

Применение внешнего армирования на основе углеродных волокон для усиления лучковых сводов по стальным балкам

О.А. Симаков

Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва

Аннотация: В статье приведен анализ возможности применения систем внешнего армирования на основе углеродных волокон для усиления несущих конструкций лучковых сводов по стальным балкам. Приведены основные выводы по результатам проведенных ранее лабораторных исследований на натуральных образцах, а также результаты выполненных работ на референтных объектах. В результате сделаны общие выводы касательно расчета и проектирования, а также даны рекомендации по дальнейшим исследованиям вопроса расчета и проектирования данных систем.

Ключевые слова: лучковый свод, прусский свод, свод Монье, внешнее армирование, углеродное волокно, усиление, восстановление.

Введение




На основе проведенного анализа [1-3], а также обширной выборки реальных объектов реконструкции, в которых автор принимал личное участие, можно сделать вывод о достаточно большом количестве зданий с несущими перекрытиями в виде лучковых сводов, также известных, как своды Монье. В целом данный факт не является удивительным, т.к. практически за двухсотлетнее применение было построено значительное количество зданий с перекрытиями данной системы, в том или ином виде сохранившихся до наших дней. Учитывая достаточную несущую способность, надежность, привлекательный внешний вид и, как правило, историческую ценность, замена данных перекрытий на современные конструктивные решения из металла и железобетона, как правило, не производится. В то же время с учетом длительной эксплуатации, деградации свойств материалов, а также проводимых перепланировок и прокладки инженерных систем, конструкции сводов полностью или частично требуют восстановления или усиления. Как правило, это касается сводчатых элементов заполнения между стальными балками.

Разрушение и усиление сводчатых перекрытий

Рассматривая вопрос усиления лучковых сводов, необходимо выделить основные дефекты и повреждения, на основе которых строится выбор методики усиления. В таблице 1 приведена выборка основных дефектов, зафиксированных в ходе обследования 37 объектов городов Москвы, Санкт-Петербурга и Казани.

Таблица № 1

Выборка дефектов перекрытий в виде лучковых сводов

№ п/п	Описание дефекта	Графическая схема
1	Повреждение стальной балки	 <p>Разрушение стальной балки</p>
2	Значительные деформации сводчатой части (без образования трещин). Как правило, данный дефект фиксируется в перекрытиях после реконструкции, в которых демонтированы элементы заполнения в верхних зонах примыкания к стальным балкам	 <p>Значительные деформации</p>
3	Значительные деформации сводчатой части (с образованием трещин). Причины: перегруз, не проектная схема нагружения и т.п.	 <p>Значительные деформации с образованием трещин</p>

В целом, оценивая надежность конструкции сводов, можно указать их высокую безотказную работу, т.к. практически разрушенные конструкции (наличие дефектов не соответствующих нормативной работе конструкции) продолжают воспринимать действующие нагрузки. В этой связи закономерно

возникает вопрос о восстановлении данных конструкций вместо полной замены. При этом желательно сохранение исторического внешнего вида нижней криволинейной поверхности. В общем, среди вариантов усиления конструкций кирпичных сводчатых перекрытий [3-5] и арок [6, 7] можно выделить следующие, приведенные в таблице 2.

Таблица № 2

Выборка вариантов усиления лучковых сводов.

№ п/п	Усиление	Графическая схема
1	Усиление стальной балки путем подведения конструкций, наращивание сечения т.п. Далее данный вопрос не рассматривается ввиду своей простоты достаточности существующих норм для расчета и проектирования	
2	Усиление сводчатой части подведением стальных балок, стальных полос по контуру свода и т.п. После усиления стальные элементы закрываются конструкцией подвесного потолка	
3	Усиление сводчатой части наращиванием по нижней грани железобетонной рубашкой с армированием.	
4	Усиление по верху свода железобетонной набетонкой. Из недостатков можно выделить значительное догружение стальных балок	

Наибольший интерес в части исследований работы усиленной конструкции представляет усиление сводчатой (неметаллической) части перекрытия (для расчета и проектирования усиления стальных балок достаточно действующих нормативных документов). При этом наиболее технологичным является усиление снизу, в данном случае при небольшой толщине слоя усиления возможно сохранение исторического внешнего вида.

Одним из вариантов такого усиления является применение внешнего армирования на основе углеродных волокон по нижней поверхности свода. С учетом минимальной толщины слоя усиления практически данный вариант несколько расходится с общей концепцией работы сводчатой части перекрытия: фактически исключается образование только центрального шарнира, образуются пластические шарниры в «приопорных» зонах с растяжением по верхней плоскости свода как в случае без усиления. С целью исследования данного метода усиления были проведены «поисковые» исследования образцов сводчатых арок с усилением внешним армированием на основе углеродных волокон (см. рис. 1).

По результатам экспериментальных исследований, проведенных в НИУ МГСУ были получены следующие выводы:

1. Был зафиксирован сложный упруго-пластический механизм работы свода без усиления практически до нагрузок составляющих примерно 90-95% от разрушающих, далее практически мгновенное хрупкое разрушение образцов. При этом расчетное значение несущей способности (определенное с требуемыми коэффициентами надежности по материалам) составляло около 50% от разрушающих нагрузок. В этой связи можно говорить о достаточном уровне надежности данных конструкций и значительном потенциале развития методов расчетного анализа.
2. Своды с усилением по нижней грани работали пластически на всем протяжении воздействий. При этом были зафиксированы отдельные скачки в диаграммах деформирования, обусловленные изменениями механизма работы элементов, образования шарниров. Повышение несущей способности по отношению к образцам без усиления составило до 2.5 раз. Хрупкое разрушение не было зафиксировано ни для одного образца, что позволяет делать вывод о высоком

уровне надежности данного усиления и возможности прогнозирования работы усиленных элементов сводов в течение времени по критериям деформаций.

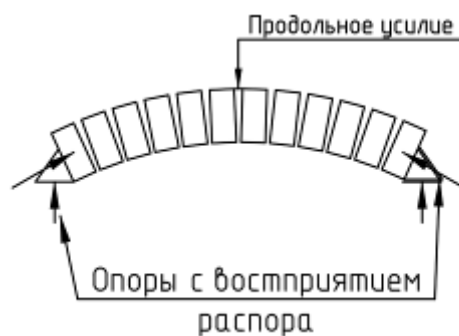


Рис. 1. – Испытание образцов сводчатых арок

3. Проведенный в работе анализ и математическое моделирование позволили в определенном смысле адаптировать существующую методику расчета. Вместе с тем эксперимент проводился на сводах одного параметра отношения высоты подъема к пролету, что не позволяет в явном виде экстраполировать методику расчета на другие аналогичные конструкции.

4. Расчет усиления

5. В общем виде методика расчета сводчатых перекрытий [8-10], так и для подобных по механизму работы арочных конструкций [7, 11-13] основывается на следующем механизме работы (рис. 2).

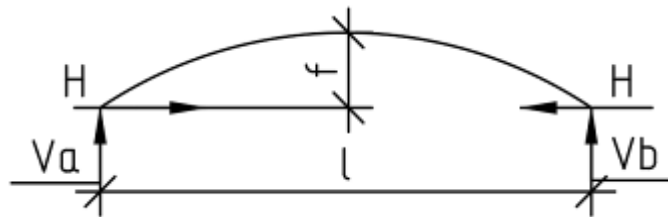


Рисунок 2. Расчетная схема арки

Условия равновесия арки записываются следующим образом:

$$V_a = V_b = 0,5ql \quad (1)$$

$$H = 0,25 \frac{ql^2}{f} k \quad (2)$$

где V_A и V_B – вертикальные реакции в опорах свода; H – горизонтальный распор; q – распределенная нагрузка; l – пролетная часть свода; k – коэффициент учитывающий обжатие свода и смещение опор.

С учетом усиления по нижней грани возможен переход для расчета в предельном равновесии по расчетной схеме вида см. рис. 3:

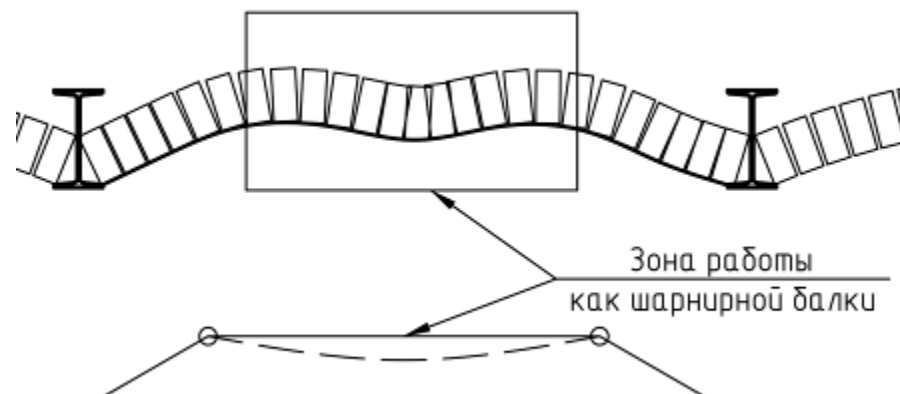


Рисунок 3. Расчетная схема арки с усилением по нижней грани

При этом расчет несущей способности возможен из условий равновесия (3) и (4).

$$M_{ult} = R \cdot b \cdot \xi \cdot h^2 \cdot (1 - 0,5 \cdot \xi) \quad (3)$$

$$\xi \cdot R \cdot b \cdot h = R_f \cdot A_f \quad (4)$$

где R – прочность кладки, определяемая по действующим нормативным документам, с учетом фактической прочности кирпича и раствора; h – высота поперечного сечения изгибаемой каменной конструкции; b – ширина поперечного сечения изгибаемой каменной конструкции; R_f – прочность внешнего армирования; A_f – площадь сечения внешнего армирования.

Опыт применения

На данный момент имеются данные по применению систем внешнего армирования для усиления сводов по нижней поверхности на 7 референтных объектах Москвы, Санкт-Петербурга и Казани, на которых ведется периодический мониторинг технического состояния строительных конструкций.

До момента усиления конструкции имели вид, представленный на рис. 4. После усиления характерный вид свода представлен на рис. 5.



Рис. 4. Схема характерных дефектов сводов до усиления



Рис. 5. Общий вид свода после усиления по нижней грани внешним армированием.

Заключение

По результатам проведенных лабораторных и натурных исследований, а также опытного применения на референтных объектах можно сделать следующие выводы:

1. Применение систем внешнего армирования на основе углеродных волокон для усиления лучковых сводов технически оправдано и позволяет повысить несущую способность до 2,5 раз.
2. При испытаниях усиленных сводов только по нижней грани зафиксирован пластический механизм разрушения с хорошей прогнозируемостью работы конструкции за пределами теории упругости.
3. Опыт применения на референтных объектах, а также периодический мониторинг за техническим состоянием усиленных конструкций позволяет рекомендовать этот метод для применения. При этом необходимо проведение дополнительных исследований с целью установки критериев расчетного анализа для различных соотношений пролета и высоты подъема свода.

Литература

1. Симаков О.А. Анализ факторов, вызывающих необходимость усиления железобетонных конструкций. Строительство и реконструкция. 2019. №1. С. 76-84.
 2. Пашкин Е.М., Бессонов Г.Б. Диагностика деформации памятников архитектуры. М. Стройиздат. 1984. 151 с.
 3. Физдель И.А. Дефекты и методы их устранения в конструкциях и сооружениях. М. Стройиздат. 1970. 177 с.
 4. Бессонов Г.Б. Исследование деформаций, расчет несущей способности и конструктивное укрепление древних распорных систем. М. Союзреставрация. 1989. 171 с.
-

5. Соколов Б.С., Антаков А.Б. Исследования сжатых элементов каменных и армокаменных конструкций. М. Издательство АСВ. 2010. 104 с.
6. Бернгард В.Р. Арки и своды. Руководство к устройству и расчету арочных и сводчатых перекрытий. СПб. Типография Ю.Н. Эрлих. 1901. 179 с.
7. Кривошеин Н.К. Расчет упругих сводов. Расчет упругих сводов по методу предельного равновесия. Петроград. Типография Бенке. 1918. 42 с.
8. Гроздов В.Т. Кирпичные своды перекрытий старых жилых и общественных зданий. Санкт-Петербург. ВИТУ. 1999. 25 с.
9. Лахтин Н.К. Расчет арок и сводов. Руководство к аналитическому и графическому расчету арочных и сводчатых перекрытий. Санкт-Петербург. 1911. 493 с.
10. Hankammer G. Schaden an Gebauden. Erkennen und Beurteilen. Berlin. 2016. 106 p.
11. Bargmann H. Historische Bautabellen. Normen und Konstruktionshinweise von 1870 bis 1960. Dusseldorf. Werner Verlag. 2001. 598 p.
12. Кашеварова Г. Г., Зобачева А. Ю. Моделирование процесса разрушения кирпичной кладки. Сб. трудов «К 50-летию кафедры строительных конструкций строительного факультета ПГТУ» Пермь. ПГТУ. 2010. С. 106-117
13. Разживин А. В. Учет несущей способности бетонных сводов при поверочных расчетах сталебетонных перекрытий. Промышленное и гражданское строительство. 2013. №3. С. 45-46

References

1. Simakov O.A. Stroitel'stvo i rekonstrukcija. 2019. №1, pp. 76-84.

2. Pashkin E.M., Bessonov G.B. Diagnostika deformacii pamjatnikov arhitektury [Diagnostics of deformation of architectural monuments]. M. Strojizdat. 1984. 151 p.

3. Fizdel' I.A. Defekty i metody ih ustraneniya v konstrukcijah i sooruzhenijah [Defects and methods of their elimination in structures and structures]. M. Strojizdat. 1970. 177 p.

4. Bessonov G.B. Issledovanie deformacij, raschet nesushhej sposobnosti i konstruktivnoe ukreplenie drevnih raspornyh system [Study of deformations, calculation of load-bearing capacity and structural reinforcement of ancient spacer systems]. M. Sojuzrestavracija. 1989. 171 p.

5. Sokolov B.S., Antakov A.B. Issledovanija szhatyh jelementov kamennyh i armokamennyh konstrukcij [Studies of compressed elements of stone and reinforced stone structures]. M. Izdatel'stvo ASV. 2010. 104 p.

6. Bergard V.R. Arki i svody. Rukovodstvo k ustrojstvu i raschetu arochnyh i svodchatyh perekrytij [Arches and vaults. A guide to the design and calculation of arched and vaulted ceilings]. SPb. Tipografija Ju.N. Jerlih. 1901. 179 p.

7. Krivoshein N.K. Raschet uprugih svodov. Raschet uprugih svodov po metodu predel'nogo ravnovesija [Calculation of elastic arches. Calculation of elastic arches by the method of limit equilibrium]. Petrograd. Tipografija Benke. 1918. 42 p.

8. Grozdov V.T. Kirpichnye svody perekrytij staryh zhilyh i obshhestvennyh zdaniy [Brick ceiling vaults of old residential and public buildings]. Sankt-Peterburg. VITU. 1999. 25 p.

9. Lahtin N.K. Raschet arok i svodov. Rukovodstvo k analiticheskomu i graficheskomu raschetu arochnyh i svodchatyh perekrytij [Calculation of arches and vaults. Guide to analytical and graphical calculation of arched and vaulted ceilings]. Sankt-Peterburg. 1911. 493 p.



10. Hankammer G. Schaden an Gebauden. Erkennen und Beurteilen. Berlin. 2016. 106 p.

11. Bargmann H. Historische Bautabellen. Normen und Konstruktioshinweise von 1870 bis 1960. Dusseldorf. Werner Verlag. 2001. 598 p.

12. Kashevarova G. G., Zobacheva A. Ju. Modelirovanie processa razrushenija kirpichnoj kladki: sb. trudov «K 50-letiju kafedry stroitel'nyh konstrukcij stroitel'nogo fakul'teta PGTU». Perm'. PGTU. 2010. pp. 106-117

13. Razzhivin A. V. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2013. №3. pp. 45-46.