

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПЕРЕКРЫТИЙ ПО СТАЛЬНЫМ БАЛКАМ С НАКАТОМ В ВИДЕ СВОДИКОВ

Лаптев Егор Александрович, инженер

Улыбин Алексей Владимирович, к.т.н., доцент

(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург)

АННОТАЦИЯ

В работе рассматривается конструктивное решение перекрытия по стальным балкам с накатом в виде бетонных сводиков. Для сравнения несущей способности перекрытия с деревянным настилом и с накатом в виде сводиков в ходе работы проведено испытание фрагмента перекрытия в лабораторных условиях двумя типами нагрузок: сосредоточенной и равномерно распределённой. Также приведен расчет фрагмента перекрытия в программном комплексе ANSYS. По результатам эксперимента и расчета показано существенное отличие фактической несущей способности перекрытия с накатом в виде сводиков по сравнению с определенной расчетным путем.

Ключевые слова: несущая способность, сводики, расчеты, перекрытие, сводчатый накат.

Введение

В зданиях постройки конца XIX – начала XX вв. одним из наиболее распространённых конструктивных решений перекрытий было перекрытие по стальным балкам. Между балок применялся различный накат: деревянный, плоский бетонный, бетонный или каменный в виде цилиндрических сводиков.

С точки зрения огнестойкости, долговечности и несущей способности накат в виде сводиков является наиболее рациональным решением, особенно для надподвальных перекрытий. К недостаткам такого наката можно отнести большой собственный вес, сложность возведения и отсутствие достоверных методик расчета. По этим причинам подобные перекрытия с начала XX века стали применяться реже, а с распространением железобетонных конструкций и вовсе потеряли свою популярность.

Несмотря на это, сохранилось немалое количество зданий, в которых применено данное конструктивное решение перекрытия, например, в Санкт-Петербурге, где многие здания исторического центра датируются XIX-XX вв.

Большинство из них требуют ремонта или усиления некоторых конструкций, в частности перекрытий, по причине физического износа или увеличения нагрузки. В существующих нормативных документах отсутствуют методики расчета таких перекрытий с учетом включения в работу сводчатого заполнения. Поэтому в расчете учитывается только несущая способность балок без учета работы бетонного заполнения. Сводики учитываются только в виде нагрузки от собственного веса бетона.

На данный момент довольно мало научных работ, посвященных изучению напряженно-деформированного состояния рассматриваемого типа перекрытия. В большинстве работ описываются именно своды [1]. Для сводов, работающих совместно со стальными балками, имеются предложения по учету несущей способности заполнения [2], а также примеры перекрытий, где по результатам расчета несущая способность балок исчерпана, однако перекрытие несет нагрузку даже с серьезными повреждениями [3, 4].

Вышесказанное говорит о том, что традиционный подход к расчету таких перекрытий не учитывает реальное напряженно-деформированное состояние, что приводит к занижению истинной несущей способности. Для сравнения различных типов наката (деревянного и бетонного сводчатого), с точки зрения деформационных свойств и несущей способности, авторами данной статьи было проведено натурное испытание фрагмента перекрытия. Результаты исследования представлены в настоящей работе.

Натурный эксперимент

Для сравнения несущей способности балок со сводчатым накатом с другими видами межбалочного заполнения было проведено натурное испытание фрагмента перекрытия. В данной работе испытывалось перекрытие с двумя типами заполнения: с накатом в виде бетонных сводиков и деревянным настилом. Фрагмент перекрытия в обоих случаях испытывался распределенной и сосредоточенной нагрузками.

Для моделирования фрагмента перекрытия (рисунок 1) использовались три двутавровые балки (двутавр №14 по ГОСТ 8239-89 [5]), уложенные с шагом 1 м. Балки с пролетом 3,10 м были шарнирно оперты по краям. К балкам были приварены арматурные стержни для закрепления смещения в горизонтальном направлении и восприятия распора сводиков, передаваемых на крайние балки.

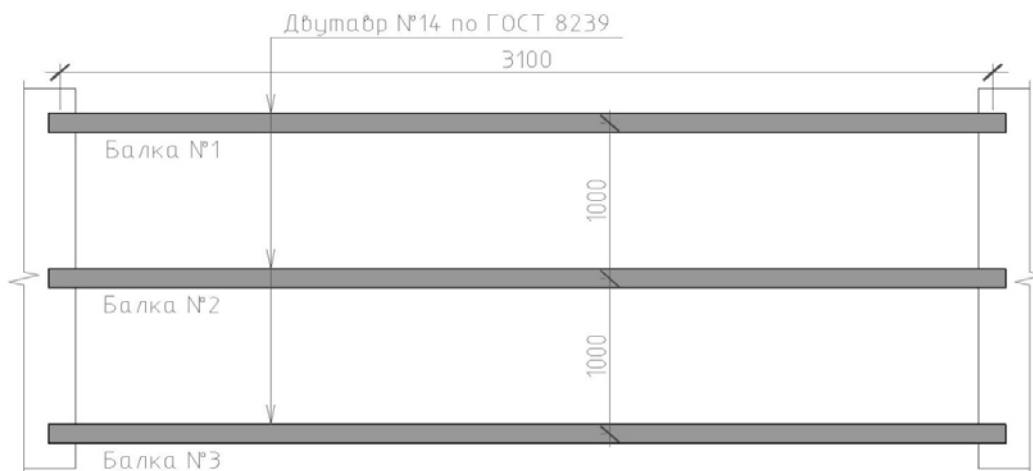


Рисунок 1 – Схема перекрытия

Испытание перекрытия без сводчатого наката

Сосредоточенная нагрузка

Для испытания балки перекрытия сосредоточенной нагрузкой был собран стенд, схема которого представлена на рисунке 2.

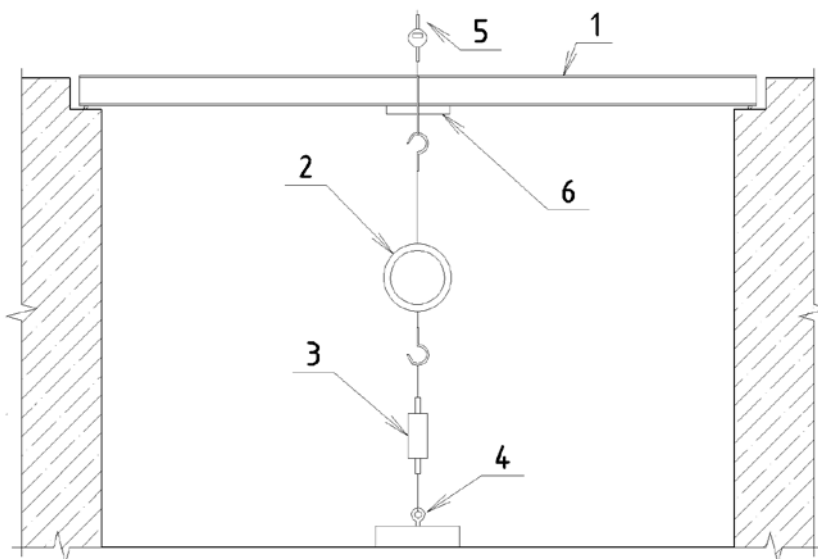
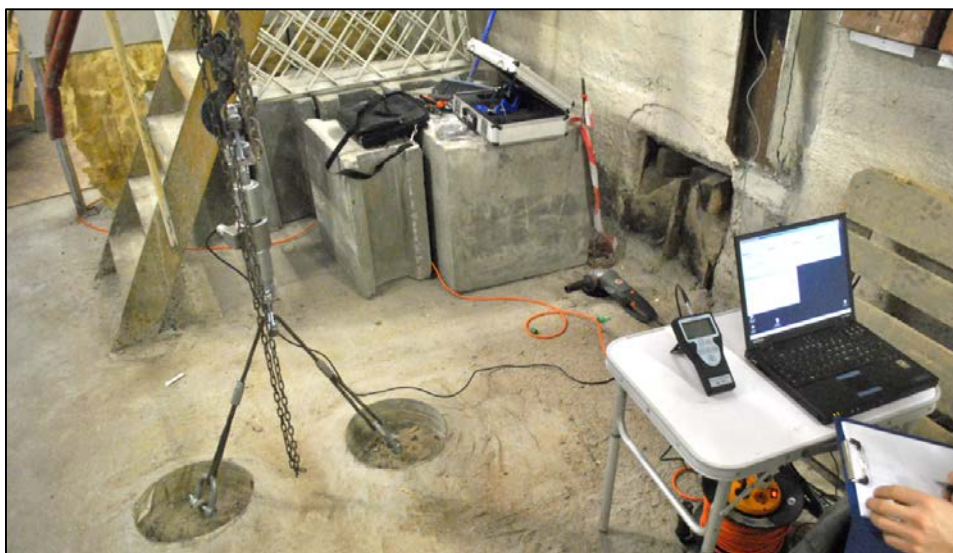


Рисунок 2 – Стенд для испытания сосредоточенной нагрузкой

К стальной балке 1, свободно опертой по краям, через проушину была подвешена ручная таль 2. Для измерения прикладываемой нагрузки, был установлен динамометр 3, одним концом закрепленный в бетонном основании через анкерное устройство 4. Для фиксации прогиба был установлен индикатор часового типа 5, а для фиксации продольных деформаций в растянутой зоне сечения – цифровой датчик перемещений 6. На рисунке 3 представлена фотофиксация процесса испытания.



**Рисунок 3 – Испытание сосредоточенной нагрузкой.
Анкерное крепление с динамометром (слева)**

Нагружение балки велось ступенями по 200 кг. Максимальная нагрузка составила 1640 кг. Результаты испытания приведены на рисунке 4.

Для сравнения на графике приведены теоретически ожидаемые прогибы и напряжения. Теоретические прогиб f и напряжения σ от сосредоточенной нагрузки F вычислены формулам (1) и (2):

$$f = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I}, \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{F \cdot l}{4 \cdot W}, \quad (2)$$

где l - пролет балки, м;

I - момент инерции сечения, см⁴;

W - момент сопротивления сечения, см³;

E - модуль упругости, МПа.

Действующие напряжения в балке были рассчитаны по формуле (3):

$$\sigma = E \cdot \frac{\Delta l}{l}, \quad (3)$$

где Δl - продольная деформация балки;

l - база датчика перемещений.

Значение модуля упругости E было принято равным 200000 МПа в соответствии с СП [6]. Момент инерции I принят равным 568,97 см⁴; момент сопротивления W принят равным 81,28 см³.

По графикам видно, что максимальный прогиб составил 9,65 мм, при напряжениях в балке 160 МПа. График «нагрузка – прогиб» имеет линейный вид и в целом совпадает с теоретическими данными. Разница (0,87 мм) между теоретическими и фактическими результатами предположительно вызваны податливостью опор.

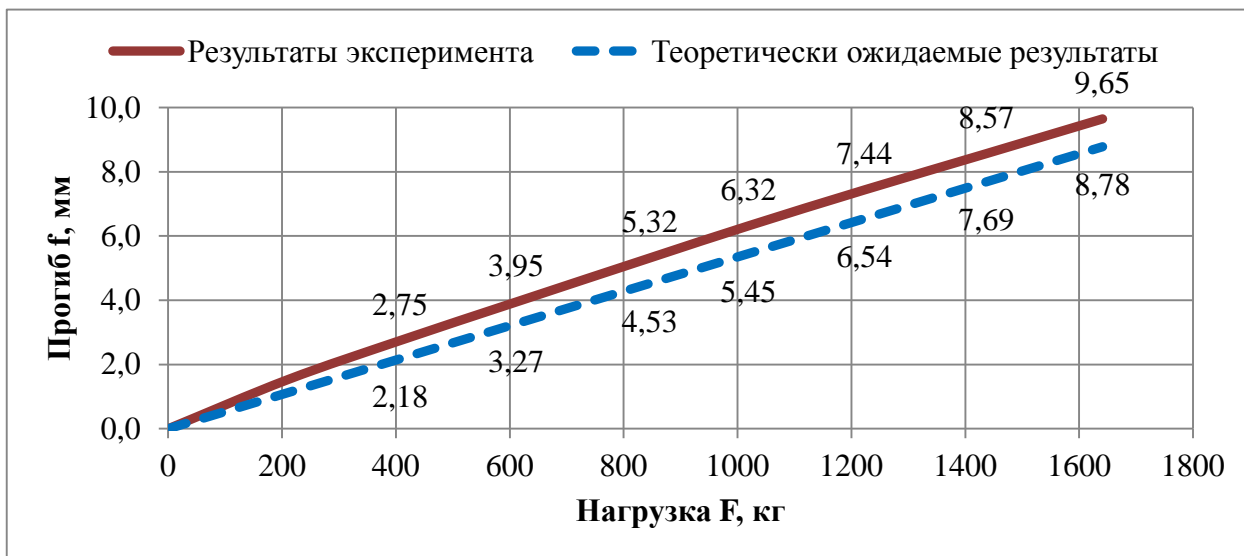


Рисунок 4 – График «Нагрузка – прогиб» по результатам испытаний одной балки сосредоточенной нагрузкой

Распределенная нагрузка

Для испытания фрагмента перекрытия распределенной нагрузкой был собран стенд, схема которого представлена на рисунке 5.

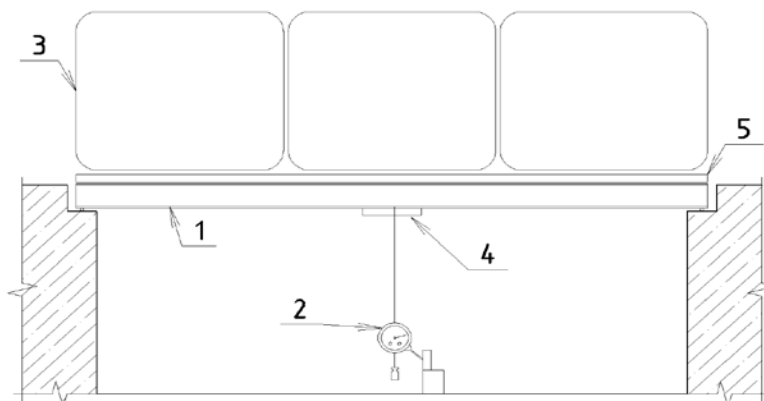


Рисунок 5 – Схема стенда для испытания распределённой нагрузкой

Для распределения нагрузки по стальным балкам 1 был уложен настил 5 из деревянного бруса и листов фанеры. Для моделирования равномерно распределенной нагрузки использовалась вода в кубических емкостях 3. У каждой балки фиксировался прогиб с помощью прогибомеров 6-ПАО, а также продольные

деформации в растянутой зоне сечения с помощью датчиков перемещений 4. Фотофиксация процесса испытания представлена на рисунке 6.

Нагружение фрагмента перекрытия велось ступенями по 100 кг/м^2 , максимальная нагрузка составила 900 кг/м^2 . Результаты представлены на рисунке 7.

Для сравнения на графике ниже также представлены аналитически вычисленные деформаций f и напряжений σ . Расчет прогиба f для центральной балки производился по формуле (4):

$$f = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (4)$$

Для крайних балок по формуле (5):

$$f = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot 2 \cdot E \cdot I} \quad (5)$$

Напряжения вычислялись по формуле (6):

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot W} \quad (6)$$

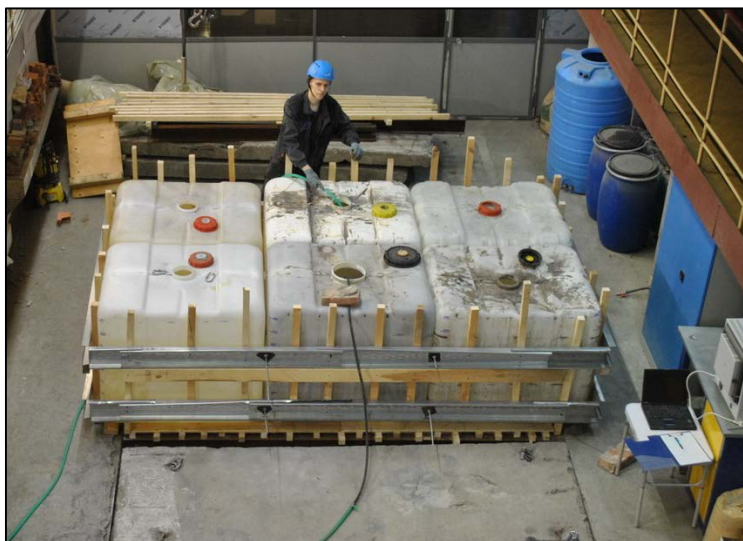


Рисунок 6 – Наполнение емкостей водой

На рисунке 7 представлен график зависимости деформаций для центральной балки. Максимальный прогиб при нагрузке в 900 кг/м^2 составил $11,08 \text{ мм}$ при напряжениях 127 МПа . Зависимость деформаций от нагрузки имеет в целом линейный вид, за исключением первых трех ступеней. Это объясняется неравномерностью приложения нагрузки на начальных этапах из-за неровного дна емкостей для воды. После нагрузки в 300 кг/м^2 зависимость приобретает

линейный вид и практически сходится с теоретически ожидаемыми значениями. Небольшая разница в прогибах (1,75 мм) вызвана просадкой опор балок.

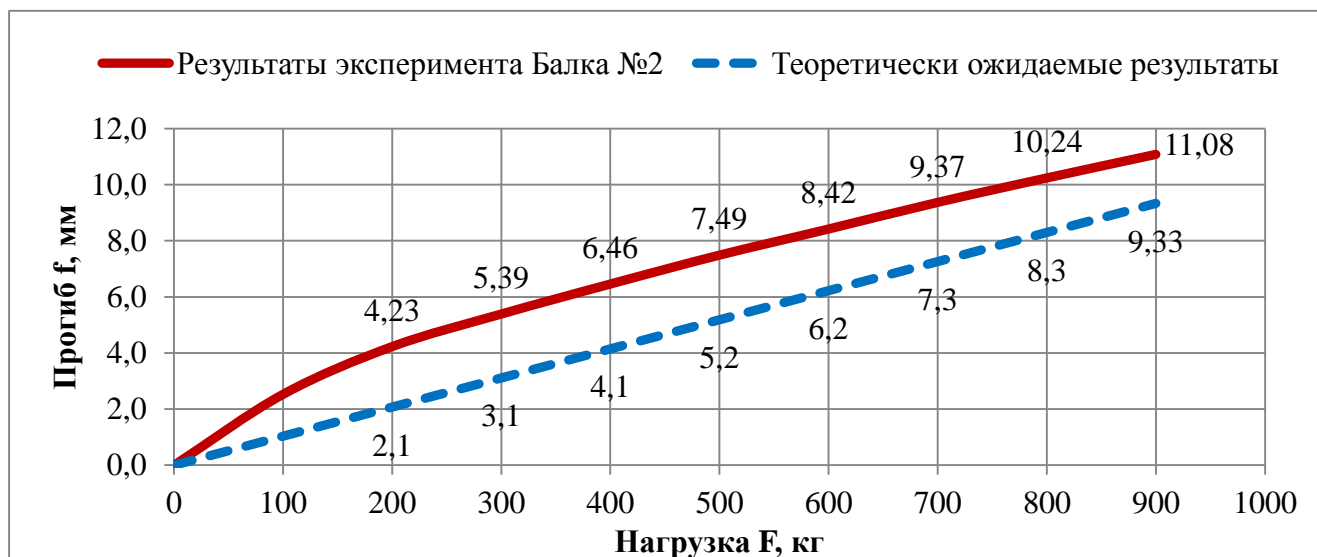


Рисунок 7 – График «Нагрузка-прогиб» для центральной балки фрагмента

У крайних балок (№1 и №3) грузовая полоса в два раза меньше, соответственно, деформации и напряжения также должны быть в два раза меньше. Полученные результаты, представленные на рис. 8, имеют сходимость хуже с теоретическими значениями, нежели результаты для центральной балки. Вероятно, это вызвано неравномерностью распределения нагрузки на крайние пролеты, вследствие включения в работу деревянного настила.

Полученные результаты испытаний близки к теоретически ожидаемым, как для сосредоточенной, так и для распределенной нагрузки, что говорит о корректности схемы испытания.

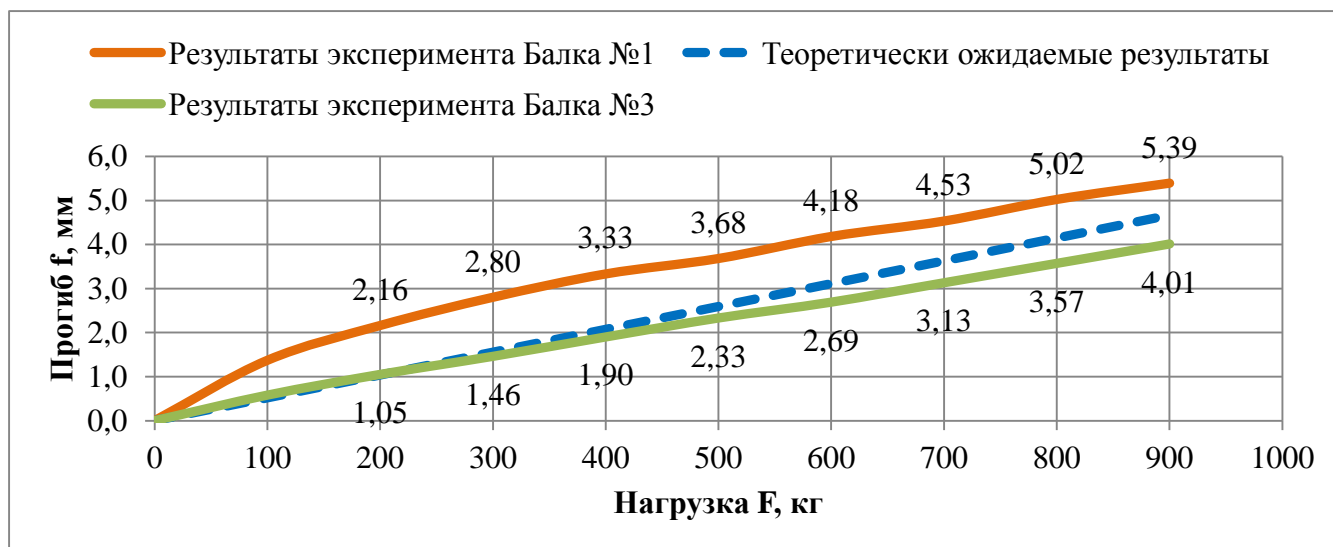


Рисунок 8 – График «Нагрузка-прогиб» для крайних балок фрагмента

Испытание балочного перекрытия со сводчатым накатом

Процесс создания сводиков

Перекрытие со сводчатым накатом было запроектировано с шагом балок в 1 м, стрела подъема сводика была принята равной 70 мм, толщина сводика в замке – 70 мм. Для создания сводиков был использован бетон на щебне с заполнителем 10-20 мм. В качестве опалубки применялись кружала, выпиленные из доски, с уложенными по ним фанерными листами. Процесс создания сводчатого наката представлен на рисунках 9, 10.

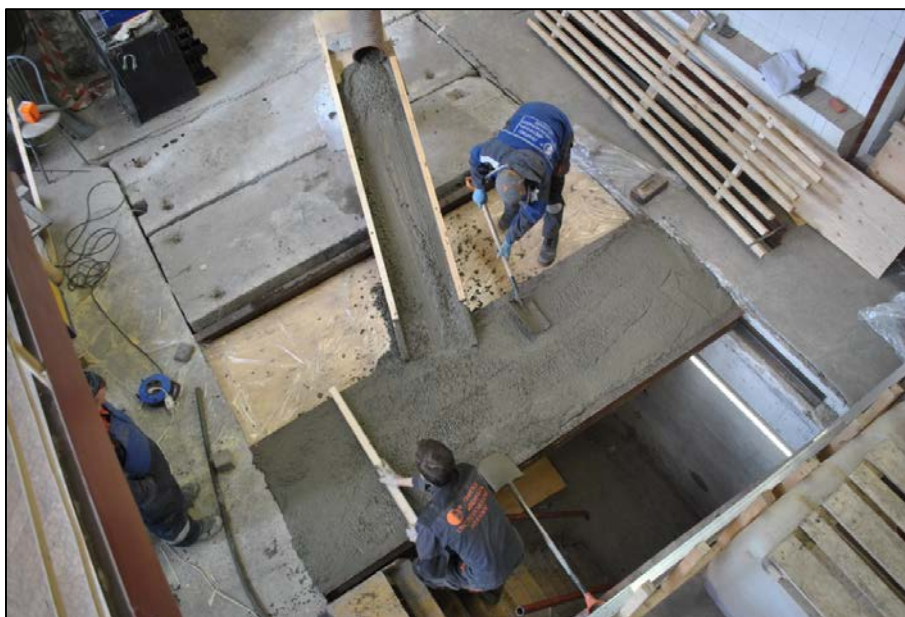


Рисунок 9 – Процесс укладки бетонной смеси

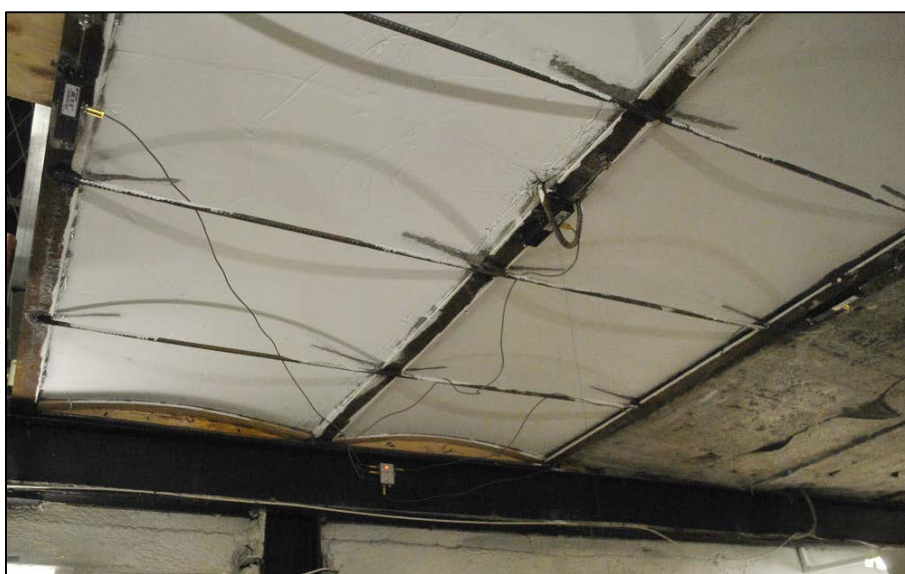


Рисунок 10 – Вид на перекрытие снизу

Сосредоточенная нагрузка

Нагружение также велось ступенями по 200 кг, однако максимальная нагрузка в процессе испытания достигла 2200 кг. На графике (рисунок 11) представлены теоретически ожидаемые результаты.

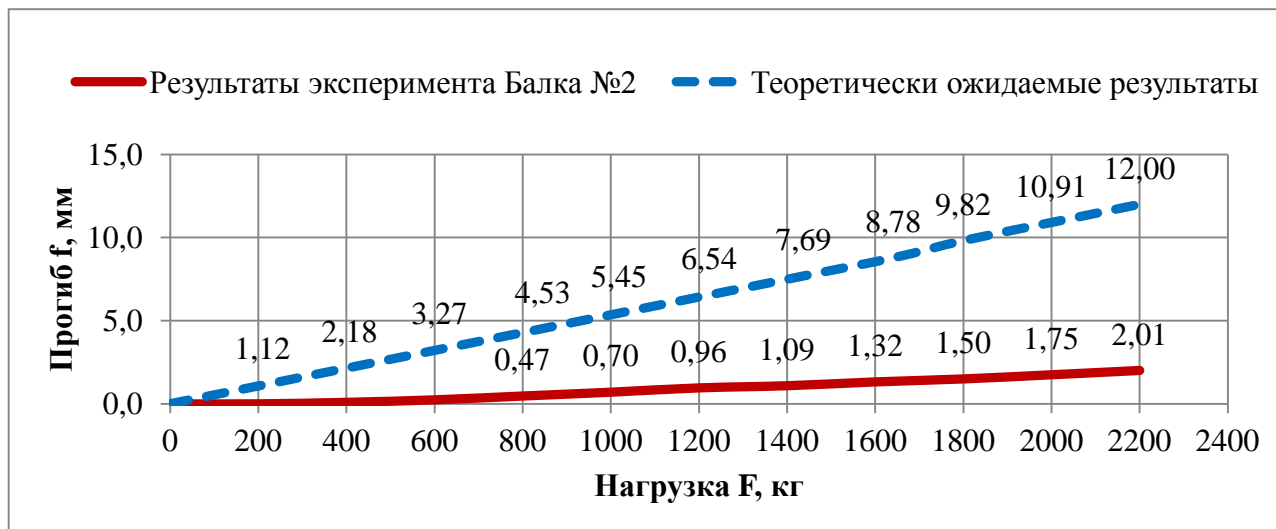


Рисунок 11 – График «Нагрузка - прогиб» для центральной балки фрагмента

Как видно из графика максимальный прогиб центральной балки составил 2,01 мм при напряжениях в 75 МПа. Полученное значение существенно отличается от теоретически ожидаемого и от полученного при предыдущем испытании. При испытании балки без сводчатого заполнения при нагрузке в 1600 кг прогиб составил 9,65 мм при напряжениях 160 МПа. Таким образом, результаты текущего испытания в 7,3 раз меньше по прогибам и в 3,3 раза меньше по напряжениям. Очевидно включение в работу сводчатого заполнения и перераспределение нагрузки на соседние балки, что видно по графикам (рисунок 12).

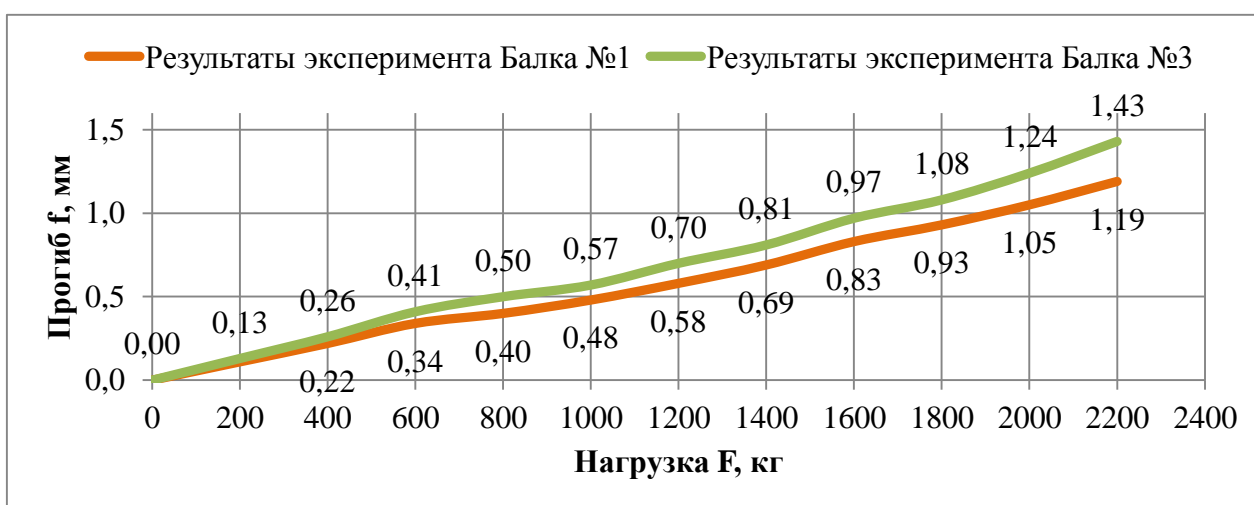


Рисунок 12 – График «Нагрузка – прогиб» для крайних балок фрагмента

Распределенная нагрузка

На рисунке 13 представлены результаты текущего нагружения.

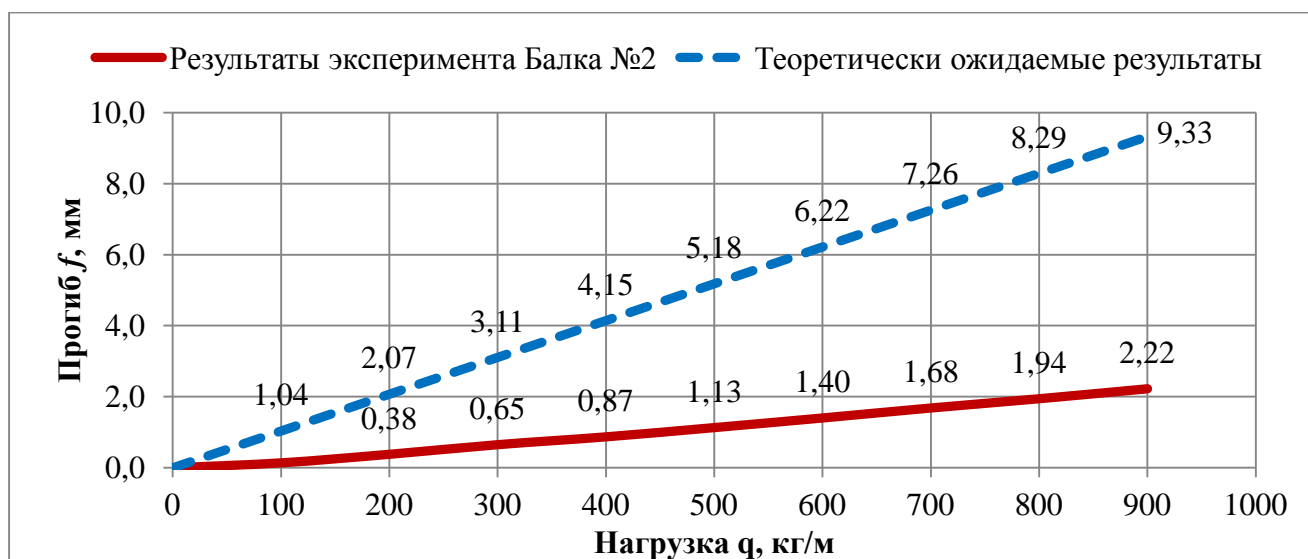


Рисунок 13 – График «Нагрузка – прогиб» для центральной балки

По результатам испытаний при нагрузке в 900 кг/м^2 прогиб центральной балки составил 2,22 мм при напряжениях в 51 МПа. Полученные в ходе текущего нагружения значения по прогибам в 4,2 раза меньше теоретически ожидаемых, по напряжениям – в 2,5 раза. По графикам видно (рисунки 13, 14), что все три балки перекрытия одинаково включились в работу, имеют приблизительно равный прогиб и незначительную разницу по напряжениям. Прогиб балок №1 и №3 составил 2,26 и 2,20 мм при напряжениях 40 и 45 МПа соответственно.

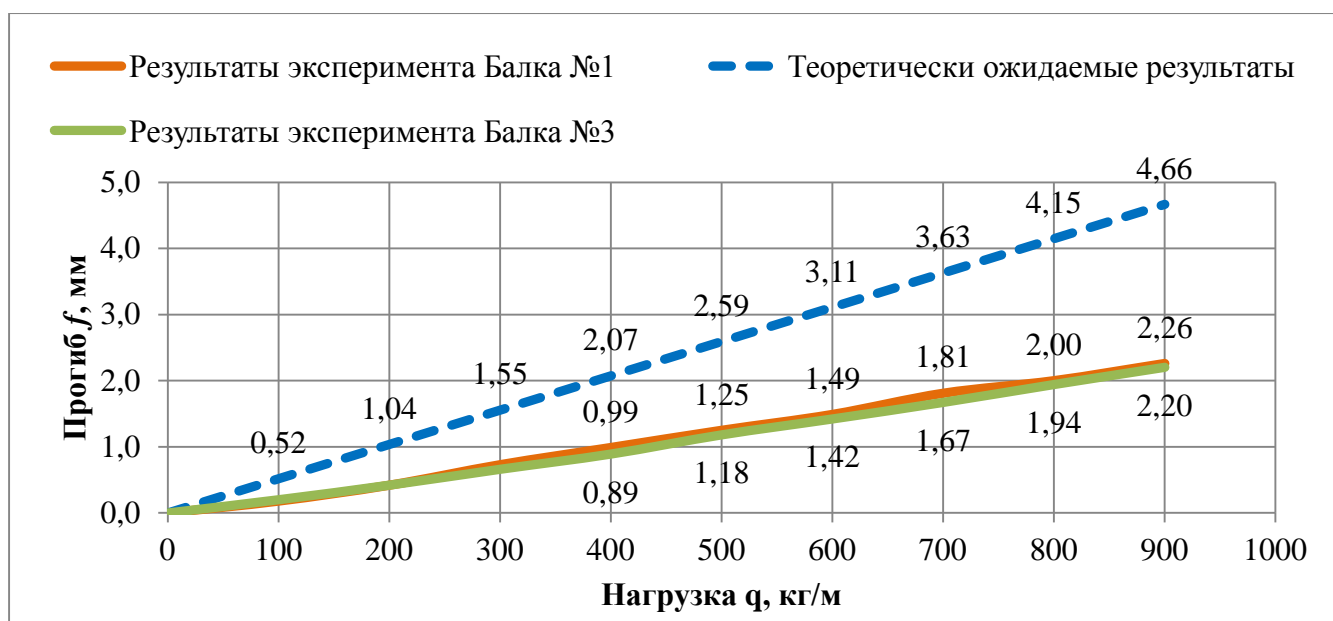


Рисунок 14 – График «Нагрузка – прогиб» для крайних балок

Испытание материалов

В лаборатории Санкт-Петербургского университета Петра Великого были проведены испытания материалов, используемых при исследовании. При заливке сводчатого заполнения из бетонной смеси были отобраны пробы-кубики, для испытания на сжатие в соответствии с ГОСТ 10180 [7]. Также из стальной балки был отобран образец для испытания на растяжение в соответствии с ГОСТ 1497 [8]. Результаты испытаний материалов сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты испытания материалов

<i>Бетон</i>		
<i>Возраст образцов, сут</i>	<i>Плотность, кг/м³</i>	<i>Прочность, МПа</i>
25	2300	34,2
<i>Сталь</i>		
<i>Место отбора</i>	<i>Предел текучести, МПа</i>	<i>Предел прочности, МПа</i>
Стенка двутавра	330,6	437,2

Результаты анализа в программном комплексе ANSYS

В программном комплексе ANSYS фрагмент перекрытия (рисунок 15) был рассчитан на действие равномерно распределенной нагрузки величиной 900 кг/м².

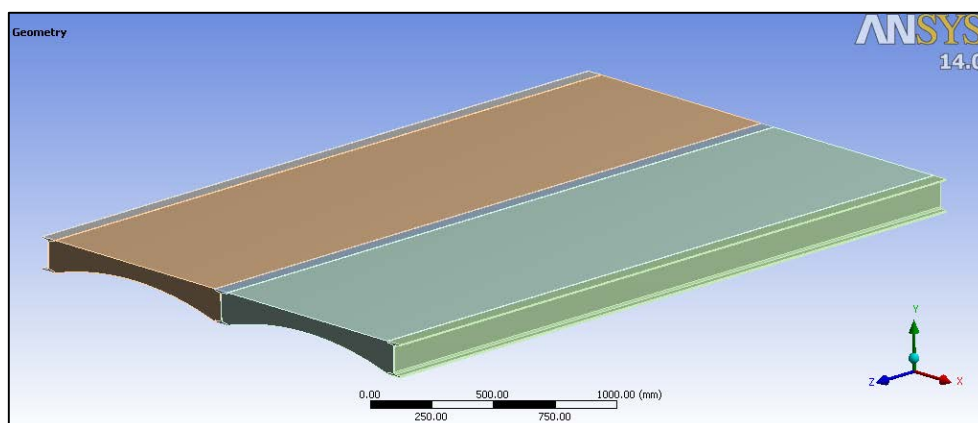


Рисунок 15 – Модель перекрытия

В расчете модуль упругости бетона принят равным 30000 МПа в соответствии с действующими нормативными документами [9]. Модуль упругости стали принят равным 200000 МПа в соответствии с [6]. Коэффициент трения между бетоном и сталью принят равным 0,45.

Результаты расчета

По результатам расчета от действия равномерно-распределённой нагрузки величиной 900 кг/м^2 максимальный прогиб центральной балки составил 2,90 мм при напряжениях 40,6 МПа. Прогиб балок №1 и №3 составил 2,7 мм, при напряжениях 38,6 МПа. Максимальные сжимающие напряжения в бетоне составили 4,3 МПа. Максимальные растягивающие напряжения 1,8 МПа. Деформированная модель представлена на рисунках 16-18.

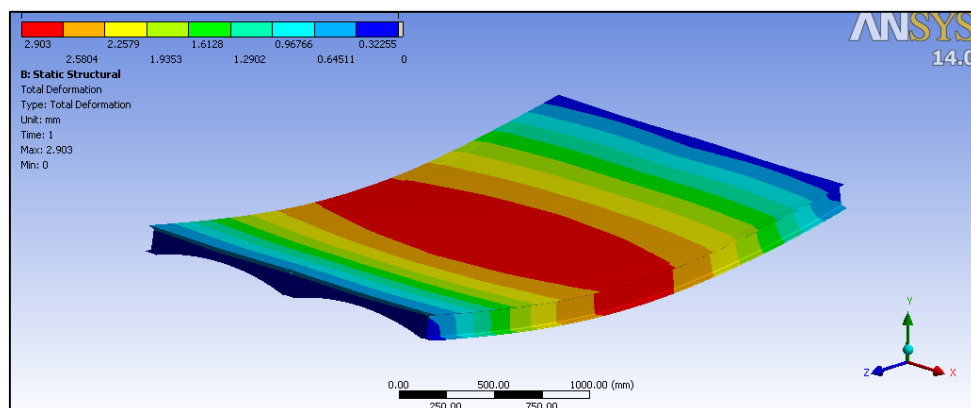


Рисунок 16 – Деформации фрагмента перекрытия при равномерно распределенной нагрузке

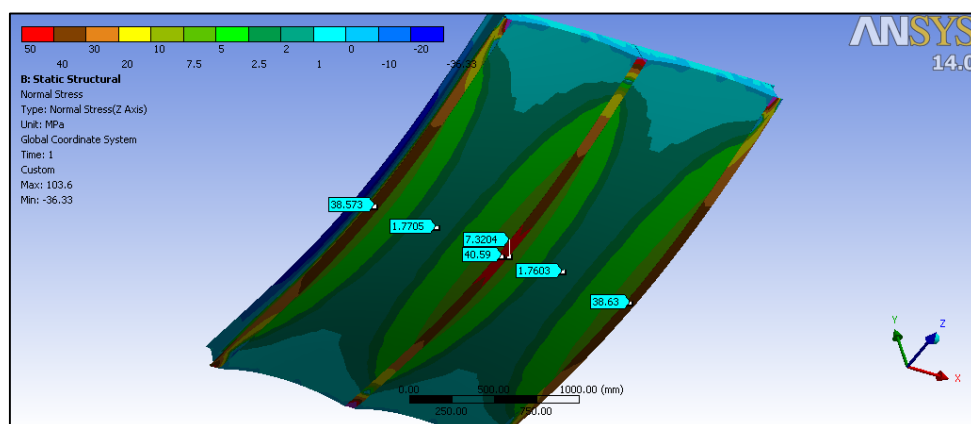


Рисунок 17 – Растягивающие напряжения

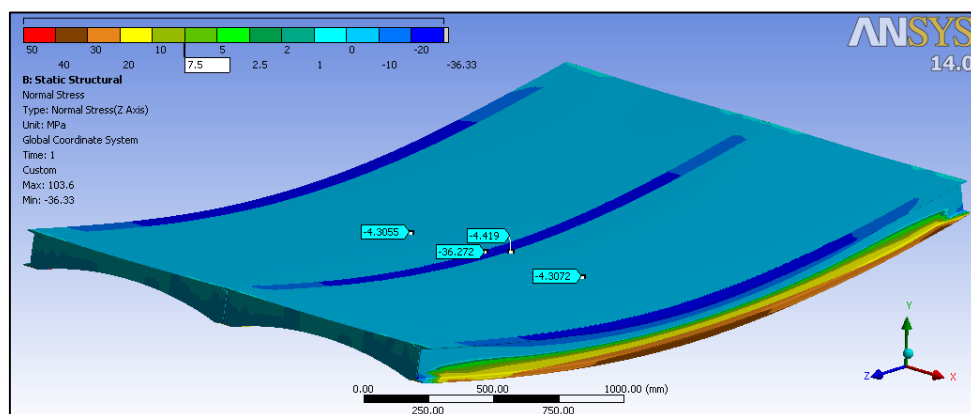


Рисунок 18 – Сжимающие напряжения

Сравнение полученных результатов

Сравнение полученных результатов представлено на рисунке 19-22.

Испытание сосредоточенной нагрузкой

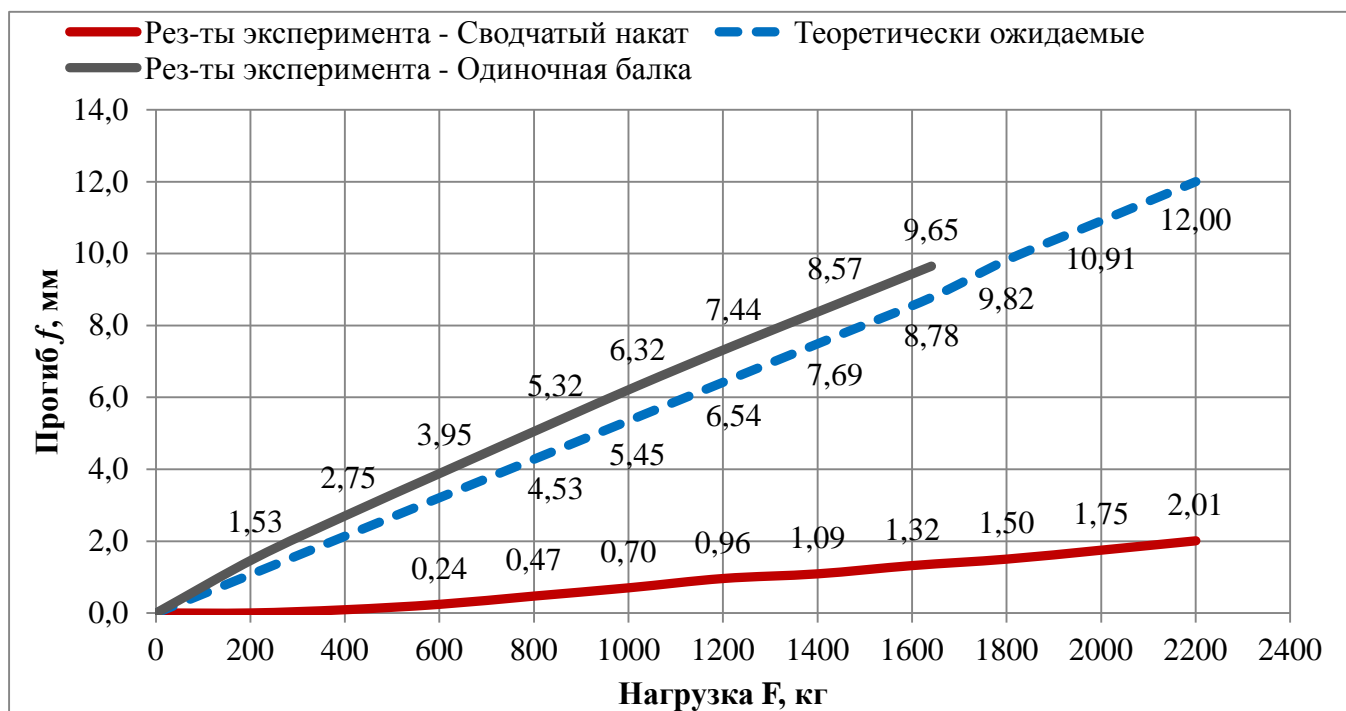


Рисунок 19 – Сравнение результатов при испытании сосредоточенной нагрузкой. Прогибы

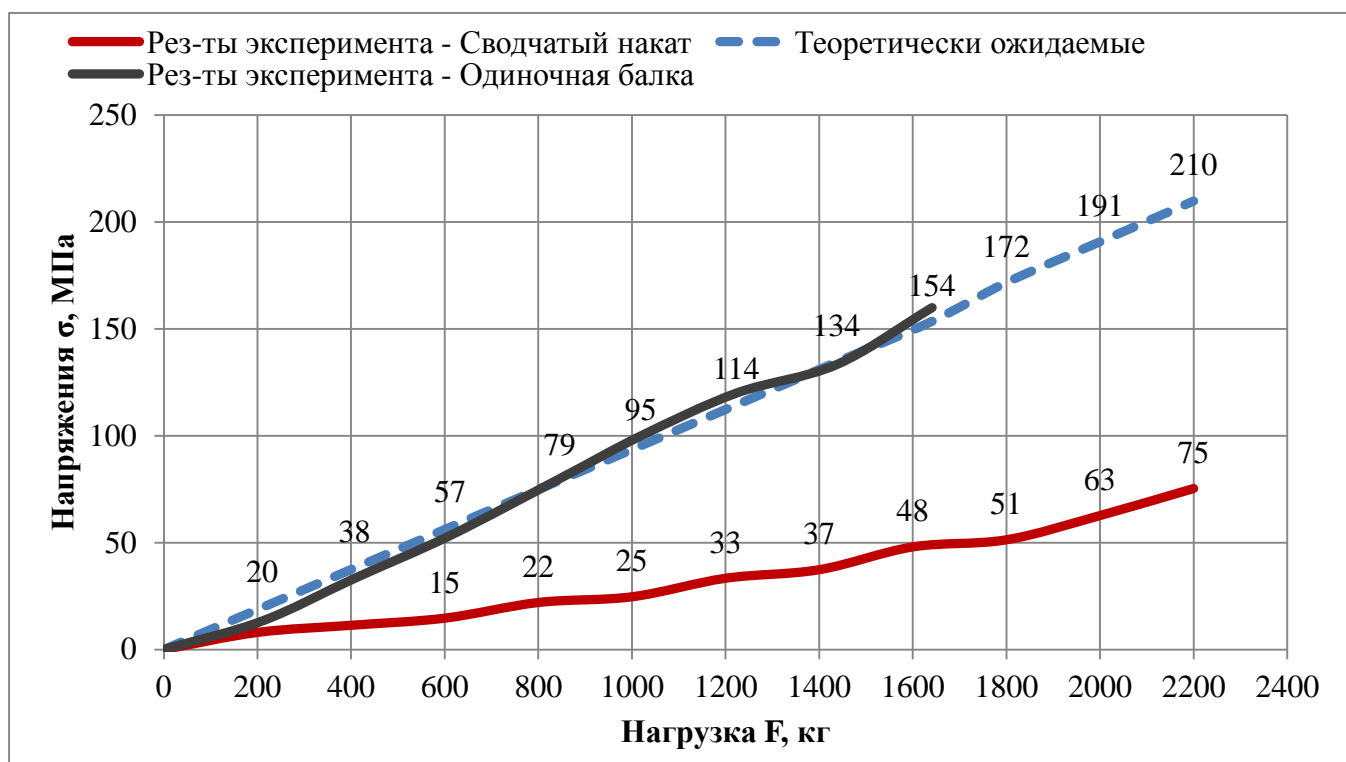


Рисунок 20 – Сравнение результатов при испытании сосредоточенной нагрузкой. Напряжения

Распределенная нагрузка

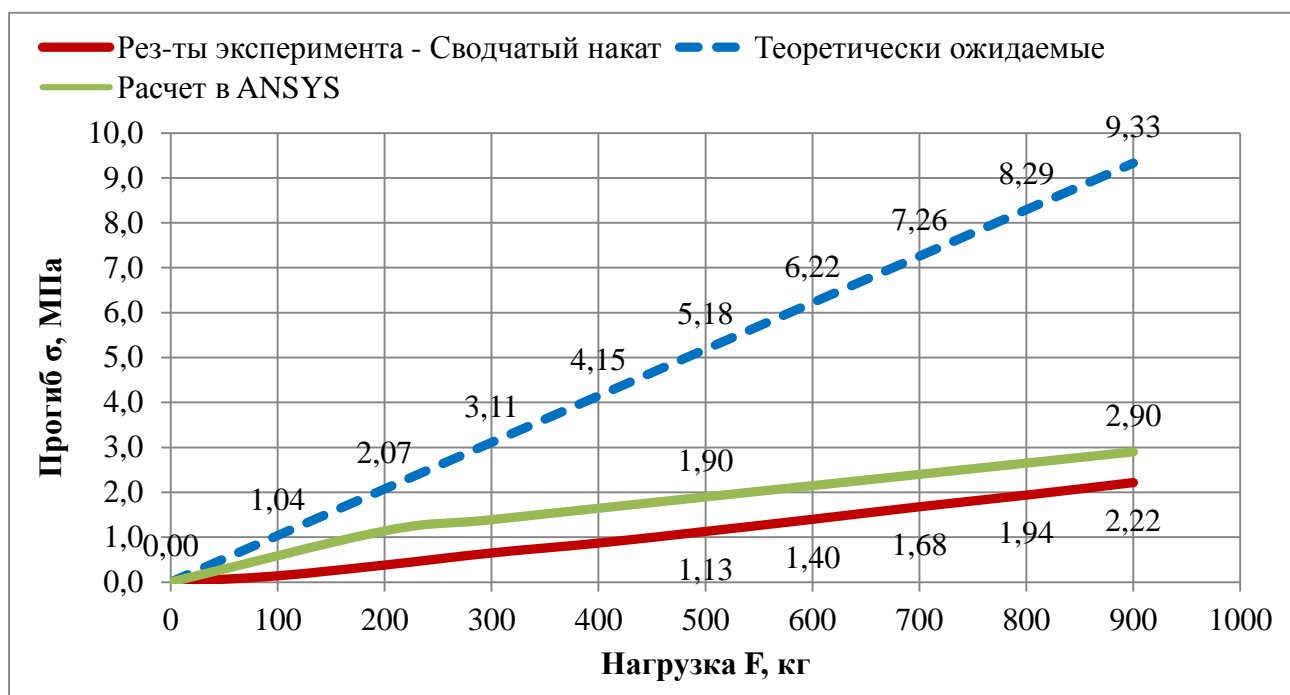


Рисунок 21 – Сравнение результатов при испытании распределенной нагрузкой. Прогибы

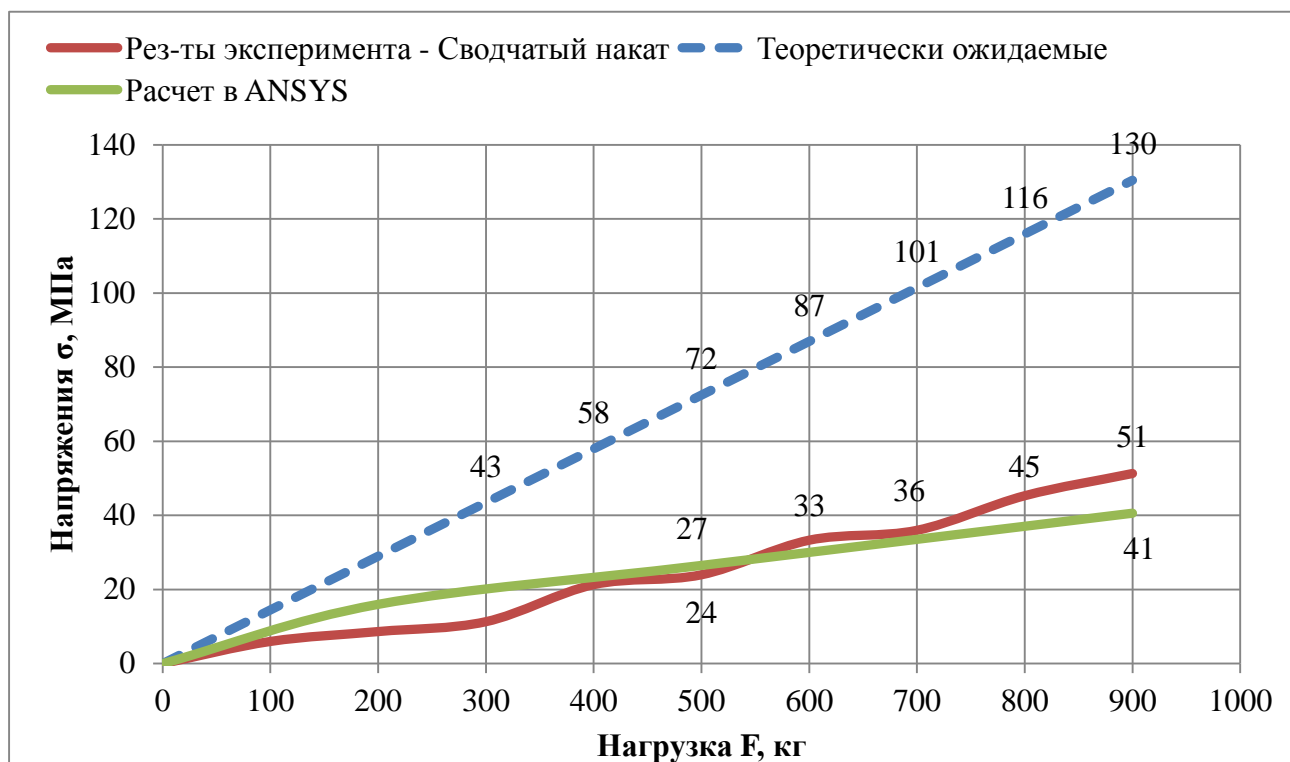


Рисунок 22 – Сравнение результатов при испытании распределенной нагрузкой. Напряжения

Выводы

По графикам испытаний (рисунки 19-22) видно существенное снижение деформаций и напряжений при испытании балки со сводчатым заполнением. Это объясняется включением в работу соседних балок, а также сводчатого заполнения, как при действии сосредоточенной нагрузки (рисунок 12), так и при равномерно-распределенной (рисунок 14). Несмотря на отсутствие полного контакта с бетоном и анкерующих элементов, по результатам эксперимента наглядно видно, что все три балки фрагмента перекрытия получили одинаковые деформации от распределенной нагрузки. Таким образом, возможно рассматривать их совместную работу, как монолитной железобетонной конструкции с жесткой арматурой в виде профильной балки. Для корректного расчета необходимо определять положение нейтральной линии и учитывать работу сжатой зоны бетона.

Результаты исследования сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты исследования

Сосредоточенная нагрузка (1600 кг)				
	Прогибы, мм	Разница, %	Напряжения, МПа	Разница, %
Расчет по балочной схеме	8,78	-	154	-
Результаты эксперимента – сводчатое заполнение	1,32	85,0	48	68,8
Равномерно распределенная нагрузка (900 кг/м²)				
	Прогибы, мм	Разница, %	Напряжения, МПа	Разница, %
Расчет по балочной схеме	9,33	-	130	-
Результаты эксперимента – сводчатое заполнение	2,22	76,2	51	60,8
Расчет в ПК ANSYS	2,9	68,9	40,6	68,8

Рассмотренное конструктивное решение перекрытия широко распространено в зданиях старой городской застройки Санкт-Петербурга и других городов. Значительная часть зданий является объектами культурного наследия. Отсутствие методик их расчета может привести к ненужным работам по усилению или замене перекрытий, что приводит к излишним затратам, а также нарушает

внутренний архитектурный облик здания. Поэтому при определении фактической несущей способности перекрытий такого типа необходимо применение методик расчета, учитывающих совместную работу сводчатого заполнения со стальными балками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лахтин Н. К. Расчет арок и сводов. Руководство к аналитическому и графическому расчету арочных и сводчатых перекрытий. – М.: Типография Т-ва И. Н. Кушнерев и К, 1911. – 493 с.
2. Разживин А. В. Учет несущей способности бетонных сводов при поверочных расчетах сталебетонных перекрытий / А. В. Разживин // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – №3. – С. 45-46.
3. Лаптев Е. А. Особенности обследования перекрытий по стальным балкам с накатом в виде сводиков / Е. А. Лаптев, А. В. Улыбин // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: материалы VI межд. науч. – практич. конференции – СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2015. – С. 95–105.
4. Григорьев Ю.С. Анализ напряженно-деформированного состояния сводчатого перекрытия здания, расположенного на улице Почаинской 17 в Нижнем Новгороде/ Ю. С. Григорьев, В. В. Фатеев // Успехи современного естествознания: материалы науч. – практич. конференции – М.: Издательский дом «Академия Естествознания», 2012. – С. 162-167.
5. ГОСТ 8239-89. Двутавры стальные горячекатаные. Сортамент. – Введ. 1990-07-01. – М.: Стандартиформ, 2012 – 23 с.
6. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. – Введ. 2011-05-20. – М.: Минрегион России, 2011– 98 с.
7. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Введ. 2013-07-01. – М.: Стандартиформ, 2013 – 67 с.
8. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 1984-07-16. – М.: Стандартиформ, 2008. – 45 с.
9. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – Введ. 2013-01-01. – М.: Минстрой России, 2015 – 120 с.

BEARING CAPACITY OF FLOORS MADE OF STEEL BEAMS WITH VAULTS FILLING

Laptev Egor Aleksandrovich, engineer

Ulybin Aleksey Vladimirovich, PhD (Eng), Associate professor
(Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg)

ABSTRACT

The article is of interest to characteristics of structural concept and inspection of floors made of steel beams with vaulted filling. An experiment was performed in which compared two types of fill: wooden and concrete vaulted. Also, presents the calculation of floor with vaulted filling in ANSYS. According to the results of the experiment and calculation shown a significant distinction between the carrying capacity of floor with vaulted filling compared with calculations.

Keywords: bearing capacity, vaulted filling, calculation, floor.