УДК 69.07

© Е. С. Енкина, магистрант

© А. Л. Туккия, старший преподаватель

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: Enkina.k@yandex.ru, atlector@mail.ru

© А. В. Мельников, канд. техн. наук, исп. директор

© О. В. Голых, канд. техн. наук, главный конструктор
(ООО «ИК «Город-А»)

E-mail: a.melnikov@ec-goroda.ru, o.golykh@ec-goroda.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-2-42-48

© E. S. Enkina, undergraduate

© A. L. Tukkiya, senior lecturer

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: Enkina.k@yandex.ru, atlector@mail.ru

© A. V. Melnikov, PhD in Sci. Tech., ED

© O. V. Golykh, PhD in Sci. Tech., Chief Designer
(LLC EC «Gorod-A», St. Petersburg, Russia)

E-mail: a.melnikov@ec-goroda.ru, o.golykh@ec-goroda.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ БАЛОК В СОСТАВЕ СВОДЧАТОГО КИРПИЧНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF METAL BEAMS AS A PART OF A VAULTED BRICK SLAB

Работа металлической балки в составе кирпичного свода мало изучена. Для исследования напряженно-деформированного состояния балки было проведено натурное испытание участка сводчатого кирпичного перекрытия. Описана методика проведения натурного испытания металлической балки в составе кирпичного свода, а также приведены результаты испытания. По результатам выполненного исследования делается вывод о достаточно высоком запасе несущей способности металлической балки в рассматриваемых условиях.

Ключевые слова: металлическая балка, кирпичные своды, несущая способность, натурное испытание.

Up to now, the performance of the metal beam as a part of brick vault has been studied very little. There was carried out an in-place test of the vaulted brick slab section to explore the stress-strain state of the beam. The method of conducting the in-place test of the metal beam as a part of brick vault is described and the test results are submitted. Based on the results of the study, the authors have come to the conclusion that the bearing capacity of the metal beam is sufficiently high under the regarded conditions.

Keywords: metal beam, brick vaults, bearing capacity, in-place test.

Перекрытия в виде кирпичных сводов по металлическим балкам (рис. 1) широко распространены в исторических зданиях на территории Санкт-Петербурга. Такие перекрытия наиболее часто встречаются над подвалами жилых зданий дореволюционного периода постройки, а также в качестве междуэтажных перекрытий производственных и общественных зданий. Конструкции с заполнением в виде сводиков из каменной кладки придают жесткость перекрытию, они более огне- и коррозионностойки и, соответственно, долговечны по сравнению с деревянными перекрытиями. К недостаткам таких перекрытий можно отнести большой собственный вес и сложность возведения (необходимость применения кружал) [1].

При обследовании зданий, где в качестве перекрытий над подвалом применены подобные конструкции, отмечено, что металлические балки находятся в неблагоприятном температурно-влажностном режиме, что приводит к их коррозии и, соответственно, уменьшению сечения, порой даже к полной утрате нижней полки балки, при этом прогибы перекрытия могут отсутствовать.

На сегодняшний день нормативной методики расчета несущей способности перекрытий такого типа не существует. Учет совместной работы металлической балки и кирпичных сводиков не изучен. Напряженно-деформированное состояние металлических балок в составе перекрытия остается неизвестным.

Рис. 1. Принципиальный разрез перекрытия и фотография общего вида

В поверочных расчетах таких конструкций металлическую балку принято рассматривать как отдельный стержневой элемент, который рассчитывается как однопролетная шарнирноопертая балка, загруженная весом кирпичного заполнения, поэтому около 35–50 % запаса прочности металлической балки приходится на нагрузку от веса кирпичного заполнения. При подобном подходе определения несущей способности металлических балок на различных объектах в Санкт-Петербурге при варьирующихся параметрах перекрытия (длина пролета, сечение балки, высота сводчатого перекрытия и прочее) коэффициент использования находится в пределах 1,6...2,2. Полученный результат противоречит фактическому состоянию конструкции перекрытия [1–5], так как по результатам визуального обследования этих перекрытий дефекты, свидетельствующие о превышении несущей способности металлических балок (значительные прогибы, трещины по сводам и прочее), зачастую не отмечены. На основании этого можно предположить, что в металлических балках не возникает значительных изгибающих напряжений. Для подтверждения вышесказанного было проведено натурное испытание участка сводчатого кирпичного перекрытия по металлическим балкам.

Целью настоящей работы являются экспериментальные исследования несущей способности металлических балок в составе сводчатого кир-

пичного перекрытия путем проведения натурного испытания.

Описание объекта исследования

Участок испытываемого перекрытия над подвалом представлен на рис. 2. Предварительно были выполнены работы по обследованию и обмерам рассматриваемого участка. Дефектов и повреждений отмечено не было. Участок перекрытия выполнен в виде кирпичных сводов по металлическим балкам. Толщина свода 250 мм, высота подъема стрелы 110...170 мм, сечение балок — двутавр № 18 по германскому нормальному сортаменту с моментом сопротивления $W_x = 161 \text{ см}^3$. Шаг балок 0,78...1,07 м, пролет испытываемой балки — 4,6 м, величина заделки в кирпичную стену — 250 мм.

На момент проведения испытаний над перекрытием была установлена кирпичная перегородка толщиной 120 мм, которая не включается в пространственную работу конструкций и не оказывает влияния на полученные результаты.

Подготовка и проведение испытания

В ходе работ по обследованию были отобраны образцы металла, кирпича и раствора для ла-

Рис. 2. Принципиальная схема установки приборов

бораторных испытаний и определены механические характеристики материалов конструкций.

Прочность материала кладки камня и раствора определена путем испытания проб согласно ГОСТ 8462–85. По результатам испытаний — марка кирпича М75 и марка раствора М25. В соответствии с табл. 2¹ расчетное сопротивление кладки сжатию $R = 1,1$ МПа.

Предел текучести стали определен путем испытания образцов на растяжение согласно ГОСТ 1497–84. Минимальное значение предела текучести составило $R_{yn} = 244,5$ МПа. Согласно п. 18.2.4² расчетное сопротивление стали R_y определяется по минимальному пределу текучести с учетом коэффициента надежности по материалу $\gamma_m = 1,2$:

$$R_y = \frac{R_{yn}}{\gamma_m}; \quad (1)$$

$$R_y = \frac{244,5}{1,2} = 203,8 \text{ МПа.}$$

Принимаем расчетный пролет с учетом величины заделки балки в кирпичную стену:

$$l_0 = l + \frac{2}{3}l', \quad (2)$$

где l — пролет балки в свету, м; l' — величина заделки балки в кирпичную стену, м,

$$l_0 = 4,61 + \frac{2}{3} \cdot 0,25 = 4,78 \text{ м.}$$

Изгибающий момент от расчетной нагрузки q

$$M = \frac{ql_0^2}{8}. \quad (3)$$

Расчет на прочность выполняем по формуле (4)¹

$$\frac{M}{W_x R_y} < 1. \quad (4)$$

При ширине грузовой полосы $a = \frac{0,93 + 0,78}{2} = 0,855$ м максимальная нагрузка, которую может нести данная балка при аналогичных условиях, составляет

$$q = \frac{8W_x R_y}{al_0^2}; \quad (5)$$

$$q = \frac{8 \cdot 161 \cdot 203,8}{0,855 \cdot 4,78^2} = 1372 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}.$$

Программа испытания предусматривает поэтапное нагружение перекрытия вертикальной нагрузкой до требуемого уровня с последующей

¹ СП 15.13330.2012. Каменные и армокаменные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-22–81*.

² СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23–81*.

полной разгрузкой. Полная вертикальная равномерно распределенная нагрузка на перекрытие создается штучными грузами, без учета веса кирпичного заполнения сводов. Нагрузка от веса свода составляет 495 кг/м^2 , от веса кирпичной перегородки — 176 кг/м^2 . На каждом этапе нагружения выдержка нагрузки составляла 10–15 мин для проведения визуального осмотра состояния конструкции, регистрации показаний приборов.

Принципиальная схема нагружения перекрытия при проведении испытаний представлена на рис. 3. Схема и очередность расположения грузов на перекрытии приняты таким образом, чтобы на уровнях контрольных нагрузок в первую очередь создать наиболее близкое к равномерному нагружение балки. На рис. 4 приведены фотографии этапов загрузки. В испытании задействовано 10,8 т сыпучих материалов, общая площадь загрузки $6,5 \text{ м}^2$.

Контрольные значения прогибов определены на основании моделирования перекрытия в программном комплексе и результатов статического расчета перекрытия, выполненного с использованием конечно-элементной модели.

Прогибы измерялись прогибомерами 6ПАО с ценой деления $0,01 \text{ мм}$ (рис. 5). Также была

Рис. 3. Схема нагружения перекрытия

Рис. 4. Загружение балки штучными материалами

установлена тензостанция для обработки сигналов тензометрических датчиков сопротивления, которые размещались на нижней полке основной испытуемой балки. Предварительно поверхность нижней полки балки была очищена и подготовлена к установке тензометрических датчиков (рис. 6). Схема установки приборов пред-

ставлена на рис. 2. Нулевые показания приборов соответствуют нагружению балки от веса кирпичного заполнения сводов и от веса кирпичной перегородки.

Результаты испытаний

Значения прогибов металлической балки в зависимости от нагрузки сведены в табл. 1.

Рис. 5. Установка прогибомеров

Рис. 6. Установка тензометрического датчика (слева), тензостанция (справа)

Таблица 1

Вертикальные перемещения расчетных точек балки

Обработка результатов испытаний по этапам	Нормативная нагрузка от загрузки, кг/м ²	Экспериментальные вертикальные перемещения, мм					
		Точка № 1	Точка № 2	Точка № 3	Точка № 4	Точка № 5	Точка № 6
1-й этап — С1 загрузка	160	0	0	0	0	0	0
2-й этап — С2 загрузка	320	0,02	0,14	0,03	0,01	0,11	0,02
3-й этап — С3 загрузка	480	0,06	0,27	0,09	0,03	0,26	0,07
4-й этап — С4 загрузка	640	0,12	0,45	0,14	0,05	0,46	0,1
5-й этап — С5 загрузка	800	0,18	0,63	0,22	0,13	0,61	0,23
6-й этап — С6 загрузка	960	0,19	0,78	0,21	0,13	0,71	0,22
7-й этап — С7 загрузка	1120	0,24	1,0	0,24	0,17	0,88	0,25
8-й этап — С8 загрузка	1280	0,29	1,21	0,31	0,15	0,98	0,24
9-й этап — С9 загрузка	1440	0,31	1,26	0,31	0,23	1,15	0,31
10-й этап — С10 загрузка	1600	0,33	1,46	0,32	0,25	1,27	0,31
11-й этап — С11 разгрузка	1120	0,34	1,43	0,34	0,26	1,19	0,31
12-й этап — С12 разгрузка	960	0,34	1,33	0,35	0,25	1,08	0,3
13-й этап — С13 разгрузка	640	0,28	1,08	0,3	0,23	0,84	0,29
14-й этап — С14 разгрузка	160	0,16	0,51	0,21	0,11	0,3	0,14

Таблица 2

Напряжения в расчетных точках балки

Обработка результатов испытаний по этапам	Нормативная нагрузка от загрузки, кг/м ²	Экспериментальные напряжения, МПа		
		Точка № 1	Точка № 2	Точка № 3
0-й этап	0	0,09*	-0,09	-0,1
1-й этап — С1 загрузка	160	0,09*	-0,09	-0,1
2-й этап — С2 загрузка	320	-16,3*	-0,6	-0,2
3-й этап — С3 загрузка	480	-12,3*	-0,5	-0,1
4-й этап — С4 загрузка	480	-17,0*	-0,3	0,19
4-й этап — С4 загрузка	640	-16,3*	0,8	0,09
5-й этап — С5 загрузка	800	-17,2*	0,7	-1,4
6-й этап — С6 загрузка	960	-12,5*	1,2	-1,6
7-й этап — С7 загрузка	1120	-17,6*	2,6	-2,8
8-й этап — С8 загрузка	1280	-13,8*	3,6	-3,1
9-й этап — С9 загрузка	1440	6,53*	4,3	-3,9
10-й этап — С10 загрузка	1600	58,3*	6,0	-3,2
10-й этап — С10 загрузка	1600	62,8*	5,8	-2,5

Графическое представление перемещений точек от нормативной нагрузки показано на рис. 7. Результаты измерения напряжений, полученные по тензометрическим датчикам, сведены в табл. 2. Графическое представление изменения напряжений от нормативной нагрузки показано на рис. 8. Нагрузка на графиках приведена с учетом ширины грузовой полосы. Сплошные линии

на графиках отражают перемещения точек при загрузке балки, штриховые — при разгрузке.

Экспериментальные напряжения, полученные в точке № 1 (*), из анализа исключаем, так как, по всей видимости, работа датчика была нарушена.

Анализ полученных результатов

Согласно полученным результатам, можно установить, что максимальные прогибы балки

Рис. 7. График зависимости перемещений расчетных точек от нагрузки

Рис. 8. График зависимости напряжений от нагрузки

при дополнительных нормативных нагрузках до 1600 кг/м^2 не превышают $1,5 \text{ мм}$. При этом балка работает как изгибаемый стержень.

С учетом коэффициента надежности по нагрузке по табл. 7.1 СП 20.13330.2016³ $\gamma_f = 1,2$ до-

³ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85* (с Изменениями № 1, 2).

полнительные расчетные нагрузки составляют 1920 кг/м^2 .

По результатам испытаний при нагрузке 1600 кг/м^2 максимальный прогиб центральной части балки составил $1,46 \text{ мм}$ при дополнительных напряжениях $6,0 \text{ МПа}$. Отметим, что соседняя балка имеет близкое значение прогиба в цен-

тральной части, несмотря на то что грузовая полоса в два раза меньше.

Выводы

В настоящей работе были выполнены экспериментальные исследования несущей способности металлических балок в составе сводчатого кирпичного перекрытия путем проведения натурного испытания.

В результате испытаний были определены прогибы и напряжения металлической балки в составе сводчатого кирпичного перекрытия.

Полные расчетные нагрузки (с учетом собственного веса свода) составляют 2591 кг/м², что в 1,9 раза превышает максимально допустимую расчетную нагрузку на балку.

Максимальный дополнительный прогиб металлической балки составил 1,46 мм при дополнительных напряжениях 6,0 МПа.

Следовательно, можно сделать вывод, что металлические балки и кирпичное заполнение свода работают совместно. Значительную часть нагрузки воспринимает и перераспределяет свод. Металлическая балка работает в основном на восприятие поперечной силы в опорных частях.

При приложенных нагрузках не было достигнуто критического значения прогибов и напряжений в металлической балке, что подтверждает наличие большого запаса прочности подобных перекрытий.

Библиографический список

1. Лаптев Е. А. Оценка несущей способности перекрытий по стальным балкам с накатом в виде сводиков в зданиях Санкт-Петербурга: дис. ... магистра. СПб., 2016. 55 с.

2. Фролов А. В., Зимин С. С., Фролова Е. В. Влияние жесткости кирпичного сводчатого заполнения на несущую способность балок // Синергия наук. 2017. № 10. С. 580–592.

3. Фролов А. В., Зимин С. С., Фролова Е. В. Методика расчета несущей способности балок с учетом жесткости кирпичного сводчатого заполнения // Синергия наук. 2017. № 10. С. 593–619.

4. Попов А. О., Антипина В. В. Технология перекрытий конструкции «Монье» // Успехи современной науки. 2017. Т. 4, № 1. С. 179–182.

5. Енкина Е. С., Туккия А. Л., Голых О. В. Оценка несущей способности металлических балок в составе кирпичных сводов // Молодой ученый. 2020. № 50 (340). С. 79–81.

References

1. Laptev E. A. *Otsenka nesushchey sposobnosti perekrytiy po stal'nyim balkam s nakatom v vide svodikov v zdaniyakh Sankt-Peterburga. Diss. magistra* [Evaluation of the load-bearing capacity of floors on steel beams with a counter floor in the form of vaults in the buildings of St. Petersburg. MSc diss.]. St. Petersburg, 2016, 55 p.

2. Frolov A. V., Zimin S. S., Frolova E. V. *Vliyanie zhestkosti kirpichnogo svodchatogo zapolneniya na nesushchuyu sposobnost' balok* [Influence of the rigidity of brick vaulted filling on the load-bearing capacity of beams]. *Sinergiya nauk – Synergy of sciences*, 2017, no. 10, pp. 580–592.

3. Frolov A. V., Zimin S. S., Frolova E. V. *Metodika rascheta nesushchey sposobnosti balok s uchetom zhestkosti kirpichnogo svodchatogo zapolneniya* [Methodology for calculating the load-bearing capacity of beams taking into account the rigidity of brick vaulting]. *Sinergiya nauk – Synergy of sciences*, 2017, no. 10, pp. 593–619.

4. Popov A. O., Antipina V. V. *Tekhnologiya perekrytiy konstruktssii «Monie»* [Slab technology of the Monier structures]. *Uspekhi sovremennoy nauki – Modern science advances*, 2017, vol. 4, no. 1, pp. 179–182.

5. Enkina E. S., Tukkiya A. L., Golykh O. V. *Otsenka nesushchey sposobnosti metallicheskih balok v sostave kirpichnykh svodov* [Evaluation of the bearing capacity of metal beams as a part of brick vaults]. *Molodoy ucheniy – Young scientist*, 2020, no. 50 (340), pp. 79–81.