



УДК 69.059.3

DOI: 10.22227/2949-1622.2023.4.104-117

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

Конструктивные особенности восстановления работоспособности каменных сводчатых перекрытий зданий

Е.В. Хорьков^{1*}, И.Т. Мирсаяпов¹¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Казань, Российская Федерация[*evg-ne@mail.ru](mailto:evg-ne@mail.ru)

Ключевые слова: свод, арка, каменная кладка, распорная система, усиление, композитные материалы, перекрытие, подвижка опоры.

История статьи

Поступила в редакцию: 18.07.2023

Доработана: 28.07.2023

Принята к публикации: 02.08.2023

Для цитирования

Хорьков Е.В., Мирсаяпов И.Т. Конструктивные особенности восстановления работоспособности каменных сводчатых перекрытий зданий // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 4. № 4. С. 104–117.

Аннотация. Каменные сводчатые перекрытия являются конструкциями устаревшими и возводятся сегодня крайне редко. Несмотря на это, своды часто встречаются в кирпичных зданиях старой постройки. Как правило, эти здания находятся в эксплуатации достаточно продолжительное время, в связи с этим в зданиях отмечаются различные дефекты и повреждения. Одним из наиболее уязвимых мест в этих зданиях являются каменные сводчатые перекрытия. Работы по усилению каменных сводчатых перекрытий ставят ряд конструктивных и технологических задач, требующих определенного подхода к их решению. В данной статье авторами представлены результаты исследования не усиленных и усиленных каменных сводчатых перекрытий, в которые входили численные и физические эксперименты. Также разработаны собственные конструктивные мероприятия по усилению каменных сводчатых перекрытий, основанных на внедрении композитных жгутов в тело кладки, расположенных в оптимальных зонах свода и тем самым позволяющих повысить эффективность и безопасность работ.

Restoration of Damaged Masonry Vaulted Ceilings of Buildings

E. Khorkov^{1*}, I. Mirsayapov¹¹ Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE), I Zelenaya, Kazan, 420043, Russian Federation[*evg-ne@mail.ru](mailto:evg-ne@mail.ru)

Keywords: vault, arch, masonry, spacer system, reinforcement, composite materials, ceiling, support movement.

Article history

Received: 18.07.2023

Revised: 28.07.2023

Accepted: 02.08.2023

Abstract. In this article, the authors present the results of a study of unreinforced and reinforced stone vaulted ceilings, which included numerical and physical experiments. We have also developed our own constructive measures to strengthen stone vaulted ceilings, based on the introduction of composite flexible rods into the body of the luggage in optimal places and, in turn, allowing to increase the efficiency and safety of work. The article presents the process of creating a homogeneous and heterogeneous model, which made it technically possible to solve problems with modeling reinforcement in masonry.

Евгений Владимирович Хорьков, старший преподаватель кафедры железобетонных и каменных конструкций, Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ), 420043, Казань, Зеленая, 1; eLIBRARY SPIN-код: 3430-4203, Scopus: 57218827182, ResearcherID: M-3764-2018, ORCID: 0000-0001-9040-6538, E-mail: evg-ne@mail.ru.

Илшат Талгатович Мирсаяпов, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ), 420043, Казань, Зеленая, 1; eLIBRARY SPIN-код: 621-651, Scopus: 57218826227, ResearcherID: G-7228-2019, ORCID: 0000-0003-4902-6167, E-mail: mirsayapovit@mail.ru.

© Хорьков Е.В., Мирсаяпов И.Т., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

For citation

Khorkov E.V., Mirsaypov I.T. Restoration of Damaged Masonry Vaulted Ceilings of Buildings. *Reinforced concrete structures*. 2023;4(4):104–117.

Based on the results of the analysis of the work of reinforced and non-reinforced arches, it was determined that the method developed by the authors allows increasing the resistance to movement up to 59%, which is a very high indicator and makes this method effective.

ВВЕДЕНИЕ

Строительство каменных зданий и сооружений на территории России началось в X веке, и в качестве перекрытий и покрытий в основном были использованы распорные системы из кладочных материалов, а именно кирпичные своды и арки, большинство из которых просуществовало до наших дней.

В связи с этим возникают вопросы конструктивно-технологического характера по усилению таких конструкций с целью сохранения их несущей способности для дальнейшей эксплуатации.

Так как сводчатые каменные перекрытия являются устаревшими конструкциями и возводятся крайне редко, то дальнейшему исследованию в данном направлении предшествовал обзор литературы, выпущенной с XIX до начала XX веков в России и посвященной расчету и технологии возведения каменных сводов - это работы В.Р. Бернгардта, Н. К. Кривошеина, Н. К. Лахтина. Проведенный обзор литературы позволил определить конструктивные схемы и особенности каменных сводчатых перекрытий зданий постройки до начала XX века на территории России.

Согласно изученной литературы [1–5] в России конструкции сводов (см. рис. 1,2) сильно отличаются от сводов, построенных в Европе или, например в Африке [6], что вносит некоторые детали в исследование. Несмотря на то, что каменные своды устарели и в России практически не применяются, в мире их до сих пор строят [7].

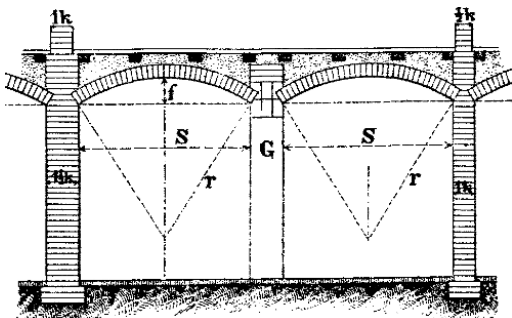


Рис. 1. Конструкции сводчатых перекрытий в России
Figure 1. Vault in Russia



Рис. 2. Сводчатое перекрытие здания по улице Мусы Джалиля 16, г. Казань
Figure 2. Masonry vault 16 Musa Djalil str., Kazan

В России исследованиями арок занимались такие ученые, как П. Т. Михайлов, Н. Н. Поликарпов, К. С. Завриев, Ю. В. Кротов, В. И. Руднев, А.В. Белов, Н. К. Снитко, В. А. Гастев.

Evgeny V. Khorkov, Senior Lecturer of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE), 1 Zelenaya, Kazan, 420043, Russian Federation, eLIBRARY SPIN-код:3430-4203, Scopus:57218827182, ResearcherID: M-3764-2018, ORCID: 0000-0001-9040-6538, E-mail: evg-ne@mail.ru.

Ilshat T. Mirsaypov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE), 1 Zelenaya, Kazan, 420043, Russian Federation, eLIBRARY SPIN-код: 621-651, Scopus:57218826227, ResearcherID: G-7228-2019, ORCID: 0000-0003-4902-6167, E-mail: mirsayapovit@mail.ru.

Оценкой прочности и деформативности арок занимались такие зарубежные ученые, как Leire Garmendia, Ignacio Marcos, Enrico Garbin, Maria Rosa Valluzzi, Silvia Briccoli Bati, Luisa Rovero, Philippe Block, Matt DeJong, John Ochsendorf, Mario Como, Maria Ricamato, Philippe Block.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями в области каменных арочных конструкций мостов на статические и динамические нагрузки занимались такие ученые, как J.F.Chen, H.Tao, Lucio Nobile, V. Bartolomeo, M. Bonagura, D.V.Oliveira, C.Lemos, P.B.Lourenco, S. W. Garrity, C. Melbourne, J. Wang, A. K. Tomor, Rosa Guimarães Atalaia Canhão.

Для получения большей информации о работе каменных сводчатых перекрытий, построенных в России, было обследовано здание гостиницы «Казань» по улице Баумана г. Казань, результаты которых изложены авторами [8]. В этом здании были выявлены основные причины разрушений и деформаций 48 каменных сводов, а именно горизонтальная и вертикальная подвижка опор.

Было определено, что древние арочные системы, подобно другим пространственным конструкциям, способны к частичным изменениям или полной перестройке начальной рабочей схемы за счет своих скрытых резервов. Это подтверждают многочисленные примеры деформированных конструкций, утративших часть вертикальных опор, подпружных арок, связей или других элементов, являющихся принципиальными в начальной теоретической рабочей схеме.

Было установлено, что все виды разрушений и деформаций сводов являются невыполнением одного или нескольких условий существования распорных конструкций. В дальнейших исследованиях за основной фактор повреждений сводов была принята горизонтальная подвижка опор, т.к. по изученной литературе [9,10] и согласно исследованиям, проведенные авторами [8], они в большей степени влияют на изменение НДС распорных систем.

МЕТОД

В данной статье целью исследования является получение экспериментальных данных о деформативности и характере трещинообразования неусиленных и усиленных кирпичных сводов разработанным авторами методом на известково-песчаных растворах с введением факторов разрушения (горизонтальной подвижки опоры).

В рамках исследования были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать деформативность неусиленных сводов на известково-песчаных растворах при нормальной работе с введением фактора разрушения.
2. Исследовать деформативность сводов усиленных разработанным методом с введением факторов разрушения.

Программа экспериментальных исследований представлена на рис. 3.

В качестве метода усиления в данной статье рассматривается метод, основанный на внедрении композиционных стержней (жгутов) в тело каменного свода в определенных местах. Близкими в этом направлении исследования были проведены в [12]. Разработанный метод усиления представлен на рис. 4. Многими авторами [13–16] проведено много исследований каменных арок и сводов, усиленных FRP материалами, и выделен ряд положительных качеств. Особое внимание стоит уделить сцеплению усиливающего элемента с каменной кладкой, что исследовано в [17].



Рис. 3. Блок-схема программы экспериментальных исследований
Figure 3. Experimental research program

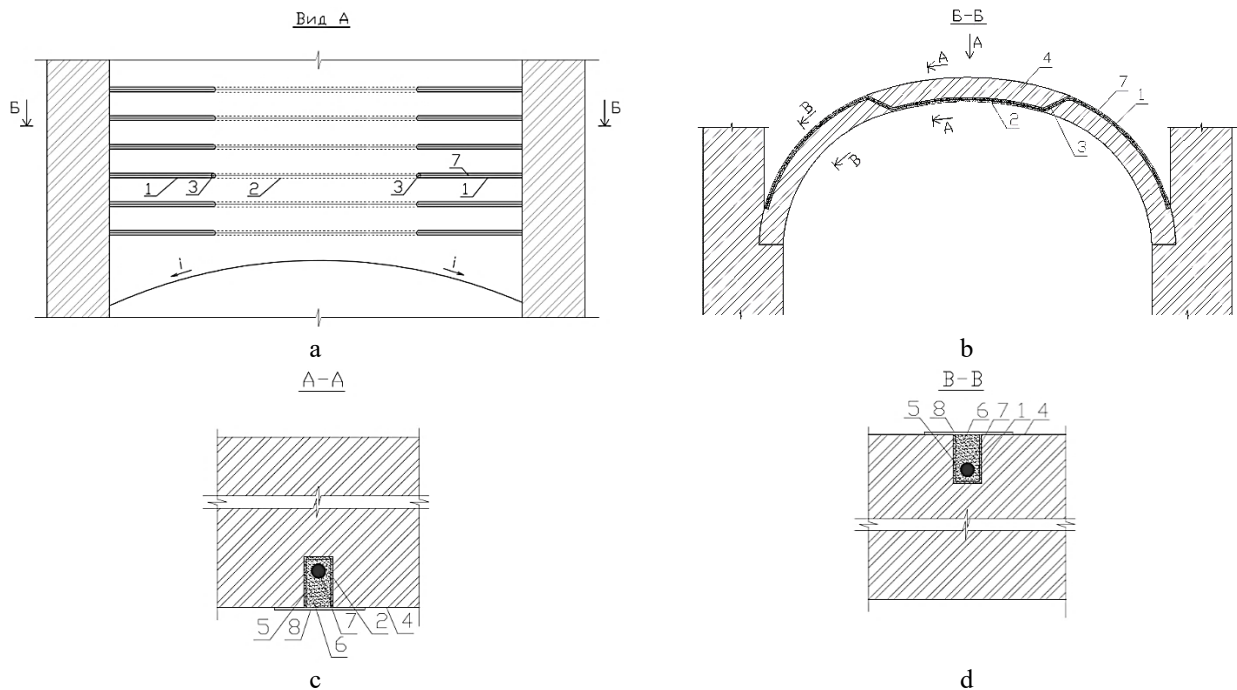


Рис. 4. Схема усиления каменного свода: а – свод в плане; б – каменный свод с устройством; с – разрез А-А, d – разрез В-В. 1 - верхняя штроба, 2 - нижняя штроба, 3 - отверстие 4 - каменный свод, 5 – праймер, 6 – адгезив, 7 - армирующий элемент, 8 - финишный слой.

Figure 4. Scheme of reinforcement of the masonry vault: a - vault in plan; b - stone arch with a device; c - section A-A, d - section B-B. 1 - upper strobe, 2 - lower strobe, 3 - hole 4 - stone vault, 5 - primer, 6 - adhesive, 7 - reinforcing element, 8 - finishing layer.

Экспериментальным исследованиям каменных сводов предшествовало численное исследование с использованием программных комплексов ANSYS. Основной целью численных исследований явилось изучение напряжённо-деформированного состояния неусиленных и усиленных сводчатых перекрытий. Для изучения работы сводов были применены гетерогенная (см. рис. 5) и гомогенная (см. рис. 6) структура. Создание гетерогенной и гомогенной модели сводов связано с технологическими особенностями внедрения элементов усиления в тело модели, а именно с моделированием контактной зоны сцепления углеволоконных жгутов и кладки. В первую очередь моделируется гетерогенная неусиленная модель с отдельными элементами раствора и кирпича, а также создание интерфейсного слоя имитирующего контакт раствора с кирпичом. По результатам анализа численных экспериментов над гетерогенными моделями, а именно схем трещинообразования и схем потери устойчивости, моделируется гомогенная модель свода.

Различные методы построения сводов в ANSYS сильно влияют на результаты, что подтверждают исследования описанные в [10]. Параметры материалов для построения были взяты идентичны физическому эксперименту.

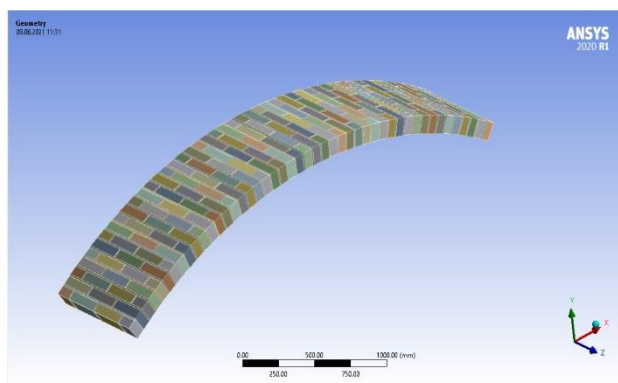


Рис. 5. Экспериментальная конечно-элементная модель свода в гетерогенном исполнении в ПК Ansys

Figure 5. Experimental finite element model of the vault in a heterogeneous design in the Ansys PC

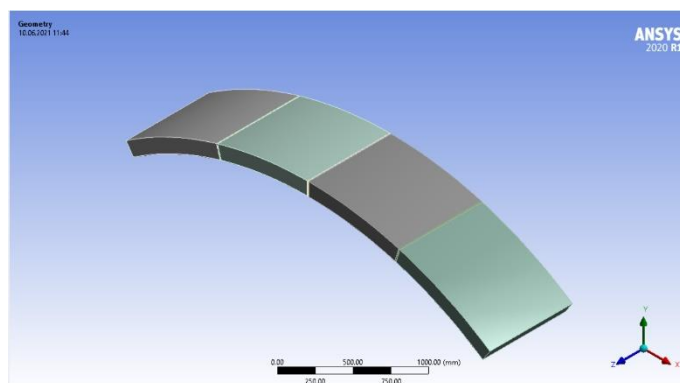


Рис. 6. Экспериментальная конечно-элементная модель свода в гомогенном исполнении в ПК Ansys

Figure 6. Experimental finite element model of the vault in a homogeneous design in the Ansys PC

В лабораторных условиях были изготовлены кирпичные своды серии С-0, СБу-1, СУ-1, СБу-2 и СУ-2 из керамического кирпича по российскому ГОСТ 530-2012 на известково-песчаном растворе марки М4. Последовательность испытаний серий выполнялась согласно программе исследований, изложенной выше.

Усиление кирпичных сводов разработанным способом осуществлялось по следующей технологии: в своде по верхней поверхности пят и по нижней поверхности в области щельги вырезались штробы глубиной 10-12 мм, между нижними и верхними штробами просверливались отверстия для их объединения, поверхность кладки на участках наклейки жгутов очищалась от пыли и зачищалась наждачной бумагой; в зачищенные штробы укладывался эпоксидный клей совместно с углеволоконным жгутом, выполненным из холста методом скрутки. Стоит заметить, что монтаж (внедрение) жгута производилось по всей длине свода непрерывно без разрывов и нахлестов согласно разработанному методу.

Геометрические характеристики экспериментальной модели сводов и места установки индикаторов (И1-И6) и тензодатчиков (Т1-Т13) на серии С-0, СБу-1, СБу-2 и СУ-2 представлены на рис. 7, 8.

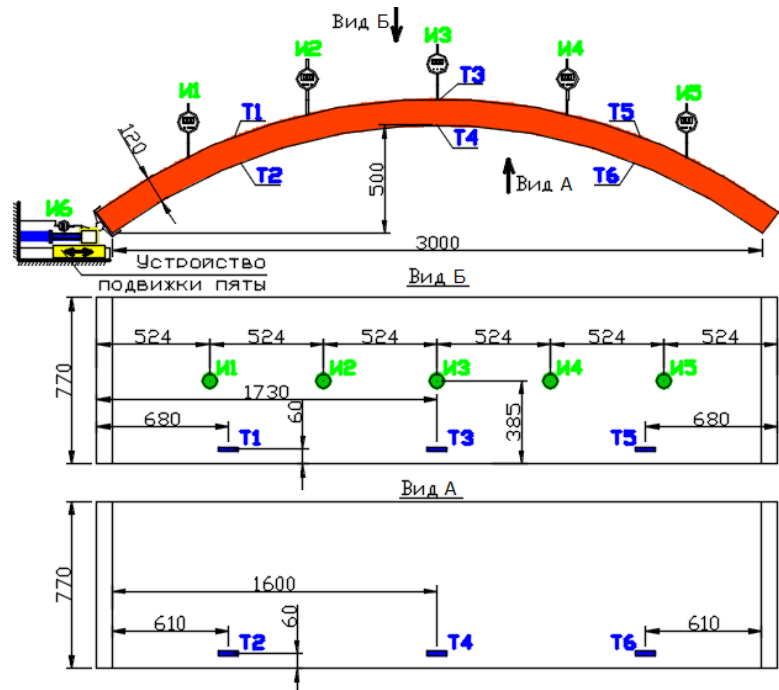


Рис. 7. Геометрические размеры серии С-0, СБу-1, СБу-2. Наименования и места установки индикаторов часового типа и тензодатчиков

Figure 7. Geometrical dimensions of the S-0, SBU-1, SBU-2 series. Names and places of installation of dial gauges and strain gauges

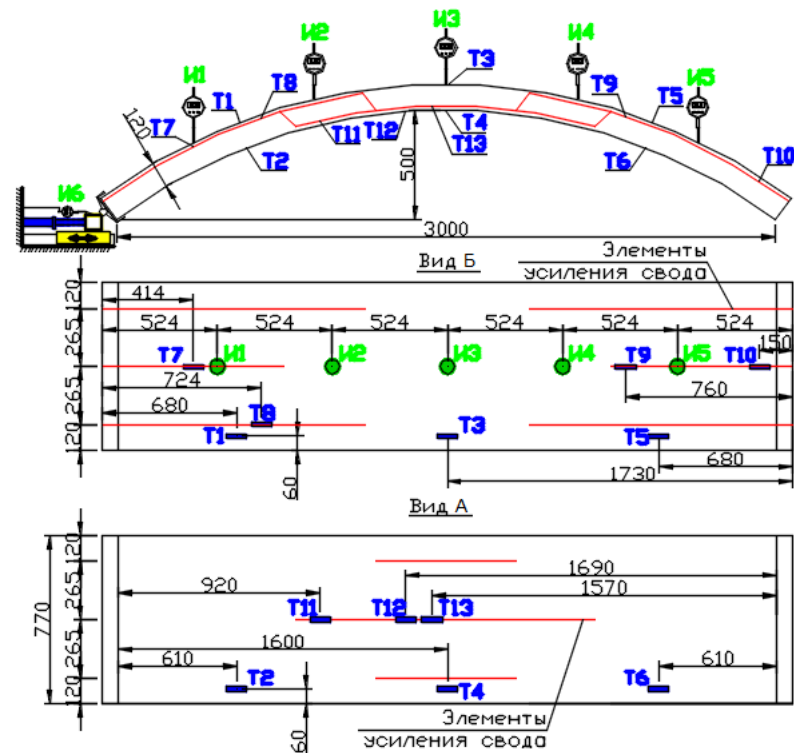


Рис. 8. Геометрические размеры серии СУ-2. Наименования и места установки индикаторов часового типа и тензодатчиков

Figure 8. Geometric dimensions of the SU-2 series. Names and places of installation of dial gauges and strain gauges

Для имитации изменения жёсткости опорного контура (податливости опоры) была выбрана горизонтальная подвижка опор. Создавались подвижки с помощью специально разработанных установок. Подвижка осуществлялась действующим на опору распором от собственной массы свода и приложенной вертикальной нагрузки. Нагрузка на свод осуществлялась путем укладки мешков с песком весом 30 кг каждый и стальными пластинами по 10-20 кг. Контроль за величиной подвижки осуществлялся путем постепенной контролируемой регулировки домкрата и установленного индикатора часового типа (см. рис. 9). Испытания проводились согласно ГОСТ 8829-94.



Рис. 9. Установка для создания горизонтальной подвижки опоры
Figure 9. Installation for creating a horizontal movement of the support

В начале и в конце каждого этапа приложения нагрузки и горизонтальной контролируемой подвижки опоры производились замеры вертикальных перемещений свода, наличия и ширины раскрытия трещин, относительные деформации на верхней и нижней поверхности свода. Для измерения вертикальных перемещений свода были установлены индикаторы часового типа с ценой деления 0.01 мм (И1-И5) в пяти местах (см. рис. 10).



Рис. 10. Усиленный свод серии СУ-2 углеволоконными жгутами.
Figure 10. Reinforced vault of the SU-2 series with carbon fiber bundles.

Величина горизонтальной подвижки опоры измерялась индикатором часового типа № 6, установленном на подвижной опоре (см. рис. 7, 8). Относительные деформации с поверхности свода снимались с помощью проволочных тензорезисторов, подключенных к тензостанции. Ширина раскрытия трещин измерялась микроскопом с точностью 0,01мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Численные эксперименты помогли установить причины и тем самым подтвердить теорию, изложенную в [18], о том, что в большинстве случаев распорные системы, своды зависят от состояния конструкций, удерживающих распор, т. е. от связевого каркаса, контрфорсов, смежных перекрытий и т.п.

Гетерогенная модель свода позволила установить места образования шарниров, спровоцированных развитием трещин в теле свода, и определить точный механизм разрушения (см. рис. 11). Результаты экспериментов над гетерогенными моделями сводов позволили более точно создать гомогенные модели (см. рис. 12), в тела которых стало технически возможным интегрировать элементы усиления.

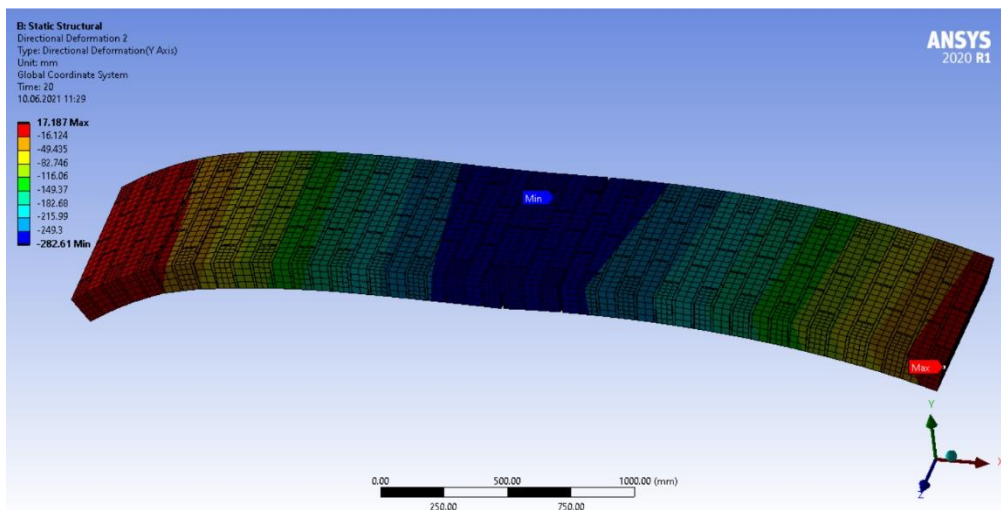


Рис. 11. Изополю вертикальных перемещений свода, выполненного в гетерогенном исполнении в ПК Ansys
Figure 11. Vertical displacements of the heterogeneous vault in the Ansys PC

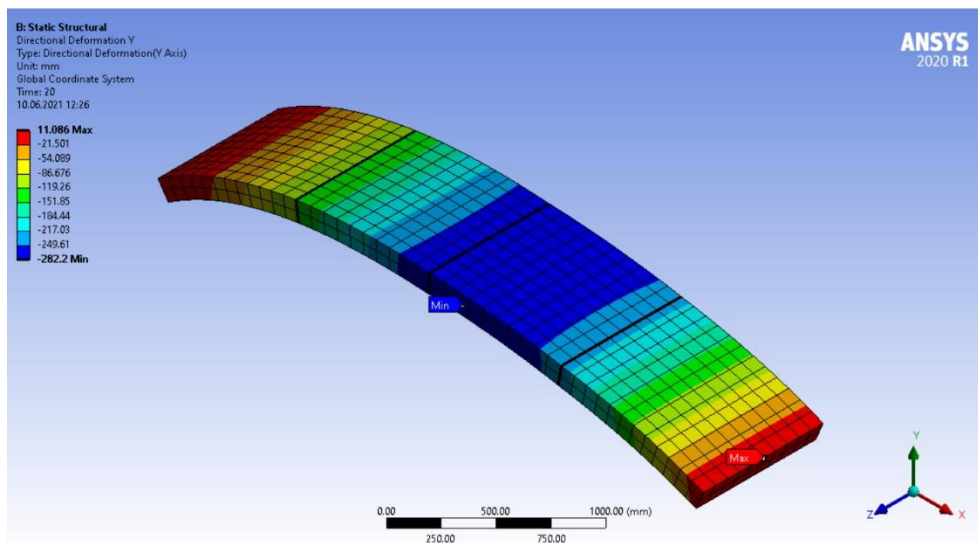


Рис. 12. Изополю прогибов свода, выполненного в гомогенном исполнении в ПК Ansys
Figure 12. Vertical displacements of the homogeneous vault in the Ansys PC

Ряд проведенных численных экспериментов над усиленными сводами, выполненных в гомогенном исполнении, с различными вариациями установки элементов усиления определил необходимый перечень задач, требующих детального внимания при проведении физических экспериментов, а также позволил определить более рациональное месторасположение и оптимальный угол прохода жгутов через тело свода.

Проведенные физические эксперименты показали следующие результаты.

В серии С-0 при общей нагрузке на свод 6,5 кН трещин обнаружено не было.

При общей нагрузке 6,8 кН замечено появление трещины №1 на нижней поверхности свода, замеры которой были сняты со стороны №1 шириной раскрытия 0,2 мм, высотой раскрытия 68 мм и со стороны №2 шириной раскрытия 0,15 мм, высотой трещины 42 мм (см. рис. 13).

При общей нагрузке 7,2 кН трещина №1 увеличилась и со стороны №1 была зафиксирована ширина раскрытия 0,3 мм, высота раскрытия 83 мм, со стороны №2 ширина раскрытия 0,2 5мм, высота трещины 60 мм.

На заключительном этапе нагружения (при общей нагрузке 7,4 кН) ширина раскрытия трещины №1 осталось неизменной и сохранилось 0,3 мм, при этом увеличилась высота трещины на стороне №1 и составила 86 мм. Высота сжатой зоны над трещиной составила 28 мм.

Далее при сохранении нагрузки на свод равной 7,4 кН производилась последовательная контролируемая горизонтальная подвижка опоры с 0 мм до 80 мм, при которой произошло обрушение свода в следствии потери устойчивости. В течении всего эксперимента наблюдения велись за единственной трещиной №1, результаты развития которой сведены в таблицу 1 ниже. К потери устойчивости свода привело появление трещины №2 на верхней поверхности свода, появление которой было мгновенным и зафиксировать ширину трещины не удалось.

Таблица 1

История развития трещины №1 в серии С-0

Величина горизонтальной подвижки, мм	Ширина раскрытия трещины, мм / высота трещины, мм	
	Трещина №1	
	Сторона свода №1	Сторона свода №2
2,5	0,6	0,5
5	0,6/91	0,5/61
7,5	0,8/91	0,5/61
10	1,1/93	0,9/90
15	1,8 /95	1,5/91
20	3,0/98	2,8/92
25	4,5	3,6
30	5,0	4,8
35	6,0	6,0
40	7,0	7,0
45	8,0	7,1
50	9,0	8,0
60	11,0	9,5
70	13,0	11,0
80	Обрушение	

Table 1

The history of the development of crack No. 1 in the C-0 series

The amount of horizontal movement, mm	Crack opening width, mm / crack height, mm	
	Crack No 1	
	Vault side No 1	Vault side No 2
2.5	0.6	0.5
5	0.6/91	0.5/61
7.5	0.8/91	0.5/61
10	1.1/93	0.9/90
15	1.8 /95	1.5/91
20	3.0/98	2.8/92
25	4.5	3.6

Cont. of Table 1

The amount of horizontal movement, mm	Crack opening width, mm / crack height, mm	
	Crack No 1	
	Vault side No 1	Vault side No 2
30	5.0	4.8
35	6.0	6.0
40	7.0	7.0
45	8.0	7.1
50	9.0	8.0
60	11.0	9.5
70	13.0	11.0
80	Failure	

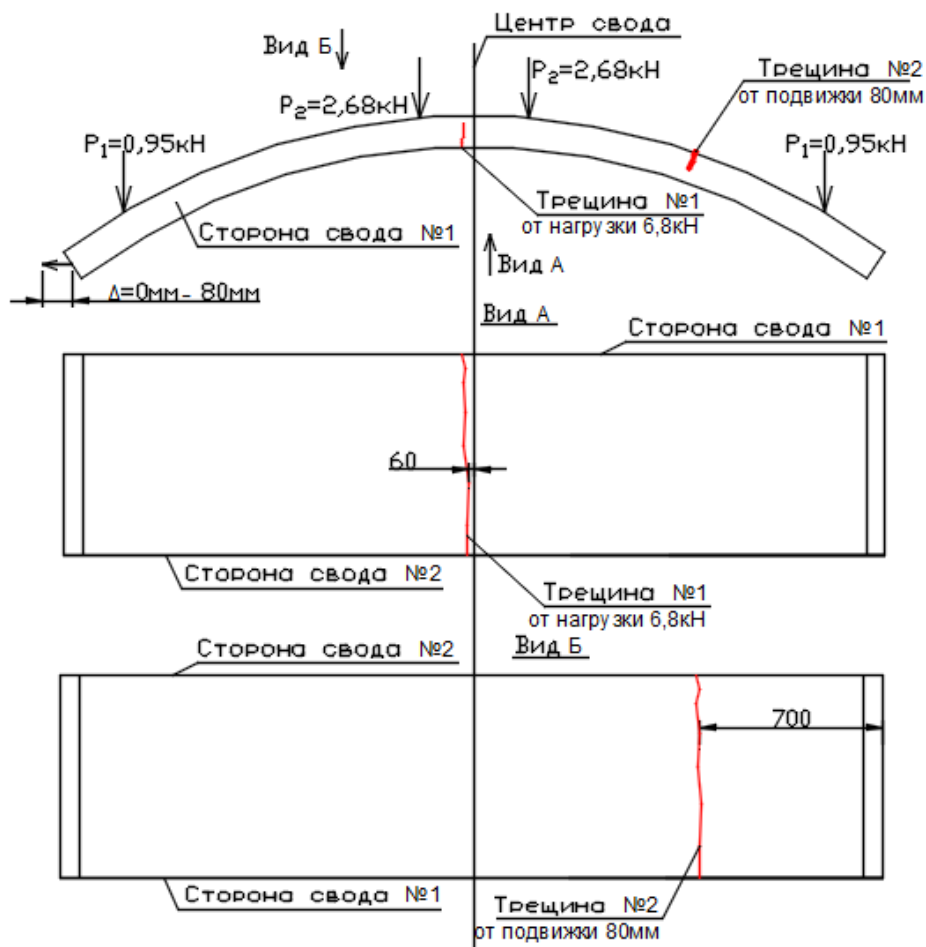


Рис. 13. Схема трещинообразования неусиленного свода серии С-0 при подвижке опоры до разрушения
Figure 13. Scheme of cracking of non-reinforced vault of C-0 series during support movement until collapse

Описание трещинообразования и развития трещин объекта С-2, в которую входили не усиленный свод серии СБу-2, а также усиленный свод серии СУ-2 описано ниже.

В серии СБу-2 на последнем этапе нагружения, при приложенной общей нагрузке 7,26 кН было обнаружено образование трещины №1 по нижней поверхности свода, которая проявилась на стороне №1 шириной раскрытия 0,1 мм (высота трещины 87,3 мм) и на стороне №2 шириной раскрытия 0,2 мм (высота трещины 74,9 мм). Расположение трещины №1 находилось 150 мм от центра свода. До окончания испытания трещина №1 была единственной. Далее для сокращения текстовой части в таблице 2 описывается история развития трещины №1.

Таблица 2

История развития трещины №1 в серии СБу-2

Величина горизонтальной подвижки, мм	Величина разгрузки, кН	Ширина раскрытия трещин / высота трещины, мм	
		Трещина №1	
		Сторона свода №1	Сторона свода №2
Горизонтальная подвижка опоры			
0,5	-	0,1 / 87,3	0,2 / 84,5
1,0	-	0,3/97,6	0,3/84,5
1,5	-	0,4/97,6	0,4/100
2	-	0,5/100	0,4/108,4
2,5	-	0,6	0,5
3	-	0,7	0,6
Разгрузка свода			
-	-1	0,7	0,6
-	-1,15	0,6	0,5
-	-1	0,5	0,5
-	-0.97	0,4	0,4
-	-1.2	0,2	0,2
-	-0.6	0,05	0,05
-	-1.34	0,05	0,05

Table 2

The history of the development of crack No. 1 in the СБу-2 series

The amount of horizontal movement, mm	Load, kN	Crack opening width, mm / crack height, mm	
		Crack No. 1	
		Vault side No 1	Vault side No 2
horizontal movement of the support			
0.5	-	0.1 / 87.3	0.2 / 84.5
1.0	-	0.3/97.6	0.3/84.5
1.5	-	0.4/97.6	0.4/100
2	-	0.5/100	0.4/108.4
2.5	-	0.6	0.5
3	-	0.7	0.6
Vault unloading			
-	-1	0.7	0.6
-	-1.15	0.6	0.5
-	-1	0.5	0.5
-	-0.97	0.4	0.4
-	-1.2	0.2	0.2
-	-0.6	0.05	0.05
-	-1.34	0.05	0.05

Свод серии СБу-2 после снятия полной нагрузки и сохранения подвижки опоры равной 3мм усиливался путем внедрения в тело кладки углеволоконных жгутов и в последующем данный усиленный свод под серией СУ-2 исследовался под нагрузкой и воздействию горизонтальной подвижки опоры до разрушения. Ниже приведена история трещинообразования и развития трещин усиленного свода СУ-2.

В серии СУ-2 на окончательном этапе нагружения при нагрузке 7,26 кН трещина №1, полученная в ходе эксперимента над серией СБу-2, увеличила ширину раскрытия с 0,05 мм до 0,3 мм (см. рис. 14).

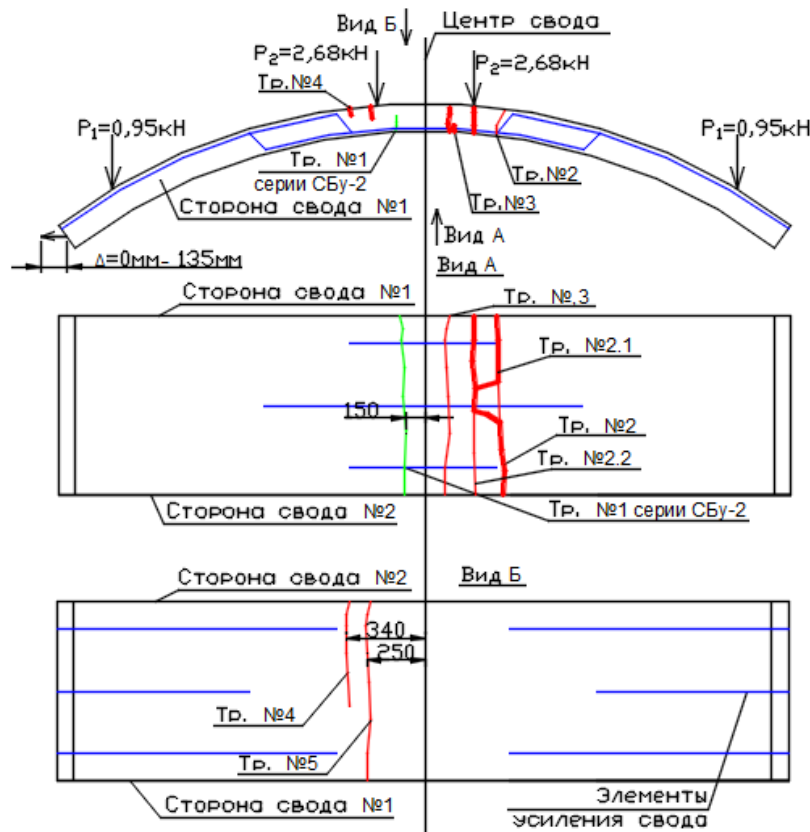


Рис. 14. Схема трещинообразования неусиленного свода серии СБу-2 и усиленного свода серии СУ-2 при подвижке опоры до разрушения

Figure 14. Scheme of cracking of an unreinforced arch of the SB-2 series and a reinforced arch of the SU-2 series during the movement of the support until collapse

При горизонтальной подвижке равной 3 мм замечено образование трещины №2 на стороне свода №2 с шириной раскрытия 0,2 мм и с высотой трещины 57 мм. Со стороны №1 было обнаружено появление трещины №2.1 с шириной раскрытия 0,05 мм.

При горизонтальной подвижке равной 4 мм замечено образование трещины №3 с шириной раскрытия 0,05 мм и с высотой трещины 34 мм, а также увеличение высоты трещины №2 до 77 мм с сохранением ширины раскрытия 0,2 мм, при этом трещина №1 не развивалась и сохранила ширину раскрытия 0,4 мм до разрушения конструкции. Трещина №2 образовалась на стороне свода №1 со смещением к центру свода, тем самым линия прохождения трещины по нижней поверхности свода приобрела нелинейный характер. На стороне №1 трещина №2 имеет ширину раскрытия 0,2 мм, высоту трещины 78 мм.

При горизонтальной подвижке равной 9 мм было замечено резкое увеличение группы трещин, сопровождавшееся резким хрустом свода. Трещина №2 на стороне №2 увеличилась до 0,5 мм с высотой трещины 115 мм, со стороны №1 ширина увеличилась до 1,2 мм с высотой трещины 110 мм. Было обнаружено появление трещины №2.2 с шириной раскрытия 0,1 мм.

При горизонтальной подвижке равной 40 мм трещина №2 на стороне №1 и №2 увеличила ширину раскрытия до 4,4 мм, при этом высота сжатой зоны над трещиной не изменилась. Основной прирост на данном этапе замечен у трещины №2.1 до 2,1 мм (высота сжатой зоны практически не заметна и не поддается замеру). Над трещиной замечено вспучивание тонкого штукатурного слоя от смятия сжатой зоны.

При горизонтальной подвижке 45 мм и до заключительной подвижки 135 мм основной прирост имеют трещины №2 и №2.1, которые объединяются в середине ширины свода, поэтому основное внимание в эксперименте уделяется им.

При величине горизонтальной подвижки 95 мм на нижней поверхности свода произошел разрыв центрального жгута.

При величине горизонтальной подвижки 125 мм при ширине раскрытия трещин №2 и №2.1 равном 16,6 мм и 18,6 мм соответственно обнаружено появление трещины № 4 на верхней поверхности шириной раскрытия 0,1 мм.

При величине горизонтальной подвижки 135 мм произошло обрушение конструкции вследствие потери устойчивости после разрыва сечения трещиной №5 в зоне трещины №4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследована деформативность неусиленных сводов на известково-песчаных растворах при воздействии вертикальной нагрузки и влияния фактора разрушения, как горизонтальная подвижка опоры. Оказалось, что на трещинообразование в большей степени оказывает податливость опор. Механизм разрушения свода связан с образованием четвертого шарнира, в свою очередь спровоцированного разрывом кладки на верхней поверхности свода. Разрушение свода произошло на расстоянии 1/4 пролета свода в зоне максимального изгибающего момента. Максимальная горизонтальная подвижка при этом составила 80 мм.

2. Исследована деформативность свода, усиленного разработанным методом с введением фактора разрушения. Усиление сводов путем внедрения композитных углеволоконных жгутов в тело кладки позволило повысить несущую способность и увеличить выносливость к подвижке опор на 59%. Образование четвертого шарнира в усиленных сводах происходит ближе к щельге в зоне минимального армирования или в зоне перехода жгутов с верхней поверхности на нижнюю.

В результате проведенного исследования определено, что предложенный метод усиления каменных арок позволяет значительно увеличить несущую способность.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают благодарность за предоставленную помощь главному технологу компании ООО “Гидрозо” Батурину Сергею Александровичу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Torres B. et al.* Experimental investigation of a full-scale timber masonry cross vault subjected to vertical settlement // *Constr. Build. Mater.* Elsevier Ltd, 2019. Vol. 221. Pp. 421–432.
2. *Angjeliu G., Cardani G., Coronelli D.* A parametric model for ribbed masonry vaults // *Autom. Constr.* Elsevier, 2019. Vol. 105, № May 2018. Pp. 102785.
3. *Marini A. et al.* Lightweight extrados restraining elements for the anti-seismic retrofit of single leaf vaults // *Eng. Struct.* Elsevier Ltd, 2017. Vol. 141. Pp. 543–554.
4. *Olivito R.S., Olivito R.S.* Experimental and analytical analysis on a Analysis masonry arch strengthened with basalt FRCM Experimental and analytical analysis on a masonry arch basalt // *Procedia Struct. Integr.* Elsevier B.V., 2020. Vol. 24, № 2019. Pp. 310–318.
5. *Castori G., Borri A., Corradi M.* Behavior of thin masonry arches repaired using composite materials // *Compos. Part B Eng.* Elsevier Ltd, 2016. Vol. 87. Pp. 311–321.
6. *Ramage M. et al.* Rwanda Cricket Stadium: Seismically stabilised tile vaults // *Structures.* Elsevier, 2019. Vol. 18, № December 2018. Pp. 2–9.
7. *Gohnert M., Bulovic I., Bradley R.* A Low-cost Housing Solution: Earth Block Catenary Vaults // *Structures.* Elsevier Ltd on behalf of Institution of Structural Engineers, 2018. Vol. 15. Pp. 270–278.
8. *Pavlov V., Khorkov E., Mirsaypov I.* Experimental research of masonry arches under the influence of the movement of supports // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* 2020. 890.
9. *Gattesco N., Boem I., Andretta V.* Experimental behaviour of non-structural masonry vaults reinforced through fibre-reinforced mortar coating and subjected to cyclic horizontal loads // *Eng. Struct.* Elsevier, 2018. Vol. 172, № May. Pp. 419–431.
10. *Zampieri P. et al.* Collapse displacements of masonry arch with geometrical uncertainties on spreading supports // *Comput. Struct.* Elsevier Ltd, 2018. Vol. 208. Pp. 118–129.
11. *Valente M., Milani G.* Damage assessment and partial failure mechanisms activation of historical masonry churches under seismic actions: Three case studies in Mantua // *Eng. Fail. Anal.* Elsevier, 2018. Vol. 92, № April. Pp. 495–519.

12. Zampieri P. et al. A review of methods for strengthening of masonry arches with composite materials // *Eng. Struct.* Elsevier, 2018. Vol. 171, № December 2017. Pp. 154–169.
13. Santis S. De. Bond behaviour of Steel Reinforced Grout for the extrados strengthening of masonry vaults // *Constr. Build. Mater.* Elsevier Ltd, 2017. Vol. 150. Pp. 367–382.
14. Carozzi F.G. et al. Ancient masonry arches and vaults strengthened with TRM, SRG and FRP composites: Experimental evaluation // *Compos. Struct.* 2018. Vol. 187. Pp. 466–480.
15. Wang X., Lam C.C., Iu V.P. Comparison of different types of TRM composites for strengthening masonry panels // *Constr. Build. Mater.* Elsevier Ltd, 2019. Vol. 219. Pp. 184–194.
16. Alecci V. et al. Experimental investigation on masonry arches strengthened with PBO-FRCM composite // *Compos. Part B Eng.* Elsevier Ltd, 2016. Vol. 100. Pp. 228–239.
17. Kouris L.A.S., Triantafillou T.C. State-of-the-art on strengthening of masonry structures with textile reinforced mortar (TRM) // *Constr. Build. Mater.* Elsevier Ltd, 2018. Vol. 188. Pp. 1221–1233.
18. Aydin A.C., Özkaya S.G. The finite element analysis of collapse loads of single-spanned historic masonry arch bridges (Ordu, Sarpdere Bridge) // *Eng. Fail. Anal.* Elsevier, 2018. Vol. 84, № June 2017. Pp. 131–138.

REFERENCES

1. Torres B. et al. Experimental investigation of a full-scale timber masonry cross vault subjected to vertical settlement. *Constr. Build. Mater.* 2019. Vol. 221. Pp. 421–432.
2. Angjeliu G., Cardani G., Coronelli D. A parametric model for ribbed masonry vaults. *Autom. Constr.* 2019. Vol. 105, № May 2018. Pp. 102785.
3. Marini A. et al. Lightweight extrados restraining elements for the anti-seismic retrofit of single leaf vaults. *Eng. Struct.* 2017. Vol. 141. Pp. 543–554.
4. Olivito R.S., Olivito R.S. Experimental and analytical analysis on a Analysis masonry arch strengthened with basalt FRCM Experimental and analytical analysis on a masonry arch basalt. *Procedia Struct. Integr.* 2020. Vol. 24. Pp. 310–318.
5. Castori G., Borri A., Corradi M. Behavior of thin masonry arches repaired using composite materials. *Compos. Part B Eng.* 2016. Vol. 87. Pp. 311–321.
6. Ramage M. et al. Rwanda Cricket Stadium: Seismically stabilised tile vaults. *Structures.* 2019. Vol. 18. Pp. 2–9.
7. Gohnert M., Bulovic I., Bradley R. A Low-cost Housing Solution: Earth Block Catenary Vaults. *Structures.* 2018. Vol. 15. Pp. 270–278.
8. Pavlov V., Khorkov E., Mirsayapov I. Experimental research of masonry arches under the influence of the movement of supports. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* 2020. Vol. 890.
9. Gattesco N., Boem I., Andretta V. Experimental behaviour of non-structural masonry vaults reinforced through fibre-reinforced mortar coating and subjected to cyclic horizontal loads. *Eng. Struct.* 2018. Vol. 172. Pp. 419–431.
10. Zampieri P. et al. Collapse displacements of masonry arch with geometrical uncertainties on spreading supports. *Comput. Struct.* 2018. Vol. 208. Pp. 118–129.
11. Valente M., Milani G. Damage assessment and partial failure mechanisms activation of historical masonry churches under seismic actions: Three case studies in Mantua. *Eng. Fail. Anal.* 2018. Vol. 92. Pp. 495–519.
12. Zampieri P. et al. A review of methods for strengthening of masonry arches with composite materials. *Eng. Struct.* 2018. Vol. 171. Pp. 154–169.
13. Santis S. De. Bond behaviour of Steel Reinforced Grout for the extrados strengthening of masonry vaults. *Constr. Build. Mater.* 2017. Vol. 150. Pp. 367–382.
14. Carozzi F.G. et al. Ancient masonry arches and vaults strengthened with TRM, SRG and FRP composites: Experimental evaluation. *Compos. Struct.* 2018. Vol. 187. Pp. 466–480.
15. Wang X., Lam C.C., Iu V.P. Comparison of different types of TRM composites for strengthening masonry panels. *Constr. Build. Mater.* 2019. Vol. 219. Pp. 184–194.
16. Alecci V. et al. Experimental investigation on masonry arches strengthened with PBO-FRCM composite. *Compos. Part B Eng.* 2016. Vol. 100. Pp. 228–239.
17. Kouris L.A.S., Triantafillou T.C. State-of-the-art on strengthening of masonry structures with textile reinforced mortar (TRM). *Constr. Build. Mater.* 2018. Vol. 188. Pp. 1221–1233.
18. Aydin A.C., Özkaya S.G. The finite element analysis of collapse loads of single-spanned historic masonry arch bridges (Ordu, Sarpdere Bridge). *Eng. Fail. Anal.* 2018. Vol. 84. Pp. 131–138.