

УДК 624.012.82

**Фабричная Ксения Александровна**

кандидат технических наук, доцент

E-mail: [fabrichnayaka@gmail.com](mailto:fabrichnayaka@gmail.com)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

**Шарафутдинова Камилла Иршатовна**

инженер 3 категории

E-mail: [info@tatsert.ru](mailto:info@tatsert.ru)

**ООО Центр сертификации «ТАТСЕРТ»**

Адрес организации: 420107, Россия, г. Казань, ул. Петербургская, д. 40

### **К вопросу усиления сводов (типа «Монье») композитными материалами при реконструкции**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* В настоящее время в нормативных документах отсутствует методика оценки прочности и деформативности кирпичных сводов по металлическим балкам (типа «Монье») при усилении композитными материалами, в связи с этим ее разработка является актуальной задачей.

*Результаты.* Выполнены статические расчеты фрагмента сводчатого перекрытия по стальным балкам с учетом наличия дефектов конструкций, увеличения нагрузки на перекрытие, использования различных схем усиления двумя видами композитных материалов. Установлены деформации элементов, характерные зоны распределения напряжений, последовательность и характер образования трещин для образцов без усиления и дефектов, без усиления с дефектом, при различных схемах усиления композитными материалами на всех этапах нагружения до виртуального разрушения конструкции. Сравнение результатов для различных вариантов усиления позволило установить наиболее эффективную из рассмотренных схем. Получены величины трещинообразующих и разрушающих нагрузок для всех рассмотренных конструкций.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в подтверждении эффективности использования композитных материалов для усиления сводов типа Монье. Предложена методика оценки прочности и деформативности сводов по стальным балкам при усилении композитными материалами, позволяющая оценить эффективность конструктивного решения.

**Ключевые слова:** своды, арки, напряженно-деформированное состояние (НДС), усиление, композитные материалы, методика расчета.

#### **Введение**

В России сохранилось множество зданий с перекрытиями из кирпичных сводов по металлическим балкам постройки начала двадцатого века, причем многие из них являются памятниками архитектуры и часто находятся в аварийном состоянии из-за физического износа или в связи с изменением силовых нагрузок. При реконструкции объектов культурного наследия замена исторических конструкций не допускается, поэтому особое внимание следует уделить восстановлению их работоспособности без значительного изменения внешнего вида конструкции. Традиционные способы усиления каменных конструкций – стальные и железобетонные обоймы, металлические пояса и накладки, перекладка кладки – трудоемки в реализации, дорогостоящи, изменяют внешний вид конструкции [1]. За рубежом для усиления сводов активно используются композитные материалы [2-4]. К последним, в частности, относятся композиты в виде ламелей, матов и сеток, изготавливаемые из углеродных, арамидных материалов и стекловолокон. К достоинствам таких систем усиления следует отнести высокую несущую способность, малые габариты и незначительный удельный вес, а также универсальность и возможность применения для любых форм и очертаний усиливаемых конструкций. Однако массовое применение подобных материалов для усиления в отечественной практике сдерживается

отсутствием методик расчета сводчатых конструкций, то есть трудно определить эффективность этого способа. Для формирования методики расчета необходимо получить ясное представление о характере напряженно-деформированного состояния конструкции до и после усиления. Получить требуемую картину можно в рамках численных и физических экспериментальных исследований.

### **Обзор исследований усиления сводов композитными материалами**

Зарубежные исследователи доказали эффективность усиления кирпичных сводов композитными материалами [5-7]. В отечественной практике больше исследовано усиление композитами кирпичных столбов и простенков [8, 9], что нашло свое отражение в рекомендациях по расчету обоем в СП 427.1325800.2018 «Каменные и армокаменные конструкции. Методы усиления» и СТО 38276489.002-2017 «Усиление каменных и армокаменных конструкций композитными материалами. Проектирование и технология производств работ». Есть отдельные работы, посвященные усилению кирпичных сводов композитными материалами [10]. Однако усиление кирпичных сводов, комбинированных с металлическими балками, недостаточно изучено. Экспериментальное исследование не усиленных сводов по стальным балкам выполнялось в Санкт-Петербурге, однако материалом сводов выступал бетон [11]. Там же, в здании «Склады» Новой Голландии, проведены натурные испытания поврежденных каменных сводов по двутавровым балкам и исследованы различные способы усиления композитами с использованием ПК Abaqus [12]. К характерным дефектам сводов авторы относят наличие отверстий в сводах, замачивание кладки, наличие трещин, которые могут влиять на несущую способность и деформативность перекрытия, снижая их в несколько раз. В работе [12] численно установлен следующий характер НДС сводов:

- 1) в армированной и в неармированной кладке образуется сеть микротрещин;
- 2) одна из микротрещин начинает развиваться – для неармированной кладки она является разрушающей, у армированной кладки композитная сетка на определенном этапе препятствует дальнейшему развитию трещины и, вследствие этого, после остановки ее роста, начинается рост следующей трещины;
- 3) разрушение армированной кладки происходит при достижении предела прочности на срез из-за роста касательных напряжений вследствие разности деформаций материала свода и элементов усиления.

Таким образом, сделан вывод о необходимости выбора такой системы усиления, у которой деформационные показатели будут наиболее близкими к кладке. Однако, кроме рассмотренных выше дефектов, часто встречается коррозия стальных балок, влияние которой так же необходимо учесть в исследованиях.

### **Общий план исследования**

Исходя из вышеизложенного, и по результатам обследования реальных объектов, авторами настоящего исследования были определены геометрические характеристики сводов, их характерные дефекты [13] и выбраны материалы системы усиления:

– Ruredil X Mesh (Руредил Икс Меш) – международная запатентованная система усиления строительных конструкций, состоящая из сетки из углеволокна и раствора, используемого в качестве клея на основе портландцемента с пуццолановой и др. добавками, которые являются химически, физически и механически совместимыми с кирпичной кладкой;

– система внешнего армирования CarbonWrapTape-530/600 – однонаправленные ленты, изготовленные из углеродных волокон, получаемых путем высокотемпературного воздействия в инертной среде на органические волокна.

Первая из систем активно используется в Европе при усилении железобетонных, каменных и кирпичных сводов, вторая – нашла широкое применение при восстановлении, ремонте, усилении, сейсмоусилении железобетонных, бетонных, каменных, стальных, деревянных конструкций.

Исследовался фрагмент перекрытия пролетом пять метров, с шагом балок один метр, толщиной кирпичной части 120 мм, стрела подъема 120 мм, балки двутавровые № 16 немецкого нормального сортамента, максимальная прочность элементов кладки

M100 и M50 для кирпича и раствора соответственно. Рассмотрено возможное увеличение нагрузки на свод, ухудшение физико-механических характеристик кладки, различное расположение элементов усиления двух видов, сплошное и локальное расположение элементов усиления.

Для усиленного свода подобран проверочный расчет, позволяющий оценить его прочность и деформативность.

### Численные исследования сводов

Численные исследования сводов выполнялись в несколько этапов: исследование влияния различных дефектов на напряженно-деформированное состояние, исследование влияния выбранных систем, с учетом вариантов их применения. На первом этапе использовался ПК Лира. Установлено, что из всех дефектов на напряжение в кладке сводов, наибольшее влияние оказывает уменьшение прочности кладки, вызванное попеременным замораживанием/оттаиванием. На втором этапе оценивалось состояние эталонного, поврежденного сводов и усиленных образцов в ПК «ANSYS» в нелинейной постановке задачи. Программа второго этапа исследований приведена на рис. 1.

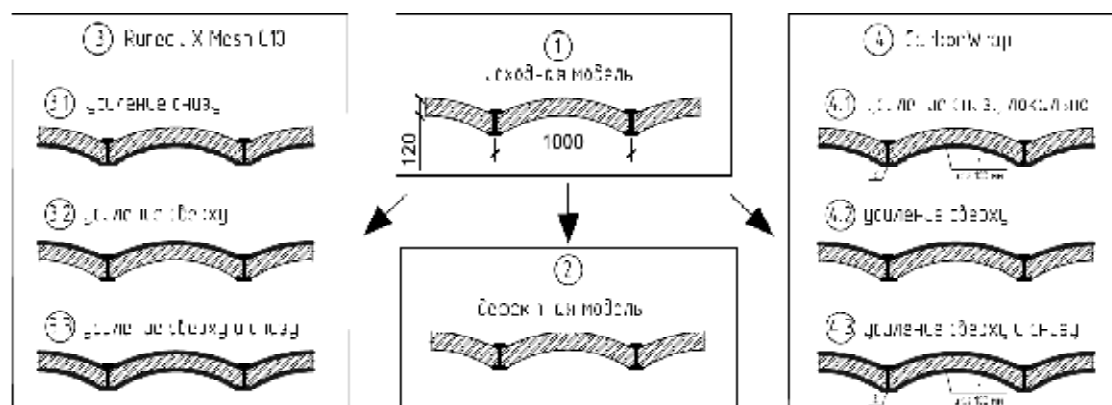


Рис. 1. Программа численных исследований (иллюстрация авторов)

Оценка достоверности методики численного моделирования выполнена путем сравнения с результатами физического эксперимента [13], показавшего хорошую сходимость. К фрагментам перекрытия прикладывалась равномерно распределенная нагрузка от 100 до 1000 кг/м<sup>2</sup> с шагом 100 кг/м<sup>2</sup> до виртуального разрушения конструкции. Учитывалось возможное снижение прочности кладки от 20 до 80 % вследствие дефектов. Кладка рассматривалась как гомогенный элемент, свойства которого под нагрузкой предложены в работе Кашеваровой [14]. Произведена оценка влияния ширины углеродной ленты (150 мм и 300 мм) и ее шага от 100 до 300 мм на несущую способность усиленного свода.

В результате расчетов получен характер распределения напряжений на каждом этапе, величина деформаций, установлены трещинообразующие и разрушающие нагрузки (табл. 1). Стоит отметить, что разрушение всех рассматриваемых конструкций происходит по кладке, то есть предельные напряжения возникают раньше в кирпиче, чем в балках. Это говорит о том, что усиление в большей степени требуется кирпичной кладке. Вариант и система усиления влияют на характер распределения напряжений в материале свода, однако в металлических балках характер распределения напряжений не меняется.

Установлено, что наибольший эффект дает усиление системой CarbonWrap, а использование отдельных полос делает данное решение экономически выгодным. Среди вариантов расположения полос разных размеров наиболее эффективным решением оказалось усиление лентами шириной 150 мм с шагом 100 мм. Согласно результатам расчетов, максимальная эффективность усиления – повышение несущей способности в 2-2,5 раза достигается, когда прочность кладки снижена не более чем на 40 %, при 60 % разрушающая нагрузка увеличивается в 1,87 раз, при 80 % – в 1,39 раз.

Таблица 1

**Величины трещинообразующих и разрушающих нагрузок**

Вариант схемы свода	$q_{срс}$ , кг/м <sup>2</sup>	$q_{ult}$ , кг/м <sup>2</sup>
Без дефектов	300	600
С дефектом (снижение прочности кладки на 40 %)	100	400
Ruredil X Mesh C10		
Усиление снизу сплошное	100	400
Усиление сверху сплошное	350	700
Усиление сверху и снизу сплошное	380	800
CarbonWrap		
Усиление снизу локальное	300	600
Усиление сверху сплошное	400	900
Усиление сверху и снизу локальное	460	1000

Схема расположения элементов усиления значительно влияет на трещиностойкость и несущую способность сводов. При расположении снизу система Ruredil X Mesh C10 неэффективна, а CarbonWrap восстанавливает характеристики до неповрежденного элемента. При расположении сверху первая из систем повышает трещиностойкость в 3,5 раза, а прочность в 1,75 раз, превышая показатели неповрежденной конструкции, вторая система эффективнее в 4 раза и в 2,25 раз соответственно. Максимальное повышение показателей достигается при комбинированном расположении усиления. Однако с точки зрения экономической эффективности привлекательней локальное усиление, например, в нижней части только наклеивание вдоль балок с заведением на опорную зону сводов.

**Методики оценки прочности и деформативности сводов**

С учетом полученных результатов предлагается следующая методика оценки прочности сводов по металлическим балкам, усиленным композитными материалами. За основу принята гипотеза о том, что рабочая схема простого пологого свода может быть представлена как система независимых параллельных арок, где арки представляют собой частный случай свода, его плоскую модель. Если нагрузка вдоль свода не меняется, то о его несущей способности и деформациях можно судить по работе одной элементарной арки единичной ширины, являющейся, таким образом, рабочей схемой свода [15]. Однако особенностью рассматриваемых сводов является возможная податливость их опор при деформаций стальных балок, что так же необходимо учитывать при расчете. Поэтому алгоритм расчета состоит из двух этапов:

1. оценка несущей способности и жесткости свода как комбинированной балки (основной пролет перекрытия);
2. оценка несущей способности каменной кладки свода (до и после усиления) между балками.

**Расчет свода как комбинированной балки**

Рассмотрим первый этап. Свод оценивается как комбинированная балка (рис. 2), с приведением модулей упругости кирпичной и композитной частей сечения к общему материалу – стали, по аналогии с работами [16-18], через коэффициенты приведения модулей упругости  $m_{св}$  и  $m_{к.}$ .

Модуль упругости кладки принимается согласно указаниям СП 427.1325800.2018 «Каменные и армокаменные конструкции. Методы усиления», при наличии дефектов учет повреждений можно принять по рекомендациям п. 7.1, в нашем случае принимаем сниженным до 15 % – учет замачивания свода.

Материал усиления, принятый для проверочных расчетов – лента из углеволокна CarbonWrap шириной  $b=150$  мм, толщиной  $t=2$  мм, наклеенная вдоль балки снизу в один слой. Основные характеристики материалов усиления, приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Характеристики принятых материалов усиления

Вид материала	Прочность на растяжение, $R_y$ , МПа	Модуль упругости, $E$ , ГПа	Деформативность при разрыве, %
Ruredil X Mesh C10	48000	240	1,8
CarbonWrap	98000	245	1,8

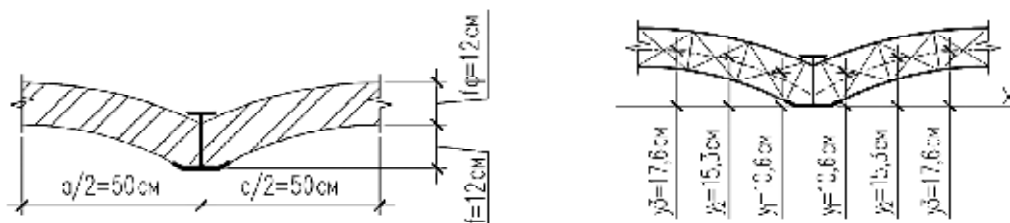


Рис. 2. Размеры приведенного сечения и определение центров тяжести в участках сводов (иллюстрация авторов)

Далее определяем суммарный статический момент, приведённый к металлу, разбивая участок свода на прямоугольники, шириной 140 мм (рис. 2):

$$\sum S_x = \frac{2S_{x_{cb}}}{m_{cb}} + \frac{2S_{x_k}}{m_k} + S_{x_b}, \quad (1)$$

где  $S_{x_{cb}}$ ,  $S_{x_b}$ ,  $S_{x_k}$  – статические моменты свода, балки и композита относительно оси  $x$  соответственно, определяемые по формулам (2)-(4):

$$S_{x_{cb}} = \sum F_i \cdot y_i, \quad (2)$$

где  $F_i$  – площадь  $i$ -ого участка свода,  $y_i$  – расстояние от центра тяжести  $i$ -ого участка свода до оси  $x$ ;

$$S_{x_b} = A_b \cdot \left( \frac{h}{2} + t \right), \quad (3)$$

где  $A_b$  – площадь сечения балки,  $h$  – высота балки,  $t$  – толщина композитного материала;

$$S_{x_k} = \sum F_k \cdot y_k, \quad (4)$$

где  $F_k$  – площадь композитного материала,  $y_k$  – расстояние от центра тяжести композитного материала до оси  $x$ .

Далее определяем положение центра тяжести комплексного сечения по формуле (5):

$$y_{ц.т.} = \frac{\sum S_x}{A_{red}}. \quad (5)$$

Аналогично определяем центры тяжести сечений свода, балки, композита.

Определяем момент инерции приведённого сечения относительно нейтральной оси по формуле (6):

$$I_{red} = I_b^0 + A_b \cdot y_1^2 + \frac{I_{cb}^0}{m_{cb}} + \frac{A_{cb}}{m_{cb}} \cdot y_2^2 + \frac{I_k^0}{m_k} + \frac{A_k}{m_k} \cdot y_3^2, \quad (6)$$

где  $I_b^0$  – момент инерции сечения балки относительно оси, проходящей через центр тяжести сечения балки,  $y_1$  – расстояние между центром тяжести объединённого сечения и центром тяжести балки,  $I_{cb}^0$  – момент инерции сечения свода относительно собственной центральной оси,  $y_2$  – расстояние между центром тяжести объединённого сечения и центром тяжести свода,  $I_k^0$  – момент инерции композитного материала относительно собственной центральной оси,  $y_3$  – расстояние между центром тяжести объединённого сечения и центром тяжести композитного материала.

Момент инерции сечения свода относительно собственной оси определяется по формуле (7):

$$I_{cb}^0 = \int_0^F y_i^2 dF = \sum F_i y_i^2, \quad (7)$$

где  $F_i$  – площадь  $i$ -ого участка свода;  $y_i$  – расстояние от центра тяжести объединённого сечения до  $i$ -ого участка свода.

Момент инерции композитного материала относительно собственной оси определяется по формуле (8):

$$I_k^0 = \frac{bt^3}{12}, \quad (8)$$

Далее определяем моменты сопротивления для верхней и нижней граней балки по формулам (9)-(10):

$$W_6 = \frac{I_{red}}{y_6}, \quad (9)$$

$$W_n = \frac{I_{red}}{y_n}, \quad (10)$$

где  $y_6$  и  $y_n$  – расстояния от центра тяжести объединённого сечения до верхней и нижней грани балки соответственно.

Напряжения в расчётных точках балки определяются из условий (11)-(12) и для оценки прочности сравниваются с расчётными сопротивлениями стали:

$$\sigma_6 = \frac{M}{W_6} \leq R_y \gamma_c, \quad (11)$$

$$\sigma_n = \frac{M}{W_n} \leq R_y \gamma_c, \quad (12)$$

где  $\sigma_6$  и  $\sigma_n$  – напряжения в верхней и нижней расчётных точках балки,  $R_y$  – расчётное сопротивление стали балки;  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы балки.

Прогиб балки оценивается из условия (13):

$$f = \frac{5q_n l_0^4}{384 EI_{red}} < [f], \quad (13)$$

где  $[f]$  – допустимый прогиб балки,  $E$  – модуль упругости стали.

Результаты, полученные по предлагаемой методике, для варианта усиления балки углеродной лентой Carbon Wrap сравнивались с расчётом в ПК ANSYS и показали расхождение менее 10 %, табл. 3.

Таблица 3

#### Максимальные напряжения и прогибы в стальной балке перекрытия

Параметры	$\sigma_n$ , кг/см <sup>2</sup>	$\sigma_6$ , кг/см <sup>2</sup>	$f$ , см
ANSYS	1390,893	1006,562	1,87
Методика	1475,03	998,82	1,68
Расхождение	5,7 %	0,77 %	10,2 %

#### Оценка прочности свода между балками

На втором этапе, при расчёте прочности сводов (между балками), усиленных композитными материалами, известны методики [15], например, когда расчетная схема принимается как для шарнирно закрепленной арки единичной ширины (рис. 3), результаты дают значительное расхождение с результатами численных исследований как усиленной, так и не усиленной кладки, значительно, до 6 раз, завышая ее несущую способность. Другие методики [19] сложны для практического применения. Так же неприменима нормативная методика, предлагаемая для оценки прочности усиливаемых простенков.

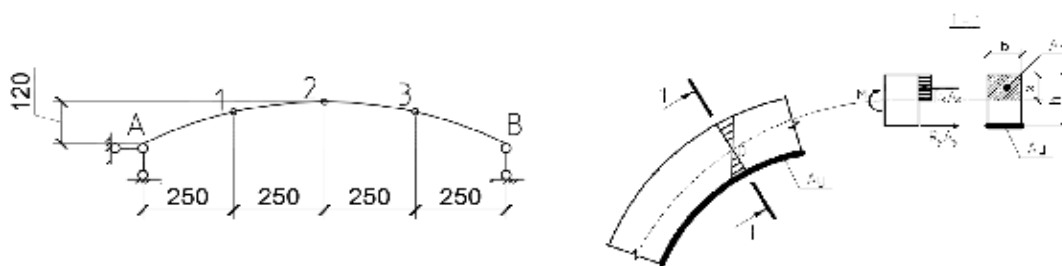


Рис. 3. Расчетная схема свода. Характерные точки сечения.  
Расчетная схема для определения прочности поперечного сечения свода, усиленного углеродным холстом снизу (иллюстрация авторов)

Так как кирпичный свод конструкции имеет очень малый подъем (пологий свод), его разрушение предполагается от сдвига пяты свода по балке с поворотом относительно внутреннего угла. При этом проседает средняя часть свода, что приводит к образованию трещин в швах замковой части на нижней поверхности и зоны смятия на верхней поверхности конструкции.

Согласно отдельным исследованиям<sup>1</sup> наиболее опасным сечением является сечение 2, для которого проверку прочности, при наличии усиления с двух сторон, можно выполнить из условия (14), при усилении снизу из условия (15), (рис. 3):

$$M \leq [R_k b x (h_0 - 0,5x) \gamma_{01} + R_y A_y^1 h_0 \gamma_{02}] \gamma_m, \quad (14)$$

$$M \leq [R_y A_y h_0 \gamma_{02} - R_k b x (h_0 - 0,5x) \gamma_{01}] \gamma_m, \quad (15)$$

где  $x$  – высота сжатой зоны,  $R_k$  – расчетное сопротивление каменной кладки сжатию,  $R_y$  – расчетное сопротивление углеродного холста растяжению,  $h_0$  – высота сечения свода в расчетном сечении,  $b$  – единичная ширина свода,  $A_y$  – площадь композитного материала снизу расчетного сечения свода;  $\gamma_{01}$  – коэффициент условий работы, учитывающий обжатие сжатой зоны каменного свода при наклейке углеродного холста, в практических расчетах рекомендуется принимать не более 1,2,  $\gamma_{02}$  – коэффициент условий работы, учитывающий предварительное напряжение растянутой зоны углеродного холста при наклейке в растянутой зоне, в практических расчетах рекомендуется принимать не более 1,6,  $\gamma_m$  – коэффициент, учитывающий совместную работу элементов усиления и каменного свода, в практических расчетах рекомендуется принимать не более 1,2.

Как для внецентренно сжатого элемента, условие прочности свода можно записать в виде (16):

$$N \leq \varphi R_k F_c, \quad (16)$$

где  $F_c$  – площадь сжатой зоны сечения;  $\varphi$  – коэффициент продольного изгиба арки, принимаемый в зависимости от гибкости арки ( $\lambda = S_0/h_c$ ) и упругой характеристики кладки  $\alpha$ . При определении гибкости,  $S_0 = 0,54S$  – расчетная длина арки принимается как для двухшарнирной арки, где  $S$  – длина участка арки, способного свободно деформироваться в соответствии с принятой расчетной схемой, то есть длина оси арки между условными шарнирами.

Основным показателем устойчивости и работоспособности арочной конструкции, сложенной из кирпича или камня является высота сжатой зоны  $x$ . По известным методикам [15] для любого внецентренно сжатого сечения свода высота сжатой зоны приблизительно равна удвоенному расстоянию от точки приложения нормальной силы до ближайшего края сечения (17):

$$o = \left( \frac{h}{2} - e \right) 2, \quad (17)$$

где  $e$  – эксцентриситет приложения нормальной силы относительно центра сечения, принимаемый не более  $0,7y$ , где  $y$  – расстояние от центра тяжести сечения до его края в сторону эксцентриситета. Высота сжатой зоны, определенная по условию (16) составила 36 мм, то есть приблизительно четверть высоты свода. Формула (18), предложенная авторами<sup>1</sup> при двустороннем усилении углеродными холстами, учитывает наличие элементов армирования:

$$x = \frac{R_y A_y \gamma_{01} - R_y A_y^1 \gamma_{02}}{R_k b}. \quad (18)$$

Результаты, полученные по формуле (18), в нашем случае так же несопоставимы с данными численных исследований. По результатам численных исследований, при нагрузке  $100 \text{ кг/м}^2$ , высота сжатой части сечения составляет более половины высоты свода и, при увеличении нагрузки, из-за эффекта обжатия композитной арматурой, только увеличивается. Распределение сжимающих напряжений по высоте неоднородно. Схожий характер распределения напряжений в каменных сводах получен и другими авторами [19].

Расчетное сопротивление Carbon Wгар растяжению при оценке прочности определялось по формуле (19):

$$R_y = \frac{\gamma_{f1}}{\gamma_f} R_{fn}, \quad (19)$$

<sup>1</sup>Попов А.О., Матвеев И.Ю., Курамшин К.В. Прочность по нормальным сечениям и деформативность кирпичных цилиндрических сводов, усиленных углеродными холстами // Известия КГАСУ. 2015. № 2. С. 173.

где  $\gamma_f$  – коэффициент надежности по материалу, принимаемый 1,8 для всех усиливающих элементов из углеродных волокон при расчете по первой группе предельных состояний (для двунаправленных и мультиаксиальных углеродных лент);  $\gamma_{fl}$  – коэффициент условия работы усиливающих элементов, учитывающий условия эксплуатации строительной конструкции, принимаемый для лент, сеток и тканей (во внутренних помещениях) равным 0,9;  $R_{fn}$  – нормативное сопротивление растяжению усиливающего элемента. При расчете строительной конструкции, усиленной СВА Carbon Wrap по предельным состояниям первой группы на действие только постоянных и длительных нагрузок расчетное сопротивление растяжению усиливающего элемента умножалось на понижающий коэффициент 0,8.

Значительное расхождение полученных значений свидетельствует о необходимости принципиально другого подхода к оценке прочности свода, учитывающего действительную пространственную работу элементов.

### Заключение

1. В результате проведенных исследований установлена эффективность использования обеих рассмотренных систем для усиления сводов по металлическим балкам. Ленты Carbon Wrap Tape обеспечивают большую несущую способность, однако их максимальная эффективность достигается при наличии локальных дефектов. Вторая система оптимальна при большой площади повреждений, например, при замачивании, или большом количестве мелких трещин. Ее максимальная эффективность достигается при устройстве сверху, повышая несущую способность до 30 %.

2. Для усиления неповрежденных сводов рекомендуется расположение композитных материалов усиления сверху, расположение снизу неэффективно. Для поврежденных сводов усиление снизу позволяет повысить трещиностойкость только в случае использования карбоновых лент до 3-х раз, при устройстве усиления сверху до 4,5 раз, а несущая способность максимально увеличивается в 2 раза.

3. Известные методики расчета позволяют достаточно достоверно оценить несущую способность свода при усилении как комбинированной балки, то есть оценить работу стальных балок при усилении свода, однако оценка прочности усиленных сводов между балками нуждается в дальнейшей разработке, для чего желательно проведение натурных испытаний усиленных конструкций.

### Список библиографических ссылок

1. Бедов А. И., Габитов А. И. Проектирование, восстановление и усиление каменных и армокаменных конструкций. М. : АСВ, 2006. 566 с.
2. Antonio Borri, Giulio Castori, Marco Corradi. Intradados strengthening of brick masonry arches with composite materials // Composites. 2011. Vol. 42. Part B. P. 1164–1172.
3. Laura Anania, Antonio Badala, Giuseppe D' Agata. The post strengthening of the masonry vaults by the  $\Omega$ -Wrap technique based on the use of C-FRP // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 47. P. 1053–1068.
4. Garmendia L., San-Jose J. T., Garcia D., Larrinaga P. Rehabilitation of masonry arches with compatible advanced composite material // Construction and Building Materials. 2011. Vol. 25. P. 4374–4385.
5. Ferit Cakir, Habib Uysal. Experimental modal analysis of brick masonry arches strengthened prepregcomposites // Journal of Cultural Heritage. 2015. Vol. 16. P. 284–292.
6. Francesca Giulia Carozzi, Gabriele Milani, Carlo Poggi. Mechanical properties and numerical modeling of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for strengthening of masonry structures // Composite structures. 2014. Vol. 107. P. 711–725.
7. Ilaria Cancelliere, Maura Imbimbo, Elio Sacco. Experimental tests and numerical modelling of reinforced masonry arches // Engineering Structures. 2010. Vol. 32. P. 776–792.
8. Соколов Б. С., Антаков А. Б. Исследования сжатых элементов каменных и армокаменных конструкций. М. : АСВ, 2010. 104 с.
9. Гасиев А. А., Грановский А. В. Динамические испытания образцов каменной кладки усиленных холстами из углеволокнистой ткани // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2015. № 2. С. 29–35.



10. Соколов Б. С., Павлов В. В., Хорьков Е. В. Конструктивно-технологические особенности восстановления эксплуатационной пригодности каменных сводчатых перекрытий : сб. ст. IV Международной (X Всероссийской) конференции НАСКР-2018 / Чувашский университет. Чебоксары. 2018. С. 323–329.
11. Лаптев Е. А. Оценка несущей способности перекрытий по стальным балкам с накатом в виде сводиков в зданиях Санкт-Петербурга : СППУ, СПб., 2016. 55 с.
12. Беспалов В. В. Прочность поврежденных каменных сводчатых конструкций исторических зданий. СПб. : СППУ, 2018. 93 с.
13. Фабричная К. А., Шарафутдинова К. И. К исследованию НДС кирпичных сводов (типа «Монье») при реконструкции : сб. ст. IV Международной (X Всероссийской) конференции НАСКР-2018 / Чувашский университет. Чебоксары, 2018. С. 338–344.
14. Кашеварова Г. Г., Зобачева А. Ю. Моделирование процесса разрушения. Кирпичной кладки : сб. трудов «К 50-летию кафедры строительных конструкций строительного факультета ПГТУ» / ПГТУ. Пермь, 2010. С. 106–113.
15. Бессонов Г. Б. Исследование деформаций, расчет несущей способности и конструктивное укрепление древних распорных систем. М. : Росреставрация. 1989. 164 с.
16. Исекеев И. Д., Трофимов А. В. Совершенствование методики расчета пологих железобетонных сводов, опирающихся на металлические балки // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 1 (66). С. 28–33.
17. Разживин А. В. Учет несущей способности бетонных сводов при поверочных расчетах сталебетонных перекрытий // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 3. С. 45–46.
18. Фролов А. В., Зимин С. С., Фролова Е. В. Методика расчета несущей способности балок с учетом жесткости кирпичного сводчатого заполнения // Международный научный журнал «Синергия наук». 2017. № 10. С. 593–619.
19. Беспалов В. В., Зимин С. С. Прочность каменной кладки сводчатых конструкций // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 11 (50). С. 37–51.

**Fabrichnaya Ksenia Alexandrovna**

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: [fabrichnayaka@gmail.com](mailto:fabrichnayaka@gmail.com)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Sharafutdinova Camilla Irshatovna**

engineer of the 3<sup>rd</sup> category

E-mail: [info@tatsert.ru](mailto:info@tatsert.ru)

**LLC Tsentr sertifikatsii «TATSERT»**

The organization address: 420107, Russia, Kazan, Petersburg st., 40

**On the issue of strengthening vaults («Monier» type)  
with composite materials in the reconstruction**

**Abstract**

*Problem statement.* Currently, in normative documents there is no methodology for calculating the reinforcement of brick vaults on metal beams («Monier» type) with composite materials, and therefore its development is an urgent task.

*Results.* Static calculations of a fragment of vaulted ceilings on steel beams were performed taking into account the presence of structural defects, increased load on the floor and the use of various amplification schemes with two types of composite materials. Deformations of elements, characteristic zones of stress distribution, the sequence and nature of cracking for specimens without reinforcement and defects, without reinforcement with a defect, were established for various reinforcement schemes with composite materials at all stages of loading until the structure is virtually destroyed. A comparison of the results for various amplification options made it possible to establish the most effective of the considered schemes. The values of cracking and destructive loads for all considered structures are obtained.

*Conclusions.* The significance of the results for the construction industry is to confirm the effectiveness of the use of composite materials to strengthen Monier type vaults. A technique for assessing the strength and deformability of arches on steel beams when reinforced with composite materials is proposed, which allows to evaluate the effectiveness of the structural solution.

**Keywords:** vault, arches, stress-strain state; reinforcement, composite materials, calculation methods.

### References

1. Bedov A. I., Gabitov A. I. Design, restoration and strengthening of stone and reinforced stone structures. M. : ASV. 2006. 566 p.
2. Antonio Borri, Giulio Castori, Marco Corradi. Intrados strengthening of brick masonry arches with composite materials // *Composites*. 2011. Vol. 42. Part B. P. 1164–1172.
3. Laura Anania, Antonio Badala, Giuseppe D' Agata. The post strengthening of the masonry vaults by the  $\Omega$ -Wrap technique based on the use of C-FRP // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 47. P. 1053–1068.
4. Garmendia L., San-Jose J. T., Garcia D., Larrinaga P. Rehabilitation of masonry arches with compatible advanced composite material // *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25. P. 4374–4385.
5. Ferit Cakir, Habib Uysal. Experimental modal analysis of brick masonry arches strengthened prepregcomposites // *Journal of Cultural Heritage*. 2015. Vol. 16. P. 284–292.
6. Francesca Giulia Carozzi, Gabriele Milani, Carlo Poggi. Mechanical properties and numerical modeling of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for strengthening of masonry structures // *Composite structures*. 2014. Vol. 107. P. 711–725.
7. Ilaria Cancelliere, Maura Imbimbo, Elio Sacco. Experimental tests and numerical modelling of reinforced masonry arches // *Engineering Structures*. 2010. Vol. 32. P. 776–792.
8. Sokolov B. S. Antakov A. B. Studies of compressed elements of stone and reinforced stone structures. M. : ASV, 2010. 104 p.
9. Gasiev A. A., Granovsky A. V. Dynamic tests of masonry samples reinforced with carbon fiber cloths // *Seismostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy*. 2015. № 2. P. 29–35.
10. Sokolov B. S., Pavlov V. V., Khorkov E. V. Design and technological features of the restoration of the serviceability of stone vaulted floors : dig. of art. of IV International (X All-Russian) conference NASKR -2018 / Chuvashsky universitet. Cheboksary, 2018. P. 323–329.
11. Laptev E. A. Assessment of the bearing capacity of ceilings on steel beams with a run-in in the form of vaults in the buildings of St. Petersburg. SPb. : SPPU, 2016. 55 p.
12. Bupalov V. V. Strength of damaged stone vaulted structures of historic buildings. SPb. : SPPU, 2018. 93 p.
13. Fabrichnaya K. A., Sharafutdinova K. I. To the study of the VAT of brick vaults (Monier type) during reconstruction : dig. of art. of IV International (X All-Russian) conference NASKR -2018 / Chuvashsky universitet. Cheboksary, 2018. P. 338–344.
14. Kashevarova G. G., Zobacheva A. Yu. Modeling the process of destruction Brickwork : dig. of art. « To the 50th anniversary of the Department of Building Structures of the Faculty of Civil Engineering of PSTU» / PGU. Per'm, 2010. P. 106–113.
15. Bessonov G. B. Research of deformations, calculation of bearing capacity and constructive strengthening of ancient spacer systems. M. : Rosrestavratsiya. 1989. 164 p.
16. Isekeyev I. D., Trofimov A. V. Improving the methodology for calculating shallow reinforced concrete vaults based on metal beams // *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2018. № 1 (66). P. 28–33.
17. Razzhivin A. V. Taking into account the bearing capacity of concrete arches during verification calculations of steel-concrete floors // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2013. № 3. P. 45–46.
18. Frolov A. V., Zimin S. S., Frolova E. V. The method of calculating the bearing capacity of beams taking into account the stiffness of the brick vaulted filling // *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Sinergiya nauk»*. 2017. № 10. P. 593–619.
19. Bupalov V. V., Zimin S. S. The strength of masonry vaulted structures // *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy*. 2016. № 11 (50). P. 37–51.