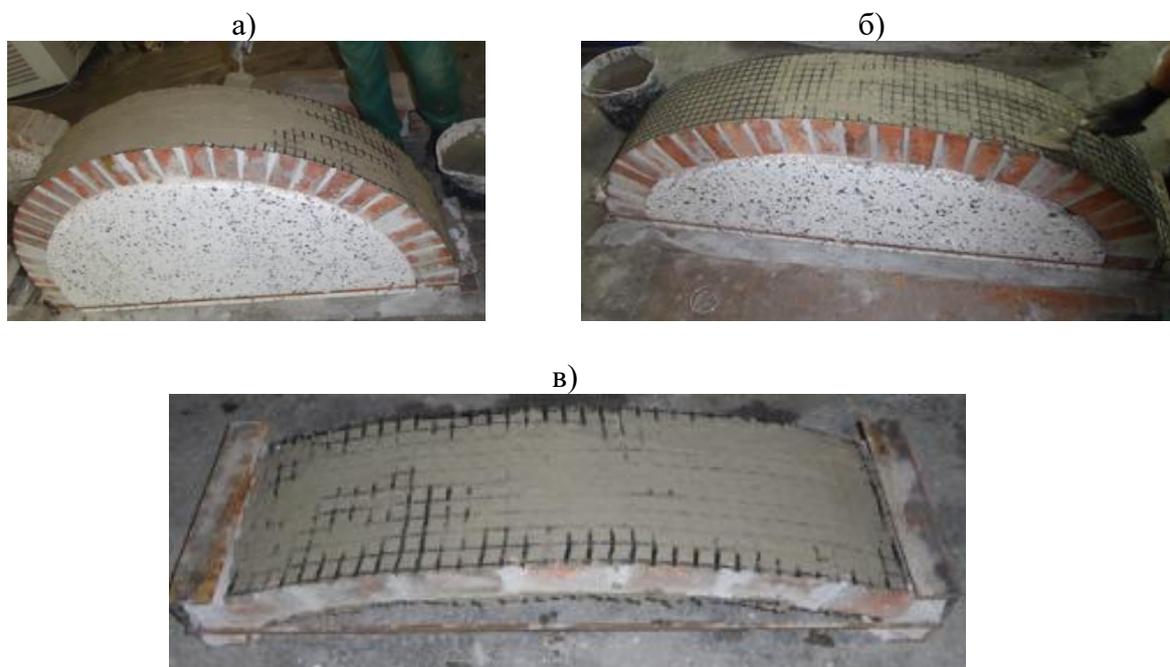


Рисунок 5 – Вид опытных образцов сводов в процессе армирования внешней поверхности композитными сетками (а – серии А; б – серии В; в – серии Г)

Испытания образцов осуществлялось гидравлическими домкратами в виде сосредоточенной нагрузки, приложенной симметрично в середине пролета и асимметрично в

1/3 пролета (рисунок 6). На всех этапах нагружения вплоть до разрушения процесс деформирования и трещинообразования фиксировался скоростной камерой высокого разрешения. Одновременно индукционными датчиками регистрировались вертикальные деформации сводов, а с помощью объединенных с силомером стальных затяжек измерялись возникающие на опорах усилия распора. Кроме того, с помощью тензометрических датчиков регистрировались относительные деформации в характерных сечениях образцов. Показания всех измерительных приборов считывались с помощью одного тензометрического моста НВМ Hottinger MGCplus с частотой 10 Гц. Основные результаты проведенных испытаний представлены в таблице 1, в которой для каждой серии образцов указаны значения их высоты f и пролета L , а также размеры их поперечного сечения $A=b \times h$. Эффективность армирования представлена как отношение несущей способности армированных и неармированных образцов P_z / P_b .



Рисунок 6 – Вид армированных образцов сводов в процессе испытаний
(а - серии Б1; б - серии Г1)

Результаты экспериментальных исследований.

Исчерпание несущей способности не армированных образцов серий А и Б носило хрупкий характер с образованием трещин между камнями и растворными швами в растянутой зоне. Их окончательное разрушение происходило в результате образования мгновенно изменяемой многошарнирной системы (рисунок 7,а). Исчерпание несущей способности армированных образцов серий А и Б носило вязкий характер и характеризовалось разрывом армирующих сеток в зоне действия наибольших растягивающих напряжений одновременным образованием трещин между камнями и растворными швами (рисунок 7,б). При этом не наблюдалось отслоения сеток от каменной кладки образцов. Несущая способность симметрично нагруженных армированных образцов А1 была в 27 раз больше по сравнению с неармированными, а несимметрично нагруженных образцов А2 в 56 раза. Несущая способность армированных образцов серии Б с соотношением $f/L=0,27$ при симметричном нагружении была в 4,3 раза больше по сравнению с не армированными, а при несимметричном нагружении в 9,2 раза.

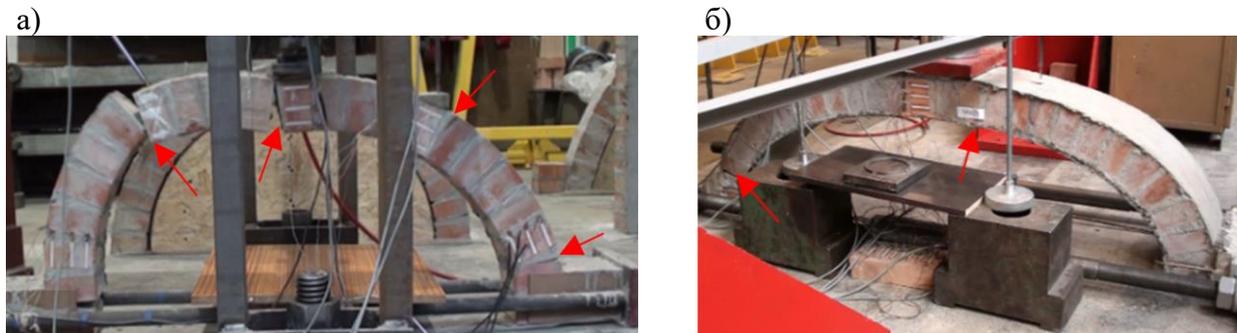


Рисунок 7 - Механизм разрушения образцов серии А1
(а - не армированных; б - армированных)

Пологие неармированных образцы серий В и Г разрушались хрупко в результате образования наклонных трещин нисходящих от места приложения сосредоточенной нагрузки к опорным участкам (рисунок 8,а). Подобный характер разрушения наблюдался и для пологих армированных образцов серий В и Г, которое происходило в результате образования наклонных трещин в каменной кладке без разрыва армирующих сеток и их отслоения от каменной кладки (рисунок 8,б). Однако эффект армирования пологих образцов серии В и Г был существенно меньшим по сравнению с образцами серий А и Б. Например, при их симметричном нагружении несущая способность в случае армирования увеличилась в 1,1 раза, а при несимметричном – в 1,6 раза. При этом доминирующими в сечениях являлись сжимающие и касательные напряжения.

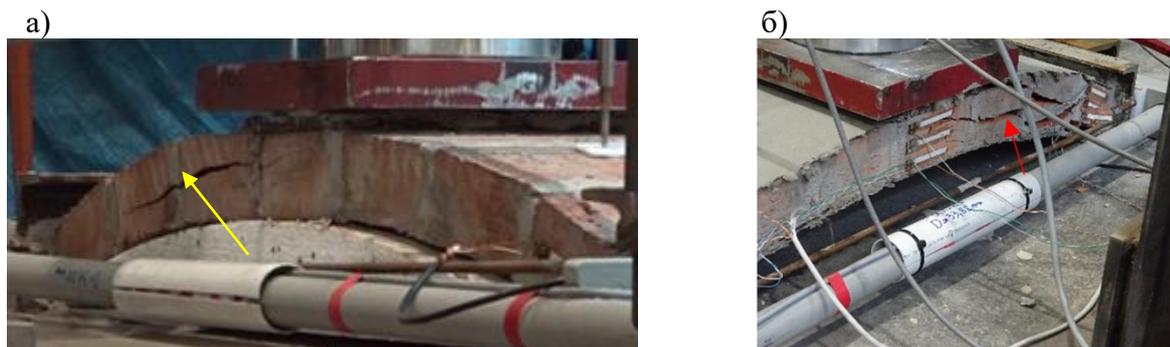


Рисунок 8 - Механизм разрушения образцов пологих сводов серии Г1 (а - не армированных; б - армированных)

Кроме увеличения несущей способности благодаря армированию также возрастает жесткость сводов. Из приведенных на рисунке 9 экспериментальных зависимостей следует, что вертикальные перемещения армированных и не армированных образцов при одном и том же уровне нагрузки существенно отличаются между собой и зависят от соотношения f/L . Для пологих сводов с соотношением $f/L = 0,1$ это различие является минимальным, что объясняется доминирующим влиянием не изгибающих моментов, а поперечных сил.

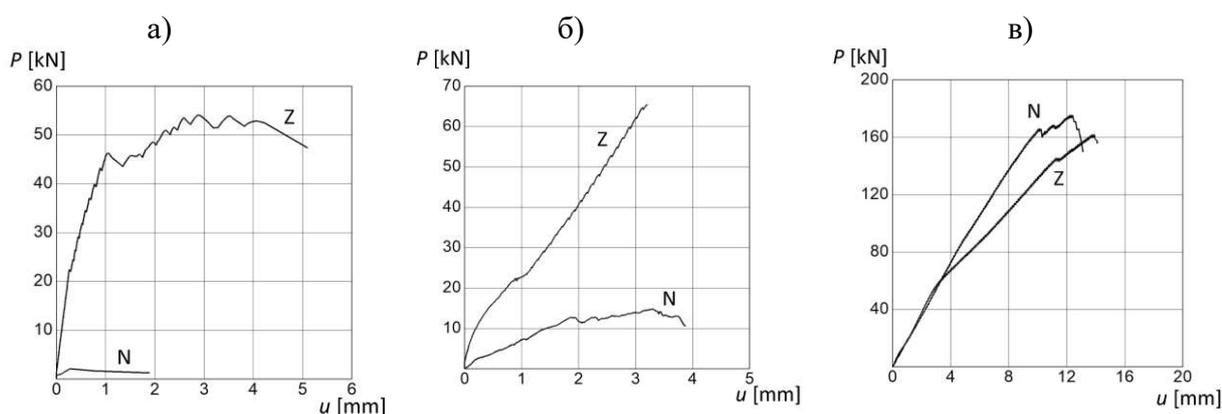


Рисунок 9 – Экспериментальные зависимости вертикальных перемещений (u) симметрично нагруженных сосредоточенной нагрузкой P без армирования (N) и армированных (Z) образцов (а - серии А1; б - серии Б1; в - серии В1)

Выводы

На основании проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что эффективность армирования каменных цилиндрических сводов зависит от соотношения их высоты к пролету и способа нагружения. С увеличением высоты свода по отношению к пролету эффективность армирования возрастает, что связано с доминирующим влиянием

изгибающих моментов, а не поперечных сил, как в пологих сводах. Наибольший эффект армирования достигается при несимметричном нагружении высоких сводов. Армирование оказывает также заметное влияние на снижение деформативности, прежде всего, более гибких высоких сводов. Следует также отметить, что исследования специфики работы сводчатых конструкций начинают появляться только в конце XIX века. В частности, в России этой проблемой занимался Н. К. Лахтин, который отмечал, что закон распределения напряжений в теле свода до сих пор не найден, а расчеты могут проводиться лишь с использованием ряда упрощений. Это утверждение справедливо и в наши дни. К сожалению, в России к настоящему моменту почти нет исследователей, занимающихся этим вопросом достаточно углубленно. Большинство публикаций посвящено либо художественно-декоративным аспектам сводов, либо анализу практического опыта их возведения и реставрации. В большинстве случаев для расчета каменных сводчатых конструкций применяются различные программно-вычислительные комплексы, основанные на методе конечных элементов, которые позволяют с определенной точностью показать распределение напряжений в действующей конструкции. Однако критерии прочности и устойчивости сводов не разработаны. Кроме того, требуется индивидуальный подход к каждому своду, из-за различий в материалах и способах кладки. К настоящему моменту существует необходимость в теории прочности сложных каменных конструкций – криволинейных, сводчатых и других, находящихся в сложном напряженном состоянии. Ее появление может существенно упростить и унифицировать расчеты, производимые при обследовании каменных зданий, составлении проектов их реставрации и реконструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование деформаций, расчет несущей способности и конструктивное укрепление древних распорных систем. Методические рекомендации. М., 1989.
2. Бернгард В.Р. Арки и своды [Текст]: Руководство по устройству и расчету арочных и сводчатых перекрытий. С-Петербург: Типография Ю.Н. Эрлих. 1901. 128 с.
3. Физдель И.А. Дефекты в конструкциях, сооружениях и методы их устранения [Текст]. 3-е издание. М.: Стройиздат, 1987.
4. Павлов В.В., Харьков Е.В. Восстановление работоспособности каменных арок и сводов. Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6(65) Стр. 65-70.
5. Ahnert R., Krause K. H. Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz. Band 1,2. Berlin, 2009.
6. Jasieńko J., Tomasz Ł., Rapp P. Naprawa, konserwacja i wzmacnianie wybranych, zabytkowych konstrukcji ceglanych; Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne: 2006.
7. Nowak R., Orłowicz R. Selected problems of failures and repairs of historic masonry vaults. MATEC Web Conf. 2019. 284. 05008.
8. Biolzi L.; Ghittoni C.; Fedele R.; Rosati G. Experimental and theoretical issues in FRP-concrete bonding. Construction and Building Materials. 2013. 41. 182–190.
9. Hojdys Ł. Wpływ wzmocnienia materiałami kompozytowymi sklepień murowych na ich nośność. Kraków, 2010.
10. Орлович Р.Б., Деркач В.А. Зарубежный опыт армирования каменных конструкций [Текст]. Жилищное строительство. 2011. №11.
11. Papanikolaou C., Triantafillou T., Fabregat P.R. Increase of load-carrying capacity of masonry with textile reinforced rendering [Text]. Mauerwerk. № 19/2015. Pp. 40-51.
12. Van Parys L., Noel J., D. Lamblin, Bultot E., Delehouzee L. FE "Block & Interaction" Approach for Computing the Impact of Tower Inclinations on the Safety of a Masonry Arch System in the Our Lady Cathedral of Tournai (BE). Structural Analysis of Historical Constructions. Wrocław, 2012.
13. Alecci V., De Stefano M., Focacci F., Luciano R., Rovero L., Stipo G. Strengthening Masonry Arches with Lime-Based Mortar Composite. Buildings 2017. 7. 49.
14. Bednarz Ł., Jasieńko J., DiTommaso A. Experimental Investigations into Collapse of Masonry Arches Reinforced Using Different Compatible Technologies. In Proceedings of Mechanics Of Masonry Structures Strengthened With Composite Materials. In Proceedings of the MuRiCo., Venice, Italy, 22-24, 2009.

15. Briccoli Bati S.; Rovero S.; Tonietti U. Experimental analysis on scale models of CFRP reinforced arches. In Proceedings of Mechanics Of Masonry Structures Strengthened With Composite Materials. In Proceedings of the MuRiCo., Venice, Italy, 22-24, 2009.
16. Castori G., Borri A., Ebaugh S., Casadei P. Strengthening masonry arches with composites. In Proceedings of Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2006), Miami, Florida, USA, 13-15, 2006.
17. Corradi M., Borri A., Castori G., Coventry K. Experimental Analysis of Dynamic Effects of FRP Reinforced Masonry Vaults. *Materials* 2015, 8, 8059-8071.
18. Oliveira D., Basílio I., Lourenco P. FRP strengthening of masonry arches towards an enhanced behaviour. In Proceedings of The Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Porto, Portugal, 16–19, 2006.
19. Pantò B., Cannizzaro F., Caddemi S., Calì I., Chácará C., Lourenço P.B. Nonlinear Modelling of Curved Masonry Structures after Seismic Retrofit through FRP Reinforcing. *Buildings*, 2017. 7. 79.
20. Triantafyllou T.C. Strengthening of Masonry Structures Using Epoxy-Bonded FRP Laminates. *Journal of Composites for Construction*, 1998. 2. 96-104.
21. Luciano R., Sacco E. Damage of masonry panels reinforced by FRP sheets. *International Journal of Solids and Structures* 1998. 35. 1723-1741.

REFERENCES

1. Исследование деформаций, расчёт несущей способности и конструктивное укрепление древних распорных систем. *Методические рекомендации*. М., 1989.
2. Бернгард В.Р. Арки и своды [Текст]: Руководство по устройству и расчёту арок и сводчатых перекрытий. С-Петербург: Типография Ю.Н. Эрлих. 1901. 128 с.
3. Физдел' И.А. Дефекты в конструкциях, сооружениях и методы их устранения [Текст]. 3-е издание. М.: Стройиздат, 1987.
4. Павлов В.В., Хар'ков Е.В. Восстановление работоспособности каменных арок и сводов. *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 6(65). Стр. 65-70.
5. Ahnert R., Krause K.H. Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz. Band 1,2. Berlin, 2009.
6. Jasiénko J., Tomasz Ł., Rapp P. Naprawa, konserwacja i wzmocnianie wybranych, zabytkowych konstrukcji ceglanych; Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne: 2006.
7. Nowak R., Orłowicz R. Selected problems of failures and repairs of historic masonry vaults. *MATEC Web Conf.* 2019, 284, 05008.
8. Biolzi L., Ghittoni C., Fedele R., Rosati G. Experimental and theoretical issues in FRP-concrete bonding. *Construction and Building Materials* 2013. 41. 182–190.
9. Hojdys Ł. Wpływ wzmocnienia materiałami kompozytowymi sklepień murowych na ich nośność. *Kraków*, 2010.
10. Orlovich R.B., Derkach V.A. Zarubezhnyj opyt armirovaniya kamennykh konstrukcij [Текст]. *ZHilishchnoe stroitel'stvo*, 2011. №11.
11. Papanikolaou C., Triantafyllou T., Fabregat P.R. Increase of load-carrying capacity of masonry with textile reinforced rendering [Text]. *Mauerwerk*. № 19/2015. Pp. 40-51.
12. Van Parys L., Noel J., D. Lamblin, Bultot E., Delehouzee L. FE "Block & Interaction" Approach for Computing the Impact of Tower Inclinations on the Safety of a Masonry Arch System in the Our Lady Cathedral of Tournai (BE). *Structural Analysis of Historical Constructions*. Wroclaw, 2012.
13. Alecci V., De Stefano M., Focacci F., Luciano R., Rovero L., Stipo G. Strengthening Masonry Arches with Lime-Based Mortar Composite. *Buildings* 2017, 7, 49.
14. Bednarz Ł., Jasiénko J., DiTommaso A. Experimental Investigations into Collapse of Masonry Arches Reinforced Using Different Compatible Technologies. In Proceedings of Mechanics Of Masonry Structures Strengthened With Composite Materials. In Proceedings of the MuRiCo., Venice, Italy, 22-24, 2009.
15. Briccoli Bati S., Rovero S., Tonietti U. Experimental analysis on scale models of CFRP reinforced arches. In Proceedings of Mechanics Of Masonry Structures Strengthened With Composite Materials. In Proceedings of the MuRiCo., Venice, Italy, 22-24, 2009.
16. Castori G., Borri A., Ebaugh S., Casadei P. Strengthening masonry arches with composites. In Proceedings of Third International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2006), Miami, Florida, USA, 13-15, 2006.
17. Corradi M., Borri A., Castori G., Coventry K. Experimental Analysis of Dynamic Effects of FRP Reinforced Masonry Vaults. *Materials* 2015, 8, 8059-8071.

18. Oliveira D., Basílio I., Lourenco P. FRP strengthening of masonry arches towards an enhanced behaviour. In Proceedings of The Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Porto, Portugal, 16–19, 2006.
19. Pantò B., Cannizzaro F., Caddemi S., Calìò I., Chácara C., Lourenço P.B. Nonlinear Modelling of Curved Masonry Structures after Seismic Retrofit through FRP Reinforcing. Buildings. 2017. 7. 79.
20. Triantafillou T.C. Strengthening of Masonry Structures Using Epoxy-Bonded FRP Laminates. Journal of Composites for Construction, 1998. 2. 96-104.
21. Luciano R., Sacco E. Damage of masonry panels reinforced by FRP sheets. International Journal of Solids and Structures 1998. 35. 1723-1741.

Информация об авторах:

Орлович Роман Болеславович

ООО «ПИ Геореконструкция», г. Санкт-Петербург, Россия,
доктор технических наук, профессор, научный консультант.
E-mail: orlowicz@mail.ru

Зимин Сергей Сергеевич

ФГАУО ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург, Россия,
кандидат технических наук, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства
Инженерно-строительного института СПбПУ.
E-mail: zimin_sergei@mail.ru

Деркач Валерий Николаевич

Филиал РУП «Институт БелНИИС» - Научно-технический центр, г. Брест, Республика Беларусь,
доктор технических наук, директор.
E-mail: v-derkach@yandex.ru

Information about authors:

Orlovich Roman B.

Chief Engineer of the company «PI Georekonstrukciya», Saint-Petersburg, Russia,
doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific consultant.
E-mail: orlowicz@mail.ru

Zimin Sergey S.

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia,
candidate of technical sciences, assistant professor of the Higher School Industrial, Civil and Highway Engineering of
the Civil Engineering Institute.
E-mail: zimin_sergei@mail.ru

Derkach Valery N.

Branch office of the RUE "Institute BelNIIS" - Scientific-Technical Center, Brest, Republic of Belarus,
doctor of Technical Sciences, Director.
E-mail: v-derkach@yandex.ru