



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІКОНСТРУКЦІЇ**  
**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ**  
**METAL CONSTRUCTIONS**

№2, ТОМ 14 (2008) 67-75

УДК 624.072

(08)-0155-1

## **АНАЛІЗ ЧИСЕЛЬНИХ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ БАЛКИ ЗАМКНУТОГО ПЕРЕРІЗУ З ПЕРФОРОВАНИМИ СТІНКАМИ ПРИ ВІЛЬНОМУ КРУЧЕННІ З ВИГИНОМ**

**Л.В. Єнжієвський, А.А. Юрченко**

*Сибірський федеральний університет, кафедра будівельних конструкцій,  
пр. Свободний, 82а, г. Красноярськ, 660041, Росія.*

*E-mail: end-lev@yandex.ru, holbon@list.ru*

*Отримана 1 квітня 2008; прийнята 19 квітня 2008*

**Анотація.** В статті представлені результати експериментальних досліджень сталюї балки замкнутого перерізу з перфорованими стінками на вплив вільного кручення з вигином. Проведено порівняння отриманих експериментальних даних з результатами аналітичних і чисельних по МКЕ розрахунків.

**Ключові слова:** балка коробчатого перерізу з перфорованими стінками, вигин з крученням, експериментальні, чисельні дослідження.

## **АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БАЛКИ ЗАМКНУТОГО СЕЧЕНИЯ С ПЕРФОРИРОВАННЫМИ СТЕНКАМИ ПРИ СВОБОДНОМ КРУЧЕНИИ С ИЗГИБОМ**

**Л.В. Енджиевский, А.А. Юрченко**

*Сибирский федеральный университет, кафедра строительных конструкций, пр. Свободный, 82а, г.  
Красноярск, 660041, Россия.*

*E-mail: end-lev@yandex.ru, holbon@list.ru*

*Получена 1 апреля 2008; принята 19 апреля 2008*

**Аннотация.** В статье представлены результаты экспериментальных исследований стальной балки замкнутого сечения с перфорированными стенками на воздействие свободного кручения с изгибом. Проведены сравнения полученных экспериментальных данных с результатами аналитических и численных по МКЭ расчетов.

**Ключевые слова:** балка коробчатого сечения с перфорированными стенками, изгиб с кручением, экспериментальные, численные исследования.

## ANALYSIS OF THE NUMERICAL AND EXPERIMENTAL RESULTS OF THE STRESSED AND DEFORMED STATE OF THE CLOSED SECTION BEAM WITH PERFORATED WALLS TO WITHSTAND THE FREE TORSION WITH BENDING

L.V. Endzhievskiy, A.A. Yurchenko

*The Siberian Federal University*

*The Chair of the building structures*

*Svobodny Avenue, 82A, Krasnoyarsk, Russia, 660041.*

*E-mail: end-lev@yandex.ru, holbon@list.ru*

*Received 1 April 2008; accepted 19 April 2008*

**Abstract.** This article concerns the results of the experimental research of the close section steel beam with perforated walls under the free torsion impact with a curve. The comparison of the gotten experimental data and the results of the analytical numerical calculation with the method of the finite elements has been done.

**Keywords:** steel beam with perforated walls, free torsion impact with a curve, experimental, numerical research.

### Введение

Для восприятия кручения с изгибом в различных отраслях народного хозяйства (промышленном и гражданском строительстве, вагоностроении, судостроении, самолетостроении и т.д.) часто применяют балки замкнутого сечения и значительно реже – балки частично замкнутого сечения.

В настоящее время в связи с тенденцией резкого увеличения стоимости металлопродукта достаточно остро проявляет себя проблема снижения металлоёмкости строительных конструкций. Одним из путей повышения эффективности балок может стать их перфорирование. Однако названные типы балок, вследствие отсутствия научно-обоснованных рекомендаций по оценке их напряженно-деформированного состояния в условиях изгиба с кручением, не находят достойного широкого применения.

### Описание модели и методики экспериментальных исследований

Ввиду отсутствия по данной проблематике экспериментальных исследований в лаборатории строительных конструкций Сибирского федерального университета в 2006 г. была произведена серия испытаний балок замкнутого сече-

ния, скомпонованной из двух перфорированных швеллеров №24 ГОСТ 8240-89 (рис. 1) на изгиб с кручением и отдельно на изгиб и кручение.

Экспериментальное исследование проводилось на специально сконструированном испытательном стенде (рис. 2) [1].

Нагружение конструкции в первом нагружении (при испытании балки на изгиб с кручением) осуществлялось гидравлическим домкратом грузоподъемностью 100 кН ступенями по 5 кН в несколько этапов. При достижении усилия в домкрате равного примерно 22 кН, испытание было прекращено из-за предельного выхода штока домкрата из корпуса. Ось действия домкрата проходила в полутора метрах от продольной оси балки. Передача усилия на балку осуществлялось при помощи нагрузочной рамы.

Нагружение конструкции во втором нагружении (при испытании балки на кручение) реализовывалось при помощи уже двух гидравлических домкратов, установленных по разные стороны от продольной оси балки.

Третье нагружение (при испытании балки на изгиб) выполнялось при помощи гидравлического домкрата, установленного по центру пролета балки и воздействующего непосредственно в полку балки.

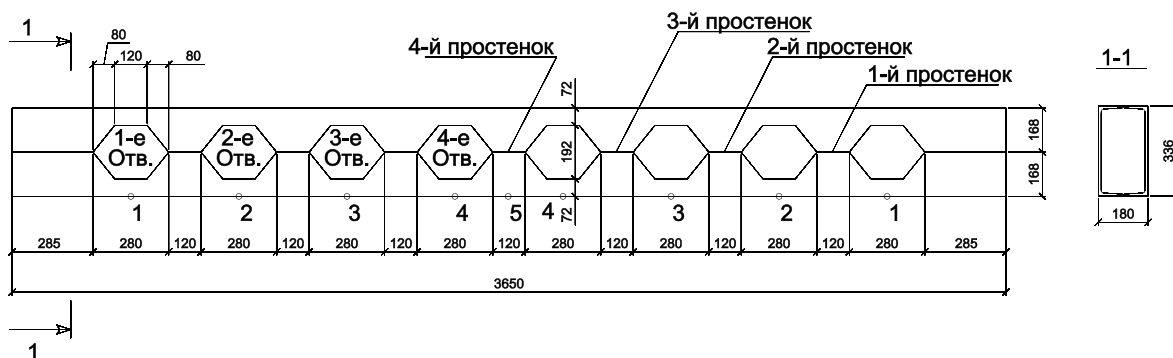


Рис. 1. Испытываемая балка.

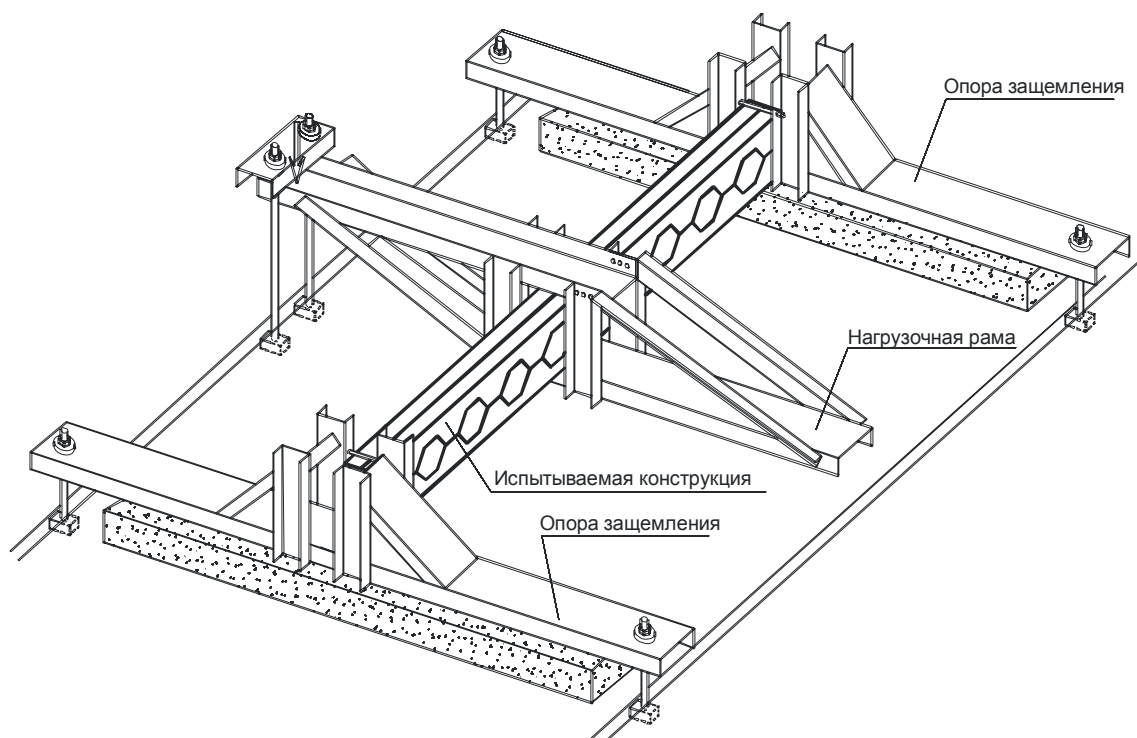


Рис. 2. Испытательный стенд.

При экспериментальных исследованиях на испытываемую конструкцию было установлено 95 тензодатчиков, 16 прогибомеров и 6 индикаторов. Кроме того, по торцам балки в верхней и нижней ее зоне были установлены по 4 контрольных индикатора, которые фиксировали деформации вилкообразного защемления. При обработке результатов эти деформации соответствующим образом отнимались от деформаций регистрируемых прогибомерами.

### Численный анализ в МКЭ SCAD

В численных расчетах большое внимание было уделено идеализации конструкции в МКЭ. В соответствии с рекомендациями [4], был произведен анализ сходимости МКЭ SCAD [2] с экспериментальными результатами Д. В. Бычкова [3]. Сравнительному анализу МКЭ с экспериментом подверглись перемещения при свободном кручении и изгибе

прокатного двутавра, прокатного швеллера и сварного составного двутавра.

В результате сравнения выявлено, что наиболее существенным фактором, влияющим на точность результатов расчета, являлись: учет сварных швов или скруглений в местах стыка стенок с полкой в прокатных профилях; несколько меньше - учет уклонов внутренних граней полки; и незначительным - учет скруглений на концах полки. Увеличение количества конечных элементов по толщине тонкостенных элементов не приводит к заметным изменениям в результатах расчета, но ухудшает сходимость. Применение в расчетах при разбиении

восьмиузловых объемных конечных элементов (тип 36) по сравнению с оболочечными конечными элементами (тип 44 и 41) позволяет получать результаты напряженно-деформированного состояния более приближенные к эксперименту.

На основе произведенного анализа в МКЭ SCAD смоделирована испытываемая балка, состоящая из 21096 узлов и 10948 объемных конечных элементов. Стенка балки по простенкам была разбита на 16 конечных элементов по высоте, полка на 16 конечных элементов по ширине. По толщине элементов дополнительное разбиение не производилось.

Таблица 1. 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

Таблица 2. Перемещения от кручения.

Номера точек	Способ определения перемещений	$M_{кр}$ , кН·м					
		7,5	15	22,5	30	37,5	45
		Перемещения $u_i$ , мм					
1	МКЭ SCAD	0.119	0.238	0.357	0.476	0.595	0.714
	Эксперимент	0.12	0.25	0.36	0.49	0.62	0.74
2	МКЭ SCAD	0.258	0.516	0.774	1.032	1.29	1.548
	Эксперимент	0.26	0.53	0.79	1.06	1.32	1.61
3	МКЭ SCAD	0.427	0.854	1.281	1.708	2.135	2.562
	Эксперимент	0.42	0.83	1.18	1.63	2.03	2.41
4	МКЭ SCAD	0.578	1.156	1.734	2.312	2.89	3.468
	Эксперимент	0.54	1.12	1.63	2.21	2.83	3.51
5	МКЭ SCAD	0.513	1.026	1.539	2.052	2.565	3.078
	Эксперимент	0.52	1.05	1.61	2.12	2.63	3.21

### Сопоставительный анализ результатов по деформациям

Сопоставительные по деформациям экспериментальные и численные результаты представлены: для балки при изгибе с кручением в таблице 1; для балки при кручении в таблице 2; для балки при изгибе в таблице 3.

В таблице 1,2 приведены общие перемещения  $u_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2}$ . Во всех решениях (см. табл. 1, 2) численные результаты по МКЭ и эксперименту хорошо согласуются. Расхождение не превышает 10 %.

Для балки при изгибе кроме экспериментальных и численных решений в табл. 3 приведены решения в соответствии с рекомендациями СНиПа и СП [9, 10], а также аналитические решения для авторской модели [6], в которой участок сечения в стенках балки, имеющий отверстия, заменялся сплошностенчатым с

$$t'_w = \left( \ell - \frac{s}{2} n \right) \cdot t_w / \ell \quad (1)$$

с использованием классического решения

$$y = \int_{\ell} \frac{\overline{M}_i M_P}{EJ^*} d\ell, \quad (2)$$

где для данной задачи  $y_{\max} = \frac{P\ell^3}{48EJ^*}$ ,

и решения по модели с учетом сдвига

$$y = \int \frac{\overline{M}_i M_P}{EJ^*} d\ell + \int \frac{\overline{kQ}_i Q_P}{GA^*} d\ell, \quad (3)$$

где для данной задачи  $y_{\max} = \frac{P\ell^3}{48EJ^*} + \frac{kP\ell}{4GA^*}$ .

В формулах 1-3 приняты следующие обозначения:  $\ell$  - пролет балки;  $s$  - длина выреза с гребнем;  $n$  - количество отверстий в балке;  $t_w$  - толщина стенки;  $J^*$ ,  $A^*$  - момент инерции и площадь поперечного сечения для рассматриваемой сплошностенчатой модели балки;  $k$  - коэффициент, учитывающий неравномерность распределения касательных напряжений по высоте балки.

Численные результаты по МКЭ и аналитическому расчету по формуле 3 хорошо согласуются с экспериментом. Расхождение не превышает 10 %. Результаты по рекомендациям СНиП и СП [9, 10] и аналитического расчета по формуле 2 имеют различие с экспериментом до 30 и 37% соответственно.

### Сравнение напряжений. Напряжения от изгиба с кручением.

Снятие напряжений в эксперименте производилось тензорезисторами, установленными на некотором удалении от точек в стенке у углов отверстий.

Сравнение результатов расчета по МКЭ с экспериментом при усилении в домкрате  $P=5$  кН

Таблица 3. Сравнение прогибов в балке от изгиба.

Способ определения прогибов	Усилие в домкрате $P$ , кН					
	5	10	15	20	25	30
	Прогибы $y_i$ , мм					
Эксперимент	0.26	0.52	0.8	1.05	1.33	1.63
МКЭ SCAD	0.2486	0.4972	0.7458	0.9944	1.243	1.4916
Аналитический расчет по формуле (2)	0.1984	0.3968	0.5952	0.7936	0.992	1.19
Аналитический расчет по формуле (3)	0.2480	0.496	0.744	0.992	1.24	1.488
По рекомендациям СНиП и СП [9, 10]	0.2089	0.4178	0.6267	0.8356	1.0445	1.2534

приведено на рис. 3 (цифры без скобок указывают значение напряжений в исследуемых точках в МПа по результатам эксперимента, цифры в скобках указывают значение напряжений в исследуемых точках в МПа по МКЭ SCAD).

Как видно, результаты экспериментальных напряжений отличаются от напряжений, полученных по МКЭ SCAD на 3-15%.

### Напряжения от изгиба

Максимальные нормальные напряжения зафиксированы в углах у двух отверстий, находящихся вблизи центра пролета. Максимальные касательные напряжения в балке возникли у углов отверстий и в наиболее узких частях простенков - в уровне сварного шва сплачивания двух перфорированных заготовок.

Сравнение нормальных и касательных напряжений, вычисленных по МКЭ с расчетом при  $P=5$  кН, по рекомендациям [9, 10] (см. табл. 4-5).

Касательные напряжения в балке с перфорированной стенкой, вызванные изгибом, будут максимальными в стенке простенка между отверстиями в уровне сварного шва и углах отверстий. Однако нормы [9 и 10] в угловых зонах отверстий касательные напряжения не регламентируют.

### Напряжения от кручения

Максимальные касательные напряжения в полке балки и усредненное значение касательных напряжений в стенке по теории Е.А. Бейлина по формуле (12) [8]

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= \tau_k + \tau_d = M_k / W + M_d / (\Omega \delta_i) = \\ &= L J_d / ((J_k + J_d) W) + L J_k / ((J_k + J_d) (\Omega \delta_i)) \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\tau_k = M_k / W_i$  - касательные напряжения определенные как для открытого профиля;

$\tau_d = M_d / (\Omega \delta_i)$  - касательные напряжения в замкнутом профиле;

$\Omega = 2(b_f - t_w)(h - t_f)$  - удвоенная площадь, охватываемая контуром сечения;

$L = M_d + M_k$  - полный момент свободного кручения.

Величину  $I_d$  определим по формуле (8) [5]

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

где  $\omega$  - секториальная координата, построенная из полюса, совпадающего с центром изгиба всего сечения (см. рис. 4).

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;

$$p = 2 \cdot b \cdot h / \sum_1^m \left( \int_{ci}^{di} ds / \delta + \bar{a}_i / \delta_{3,i} \cdot G / \bar{G}_i \right) -$$

поток единичного закручивания при ;

$\theta$  - угол закручивания.

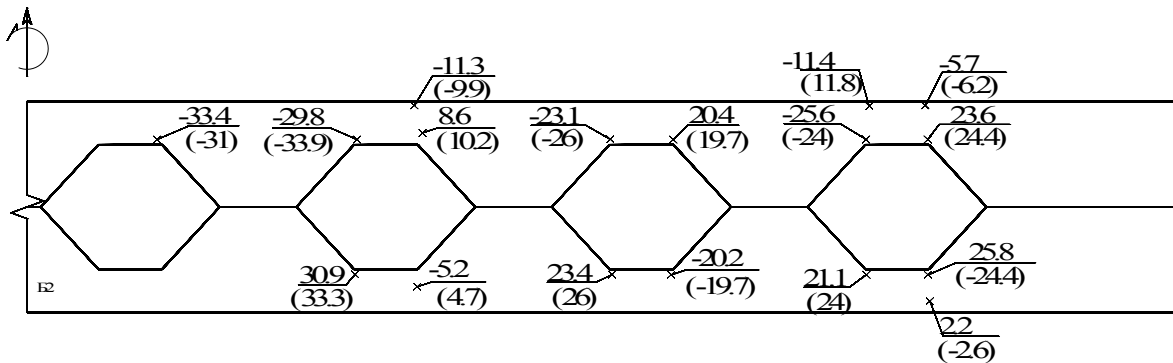


Рис. 3. Нормальные напряжения  $N_y$  в балке при загрузении от изгиба с кручением в местах расположения тензорезисторов.

Балку с отверстиями в стенке по рекомендациям Бейлина [5, 8] на основе теории Власова [11] приводим к сплошностенчатой без отверстий с помощью замены участка сечения, в котором имеются отверстия сплошным участком с эквивалентной толщиной  $\delta_3$ . Но, так как рассматриваемая теория применима для дискретно расположенных связей постоянной ширины, то сделаем следующие допущения:

1. За шаг депланационных связей примем регулярный шаг простенков в балке  $\bar{b} = s$  ;
2. За ширину депланационных связей примем среднюю ширину пролетных простенков  $c = s / 2$  ;
3. За толщину депланационных связей  $t'_w$  при определении  $\delta_3$  примем усредненную толщину стенки балки, вычисленную по формуле (1). Тогда

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

где  $\bar{G} / (12 \bar{E} I_{nl}) = 1 / (2 t'_w c^3 (1 + \mu))$ .

Вычислив все слагаемые и подставив их в формулу (4), получим максимальные касательные напряжения для полки и усредненные для стенки

$$\tau_{\max, n} = 13,87 \text{ МПа}, \tau_{\text{уср}, cm} = 16,6 \text{ МПа}.$$

Максимальные касательные напряжения в уровне сварного шва в простенках от свободного кручения

$$\tau_{\text{св.шов}} = \tau_{\text{уср}, cm} \cdot 2(s - a) / s = 23,2 \text{ МПа}.$$

**Предлагаемое уточнение**

В предлагаемой нами расчетной модели при свободном кручении максимальные касательные напряжения в уровне сварного шва в простенках

$$\tau_{\max} = M_z / (\Omega \delta_{32}), \tag{5}$$

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

**Таблица 4.** Сравнение нормальных напряжений  $N_y$  от изгиба.

Способ определения $N_y$	Номера отверстий с краю балки			
	1	2	3	4
У угловых зон отверстий в стенке				
МКЭ SCAD, МПа	-7,086 <sup>1</sup> [7,09]	-7,984 [7,99]	-9,022 [9,07]	-12,243 [9,27]
По рекомендациям СНиП и СП [9, 10], МПа	-5,594	-6,401	-7,208	-8,015
Отличие, %	26,7 [26,74]	24,7 [24,82]	25,2 [25,83]	52,7 [15,66]
В надугловых зонах отверстий в полке				
МКЭ SCAD, МПа	3,134 [3,13]	4,619 [4,56]	5,945 [6,08]	7,802 [7,05]
По рекомендациям СНиП и СП [9, 10], МПа	2,987	4,399	5,811	7,224
Отличие, %	4,9	5,0	2,3	8,0

<sup>1</sup>-Числа в таблице без скобок сняты с верхних краев у отверстий, значения в скобках с нижнего края у отверстий.

**Таблица 5.** Сравнение результатов расчетов касательных напряжений от изгиба.

Способ определения $\tau_{yz}$	Номера простенков с краю балки			
	1	2	3	4
МКЭ SCAD, МПа	2,191	2,199	2,24	0,03
По рекомендациям СНиП и СП [9, 10], МПа	2,45	2,45	2,45	0
Отличие, %	10,6	10,2	8,6	-

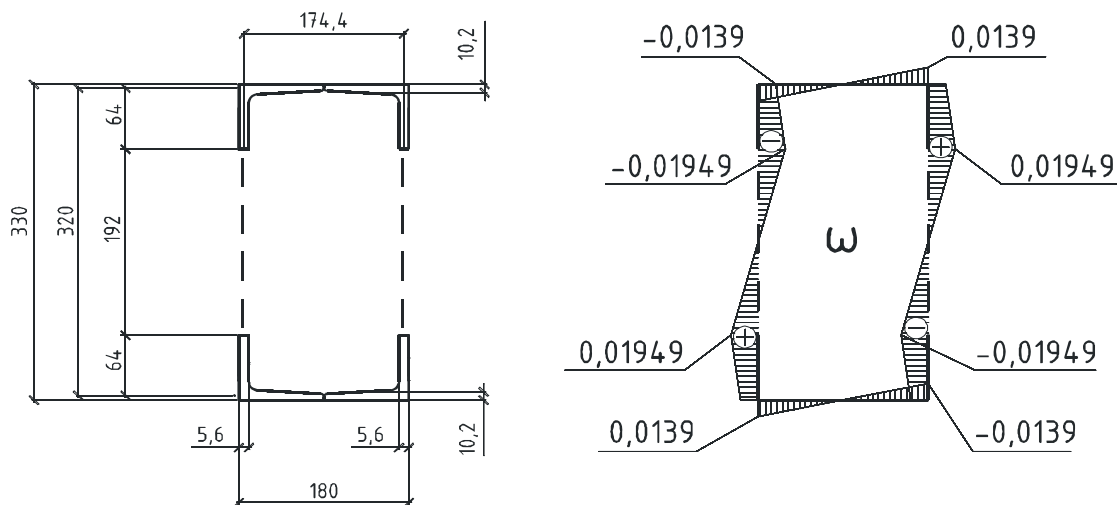


Рис. 4. Конструктивные размеры сечения и эпюра секториальных координат .

Предлагаемая формула (5) отличается от известной формулы Бретта [7] тем, что в качестве толщины на участках сечения, в стенках балки которых имеются отверстия, используется приведенная толщина пластины, а не полная толщина пластины.

Сравним полученные результаты расчетов (при  $P=5$  кН,  $M_{кр}=7,5$  кНм) в МКЭ SCAD (см. таблицу 6) с аналитическими расчетами.

Как видно из табл. 6, касательные напряжения от изгиба стремятся разгрузить балку и снизить значение максимальных касательных напряжений, возникающих от кручения.

Для сравнения максимальные касательные напряжения, вычисленные в балке без отверстий, будут равны  $\tau_{ан.замки} = 6,03$  МПа.

## Вывод

Характер распределения нормальных напряжений полученных в эксперименте в целом, хорошо совпадает с характером распределения напряжений, полученных в численных расчетах.

При замене в расчетах перфорированного участка стенки балки на сплошной с приведенной толщиной стенки, получены приемлемые результаты расчетов при определении прогибов и максимальных касательных напряжений от кручения.

При изгибе хорошие результаты получают при принятой модели и учете сдвига.

## Литература

1. Патент на полезную модель №56618. Российская Федерация. МПК G01N3/20. Испытательный стенд [Текст]/Л.В.Енджиевский, А.А.Юрченко, Ю.А.Шеходанов// Заявитель и патентообладатель Красноярская государственная архитектурно-строительная академия КрасГАСА. Заявка №2006113514.
2. 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// Сборник материалов конференции. Наука и инновации в современном строительстве – 2007. Посвященная 175 – летию СПбГАСУ. Международная научно-практическая конференция. Санкт-Петербург. 2007. С. 110-113.
3. Бычков Д.В. Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций [Текст]/ Д.В. Бычков. Москва. Госстройиздат. 1962 г. - 476 с.
4. Карировский, В.С. Вычислительный комплекс SCAD [Текст] /В.С.Карировский, Э.З.Крискунов, А.А.Маляренко, А.В.Перельмутер, М.А.Перельмутер. М.: Издательство АСВ, 2007. – 592с. ISBN 978-5-93093-289-1.
5. Бейлин Е.А. Кручение тонкостенных стержней с частично замкнутым контуром сечения [Текст]/Е.А. Бейлин, Р.Г. Джонсон//Строительная механика и расчет сооружений, №3. 1991 г. С. 7-15.
6. Юрченко А.А. Деформации балок с перфорированной стенкой [Текст]/А.А. Юрченко// Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Материалы Междунар. академических чтений 27-29 сентября 2007. Курс 2007 г. 171-175 с. ISBN 978-5-7681-0325-5.



Таблица 6. Сравнение касательных напряжений в простенках в уровне сварного шва.

Вид напряжения и силовой фактор	Опорный простенок, МПа	1-й простенок, МПа	2-й простенок, МПа
$\tau_{МКЭ}$ изгиб с кручением	-11,01	-14,84	-11,9
$\tau_{МКЭ}$ кручение	-13,17	-16,92	-14,41
$\tau_{МКЭ}$ изгиб	1,43	2,16	2,2
$\tau_{ан,2}$ по формуле 4, кручение		-23,5	-23,5
$\tau_{ан,3}$ по формуле 5, кручение	-16,48	-16,48	-16,48

7. Александров А.В. Сопротивление материалов [Текст]/А.В.Александров, В.Д.Потапов, Б.П.Державин // Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 1995. – 560 с.: ил. ISBN 5-06-02751-1.
8. Бейлин Е.А. Вариант единой теории кручения тонкостенных стержней открытого, замкнутого и частично замкнутого профилей [Текст]// Исследования по механике строительных конструкций и материалов: Межвуз. темат. сб. тр. /ЛИСИ. Л., 1991. С. 57-74.
9. СНиП 11-23-81\*. “Стальные конструкции. Нормы проектирования” [Текст]/ Госстрой СССР. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
10. СП 53-102-2004. Свод правил по проектированию и строительству. Общие правила проектирования стальных конструкций [Текст]/ ЗАО ЦНИИПСК. М., 2005.
11. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни/ В.З.Власов [Текст]// Госуд. издательство физико-математической литературы, Москва, 1959г.

**Юрченко Андрій Анатолійович**, асистент кафедри «Будівельні конструкції» Сибірського федерального університету. Наукові інтереси: балки замкнутого перерізу, балки з перфорованими стінками.

**Єнжівський Лев Васильович**, д.т.н. професор, чл.-кор. РААСН, заслужений діяч науки РФ, завідувач кафедри «Будівельні конструкції» Сибірського федерального університету. Наукові інтереси: комбіновані просторові конструкції, статика й динаміка інженерних споруд, чисельні методи розрахунку просторових систем.

**Юрченко Андрей Анатольевич** асистент кафедры «Строительные конструкции» Сибирского федерального университета. Научные интересы: балки замкнутого сечения, балки с перфорированными стенками.

**Енджиевский Лев Васильевич**, д. т. н. профессор, чл.-корр. РААСН, заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой «Строительные конструкции» Сибирского федерального университета. Научные интересы: комбинированные пространственные конструкции, статика и динамика инженерных сооружений, численные методы расчета пространственных систем.

**Yurchenko Andrey Anatolyevich**, assistant of the “Building structures” Chair of the Siberian Federal University. Scientific interests: closed section beam, steel beams with perforated walls.

**Endzhievskiy Lev Vasilyevich**, professor, Doctor of Technical Science, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, honorary worker of Sciences of the Russian Federation, the head of the “Building structures” Chair. Scientific interests: composite spatial structures, static and dynamics of engineering constructions, numerical calculation methods of spatial systems.