

На правах рукописи

ЮРЧЕНКО Андрей Анатольевич

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ БАЛОК
ЗАМКНУТОГО СЕЧЕНИЯ С ПЕРФОРИРОВАННЫМИ
СТЕНКАМИ**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Красноярск – 2008

Работа выполнена в федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор **Енджиевский Лев Васильевич**

Официальные оппоненты: академик РААСН, доктор технических наук, профессор **Ольков Яков Иванович**

доктор технических наук, профессор
Деруга Анатолий Петрович

Ведущая организация: ГУП «Красноярский ПромстройНИИпроект»

Защита состоится 18 ноября 2008 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д212.099.08 при федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет" по адресу: 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82, аудитория К-120.
Тел. (8-391) 252-78-68; факс (8-391) 252-78-68; e-mail end-lev@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института градостроительства, управления и региональной экономики Сибирского федерального университета

Автореферат разослан 16 октября 2008 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Пересыпкин Е.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Для восприятия кручения с изгибом в промышленном и гражданском строительстве, судостроении, авиастроении и т.д. часто применяют балки коробчатого сечения.

Очевидно, большое многообразие типов сечений балок, их геометрических параметров, функциональных предназначений с конкретной спецификой их напряженно-деформированного состояния (НДС) в различных конструктивных схемах инженерных сооружений объективно обусловило отсутствие обобщающей аналитической теории расчета.

Современные программные комплексы, реализующие метод конечных элементов (МКЭ), формально могут справиться с задачей учета различных конструктивных особенностей, но правильно задать входную информацию, воспринять и использовать без четкого понимания физического смысла задачи многомерные массивы входной информации в реальном инженерном проектировании, трудно выполнимо.

В настоящее время в связи с тенденцией резкого увеличения стоимости металлопроката достаточно остро проявляет себя проблема снижения металлоёмкости строительных конструкций.

Для повышения эффективности работы балок коробчатого сечения может использоваться весь положительный арсенал, реализованный в балках двутаврового сечения. Так, применение балок коробчатого сечения с гибкими, гофрированными или перфорированными стенками будет в большинстве случаев экономически более выгодно по сравнению с аналогичными балками, имеющими обычные стенки.

Однако названные типы балок, вследствие отсутствия научно-обоснованных рекомендаций по оценке их НДС в условиях изгиба с кручением, не находят достойного широкого применения.

Цель работы.

На основе комплекса экспериментально-теоретических исследований выявить особенности НДС, совершенствовать расчетные модели и алгоритмы расчетов балок коробчатого сечения с перфорированными стенками при воздействии крутящего момента, поперечной силы и совместного действия крутящего момента и поперечной силы.

Основные задачи исследований:

1. Определить степень влияния деформаций сдвига в балочных конструкциях и необходимость их учета при проверках по второй группе предельных состояний. Разработать геометрическую модель, позволяющую определять прогибы в балках с перфорированной стенкой при изгибе с учетом деформаций сдвига.
2. Поиск эффективных параметров конечно-элементных моделей тонкостенных профилей, обеспечивающие приемлемый уровень сходимости численных методов с опытными данными.
3. В развитие существующих теорий определения касательных напряжений при свободном кручении в сплошностенчатых балках коробчатого сечения разработать расчетную модель, для балок с перфорированными стенками.
4. Законструировать испытательный стенд для исследования напряженно-деформируемого состояния балок в большом диапазоне варьируемых геометрических параметров.
5. Произвести сравнительный анализ экспериментальных данных с определенными по методике СНиПа.

Научная новизна работы:

- экспериментальным путем выявлено НДС балок коробчатого сечения, скомпонованных из перфорированных профилей при действии свободного кручения, изгиба, кручения с изгибом;
- обоснованы параметры конечно-элементных моделей тонкостенных профилей, работающих на свободное кручение, позволяющие получить наиболее точные результаты распределения НДС;
- исследовано влияние деформаций сдвига в балках с перфорированной стенкой.

Практическое значение диссертационной работы состоит в следующем:

- предложена методика определения деформаций сдвига при изгибе балок с перфорированной стенкой;
- даны рекомендации по определению НДС в балках коробчатого сечения, скомпонованных из перфорированных профилей при изгибе, изгибе с кручением и свободном кручении.

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы представлялись на:

-третьей Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Достижения науки и техники – развитию сибирских регионов (инновационный и инвестиционный потенциалы)», Красноярск, 6-7 июня 2001 г.;

-международной научно-практической конференции «Наука и инновации в современном строительстве», г. Санкт-Петербург, 2007 г.

Публикации.

Результаты диссертационных исследований опубликованы в 5 работах, включая одну статью в рецензируемом ВАК журнале, и в одном патенте РФ.

На защиту выносятся:

- результаты численных исследований балок на изгиб, кручение и изгиб с кручением;

- методика и результаты натурных испытаний;

- результаты исследований деформаций в балках с перфорированной стенкой коробчатого и двутаврового сечений;

-анализ несущей способности исследуемых балок при изгибе, кручении и изгибе с кручением;

- испытательный стенд, позволяющий производить испытания конструкций натуральной величины на изгиб, изгиб с кручением и кручение.

Структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка используемой литературы и приложений. Объем диссертации составляет 166 стр.: в том числе 115 рисунков, 22 таблицы, 5 приложений, библиографический список, включающий 119 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, изложены цели, задачи и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан обзор работ, соответствующих теме диссертации, рассмотрен опыт применения балок замкнутого сечения и балок с перфорированной стенкой.

Теории расчета на восприятие отдельных силовых воздействий для различных сечений разрабатывались в трудах ученых:

- кручение частично замкнутых, открытых и замкнутых профилей: Е.А. Бейлина, М.И. Длугача, Г.П. Соболевского, В.В. Холопцева, П.Ф. Дроздова, Д.В. Бычкова, Л.М. Шаншиашвили, А.Р. Туснина, В.З. Власова, А.А. Уманского, И.Ф. Образцова, Хр. Върбанова, Т. Ганева, С. Weber и др.;

- изгиб балок замкнутого сечения: В.В. Бирюлева, А.И. Отрешко, Ш.И. Исабаева, Б.Б. Лампси (проф.), Б.Б. Лампси и др.;

- изгиб балок с перфорированной стенкой: Я.А. Каплуна, А.А. Заборского, Я.И. Олькова, В.В. Бирюлева, В.М. Добрачева, М.М. Копытова, А.И. Скляднева, А.Р. Ржаницына, F. Faltus, P.Halleux, T.E. Gibson и др.

Одним из наиболее рациональных типов легких металлоконструкций в строительстве являются балки с перфорированными стенками, изготавливаемые на специализированной установке с высоким уровнем механизации заготовительных и сборочно-сварочных операций.

В обзоре выявлено, что методики вычисления прогибов от поперечного изгиба даже в двутавровых балках с перфорированной стенкой сильно разнятся и не имеют единой концепции. Кроме того, отсутствует их сравнительный анализ и не приведена оценка степени их точности в сравнении с экспериментальными данными. Также отсутствуют данные о применимости указанных теорий к балкам замкнутого сечения с перфорированными стенками.

Общий метод решения задачи о кручении стержня некруглого сечения впервые был разработан Сен-Венаном в 1864 г. Год спустя, в 1865 г, русским ученым А. Соколовым было дано решение ряда задач на кручение стержней некруглого сечения.

Наиболее многочисленные теоретические исследования, подкрепленные экспериментальными исследованиями тонкостенных стержней частично замк-

нутого сечения на кручение и кручение с изгибом, приведены в монографии Д.В. Бычкова.

Немногочисленность экспериментальных исследований балок с частично замкнутым сечением и полное отсутствие данных об исследованиях балок коробчатого сечения с перфорированными стенками на кручение и изгиб с кручением может объясняться отсутствием специального испытательного оборудования, позволяющего производить такие испытания.

В последнее время в «машинных» расчетах все больше исследователей использует численный метод МКЭ, который позволяет определять НДС в исследуемых балках, но в литературе отсутствуют исследования по моделированию таких балок при кручении.

Во второй главе рассмотрены алгоритмы определения прогибов с учетом сдвига в двутавровых балках с перфорированной стенкой и методика определения касательных напряжений в стенке перфорированной балки замкнутого сечения при кручении. Проведен поиск оптимальных параметров моделирования в МКЭ балок коробчатого сечения с перфорированными стенками при кручении.

Результаты сравнения экспериментальных результатов деформативности двутавровых балок с перфорированной стенкой, приведенных в работах Литвинова Е.В., Добрачева В.М, Данкова В.С., Ворожбянова В.Н., Корчака М.Д., Майсова М.П. и др., показывают, что методика определения прогибов по нормам проектирования несовершенна. Значения прогибов в упругой стадии работы балки при большом диапазоне параметров могут превышать нормативные, вычисленные по СНиПу и СП более чем в 5 раз.

Большинство исследователей полагают, что сверхнормативные деформации вызваны неучтенными деформациями сдвига, но при этом в классической форме решения по определению прогибов с учетом деформаций сдвига в известных публикациях не освещены. Существующие методики при решении данной задачи сильно разнятся друг с другом и не имеют сравнений полученных результатов между собой и экспериментом.

Рассмотрим формулу определения прогибов в стальных балках с учетом деформаций сдвига при поперечном изгибе.

$$y(z) = y_M(z) + y_Q(z),$$

где $y_M(z)$ – прогибы, определяемые без учета деформации сдвига;

$y_Q(z) = kf(z, M_0(z), EJ, GA)$ – дополнительные прогибы, вызванные сдвиговыми деформациями.

Здесь $k = \frac{A}{J_x^2} \int_{h_1}^{h_2} \frac{S^2(y)}{b(y)} dy$ – коэффициент, зависящий от формы поперечного сечения.

Для симметричного составного двутавра

$$k = \frac{2A}{J_x^2} \left(\int_{h_1}^{h_2} \frac{S_1(y)^2}{b_f} dy + \int_0^{h_1} \frac{S_2(y)^2}{t_w} dy \right),$$

где $S_1(y)$, $S_2(y)$ – статические моменты отсеченных частей сечения, соответственно от полки и стенки; A , J_x – соответственно площадь и момент инерции сечения двутавра; h – высота балки; $h_1 = \frac{h_w}{2}$; $h_2 = \frac{h}{2}$; h_w – высота стенки.

Степень влияния сдвига на прогибы продемонстрируем на примерах расчета однопролетных жестко защемленных по обоим концам балок из двутавра №12 (ОСТ 10016-39) ($h = 120$ мм, $b_f = 74$ мм, $t_w = 5$ мм, $t_f = 8,4$ мм, $A = 17,91$ см², $J = 436$ см⁴, $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,3$) при $10 \geq \ell \geq 4$, загруженных в середине пролета силой $P = 100$ кН. Указанная серия балок ранее подвергалась экспериментальным исследованиям.

Сравнения максимальных прогибов, вычисленных по МНП без учета сдвига – y_M , с учетом сдвига – $y = y_M + y_Q$, экспериментальные значения – $y_э$, приведены в табл.1.

Таблица 1

Сравнение максимальных прогибов, вычисленных с учетом и без учета сдвига МНП, с экспериментальными прогибами

ℓ/h	$y_M,$ мм	$y,$ мм	$\frac{y}{y_M}$	$y_{\text{э}},$ мм	$\frac{y_{\text{э}} - y}{y_{\text{э}}} \cdot 100, \%$
10	1,0020	1,6348	1,63	1,5674	-4,30
8	0,51305	1,0193	1,99	0,9835	-3,64
6	0,21644	0,5961	2,75	0,5578	-6,87
4	0,06413	0,3172	4,95	0,2961	-7,12

Сравнение результатов представленных в табл. 1, показывает, что в рассматриваемом широком диапазоне ℓ/h неучет влияния сдвига приводит к существенным расхождениям по максимальному прогибу от 1,63 раза при $\ell/h=10$ до 4,95 раза при $\ell/h=4$. Расхождение же теоретических значений, полученных при расчете с учетом сдвига, с экспериментальными не превышает 7,2%. Таким образом, учет деформаций сдвига необходим для широкого диапазона балок.

В балке с перфорированной стенкой, на отдельных участках по длине, за счет имеющихся отверстий сечение стенки балки меняется, поэтому вычисление прогибов с учетом деформаций сдвига становится довольно сложным. Для упрощения вычислений заменим участок сечения балки, в котором находится

отверстие, на сплошной с приведенной толщиной $t'_w = \frac{\left(\ell - \frac{s}{2}n\right) \cdot t_w}{\ell}$,

где ℓ – пролет балки; s – длина выреза с гребнем; n – количество отверстий в балке.

Приведенное сечение двутавровой балки с перфорированной стенкой выглядит следующим образом (рис. 1)

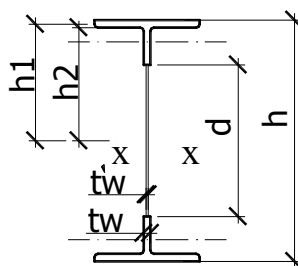


Рис. 1. Приведенное сечение балки с перфорированной стенкой

Наибольшую сложность в вычислениях прогиба от сдвига представляет нахождение коэффициента неравномерности распределения касательных напряжений k .

Для приведенного сечения коэффициент k определим по формуле

$$k = \frac{A}{J_x^2} \left[\frac{b_f}{2} \left(\frac{h^5}{60} - \frac{h^4 h_w}{32} + \frac{h^2 h_w^3}{48} - \frac{h_w^5}{160} \right) + \right. \quad (1)$$

$$+ \frac{2}{t_w} \left(\left(b_f t_f h_1 + \frac{t_w h_2^2}{2} \right)^2 \cdot \left(h_2 - \frac{d}{2} \right) + \frac{t_w^2}{20} \left(h_2^5 - \left(\frac{d}{2} \right)^5 \right) - \left(\frac{b_f t_f h_1 t_w}{3} + \frac{t_w^2 h_2^2}{6} \right) \cdot \left(h_2^3 - \left(\frac{d}{2} \right)^3 \right) \right) +$$

$$+ \frac{1}{t_w'} \left(-\frac{13 t_w'^2 d^5}{240} + b_f^2 t_f^2 h_1^2 d - t_w^2 d \left(h_2 - \frac{d}{2} \right)^2 \left(d + \frac{h_2 - \frac{d}{2}}{2} \right) + 2 t_w d b_f t_f h_1 \left(h_2 - \frac{d}{2} \right) \left(d + \frac{h_2 - \frac{d}{2}}{2} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{b_f t_f h_1 t_w' d^3}{6} + \frac{11 h_2 d^4 t_w' t_w}{96} - \frac{7 d^5 t_w' t_w}{32} + \frac{h_2^2 d^3 t_w' t_w}{8} - \frac{h_2^2 d^3 t_w' t_w}{24} \right) \Bigg].$$

При вычислении использовались следующие обозначения:

S_1, S_2, S_3 – статические моменты отсеченных частей сечения полки, стенки вне отверстия и стенки в пределах отверстия;

$A_{оме}, J_{x,оме}$ – площадь и момент инерции сечения перфорированного двутавра в сечении с отверстием;

d – высота отверстия;

h – высота перфорированной балки;

h_1 – расстояние от центра тяжести (ц.т.) сечения двутавра до ц.т. полки;

h_2 – расстояние от ц.т. сечения двутавра до наружной грани полки.

С целью разработки методики определения касательных напряжений в стенках-перемычках балок замкнутого сечения с перфорированной стенкой при воздействии на балку крутящего момента было произведено совершенствование (с помощью введения некоторых допущений) существующих методик Е.А.Бейлина и Бретта.

По теории Е.А. Бейлина максимальное касательное напряжение в полке балки и усредненное значение касательных напряжений в стенке может быть получено по следующей формуле:

$$\tau_{\max} = \tau_k + \tau_d = M_k / W + M_d / (\Omega \delta_i) = L J_d / ((J_k + J_d) W) + L J_k / ((J_k + J_d) (\Omega \delta_i)), \quad (2)$$

Балку с отверстиями в стенке на основе теории Власова приводим к сплошностенчатой без отверстий с помощью замены участка сечения, в котором имеются отверстия, сплошным участком с эквивалентной толщиной δ_3 . Тогда

$$\delta_3 = \left[\bar{b} \left(\bar{a}^2 \bar{G} / 12 \bar{E} I_{nl} + 1,2 / A_{nl} \right) \right]^{-1} = 1 / \left(\bar{b} \left(h_{омс}^2 \bar{G} / 12 \bar{E} I_{nl} + 1,2 / A_{nl} \right) \right),$$

где $\bar{G} / (12 \bar{E} I_{nl}) = 1 / (2 t_w' c^3 (1 + \mu))$.

По теории Бретта при свободном кручении суммарный поток касательных напряжений по длине балки должен быть одинаков как для балки полностью замкнутого сечения, так и для балки с частично замкнутым сечением. Тогда, рассматривая балку с частично замкнутым сечением, участок сечения балки, в котором имеются отверстия, заменяем сплошностенчатым без отверстий с эквивалентной толщиной δ_3 исходя из условия, что касательные напряжения в серединах высоты стенок увеличатся пропорционально уменьшению площади сечения стенки.

Касательные напряжения в уровне сварного шва в простенках в предлагаемой расчетной модели могут быть найдены по следующей формуле:

$$\tau_{\max} = M_z / (\Omega \delta_{32}), \quad (3)$$

где $\delta_{32} = t_w \cdot (\ell - (s - a)n) / \ell$ – эквивалентная толщина пластины.

Наиболее полную картину распределения НДС в исследуемых балках при кручении и изгибе с кручением можно получить с помощью расчета балки методом конечных элементов. Но для расчета необходим поиск наиболее оптимальных параметров моделирования балок, при которых бы была обеспечена приемлемая точность вычислений.

Для определения оптимальных параметров моделирования балки коробчатого сечения с перфорированными стенками при свободном кручении был произведен анализ сходимости МКЭ SCAD в сравнении с результатами экспериментов кручения профилей, описанных в работе Д. В. Бычкова.

Сравнительному анализу МКЭ с экспериментом подверглись результаты перемещений при свободном кручении прокатного двутавра, прокатного швеллера и сварного составного двутавра. Варьировался тип конечного элемента при расчете (объемный и плоский) и количество конечных элементов при разбиении балки по толщине. Исследовалось также влияние сварного шва и закруглений в месте стыка полки со стенкой и уклон внутренних граней полок.

Плоские конечные элементы, моделирующие балку, выполнялись из 44-го типа конечного элемента оболочки. Объемные конечные элементы выполнялись из 34-го типа КЭ (6 узловой изопараметрический конечный элемент) и 36-го типа КЭ (8 узловой изопараметрический конечный элемент).

Результаты сравнения деформаций, вычисленных по МКЭ и эксперименту для прокатного двутавра и швеллера, с использованием при разбиении объемных конечных элементов (КЭ), приведены в табл. 2, а для составного двутавра - в табл. 3.

Таблица 2

Результаты сравнения усредненных экспериментальных относительных углов закручивания [2] и вычисленных по МКЭ для прокатных профилей

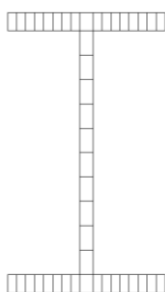
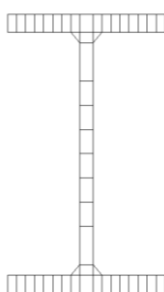
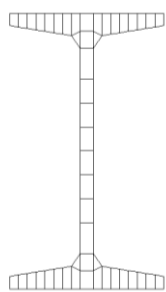
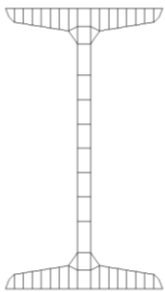

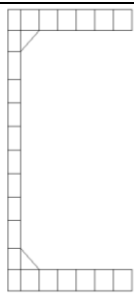
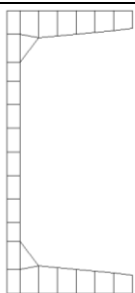

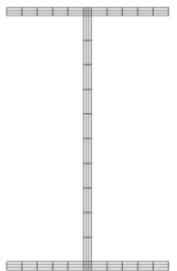
Вид профиля	Варианты моделирования сеточных областей, расчетные модели сечений и процент расхождения $\frac{\theta'_{эксп} - \theta'_{МКЭ}}{\theta'_{эксп}} \cdot 100 \%$			
	а	б	в	г
Прокатный двутавр с уклоном внутренних граней полок	 28 %	 14,4 %	 5,98 %	 5,04 %
Прокатный швеллер с уклоном внутренних граней полок	 33,4 %	 12,8 %	 1,5 %	 0,07 %

Таблица 3

Результаты сравнения усредненных экспериментальных относительных углов закручивания [2] и вычисленных по МКЭ для сварного составного двутавра

Варианты по типу КЭ и моделирования сеточных областей, расчетные модели сечений и процент расхождения $\frac{\theta'_{\text{эксп}} - \theta'_{\text{МКЭ}}}{\theta'_{\text{эксп}}} \cdot 100 \%$				
а	б	в	г	д
				
10,9%	7,2%	7,5%	7,9%	1,4%

В табл. 2 варианты моделирования сеточных областей соответствуют следующим сечениям: а) без скруглений и уклонов полок; б) с элементами, имитирующими скругление в местах примыкания полок к стенке; в) с элементами, имитирующими скругление в местах примыкания полок к стенке и уклоны граней полок; г) с элементами, имитирующими все скругления и уклоны граней полок.

В табл. 3 варианты по типу КЭ и моделирования сеточных областей соответствуют: а) оболочечные КЭ; б) объемные КЭ; в) объемные КЭ с разбиением полки по толщине на три КЭ; г) объемные КЭ с разбиением полки и стенки по толщине на три КЭ; д) объемные КЭ с элементами, имитирующими по геометрическим параметрам сварной шов в месте примыкания полок к стенке.

Проведенными исследованиями установлено, что наиболее существенным фактором, влияющим на точность результатов расчета в МКЭ при чистом кручении, является учет сварных швов или скруглений в местах стыка стенок с полкой в прокатных профилях; несколько меньше - учет уклонов внутренних граней полок и незначительным - учет скруглений на концах полок. Увеличение конечных элементов по толщине элементов не приводит к заметным изменениям в результатах расчета и даже немного ухудшает сходимость.

В третьей главе изложена методика испытания опытных балок коробчатого сечения с перфорированными стенками и приведены результаты экспериментальных исследований.

Цель экспериментальных исследований:

- изучение распределения напряжений и деформирования в балках коробчатого сечения с перфорированными стенками при изгибе, кручении и изгибе с кручением;

- экспериментальная проверка результатов расчета, полученных по разработанным ранее методикам.

Основными задачами экспериментального исследования являлись:

- определение НДС экспериментальным путем в балках коробчатого сечения, скомпонованных из перфорированных профилей при свободном кручении, изгибе и кручении с изгибом;

- сравнение и анализ прогибов при изгибе, снятых при проведении эксперимента, с прогибами, вычисленными по МКЭ и разработанным алгоритмам;

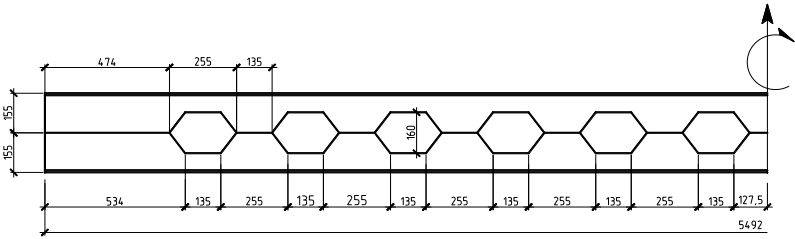
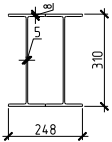
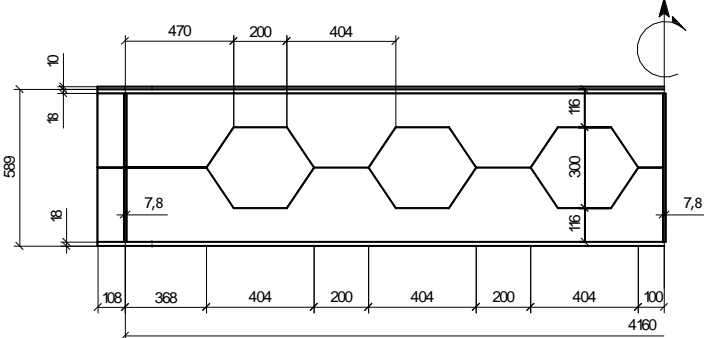
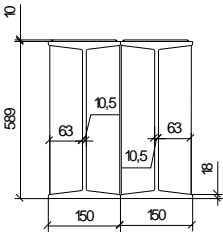
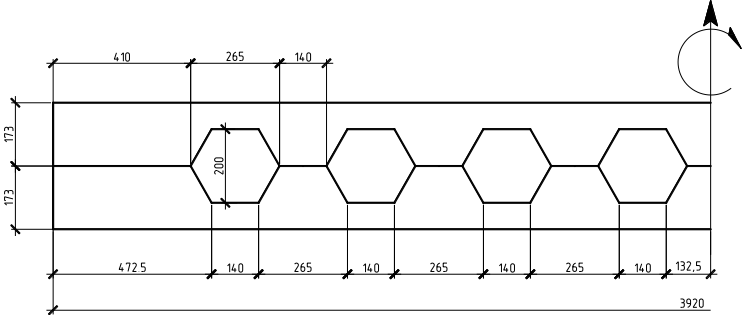
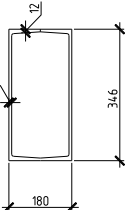
- сравнение и анализ жесткостных характеристик и максимальных касательных напряжений при кручении, полученных экспериментальным путем, с результатами аналитического расчета и МКЭ.

В соответствии с поставленной целью и задачами экспериментальных исследований были запроектированы и изготовлены 5 балок пролетом 3,68 – 5,49 м (табл. 4)

Таблица 4

Размеры опытных балок

Балка	Схема балки	Сечение балки
1	2	3
Б-1		
Б-2		

1	2	3
Б-3		
Б-4		
Б-5		

Испытательный стенд С-1 при испытании на кручение и изгиб с кручением. Для экспериментального исследования напряженно-деформируемого состояния балок при кручении и изгибе с кручением законструирован и изготовлен испытательный стенд С-1 в соответствии с патентом на полезную модель.

Испытательный стенд С-1 состоит из следующих основных частей: основание, опорные конструкции, приспособление для нагружения испытываемой балки и гидравлический домкрат.

Опорные конструкции выполнены в виде двух опор заземления 3 (рис. 2), установленных на основании с возможностью варьирования размеров пролета и снабженных упорами, фиксирующими положение устанавливаемой опоры испытываемой конструкции. Приспособление для нагружения 2 выполнено в виде подкрепленной раскосами сборной траверсы, навешиваемой по ее цен-

тру на испытываемую балку и состоящей при этом из двух асимметрично расположенных полурам, содержащих захваты под балку, соединенные между собой посредством болтовых соединений. Сборная траверса установлена с возможностью взаимодействия через полусферические шарниры или с одним (в испытаниях на изгиб с кручением), или с двумя гидравлическими домкратами (в испытаниях на кручение), установленными на одинаковом расстоянии от продольной оси балки и обеспечивающими силовое воздействие в противоположных направлениях. При этом один домкрат, предназначенный для силового воздействия вверх, установлен на основании под траверсой, а второй домкрат, предназначенный для силового воздействия вниз, установлен над траверсой с использованием опоры домкрата, фиксирующей его местоположение.

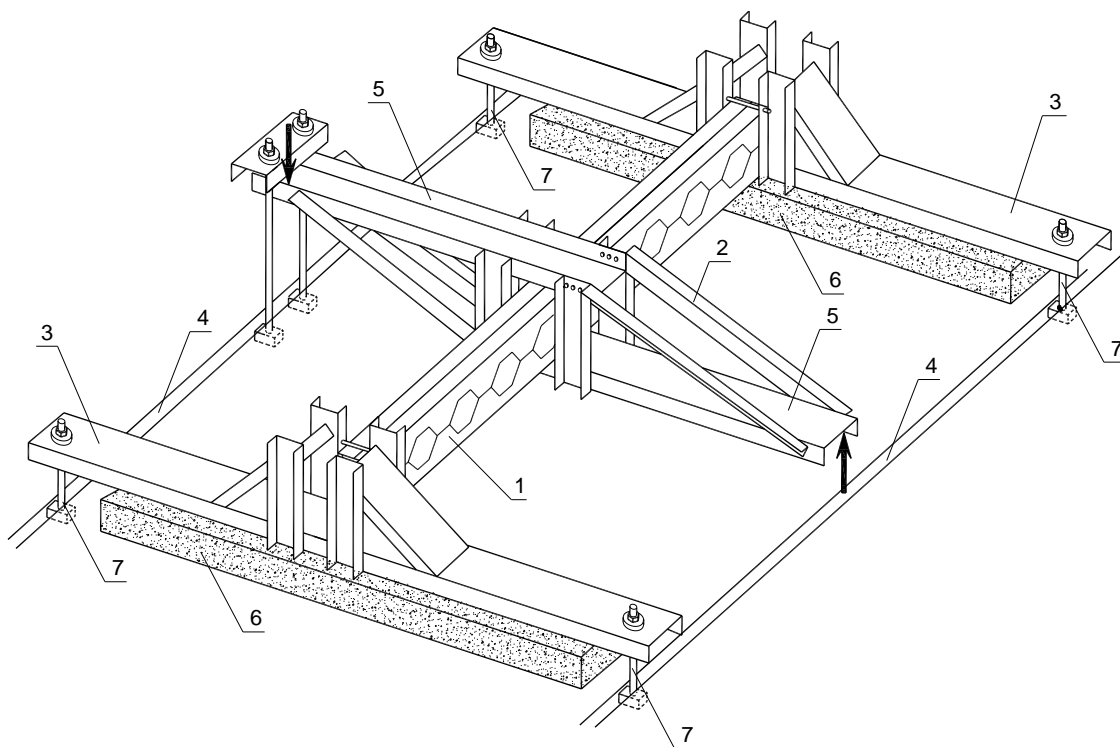


Рис. 2. Общий вид испытательного стенда

При взаимодействии траверсы с одним домкратом, последний расположен над траверсой. В качестве основания использован силовой пол, в котором выполнены Т-образные силовые каналы 4, взаимодействующие с опорными элементами домкрата, установленного над траверсой, и опорами заземления.

Каждая опора заземления оперта на установленную на основание железобетонную плиту 6 и снабжена двумя анкерами 7, взаимодействующими с Т-образными силовыми каналами основания.

Приспособление для нагружения состоит из двух полурам 5, скрепленных между собой болтовыми соединениями, домкратов, полусферических шарниров и опоры домкрата.

Опора заземления выполнена в виде горизонтально расположенного швеллера, в средней части которого приварены вертикально установленные упоры, подкрепленные подкосами. Швеллер оперт на железобетонную плиту, установленную на основание, и с обоих торцов закреплен посредством крепежных анкеров, установленных в Т-образных силовых каналах основания.

Передача усилий от домкратов на раму осуществляется через стальные полусферические шарниры, позволяющие шарнирно передавать нагрузку, без изменения расстояния от оси балки даже при достаточно больших углах закручивания. Опоры заземления, установленные по торцам испытываемой конструкции, позволяют производить шарнирно-подвижное заземление.

Принцип действия приспособления для нагружения при испытании на кручение заключается в восприятии приспособлением разнонаправленной сосредоточенной нагрузки от двух домкратов (задающих одинаковую нагрузку), расположенных на равном расстоянии от оси центра тяжести испытываемой конструкции, в результате чего поперечные силы от каждого домкрата взаимно уравновешиваются. Вследствие наличия плеча сил возникает «чистый» крутящий момент в плоскости поперечного сечения балки.

Испытательный стенд С-2 при испытании на изгиб. Испытания балок Б-1 – Б-5 на поперечный изгиб было произведено на базе тысячетонного прессы.

В ходе экспериментов перемещения точек конструкции измеряли при помощи прогибомеров ПАО-6 и индикаторов часового типа ИЧ-25 с ценой деления 0,01 мм. Контроль горизонтальных смещений опор заземления производился индикаторами часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм.

Деформации отдельных участков волокон конструкции, а по ним напряжения измеряли при помощи тензодатчиков с базой 5, 10 и 20 мм.

Проведение испытаний

Балка Б-1 испытывалась на кручение, изгиб и изгиб с кручением. Нагружение балки в первом загрузении (при испытании балки на кручение) осуществлялось гидравлическим домкратом максимальной грузоподъемностью 100 кН, ступенями по 2,5 кН в несколько этапов. При достижении усилия в

домкратах значения 15 кН, (что соответствует $M_{кр} = 45$ кН·м) испытание было прекращено.

Нагружение конструкции во втором загрузении (при испытании балки на изгиб с кручением) осуществлялось гидравлическим домкратом максимальной грузоподъемностью 100 кН ступенями по 5 кН в несколько этапов.

Нагрузка от домкрата на балку при испытаниях на изгиб передавалась при помощи полусферического шарнира и стальных, толстолистовых распределительных пластин.

Балка Б-2 испытывалась на изгиб. Нагружение балки осуществлялось гидравлическим домкратом максимальной грузоподъемностью 500 кН ступенями по 50 кН в несколько этапов. При достижении усилия в домкрате значения 325 кН испытание было прекращено из-за разрушения балки.

Разрушение балки произошло из-за потери устойчивости стенки – перемычки, расположенной по центру пролета, к которой непосредственно была приложена нагрузка.

Балка Б-3 испытывалась на изгиб. Нагружение балки осуществлялось гидравлическим домкратом максимальной грузоподъемностью 250 кН ступенями по 20 кН в несколько этапов. При достижении усилия в домкрате значения 15,5 кН испытание было прекращено из-за разрушения балки. Разрушение балки произошло из-за потери несущей способности верхних тавровых поясов в местах контакта роликовых катков с балкой. Разрушающая нагрузка 15,5 т.

Балка Б-4 испытывалась на изгиб. Нагружение балки осуществлялось гидравлическим домкратом максимальной грузоподъемностью 1000 кН ступенями по 200 кН в несколько этапов.

При достижении усилия в домкрате значения 1200 кН испытание было прекращено из-за опасности выхода из строя гидравлического оборудования домкрата от большого давления. Видимых повреждений в балке при максимальной нагрузке выявлено не было. Превышение предельного напряжения достигло 7%.

Балка Б-5 испытывалась на изгиб. Нагружение балки осуществлялось гидравлическим домкратом максимальной грузоподъемностью 250 кН ступенями по 50 кН в несколько этапов. При достижении усилия в домкрате значения 275 кН испытание было прекращено из-за разрушения балки.

Нагрузка от домкрата на балку передавалась при помощи полусферического шарнира и стальных, толстолистовых распределительных пластин. Разрушение балки произошло из-за потери устойчивости стенки – перемычки, расположенной по центру пролета, к которой непосредственно была приложена нагрузка.

Результаты испытания балки Б-1 на кручение

Значение касательных напряжений (при $M_{кр} = 30 \text{ кН} \cdot \text{м}$), возникаемых в центрах простенков, полученных в МКЭ SCAD, с разработанными формулами и экспериментом представлены в табл. 5.

Таблица 5

Средние значения касательных напряжений в простенках в уровне сварного шва

Вид напряжения и силовой фактор	Опорный простенок, МПа	1-й простенок, МПа	2-й простенок, МПа
$\tau_{МКЭ}$ кручение	-52,68	-69	-64,48
$\tau_{экс}$ кручение	-	-	-59,3
$\tau_{ан,2}$ по формуле (2)	-	-84,3	-84,3
$\tau_{ан,3}$ по формуле (3)	-62,24	-62,24	-62,24

Сравнивая результаты расчета с экспериментальными данными, можно отметить, что несущая способность балок выше, чем предполагается в выведенных формулах (2) и (3). Превышения составили в сравнении с экспериментом для формулы (2) 42%, для формулы (3) 4,9%. В сравнении с МКЭ SCAD различия для формулы (2) составили от 22% до 39%, для формулы (3) от 3,5% до 18%.

Из табл. 5 видно, что различия МКЭ SCAD с экспериментальными результатами в среднем диапазоне нагрузок небольшие и составляют в среднем около 7% .

В наиболее узких местах простенков максимальные по модулю касательные напряжения при критической нагрузке $M_{кр} = 4,76 \text{ т} \cdot \text{м}$ будут равны $T_{уз} = 109,9 \text{ МПа}$.

При проведении экспериментальных исследований в тензорезисторах, установленных на балке, были зафиксированы достаточно большие нормальные напряжения. На рис. 3 представлен график изменения нормальных напряжений в отдельных точках балки, полученных при проведении эксперимента (при нагрузке-разгрузке), в сравнении с нормальными напряжениями, определенными по МКЭ SCAD.

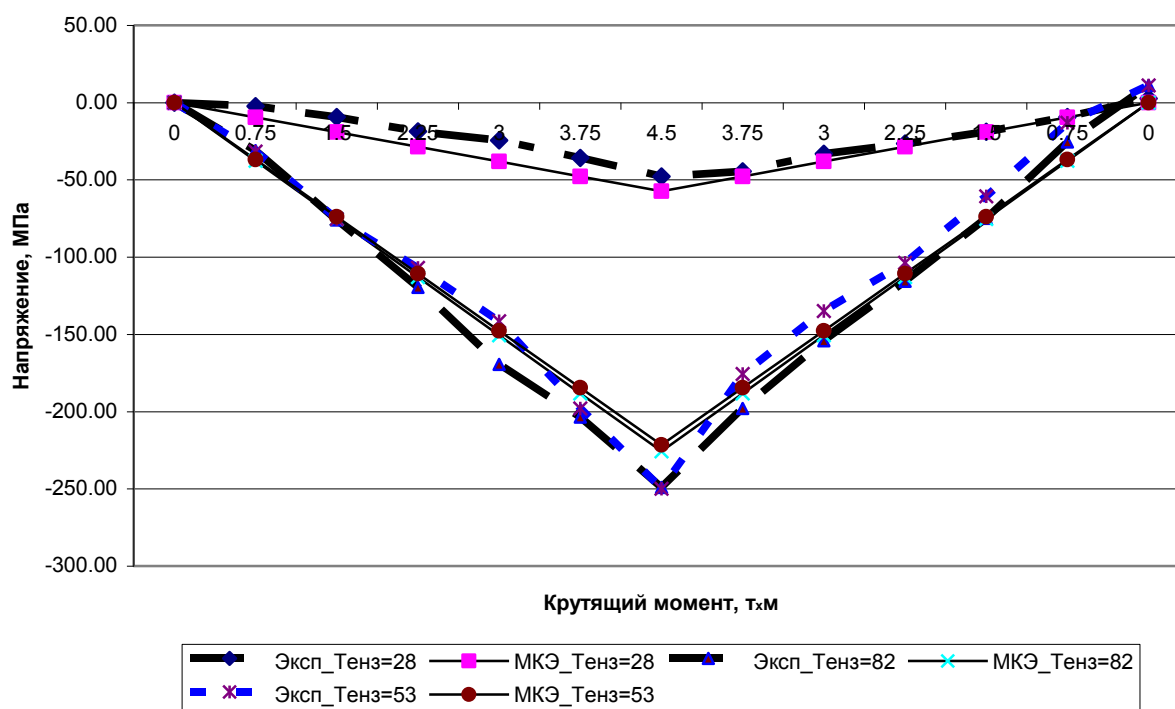


Рис. 3. Напряженное состояние в тензорезисторах №№ 28,82 и 53, установленных в стенке вблизи угловых зон 1-го отверстия балок Б1 и БII

Как видно из представленного графика (рис. 3), численные значения нормальных напряжений в балке коробчатого сечения с перфорированными стенками сравнительно велики. Вообще, в шарнирно-опертых балках замкнутого сечения при воздействии свободного кручения нормальных напряжений возникать не должно или они могут иметь небольшие значения, связанные с местными напряжениями.

Для сравнения были произведены численные расчеты МКЭ балки коробчатого сечения, имеющей те же геометрические характеристики, но не имеющей отверстий на такой же крутящий момент. Полученные в результате расчета нормальные напряжения σ_y в зонах балки удаленные от опор и мест приложения нагрузки имеют сравнительно небольшие численные значения, состав-

ляющие не более 2,5% (в среднем 1,2%) от нормальных напряжений σ_y , возникаемых в полке и стенке вблизи отверстий в балке коробчатого сечения с перфорированными стенками.

Следовательно, появление сравнительно больших значений нормальных напряжений в балке коробчатого сечения с перфорированными стенками при кручении может быть объяснено наличием вырезов в стенке балки.

В экспериментальных исследованиях изгиба балок Б-1-Б-5 основное внимание было уделено исследованиям прогибов в этих балках.

Для всех испытанных балок отношения средних значений прогибов сведены в табл. 6.

Таблица 6

Отношения средних значений прогибов, вычисленных по различным методикам, к экспериментальному прогибу

Балка	Авторы или методики определения прогибов							
	МКЭ SCAD	Копытов М.М. прибл.	Копы- тов М.М.	Доб- рачев В.М.	Ржа- ницин А.Р.	СНиП, СП	Тро- фимов В.И.	Предла- гаемый метод
	Отношение вычисленного по методике прогиба к экспериментальному $\frac{y_{ан}}{y_э}$							
Б-1	0,97	0,87	0,75	0,98	4,15	0,82	0,74	0,97
Б-2	1,13	1,08	0,91	1,1	3,95	0,95	0,91	1,05
Б-3	0,99	1,08	0,91	0,93	1,87	0,88	0,92	0,96
Б-4	1,01	0,79	-	-	-	0,68	-	0,96
Б-5	0,94	1,00	0,85	1,03	4,11	0,86	0,85	0,97

Предлагаемая методика определения прогибов в балках с перфорированной стенкой от изгиба показывает в сравнении с экспериментальными результатами для всех исследованных балок расхождение не более 5%. Результаты прогибов по рекомендациям СНиП и СП имеют различие с экспериментом до 32% соответственно.

Результаты испытания балки Б-1 на изгиб с кручением

Деформации балки Б-1 при изгибе с кручением. Экспериментальные и численные результаты деформаций представлены в таблице 7.

Таблица 7

Перемещения от изгиба с кручением

Номера точек	Способ определения перемещений	Нагрузка в домкрате P , кН							
		5	10	15	20	15	10	5	0
		Перемещения u_i , мм							
1	МКЭ SCAD	0.135	0.27	0.405	0.54	0.405	0.27	0.135	0
	Эксперимент	0.15	0.29	0.37	0.53	0.38	0.25	0.13	-0.05
2	МКЭ SCAD	0.266	0.532	0.798	1.064	0.798	0.532	0.266	0
	Эксперимент	0.28	0.55	0.79	1.07	0.8	0.56	0.29	0.02
3	МКЭ SCAD	0.444	0.888	1.332	1.776	1.332	0.888	0.444	0
	Эксперимент	0.43	0.86	1.29	1.73	1.3	0.85	0.41	-0.04
4	МКЭ SCAD	0.608	1.216	1.824	2.432	1.824	1.216	0.608	0
	Эксперимент	0.61	1.23	1.88	2.51	1.88	1.22	0.6	-0.03
5	МКЭ SCAD	0.631	1.262	1.893	2.524	1.893	1.262	0.631	0
	Эксперимент	0.63	1.28	1.92	2.55	1.9	1.28	0.62	-0.06

Примечание. В табл. 7 приведены общие перемещения $u_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2}$.

Касательные напряжения в коробчатых балках от изгиба и кручения по эксперименту и расчету по МКЭ для одной стенки получились одинаковыми по знаку, для другой стенки – разными по знаку. Эта закономерность соблюдается также и для нормальных напряжений.

Максимальные нормальные напряжения при изгибе и кручении зафиксированы в стенке у углов двух отверстий, находящихся вблизи центра пролета. Максимальные касательные напряжения возникли в стенке балки у углов отверстий и в наиболее узких частях простенков – в уровне сварного шва сплачивания двух перфорированных заготовок.

В четвертой главе приведены рекомендации по определению НДС в балках коробчатого сечения с перфорированными стенками при кручении с изгибом от сосредоточенных сил, приложенных по центру пролета.

НДС при изгибе. Определить напряженное состояние в шарнирно - опертых балках коробчатого сечения с перфорированными стенками при изгибе можно руководствуясь методикой, изложенной в действующих нормативных документах, приведя сечение к обыкновенной двутавровой балке с перфорированной стенкой (см. рис. 4).

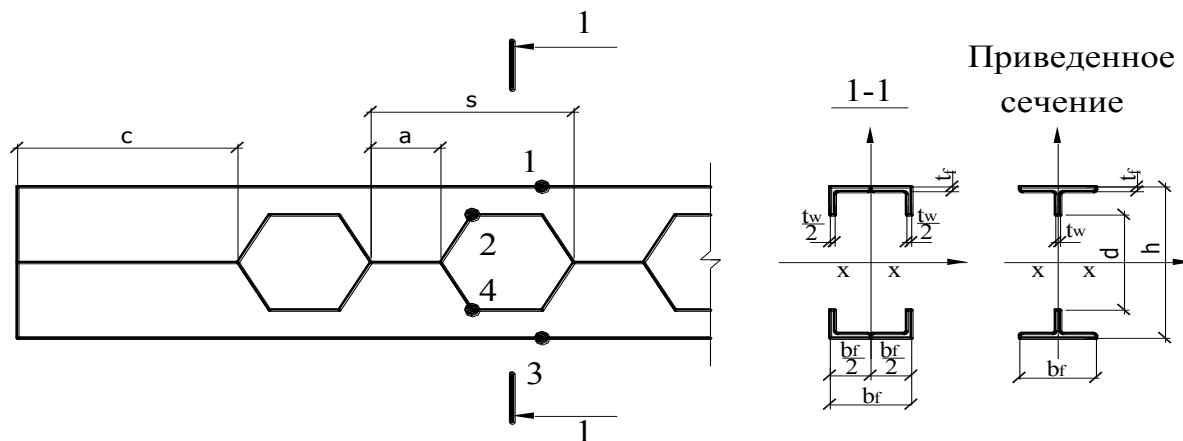


Рис. 4. Характерные геометрические размеры балки коробчатого сечения с перфорированной стенкой, сечение балки и приведенное сечение (на примере балки, скомпонованной из двух перфорированных швеллеров)

Определение прогибов следует осуществлять по формулам сопротивления материалов с учетом деформаций сдвига по разработанной модели сечения балки с заменой участка сечения балки, в котором находится отверстие, на сплошной с приведенной толщиной.

НДС при кручении. Касательные напряжения в уровне сварного шва в простенках в предлагаемой расчетной модели могут быть найдены по следующей формуле:

$$\tau_{\max} = M_z / (\Omega \delta_{s2}),$$

где $\delta_{s2} = t_w \cdot (\ell - (s - a)n) / \ell$ - эквивалентная толщина пластины.

Угол закручивания балки φ на расстоянии dz от опоры может быть найден интегрированием выражения $\frac{d\varphi}{dz} = \frac{M_z}{GJ_d}$ по координате z .

Величину J_d можно определить по формуле

$$J_d = p \sum_1^m |\omega_{ci} - \omega_{di}|,$$

где ω - секториальная координата, построенная из полюса, совпадающего с центром изгиба всего сечения. В характерных точках балки секториальные координаты будут равны $\omega_1 = b/2 \cdot h_{cm}/2$, $\omega_2 = \omega_1 + b/2 \cdot h'_{cm}/2$;

$m = 2$ - полное число связей в сечении;

$$p = 2 \cdot b \cdot h / \sum_1^m \left(\int_{ci}^{di} ds / \delta + \bar{a}_i / \delta_{\alpha_i} \cdot G / \bar{G}_i \right) - \text{поток единичного закручивания.}$$

Величины перемещений x и y могут быть определены по следующим формулам: $x = R \sin \varphi$; $y = R - R \cos \varphi$. Перемещение по оси y будет направлено вниз при угле закручивания сечения балки в интервале от $\varphi = 0$ до $\varphi = \arcsin \frac{b_f}{R}$.

Нормальные напряжения можно определить, произведя расчет по МКЭ на модели, сформированной в соответствии с рекомендациями, разработанными в главе 2.

НДС при кручении с изгибом. При сосредоточенной нагрузке с кручением в уровне сварного шва касательные напряжения в любом из простенков стенки №1 и стенке №2 могут быть найдены по формулам:

$$\tau_{1,c} = \frac{Qs}{t_w a (d + 2y_m)} + \frac{M_{kp}}{\Omega \delta_{\alpha 2}}; \tau_{2,c} = \frac{Qs}{t_w a (d + 2y_m)} - \frac{M_{kp}}{\Omega \delta_{\alpha 2}}.$$

При равномерно-распределенной нагрузке с кручением в уровне сварного шва касательные напряжения на расстоянии $(c + s - 0,5a)$ от опоры в стенке №1 и стенке №2 могут быть найдены по формулам:

$$\tau_{1,c} = \frac{\left(\frac{ql}{2} - q(c + s - 0,5a) \right) s}{t_w a (d + 2y_m)} + \frac{M_{kp}}{\Omega \delta_{\alpha 2}}; \tau_{2,c} = \frac{\left(\frac{ql}{2} - q(c + s - 0,5a) \right) s}{t_w a (d + 2y_m)} - \frac{M_{kp}}{\Omega \delta_{\alpha 2}}.$$

Определить нормальные и другие виды напряжений можно, произведя расчет по МКЭ на модели, сформированной в соответствии с рекомендациями, разработанными в главе 2.

Максимальное перемещение по оси y точки балки (эта точка находится в центре пролета и расположена на полке в наиболее удаленном от центра кручения месте, в котором при воздействии кручения точка перемещается вниз) можно определить, произведя суммирование прогибов от изгиба и кручения по следующей формуле:

$$f_{\text{сумм}} = f + y.$$

Перемещение по оси y от кручения будет увеличивать суммарный прогиб при угле закручивания сечения балки в интервале от $\varphi = 0$ до $\varphi = \arcsin \frac{b_f}{R}$.

Перемещение по оси x может быть найдено по формуле $x = R \sin \varphi$.

Основные выводы по диссертации

1. Результаты численных решений и экспериментов, проведенных на двутавровых балках и балках коробчатого сечения с перфорированными стенками, подтверждают существенное влияние сдвига на величину прогибов в большом диапазоне параметров. При проверках по второй группе предельных состояний в балочных конструкциях учет влияния сдвига необходим. Для определения прогибов в балках с перфорированной стенкой предлагается новая геометрическая модель, в которой участок сечения балки с отверстием заменяется сплошным с приведенной толщиной t'_w . Результаты расчета с использованием этих моделей хорошо согласуются с результатами численных (по МКЭ) расчетов и результатами экспериментов. Максимальное расхождение прогибов, вычисленных по данной геометрической модели, к экспериментальному прогибу составляет не более 5%.
2. В развитие теории Бретта для определения максимальных касательных напряжений в уровне сварного шва балок коробчатого сечения с перфорированными стенками при свободном кручении разработана геометрическая модель, в которой участок сечения каждой из стенок балки с отверстием заменяется сплошным с приведенной толщиной. Расхождение напряжений, вычисленных по данной геометрической модели, с напряжениями, полученными экспериментальным путем, составляет не более 4,9 %.
3. Численными расчетами тонкостенных балок при кручении в сравнении с экспериментальными данными подтверждена необходимость использования объемных конечных элементов, позволяющих моделировать реальное геометрическое сечение.
4. Экспериментальными исследованиями и численными расчетами впервые выявлено появление нормальных напряжений в балке замкнутого сечения с перфорированными стенками при свободном кручении.
5. Предлагаемая автором конструкция испытательного стенда позволяет в большом диапазоне варьируемых геометрических параметров испытываемых

балок проводить экспериментальные исследования напряженно-деформируемого состояния балок при кручении и изгибе с кручением.

б. Напряженное состояние, выявленное в балке коробчатого сечения с перфорированными стенками в экспериментальных исследованиях при изгибе, хорошо согласуется с результатами, определенными по методике СНиПа.

Основные положения диссертации изложены в печатных работах:

1. Енджиевский, Л.В. Анализ численных и экспериментальных результатов деформирования балки замкнутого сечения с перфорированной стенкой, при свободном кручении [Текст]/ Л.В.Енджиевский, **А.А.Юрченко** // Сб. материалов международной научно-практической конф. Наука и инновации в современном строительстве – 2007. Посвященной 175 – летию СПбГАСУ. Санкт-Петербург, 2007, -С. 110-113.
2. Юрченко, А.А. Деформации балок с перфорированной стенкой [Текст]/ **А.А. Юрченко** // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы междунаро. академических чтений 27-29 сентября 2007. - Курск. -2007 -С.171-175. ISBN 978-5-7681-0325-5.
3. Енджиевский, Л.В. Анализ алгоритмов определения прогибов стальных составных двутавровых балок с учетом деформаций сдвига [Текст]/ Л.В.Енджиевский, **А.А.Юрченко** // Изв. высших учебных заведений. Строительство. №10. – Новосибирск, 2002. С.129-134. ISSN 0536-1052.
4. Пат. №56618. Российская Федерация. МПК G01N3/20. Испытательный стенд [Текст]; Л.В.Енджиевский, Ю.А.Шеходанов, **А.А.Юрченко**; заявитель и патентообладатель Красноярская гос. архитектурно-строит. академия. №2006113514. Заявл. 20.04.2006; опубл. 10.09.2006. Бюл. № 25.
5. Енджиевский, Л.В. Учет деформаций сдвига для уточнения фактических прогибов в балочных конструкциях двутаврового и таврового сечений при проверках по второй группе предельных деформаций [Текст]/ Л.В.Енджиевский, А.В.Малиновская, **А.А.Юрченко** // Вестник ТГАСУ - Томск. 2002. С.7-8. ISBN 5-93057-072-8.

Юрченко Андрей Анатольевич

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ БАЛОК ЗАМКНУТОГО
СЕЧЕНИЯ С ПЕРФОРИРОВАННЫМИ СТЕНКАМИ

АВТОРЕФЕРАТ

Подписано в печать 09.10.08. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать плоская. Усл.-печ.л. 1,1.

Тираж 100 экз. Заказ № ____.

660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82.

Отпечатано на ризографе ИГУиРЭ.

660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82.