

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

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

²ФГАУО 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.

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 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. Hojdyś 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., 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. 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. 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.

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. Pavlov V.V., Har'kov E.V. Vosstanovlenie rabotosposobnosti kamennyh arok i svodov. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2017. № 6(65). Str. 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. Jasięńko 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. Hojdyś Ł. Wpływ wzmocnienia materiałami kompozytowymi sklepień murowych na ich nośność. Kraków, 2010.
10. Orlovich R.B., Derkach V.A. Zarubezhnyj opyt armirovaniya kamennyh konstrukcij [Текст]. *ZHilishchnoe stroitel'stvo*, 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., Jasięńko 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., Toniatti 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. 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