



(06)-0105-1

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА КОНЦЕНТРАЦІЇ НАПРУЖЕНЬ ДЛЯ Т-ПОДІБНИХ ВУЗЛІВ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ШИРОКОПОЛИЧКОВОГО ДВОТАВРА ТА РЕШІТКИ ІЗ ГНУТОЗВАРНИХ ЗАМКНЕНИХ ПРОФІЛІВ

**С.В. Колесніченко, А.М. Миронов, І.М. Кулик**

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,  
вул. Державина 2, 86123, м. Макіївка, Україна.  
E-mail: ksv@dgasa.dp.ua*

*Отримана 27 грудня 2005; прийнята 21 січня 2006*

**Анотація.** У статті наведені результати експериментальних досліджень напружено - деформованого стану та концентрації напруження Т - подібного вузла типової кроквяної ферми з поясами із ШПД і решіткою із ГЗП. Наведено схеми випробування ферми, схема експериментальної установки, порівняння експериментальних і теоретичних результатів.

**Ключові слова:** коефіцієнт концентрації напруження, Т-подібні вузли із широкополічкового двотавра і решітки із гнутозварних замкнених профілів, поправочні коефіцієнти.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ Т-ОБРАЗНЫХ УЗЛОВ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ШИРОКОПОЛОЧНОГО ДВУТАВРА И РЕШЕТКИ ИЗ ГНУТОСВАРНЫХ ЗАМКНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

**С.В. Колесниченко, А.Н. Миронов, И.Н. Кулик**

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,  
ул. Державина 2, 86123, г. Макеевка, Украина.  
E-mail: ksv@dgasa.dp.ua*

*Получена 27 декабря 2005; принята 21 января 2006*

**Аннотация.** В статье приведены результаты экспериментальных исследований напряженно - деформированного состояния и концентрации напряжений Т-образного узла типовой стропильной фермы с поясами из ШПД и решеткой из ГСП. Приведены схемы испытания фермы, схема экспериментальной установки, сравнение экспериментальных и теоретических результатов.

**Ключевые слова:** коэффициент концентрации напряжений, Т-образные узлы с поясом из широкополочного двутавра и решеткой из гнутосварных замкнутых профилей, поправочные коэффициенты.

## THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF STRESS CONCENTRATION FACTOR FOR T-JOINTS WITH H-BEAMS AND RHS MEMBERS

S.V. Kolesnichenko, A.M. Myronov, I.M. Kulik

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,  
Derzhavin str. 2, 86123, Makeyevka, Ukraine.  
E-mail: ksv@dgasa.dn.ua*

*Received 27 December 2005; accepted 21 January 2005*

**Abstract.** The results of stress-strain experimental investigations and stress concentration factors for truss with T-joints with H-beam and RHS members have done in the paper. Also the model of experimental truss, models of loadings and comparison between theoretical and experimental results were provided.

**Keywords:** stress concentration factor, T-joint with H-beam and RHS member, correction factor.

### 1. Введение

Широкополочные двутавры (ШПД) в сочетании с гнутосварными замкнутыми профилями (ГСП) находят применение в решётчатых конструкциях промышленного, гражданского и транспортного строительства. К таким конструкциям относятся: стропильные фермы промышленных зданий с подвесным грузоподъёмным оборудованием, подкраново – подстропильные фермы, отдельно стоящие опоры и пролетные строения эстакад технологического оборудования, фермы пролётных строений транспортных галерей, элементы пролётных строений пешеходных, автодорожных и железнодорожных мостов, элементы антенно – мачтовых сооружений. Практически все вышеперечисленные конструкции воспринимают динамические нагрузки со случайным характером нагружения, к которым предъявляется одно из главных требований – обеспечение усталостной прочности.

Наибольшее распространение получили конструкции, у которых элементы решетки непосредственно примыкают к поясным элементам при помощи сварки. Самыми типичными соединениями данных видов проката являются Т, V, К и ТК-образные. На перспективность и приоритетность использования ШПД совместно с ГСП в решётчатых конструкциях указывают многочисленные исследователи [3-6, 8, 9], а также Европейская организация CIDECT [10], которая проводит исследования и внедре-

ние норм расчета конструкций с применением трубчатых профилей.

Следует отметить, что для узлов данного типа, методика расчета на выносливость не разработана и в отечественных нормативных документах [1, 2] не приведена, — что определяет необходимость в исследовании их выносливости.

Основным фактором, влияющим на выносливость узлов, является сложное напряженно – деформированное состояние (НДС), определяющее существование зон со значительным уровнем локальных напряжений. Особенно важно знать места концентраций напряжений, являющиеся опасными с позиции зарождения усталостных трещин. Концентрация напряжений характеризуется коэффициентом концентрации напряжений (ККН) —  $\alpha_\sigma$ , который показывает во сколько раз уровень локальных напряжений больше номинальных, определенных обычными методами теории упругости.

Исследования НДС и концентрации напряжений в узлах с поясом из ШПД и решеткой из ГСП приводятся в работах [3-5]. В работе [3] с помощью МКЭ произведен расчет Т-образных узлов без учета продольных сил и изгибающих моментов в поясных элементах. В работах [4, 5] было исследовано НДС узлов натуральных ферм методом тензометрии, однако данный метод дает недостаточную информацию о распределении напряжений ввиду недоступности для наклейки тензодатчиков зон.

## 2. Теоретические исследования

Результаты теоретических исследований Т – образных узлов из ШПД и ГСП приведены в работе [7]. В данной работе применялся МКЭ, который дает достаточно точную оценку местных напряжений для каждого узла в отдельности. Основными задачами являлись исследования НДС и концентрации напряжений, а также определение теоретических зависимостей ККН от: геометрических параметров профилей, составляющих узлы; узловых эксцентриситетов из плоскости узлов. Зависимости  $\alpha_\sigma$  от геометрических параметров профилей приведены в табл. 1.

Следует отметить, что МКЭ применим на стадии предварительного расчета или при первоначальных теоретических исследованиях новых типов узлов, но требует экспериментального подтверждения.

## 3. Экспериментальные исследования

Для подтверждения полученных теоретических данных в работе [7], были проведены экспериментальные исследования ККН для Т-образных узлов.

В качестве объекта экспериментальных исследований приняты натурные образцы Т-образных узлов типовой металлической стропильной фермы с параллельными поясами из ШПД и решеткой из ГСП пролетом 24 м, выполненной по типовому альбому [6]. Ферма имеет в своем составе треугольную решетку с промежуточными стойками. Поясной двутавр Т – образных узлов был усилен постановкой

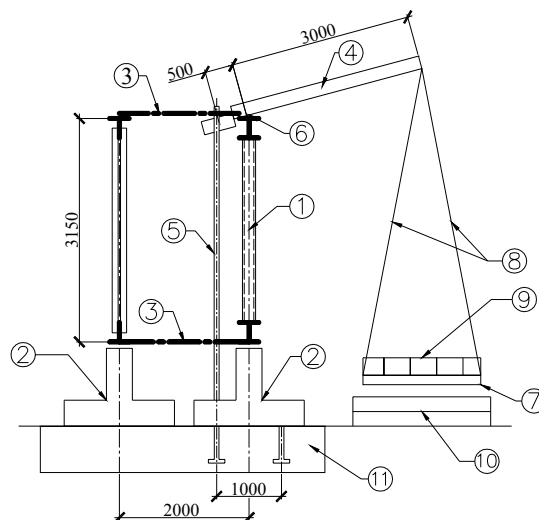


Рис. 1.1. Общая схема экспериментальной установки:

- 1 – испытываемая ферма;
- 2 – опорные тумбы;
- 3 – связи по верхнему и нижнему поясам фермы;
- 4 – нагружающие рычаги;
- 5 – тяги;
- 6 – ножевые шарниры;
- 7 – корзина;
- 8 – серьи;
- 9 – тарированные грузы;
- 10 – страховочные поддоны;
- 11 – силовой пол.

двух вертикальных ребер жесткости толщиной 8 мм. Материал элементов фермы: для поясов сталь С245, для стоек – С275.

Для загрузки фермы использован метод следящей нагрузки, хорошо моделирующий действительные условия нагружения узловый нагрузкой.

Таблица 1. Зависимость коэффициентов концентрации напряжений  $\alpha_\sigma$  от геометрических параметров профилей Т – образного узла.

Элемент	Зависимость
Сжатый пояс	$\alpha_\sigma^{geom} = 5,4274 \cdot EXP \left[ -0,9534 \cdot \left( \frac{d}{D} \right) \right]$
Стойка	$\alpha_\sigma^{geom} = 7,3034 \cdot \left( \frac{T}{t} \right)^{-0,8914}$
<b>Обозначения:</b> Т – толщина полки поясного двутавра; t – толщина стойки; d – ширина стойки; D – ширина полки поясного двутавра. Все геометрические параметры вводятся в мм.	

Общая схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.1.

Испытываемая ферма 1 установлена на опорные тумбы 2 и раскреплена связями по верхним и нижним поясам. Нагружаемые рычаги 4 опираются на фермы через ножевые шарниры 6. Короткое плечо рычага закреплено к силовому полу тягами 5. На длинном плече рычага подвешена корзина 7 для размещения тарированных грузов 9. Подстраховка грузовых корзин обеспечивается поддонами 10. Тарированные грузы выполнены из чугуна и имеют среднюю массу – 21,44 кг.

Нагрузка на ферму прикладывалась ступенями в среднем по 10,31 кН в узел. Нагрузка от собственного веса и рычага с корзиной составляла 9,20 кН в узел. В процессе испытаний проводилось несколько загрузений. Максимальная узловая нагрузка составляла  $P = 133,1$  кН.

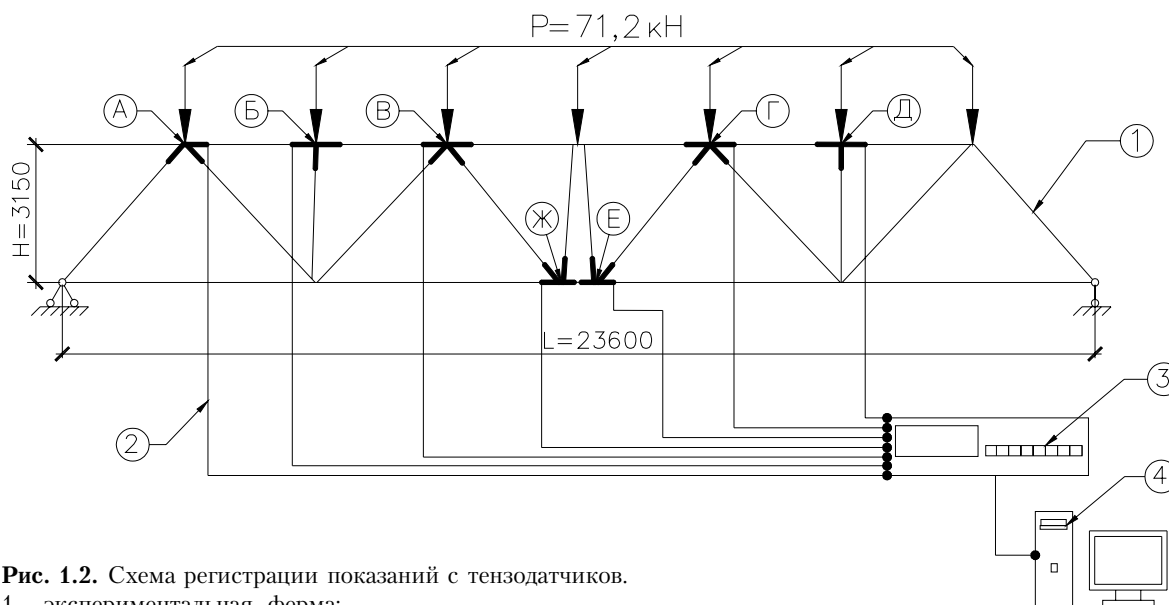
Для измерения деформаций при испытаниях использовались проволочные петлевые тензодатчики сопротивления с базой 5 мм на бумажной основе (марки ПКБ с электрическим сопротивлением  $R = 100$  Ом), выпущенных ЗОКИО Госстроя СССР. Для наклейки тензодатчиков на конструкцию использовался клей «Циакрин». Расположение тензодатчиков в узлах фермы приведено на рис. 1.3.

Выбор датчиков с базой 5 мм обусловлен исследованием НДС в узлах как можно ближе к сварным швам, прикрепляющим решетку к поясам [11, 12, 13]. Указанное на рис. 1.3. расположение датчиков необходимо для получения полной информации о НДС в узле, а именно: контурных напряжений в поясе и решетке вдоль сварных швов и зон краевого эффекта в поясе и решетке – в непосредственной близости от сварных швов.

Для проверки тензочувствительности и цены деления датчиков была выполнена их контрольная тарировка на эталонной консольной балке. Средняя цена деления датчиков, наклеенных на клею «Циакрин», составила  $C=0,38$  МПа.

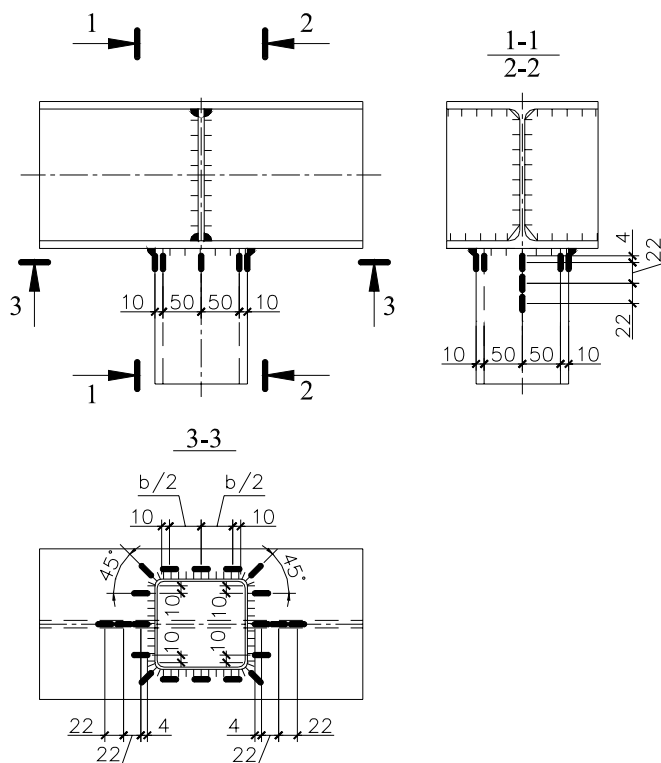
#### 4. Регистрация и обработка показаний

Показания с тензодатчиков сопротивления регистрировались с применением системы измерительной тензометрической СИИТ – 2 на 1000 каналов измерения. Вывод показаний тензодатчиков в процессе загрузки конструкции осуществлялся на персональную ЭВМ (рис. 1.2) с последующим импортом в программный комплекс «Microsoft Excel». Обработка результатов эксперимента производилась с использованием комплекса «EXCEL».



**Рис. 1.2.** Схема регистрации показаний с тензодатчиков.

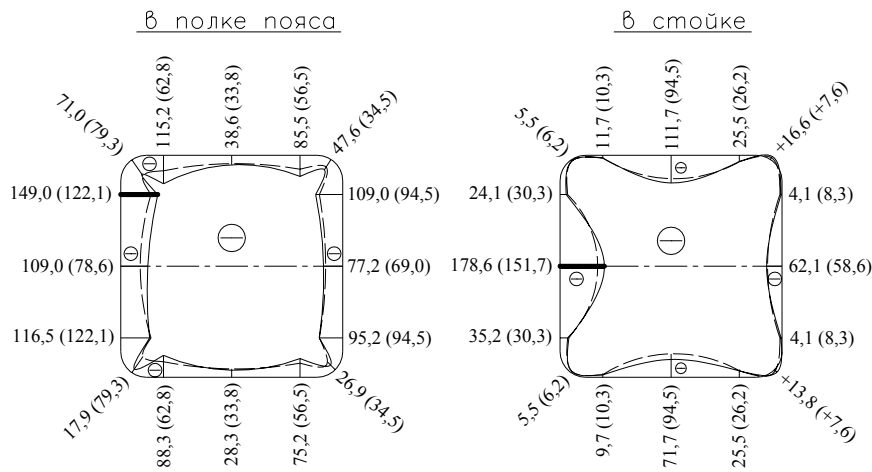
- 1 – экспериментальная ферма;
- 2 – медные кабели на 10 каналов каждый;
- 3 – измерительная тензометрическая система СИИТ – 2 на 1000 каналов;
- 4 – компьютер с монитором.



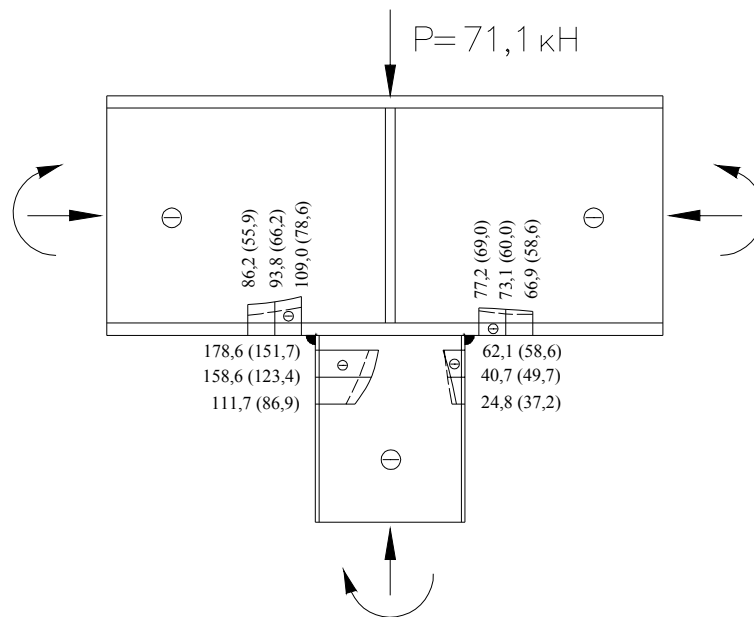
**Рис. 1.3.** Схема расположения тензодатчиков в Т – образных узлах марок «Б», «Д». Общее количество датчиков в каждом узле – 40 шт.



**Рис. 1.4.** Общий вид расположения тензодатчиков в Т – образных узлах марок «Б», «Д» в процессе эксперимента.



**Рис. 1.5.** Эпюры осевых напряжений  $\sigma_x$  в полке поясного двутавра и стойке, в сечении у сварного шва, МПа. Узловая нагрузка  $P = 71,1$  кН. (В скобках указаны теоретические значения напряжений).



**Рис. 1.6.** Эпюры осевых напряжений  $\sigma_\sigma$  в наружных слоях стенок стойки и полки пояса в зоне сопряжения стенки и полки поясного двутавра, МПа. (В скобках указаны теоретические значения напряжений).

На основании показаний тензодатчиков по нагружениям в результате обработки были построены эпюры контурных напряжений в поясе и решетке узлов и напряжения в зонах краевых эффектов.

### 5. Сравнение экспериментальных и теоретических значений

Как видно из рис. 1.5-1.6 и табл. 2-3, расхождение между экспериментальными и теоретическими

значениями напряжений в поясе и стойке – незначительно. Анализ результатов исследований приведен для узла «Д», для узла «Б» распределение напряжений – аналогично.

Эпюры контурных напряжений в поясе и стойке относительно продольной оси узла является несимметричным, что указывает на появление изгибающих моментов из плоскости узла в стойке и крутящих в поясе.

Распределение напряжений по контуру при замыкания стойки к поясу – крайне неравномерное

Таблица 2. Экспериментальные и теоретические значения ККН  $\alpha_c$  в узле «Б».

Элем.	Состав	Область	Экспериментальная продольная сила, $N_{эксп}$ , кН	Экспериментальный изгибающий момент, $M_{эксп}$ , кНм	Номинальные напряжения, $\sigma_{ном}$ , МПа	Локальные напряжения, $\sigma_{max}$ , МПа		Коэффициент $\alpha_c$		$\Delta$ , %
						Эксперимент	Теория	Эксперимент	Теория	
Пояс	I20K1	Слева	-361,7	-3,71	77,9	123,4	106,1	1,58	1,36	13,9
Пояс	I20K1	Справа	-384,9	-1,32	76,2	149,6	119,3	1,96	1,57	19,9
Стойка	Гн.120х3	Слева	-56,7	0,63	28,6	89,7	81,6	3,14	2,85	9,2
Стойка	Гн.120х3	Справа	-56,7	0,63	52,2	164,1	146,3	3,14	2,80	10,8

Таблица 3. Экспериментальные и теоретические значения ККН  $\alpha_c$  узле «Д».

Элем.	Состав	Область	Экспериментальная продольная сила, $N_{эксп}$ , кН	Экспериментальный изгибающий момент, $M_{эксп}$ , кНм	Номинальные напряжения, $\sigma_{ном}$ , МПа	Локальные напряжения, $\sigma_{max}$ , МПа		Коэффициент $\alpha_c$		$\Delta$ , %
						Эксперимент	Теория	Эксперимент	Теория	
Пояс	I20K1	Слева	-384,9	-1,32	76,2	149,0	122,1	1,96	1,60	18,4
Пояс	I20K1	Справа	-361,7	-3,71	77,9	109	94,5	1,40	1,21	13,6
Стойка	Гн.120х3	Слева	-56,7	0,86	56,5	178,6	151,7	3,16	2,68	15,2
Стойка	Гн.120х3	Справа	-56,7	0,86	24,3	62,1	58,6	2,56	2,41	5,9

Таблица 4. Значения поправочных ККН  $\gamma_\alpha$ .

Тип узла	Элемент узла	$\gamma_\alpha$
Т – образный сжатого пояса («Д»)	пояс	1,20
	стойка	1,12

ное, особенно для стойки. Больше всего напряжены левая стенка стойки, перпендикулярная продольной оси узла и полка пояса под ней. Наименьшие напряжения обнаружены на скруглениях и посередине «щековых» областей в поясе.

Максимальные осевые напряжения в поясе возникают у начала скруглений под левой стенкой стойки. Значительный уровень напряжений наблюдается также под левой стенкой стойки, по оси узла, вследствие отгиба полки поясного двутавра.

К центру «щековых» областей и скруглений полки пояса происходит резкое уменьшение напряжений до минимальных значений, вследствие значительной деформативности полки в продольном направлении.

Максимальные осевые напряжения в стойке возникают в левой поперечной стенке, в месте примыкания полки к стенке поясного двутавра.

В отличие от полки пояса, всплеск напряжений в стойке отмечается у поперечных ребер жесткости, посередине «щековых» областей. Это можно объяснить повышением жесткости пояса в месте постановки ребер жесткости, и тем самым, передачей большей доли нагрузки на пояс.

Наибольшие напряжения в поясе и стойке для всех рассматриваемых зон узла наблюдаются в непосредственной близости от сварного шва (рис. 1.6). С удалением от сварного шва напряжения приближаются к своим номинальным значениям, причем резкое уменьшение  $\sigma_x$  характерно для стойки.

Максимальная концентрация осевых напряжений в поясе возникает под левой стенкой стойки ( $\alpha_\sigma = 1,96$ ), а для стойки – в месте примыкания полки поясного двутавра к стенке ( $\alpha_\sigma = 3,16$ ).

На основе сравнения экспериментальных и теоретических значений напряжений были получены поправочные коэффициенты, уточняющие теоретический ККН –  $\alpha_\sigma$  (см. табл. 4).

Таким образом, для дальнейших расчетов ККН исследуемого типа узлов, можно рекомендовать следующую зависимость:

$$\alpha_\sigma = \alpha_\sigma^{geom} \cdot \gamma_\alpha,$$

где  $\alpha_\sigma^{geom}$  – теоретический ККН, определенный по геометрическим параметрам элементов узлов (табл.1);  $\gamma_\alpha$  – поправочный ККН (табл. 4).

## 6. Выводы

1. Полученные экспериментальные значения напряжений в Т-образных узлах подтверждают теоретические предпосылки. Максимальное расхождение составило 19,9%.
2. Наибольшие напряжения в стойках узлов возникают у сварных швов – в местах примыкания стенки к полке поясного двутавра. С удалением от сварных швов напряжения в стойке сглаживаются и уменьшаются до номинальных значений.
3. Распределение контурных напряжений в поясе и стойке относительно продольной оси узла – несимметричное, что говорит о присутствии изгибающих моментов из плоскости фермы в стойке и крутящих моментов в поясе.
4. На основе экспериментальных исследований уточнены коэффициенты концентрации осевых напряжений для Т – образных узлов и рекомендованы численные зависимости расчета коэффициента концентрации.



## Литература

1. СНиП II-23-81\* «Стальные конструкции. Нормы проектирования» ЦИТП Госстроя СССР, М:1991 – 96с.
2. СНиП 2.05.03-84 «Мосты и трубы. Нормы проектирования» ЦИТП Госстроя СССР, М:1985 – 200с.
3. Зинкевич И.В., Мухин А.В., Соболев Ю.В. Особенности напряженно – деформированного состояния узлов ферм с поясами из широкополочных двутавров и решеткой из гнутосварных профилей. – Брестский инженерно-строительный институт, 1987. – 20 с.
4. Исследование технологичных конструкций, в том числе с применением прогрессивных профилей проката: Отчет о НИР / ВНИЦентр; Руководитель Б.С. Цетлин. – инв № 02820079733. – Щелково: 1979. – 96с.
5. Колесниченко С.В. Действительная работа стропильных ферм с поясами из широкополочных двутавров: Дисс...канд. техн. наук. – Макеевка, 1991. – 187 с.
6. Стальные конструкции покрытий одноэтажных производственных зданий с применением ферм с поясами из широкополочных двутавров. //Типовой альбом. Серия 1.460.3-15. Выпуск 1. – М.:ЦНИИПСК, ВНИКТИСК, 1982.– 100с.
7. Колесниченко С.В., Миронов А.Н. Влияние геометрических параметров на напряженно – деформированное состояние и концентрацию напряжений T – образных узлов с поясом из широкополочного двутавра и решеткой из гнутосварных замкнутых профилей. // Металеві конструкції. – том 4, №1, 2001. – С. 55-59.
8. Куклин Ф.Ф. Определение усилий в стержнях ферм с поясами из широкополочных двутавров и решеткой из гнутосварных профилей с учетом фактической жесткости и размеров узлов. // Строительные конструкции и инженерные сооружения. / Сб. научных трудов МИСИ, 1982. – С. 84-97.
9. Левитанский И.В., Куклин Ф.Ф. О изгибе стержней бесфасоночных стропильных ферм с поясами из широкополочных двутавров и решеткой из гнутосварных профилей. // Строительные конструкции и инженерные сооружения. / Сб. научных трудов МИСИ, 1982. – С. 75-84.
10. J. Wardenier, D. Dutta, N. Yeomans, J. A. Packer, O. Bucak. Construire avec des profils creux en acier. Guide de dimensionnement. «Utilisation de profils creux de construction dans les applications mecaniques». – CIDECT , Koln: Verl. TUV. Rheinland, 1996 – pages 159.
11. A. M. Wingerde, J.A. Packer, J. Wardenier. New guidelines for fatigue design of HSS connections. / / Journal of structural engineering. / February 1996 – pages 125-132.
12. J. Gerald, I. Ragout. Design concepts for large welded connections. // DGA – DCN Service Technique des Constructions et Armes Navales 75732 PARIS CEDEX 15. – pages 103-120.
13. Recommandations pour la verification a la fatigue des structures en acier. // CECM – Comite technique 6 «Fatigue». / №43, 1987 – pages 32.

**Колесніченко Сергій Володимирович** є доцентом кафедри "Металеві конструкції" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Член Української асоціації з металевих конструкцій, член Британської інженерної ради та Британського інституту будівельників. Наукові інтереси: розрахунок конструкцій на витривалість, розробка схем навантажень при розрахунках на витривалість.

**Миронов Андрій Миколайович** є асистентом кафедри "Металеві конструкції". Наукові інтереси: розрахунок конструкцій на витривалість, розробка схем навантажень при розрахунках на витривалість.

**Кулик Іван Миколайович** є магістрантом кафедри "Металеві конструкції". Наукові інтереси: розрахунок конструкцій на витривалість, розрахунок коефіцієнтів концентрації напружень для пружно-пластичної стадії роботи.

**Колесниченко Сергей Владимирович** является доцентом кафедры "Металлические конструкции" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Член Украинской ассоциации по металлургическим конструкциям, член Британского инженерного совета и Британского института строителей. Научные интересы: расчет конструкций на выносливость, разработка схем нагружений при расчете на выносливость.

**Миронов Андрей Николаевич** является ассистентом кафедры "Металлические конструкции". Научные интересы: расчет конструкций на выносливость, разработка схем нагружений при расчете на выносливость.

**Кулик Иван Николаевич** является магистрантом кафедры "Металлические конструкции". Научные интересы: расчет конструкций на выносливость, определение коэффициентов концентрации напряжений при работе в упруго-пластической стадии.

**Kolesnichenko Sergiy Volodymyrovych** is an Associate Professor of Metal Structures department in Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. He is a member of Ukrainian Association of Metal Construction. Member of Engineering Council (UK) and Member of Institution of Civil Engineers (UK) - Chartered Civil Engineer. His research interests: calculation of metal structures and loading schemes for endurance calculation.

**Myronov Andriy Mykolayovych** is an Assistant professor of Metal Structures department of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. His research interests: calculation of metal structures and loading schemes for endurance calculation.

**Kulik Ivan Mykolajovych** is a Bachelor, post-graduate student of Metal Structures department. His research interests: calculation of metal structures and calculation of stress concentration factors for elastic-plastic conditions.