

УДК 624.014.2:621.771

Исследование напряженно-деформированного состояния и концентрации напряжений в узлах плоских решетчатых конструкций с учетом упругопластической работы материала

¹Колесниченко С.В., к.т.н., ²Миронов А.Н.

¹ДонЦТБ ОАО «УкрНИИпроектстальконструкция им. В.Н. Шимановского»,
Украина

²Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, Украина

Анотація. У статті викладено результати теоретичних досліджень вузла з поясом широкополочним двутавром та гнutosварним профілем у решітці. Доведено зменшення значення коефіцієнта концентрації напружень з урахуванням можливих пластичних деформацій в найбільш напружених зонах вузла.

Аннотация. В статье излагаются результаты теоретических исследований узла с применением в поясе широкополочного двутавра и гнutosварного профиля в решетке. Доказано уменьшение значения коэффициента концентрации напряжений с учетом возможных пластических деформаций в наиболее напряженных зонах узла.

Abstract. The main results of theoretical investigation of stress concentration factor with plastic steel properties for plane joint with H-beam chord and RHS bracing member are presented. Decreasing of level for stress concentration factor with plastic steel deformation in main stressed joint zones have proved.

Ключевые слова: концентрация напряжений, пластические деформации, гнutosварной профиль, широкополочный двутавр.

Постановка проблеми. Изучение реального напряженно-деформированного состояния узлов является сложной задачей. Полный комплекс работ должен включать не только выполнение теоретических расчетов узлов по пространственным схемам, максимально приближенным к реальным конструкциям, но и проведение эксперимента. Особенно актуальными такие исследования являются для сложных узлов с местами значительных концентраций напряжений. При работе конструкций на знакопеременные нагрузки в местах с локальными концентраторами напряжений возможно возникновение усталостной трещины. Большинство исследований коэффициентов концентрации напряжений (ККН) – параметра, характеризующего напряженное состояние в узле, выполнено для упругой стадии работы материала, хотя можно предположить, что при локальных пластических деформациях возможно изменение ККН. Исследование изменения ККН позволит оценить не только уровень напряжений

в узлах сложной конфигурации, но и выполнить расчет ресурса конструкции в реальных условиях эксплуатации.

Цель публикации. В данной работе представлены теоретические расчеты, выполненные для определения изменения ККН при возникновении локальных пластических деформаций. В качестве объекта исследования принят Т-образный узел с использованием в поясах широкополочных двутавров, а в элементах решетки – гнutosварных замкнутых профилей (ШПД+ГСП). Конструкции с такими профилями используются под значительные, в т.ч. знакопеременные нагрузки – фермы пролетных строений мостов, транспортных галерей, конструкции больших пролетов.

Определение концентрации напряжений в узлах сводится к расчёту максимального ККН – α_{σ} (в зарубежной литературе обозначается как SCF (stress concentration factor) зависящего от: формы узлов, геометрических размеров элементов узлов и параметров сварных швов, прикрепляющих решётку к поясу. Знание коэффициентов α_{σ} необходимо как при определении расчетной долговечности, так и при диагностике конструкций с выявлением резервов их несущей способности.

Анализ проведенных исследований. Теоретические и экспериментальные исследования данного типа узлов активно выполнялись за рубежом в 1980-90-х годах [1 – 3]. Внедрение полученных результатов в реальную практику проектирования было выполнено под эгидой CIDECT (Comité International pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubulaire – Международный комитет по изучению и использованию трубчатых конструкций). Для расширения использования трубчатых профилей в строительных конструкциях было предложено продолжать изучения узлов, а в работе [5] исследование данного типа узлов было определено как приоритетное.

Результаты, полученные CIDECT, были внедрены в Еврокод 3 при выполнении расчетов конструкций на выносливость, хотя для трубчатых узлов с поясным двутавровым профилем представленные данные разработаны менее всего. Теоретические и экспериментальные исследования реального НДС для узлов типа ШПД+ГСП в упругой стадии работы были представлены в работах [7 – 9].

Нерешенные ранее части общей проблемы. В условиях реального нагружения значительными нагрузками в местах со значительной концентрацией напряжений возможно образование зон с пластической работой материала. В связи с этим возможно перераспределение уровня напряжений и изменение ККН. До настоящего времени для узлов с использованием ШПД и ГСП такие исследования не выполнялись.

Определение расчетной схемы узла и анализ результатов расчета. Приведенные результаты численных исследований относятся к Т-образным узлам ферм с поясами из широкополочных двутавров (ШПД) и решеткой из гнутосварных замкнутых профилей (ГСП), выполненных по типовому альбому [10] под типовую нагрузку (рис. 1, 2).

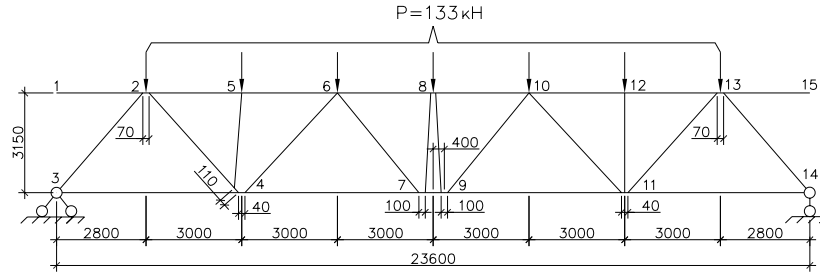


Рис. 1. Схема типовой фермы

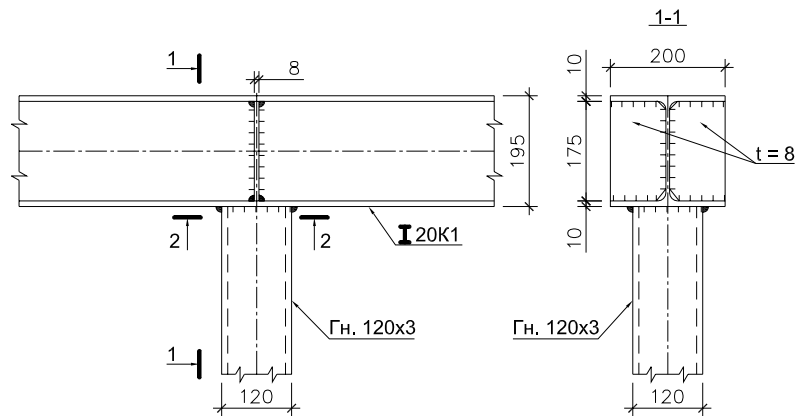


Рис. 2. Конструкция Т-образных узлов фермы

Расчет Т-образного узла производился с использованием ПК «Лири 9.6», реализованного в ОС Windows для двух типов моделей с идентичной геометрией, нагрузками и граничными условиями, но различными законами деформирования материала (стадиями работы):

- 1 тип модели рассчитывался в линейной постановке при упругой работе стали;
- 2 тип модели рассчитывался в физически нелинейной постановке при упругопластической работе стали шагово – итерационным методом. Нагрузка на каждом шаге увеличивалась на 5 % от суммарной нагрузки (всего 20 шагов), количество итераций на каждом шаге принималось равное 300.

Поскольку в зоне соединения решетки с поясом возникает сложное объемное НДС, то в состав моделей входили объемные конечные элементы (КЭ) из таблицы ПК «ЛИРА» – физически нелинейные оболочки, призмы и параллелепипеды для обозначения соответствующих элементов в модели узла.

Для приложения расчетных нагрузок по торцам моделей вводились оболочки нулевой толщины и прямоугольной формы (универсальный четырехугольный КЭ оболочки № 44).

Полки поясного двутавра и стенок решетки ГСП разбивались по толщине на два одинаковых слоя с целью проследить изменение напряжений по толщине элементов. Анализ НДС производился по зоне термического влияния в местах примыкания стойки к нижней полке поясного ШПД, с рассмотрением четырех расчетных зон и двух слоев, определяющих толщины элементов (рис. 3):

- область «1» является зона, где стенка ГСП стойки перпендикулярна стенке поясного двутавра, а узловой изгибающий момент догружает стойку;
- область «2» является зона, где стенка ГСП стойки перпендикулярна стенке поясного двутавра, а узловой изгибающий момент разгружает стойку;
- областями «щек» являются зоны, параллельные стенкам поясных ШПД;
- областями «скругления» являются зоны перехода от областей «1» и «2» к «щековым областям».

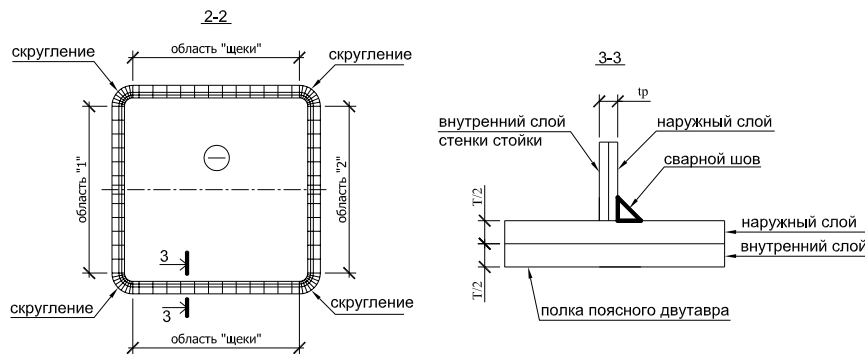


Рис. 3. Схемы исследуемых зон Т-образного узла

Размеры сетки КЭ назначались таким образом, чтобы погрешность полученных результатов не превышала 5 %, а сгущение происходило в местах соединения решетки с поясами по зоне термического влияния.

Определение нагрузок на элементы расчётных моделей узлов.

Рассматриваемый тип узла входит в состав фермы, у которой в стержнях кроме продольных усилий возникают дополнительные изгибающие моменты, вследствие значительной изгибной жесткости элементов.

Исходя из этого, определение расчетных усилий для моделей узла производилось в два этапа. На первом этапе производился статический расчет фермы как многократно статически неопределимой рамы с точечными жесткими узлами с целью определения изгибающих моментов M и продольных сил N в элементах узла.

На втором этапе определялись окончательные нагрузки, которые прикладывались к торцам элементов моделей (рис. 5). Расчет нагрузок производился по формуле:

$$q_i = \frac{N}{A} \pm \frac{M \cdot y_i}{I_x}, \quad (1)$$

где y_i – расстояние от центра тяжести сечения до i -го волокна; \pm – знаки, определяющие положение i -го волокна относительно нейтральной оси; A и I_x – соответственно площадь и момент инерции поперечного сечения элемента.

Следует отметить, что величина нагрузки q_i является номинальным напряжением в i -м волокне элемента.

Величина внешней нагрузки в узлы фермы составляла $P = 133$ кН, которая является предельной по критерию прочности рассматриваемого Т-образного узла в соответствии с нормами [11] (рис. 1, 4).

Закон нелинейного деформирования материала.

Материал 2-х типов моделей узлов назначался из малоуглеродистой стали марки С255 с расчетным сопротивлением $R_y = 240$ МПа. Для модели 2-го типа, где производился учет физической нелинейности, диаграмма работы стали задавалась в виде кусочно-линейной зависимости (14-й тип в ПК «Лира»). Здесь следует отметить три участка этой диаграммы (рис. 5):

- участок ОА до предела пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ – характеризует упругую стадию работы материала, которая подчиняется закону Гука и имеет постоянный модуль упругости $E \approx 2 \times 10^5$ МПа;
- участок АВ от предела пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ до предела текучести $\sigma_{\text{т}} = 240$ МПа на действительной диаграмме работы стали характеризует нелинейную зависимость между напряжениями и деформациями и переменный касательный модуль упругости. В данной работе на участ-

- ке АВ принят осредненный постоянный модуль упругости и линейный закон деформирования;
- участок ВС характеризует площадку текучести до начала стадии самоупрочнения стали при $\varepsilon = 2 \%$, и моделировался незначительным уклоном площадки, так как задание горизонтальных участков закона деформирования (при $E = 0$ МПа) для МКЭ – недопустимо.

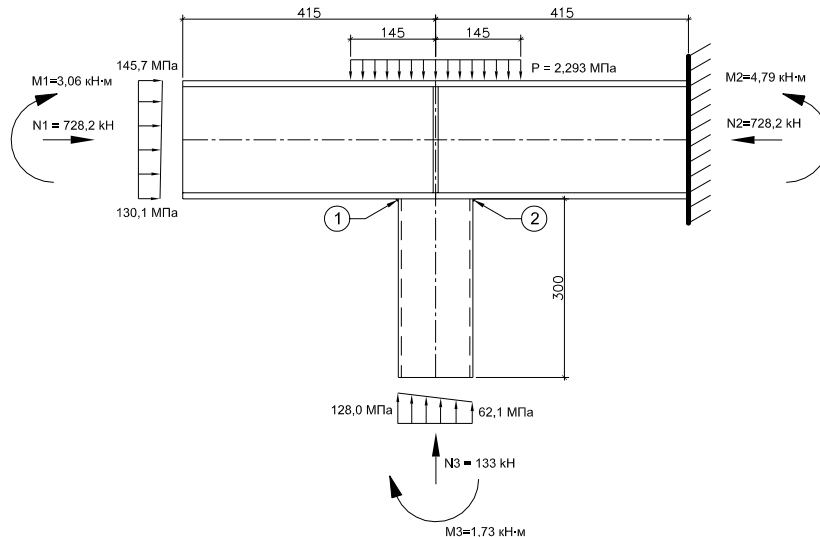


Рис. 4. Габариты расчетных моделей Т-образного узла с граничными условиями, действующими внутренними усилиями (M, N) и нагрузками (номинальными напряжениями), приложенными к торцам моделей

Анализ результатов расчета моделей узлов. Анализ результатов расчета всех типов узлов производился по главным и эквивалентным напряжениям $\sigma_{\text{экв}}$, рассчитанным по 4-й энергетической теории прочности (Губера – Хенки – Мизеса), поскольку данная теория наиболее приемлема для пластичных материалов, каким является обычная строительная сталь:

$$\sigma_{\text{экв}}^{IV} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 \right]}. \quad (2)$$

Анализ результатов, как было показано выше, производился для внутренних и внешних слоев стенок ГСП стойки и наружного слоя полки поясного ШПД. ККН в опасных точках определялись по формуле (3):

$$\alpha_{\sigma} = \frac{\sigma_{\text{экв}}^{IV}}{\sigma_{\text{ном}}}, \quad (3)$$

Где $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{IV}}$ и $\sigma_{\text{НОМ}}$ – соответственно эквивалентные и номинальные напряжения в опасной точке.

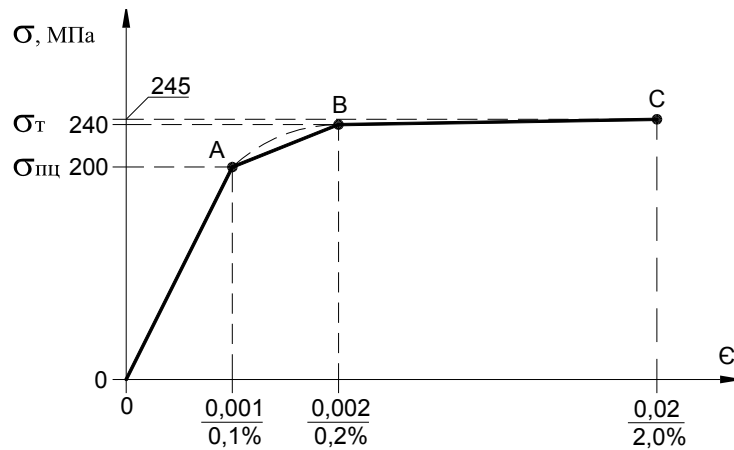


Рис. 5. Кусочно-линейная зависимость между напряжениями и деформациями

На основании расчетов были определены изополя главных и эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{ЭКВ}}^{\text{IV}}$ в элементах пояса и стойки. Эпюры контурных эквивалентных напряжений в зоне примыкания стойки к поясу и эпюры распределения эквивалентных напряжений вдоль нижней полки поясного двутавра и стенок ГСП стойки представлены на рис. 6 и 7.

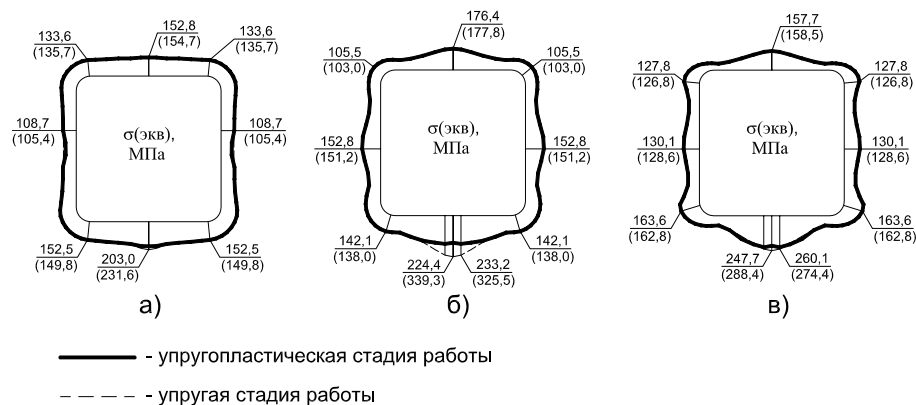


Рис. 6. Эпюры контурных эквивалентных напряжений в зоне примыкания стойки к поясу (в скобках указаны напряжения, определенные при упругой работе материала): а – в нижней полке пояса; б – в наружном слое стенки ГСП стойки; в – во внутреннем слое стенки ГСП стойки

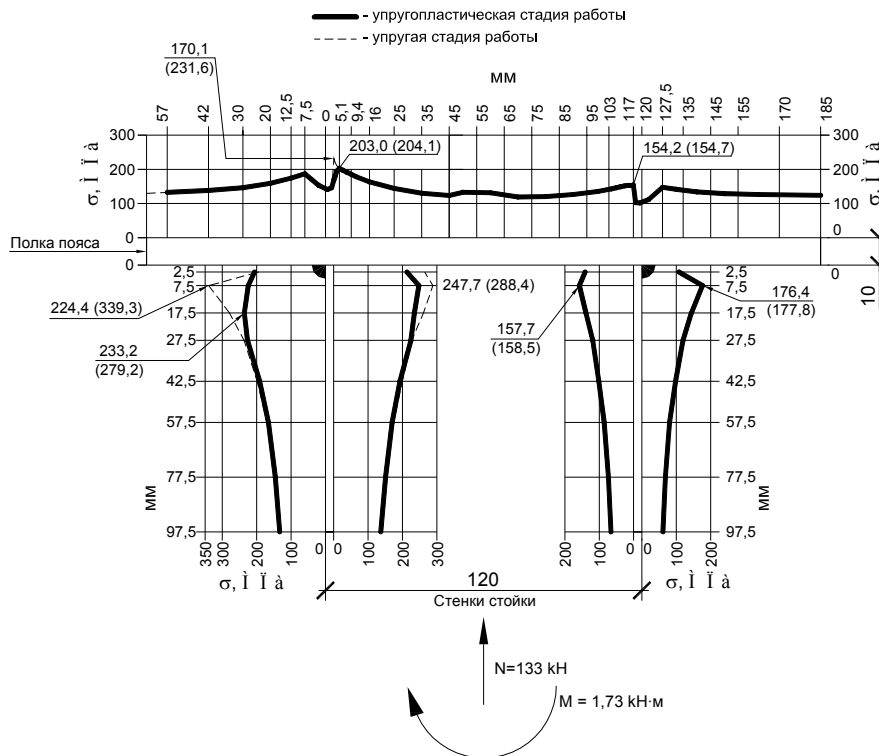


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений вдоль нижней полки поясного двутавра и стенок ГСП стойки (в скобках указаны напряжения, определенные при упругой работе материала)

По результатам расчета можно отметить следующее:

1. Уровень главных растягивающих напряжений σ_1 для двух моделей узлов фактически остался неизменным. Наблюдается некоторое увеличение σ_1 в модели с физической нелинейностью: в поясе на 4,8 %, а в стенке стойки на 11,1 %, однако, в целом их значение не превышает 0,23...0,24 R_y .
2. Значительно изменились главные сжимающие напряжения σ_3 , которые вносят наибольший вклад в концентрацию напряжений Т-образных узлов:
 - в полке пояса зоны «1» вследствие перехода материала в пластическую стадию работы σ_3 уменьшились на 15,1 %;
 - в стенке стойки зоны «1», где материал также переходит в пластическую стадию работы, напряжения σ_3 уменьшились на 29,2 %.
3. Для модели узла с физической нелинейностью характерно сглаживание пиков упругих эквивалентных напряжений, характерных для «краевого

эфекта», вследствие защемления стенок стойки в полке пояса:

— в зоне «1» полки пояса происходит уменьшение напряжений в 1,36 раза с $\sigma_{\max}^{\text{IV}} = 231,6$ МПа до $\sigma^{\text{IV}} = 170,1$ МПа – см. рис. 7;

— в зоне «1» стенки стойки напряжения уменьшаются в 1,51 раза с $\sigma_{\max}^{\text{IV}} = 339,3$ МПа до $\sigma^{\text{IV}} = 224,4$ МПа для наружного слоя и в 1,11 раза для внутреннего слоя.

4. Размеры характерных пятен с пластическими деформациями элементов составляют:

— в поясе 5x35 мм (рис. 6, а и 7);

— в наружном слое стенки стойки, где изгибающий момент догружает стойку 60x25мм (60 мм – вдоль зоны «1», 25 мм – вдоль продольной оси стойки) (рис. 6, б и 7);

— во внутреннем слое стенки стойки, в зоне «1» – 25x25 мм (рис. 6, в и 7).

5. Пластические деформации распространяются по всей толщине стенки ГСП стойки, где изгибающий момент догружает стойку (зона «1»).

6. В остальных зонах узла («щечковые», скругления, область «2») при уровне упругих напряжений, не превышающих предела текучести материала, напряжения остаются неизменными – см. рис. 6, 7.

6. Для модели с физической нелинейностью наибольшая концентрация напряжений в поясе возникает в наружном слое полки зоны «1», где стенка ШПД примыкает к полке. Величина ККН составляет $\alpha_{\sigma} = 1,56$ (см. табл.); в зоне «2» ККН не изменился по сравнению с моделью в упругой стадии работы материала.

7. Наибольшая концентрация напряжений в стойке возникает в зоне «1», где стенка ШПД примыкает к полке. Точка с наибольшей концентрацией напряжений смещается с наружного слоя при упругой работе во внутренний слой при упругопластической работе стали. Величина ККН составляет $\alpha_{\sigma} = 2,06$ (см. табл.).

8. Наибольшая концентрация напряжений для всего Т-образного узла наблюдается в стенке ГСП стойки по зоне «2» и составляет $\alpha_{\sigma} = 2,84$ (см. табл.), однако уровень упругих напряжений не превышает предела пропорциональности $\sigma_{\text{пц}} = 200$ МПа и имеется резерв несущей способности узла.

9. Уровень наибольшей концентрации напряжений при учете упругопластической стадии работы материала уменьшается в поясе в 1,14 раза, а в стойке – в 1,29 раза по сравнению с упругой работой.

Таблиця

Определение коэффициентов концентрации напряжений α_σ и коэффициентов пластических деформаций «С» в элементах моделей узлов (в скобках указаны экспериментальные ККН, полученные в работах [7, 9])

Элемент	Номинальные напряжения, $\sigma_{ном}$, МПа	1-я модель / линейный расчет		2-я модель / нелинейный расчет		С = α_1/α_2
		Эквивалентные напряжения, $\sigma_{эв}^{IV}$, МПа	ККН, $\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{эв}^{IV}}{\sigma_{ном}}$	Эквивалентные напряжения, $\sigma_{эв}^{IV}$, МПа	ККН, $\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{эв}^{IV}}{\sigma_{ном}}$	
Полка пояса зоны «1» – наружный слой	130,1	231,6	1,78 (1,96)	170,1	1,31	1,14
		204,1	1,57	203,0	1,56	
Полка пояса зоны «2» – наружный слой	125,6	154,7	1,23	154,2	1,23	1,0
Стенка стойки зоны «1» – наружный слой	128,0	339,3	2,65 (3,16)	224,4	1,75	1,29
		279,2	2,18	233,2	1,82	
Стенка стойки зоны «1» – внутренний слой	126,3	288,4	2,28	260,1	2,06	1,0
Стенка стойки зоны «2» – наружный слой	62,1	177,8	2,86	176,4	2,84	
Стенка стойки зоны «2» – внутренний слой	63,7	158,5	2,49	157,7	2,48	

10. Значения ККН, определенные для модели с упругой работой стали, хорошо согласуются с экспериментальными ККН, полученными в работе [9]:

- в поясе расхождение между теоретическим и экспериментальным ККН составляет 10,1 %;
- в стойке расхождение составляет 19,2 %, что, по-видимому, объясняется неучтенными компонентами НДС в экспериментальных исследованиях.

11. Для учета упругопластической работы стали Т-образных узлов предлагается вводить коэффициент пластических деформаций «С», а расчет ККН производить по формуле:

$$\alpha_{\sigma}^{pl} = \frac{\alpha_{\sigma}^{el}}{C},$$

где α_{σ}^{pl} – ККН с учетом упругопластической работы материала; C – коэффициент пластических деформаций (см. таблицу); α_{σ}^{el} – ККН, определенный при упругой работе материала.

Выводы

Результаты представленных исследований позволяют дополнить инженерную методику определения коэффициентов концентрации упругих напряжений и в дальнейшем могут применяться для расчета бесфасонных узлов на выносливость как при прогнозировании остаточного ресурса конструкций во время выполнения как комплекса работ по обследованию, так и при проектировании новых конструкций.

Литература

- [1] A.M. van Wingerde The fatigue behavior of T- and X-joints made of square hollow sections. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Netherlands. 182 p.
- [2] J.A. Packer, J. Wardenier Design rules for welds in RHS K, T, Y, and X-connections. Proceedings of the International Conference “Engineering design in welded constructions”. Madrid, Spain, 7 – 8 September 1992. P. 113 – 120.
- [3] Guide de dimensionnement. Assemblages de sections creuses rectangulaires (RHS) sous chargement statique predominant / J.A. Packer, J.Wardenier, Y. Kurobane, D. Dutta, N. Yeomans / Comité International pour le Développement et l’Etude de la Construction Tubulaire – CIDECT / Köln: Verl. TÜV Rheinland. 1993. – 100 p.
- [4] D. Dutta, K. Hoffmann CIDECT research and development in the use of hollow steel sections and their impact on Eurocodes and other national and international standards. Tubular Structures VII, Farkas & Jamai, 1996, Balkema, Rotterdam, P. 9 – 16.
- [5] Guide de dimensionnement. Utilisation de profils creux de construction dans les application mecaniques / J.Wardenier, D. Dutta, N. Yeomans, J.A. Packer, Ö. Bucak / Comité International pour le Développement et l’Etude de la Construction Tubulaire – CIDECT / Köln: Verl. TÜV Rheinland. 1996. – 159 p.
- [6] X. Wang, S.B. Lambert. On the calculation of stress intensity factors for surface cracks in welded pipe-plate and tubular joints. International Journal of Fatigue. No. 25, 2003, P. 89 – 96.
- [7] Колесниченко С.В., Миронов А.Н., Кулик И.Н. Экспериментальные исследования коэффициента концентрации напряжений Т-образных узлов конструкций с применением широкополочных двутавров и решеткой из гнуто-сварных замкнутых профилей. Металеві конструкції. Том 9, № 1. 2006 рік. УАМК, С. 69 – 79.

- [8] Колесниченко С.В., Миронов А.Н. Напряженно-деформированное состояние бесфасоночных узлов с использованием широкополочных двутавров. Вісник ДонДАБА, 2003. – С. 107 – 116.
- [9] Миронов А.Н. Концентрация напряжений в узлах ферм с применением двутавров и гнутосварных замкнутых профилей, вызванная конструктивной формой: Дисс...канд. техн. наук. – Макеевка, 2005. – 188 с.
- [10] Стальные конструкции покрытий одноэтажных производственных зданий с применением ферм с поясами из широкополочных двутавров. // Типовой альбом. Серия 1.460.3-15. Вып. 1. – М.: ЦНИИПСК, ВНИКТИСК, 1982. – 100 с.
- [11] Пособие по проектированию стальных конструкций / к СНиП II-23-81* Стальные конструкции / ЦНИИПСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 148 с.

Надійшла до редколегії 16.06.2010 р.