



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ**  
**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ**  
**METAL CONSTRUCTIONS**

№4, ТОМ 13 (2007) 181-186

УДК 624.072.002.2

(07)-0145-1

## **ВПЛИВ ЗАЛИШКОВОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ НА СТІЙКІСТЬ СТИСНУТИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ТРУБ**

**О.І. Голоднов, О.М. Козлова**

*Відкрите акціонерне товариство «Український науково-дослідний та проектний інститут  
сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського»*

*(ВАТ «УкрНДІпроектстальконструкція ім. В.М. Шимановського»),*

*просп. Визволителів, 1, Київ, 02660, Україна.*

*E-mail: golodnow@ukr.net*

*Отримана 15 жовтня 2007; прийнята 22 жовтня 2007*

**Анотація.** Залишкові напруження впливають на стійкість і деформативність конструкцій. Цей вплив неоднозначний, тому актуальним залишається питання про розподіл залишкових напружень у перетинах елементів. В першу чергу це стосується елементів з перерізами із зварних двотаврових профілів, таврового із парних кутиків і електрозварних прямошовних труб. Експериментально доведено зниження критичних сил для стиснутих зварних двотаврових елементів внаслідок наявності в поясах залишкових стискальних напружень і збільшення критичних сил для стиснутих елементів із труб після наплавлення валиків на кромках під кутом 120 градусів. Необхідність проведення цих досліджень виникла в зв'язку з відсутністю в нормативній літературі рекомендацій щодо визначення залишкового напруженого стану і його врахування при розрахунках конструкцій.

**Ключові слова:** залишкові напруження, електрозварні прямошовні труби, стійкість.

## **ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ТРУБ**

**А.И. Голоднов, О.Н. Козлова**

*Открытое акционерное общество «Украинский научно-исследовательский и проектный институт  
стальных конструкций имени В.Н. Шимановского»*

*(ОАО «УкрНДІпроектстальконструкція ім. В.Н. Шимановського»),*

*просп. Освободителей, 1, Киев, 02660, Украина.*

*E-mail: golodnow@ukr.net*

*Получена 15 октября 2007; принята 22 октября 2007*

**Аннотация.** Остаточные напряжения влияют на устойчивость и деформативность конструкций. Это влияние неоднозначно, поэтому актуальным является вопрос о распределении остаточных напряжений в сечениях элементов. В первую очередь это относится к элементам с сечениями из сварных двутавровых профилей, таврового из парных уголков и электросварных прямошовных труб. Экспериментально доказано снижение критических сил для сжатых сварных двутавровых элементов из-за наличия в поясах остаточных сжимающих напряжений и увеличение критических сил для сжатых элементов из труб после наплавки валиков на кромках под углом 120 градусов. Необходимость проведения настоящих исследований возникла в связи с отсутствием в нормативной литературе рекомендаций по определению остаточного напряженного состояния и его учета при расчетах сжатых элементов из труб.

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, электросварные прямошовные трубы, устойчивость.

## THE INFLUENCE OF STRESSED STATE ON STABILITY OF COMPRESSED ELEMENTS MADE OF PIPES

O.I. Golodnov, O.N. Kozlova

Open Joint-Stock Company «V.Shimanovsky Ukrainian Research and Design Institute of Steel Construction»,  
1, Osvoboditelei Ave., 02660 Kyiv, , Ukraine.  
E-mail: golodnow@ukr.net

Received 15 October 2007; accepted 22 October 2007

**Abstract.** The residual stresses effect upon stability and ability to deform of the structures. This influence is ambiguous, so the problem of distribution of residual stresses in sections of elements may be regarded as urgent. In the first turn it concerns the elements with sections made of compressed welded double-tee profiles, tee sections of double angles and straight-seamed electrically welded pipes. It was proved experimentally a reduction of critical forces for compressed welded double-tee elements because of availability in chords the remaining compressive stresses and increase of critical forces for compressed elements made pipes after buttering under the angle 120 degrees. The necessity of making of the present researches has arisen in connection with an absence in normative reference sources the recommendations for determination of parameters of residual stressed state and its taking into consideration during calculation of compressed elements made of pipes.

**Keywords:** residual stresses, straight-seam electrically welded pipes, stability.

### Введение. Постановка проблемы

Остаточные напряжения влияют на устойчивость и деформативность конструкций. Это влияние неоднозначно, поэтому актуальным является вопрос о распределении остаточных напряжений в сечениях элементов [1, 2 и др.]. В полной мере этот вопрос представляет интерес и для элементов из электросварных труб, поскольку они входят в состав большепролетных покрытий гражданских и промышленных зданий, башенных сооружений, мачт и т.п.

Экспериментально доказано снижение критических сил для сжатых сварных двутавровых элементов из-за наличия в поясах остаточных сжимающих напряжений [1]. Как один из приемов повышения устойчивости сжатых элементов может рассматриваться регулирование остаточного напряженного состояния (далее ОНС) путем наплавки холостых валиков или прогрева отдельных участков металлоконструкций до температуры выше критической точки  $A_{\text{сз}}$ .

Исследования ОНС и его влияния на устойчивость конструкций проводились практически с момента появления сварки как основного вида соединений металлоконструкций. В Институте электросварки НАН Украины еще в 30-е годы прошлого столетия проводились исследования

элементов из труб с наплавленными валиками и без них на внецентренное сжатие [3]. Были испытаны сжатые образцы из труб с наружным диаметром 168 мм и внутренним диаметром 144 мм (для образцов без наплавки) и диаметром 146 мм (для образцов с наплавкой) общей длиной 3512 и 3501 мм соответственно. У одной трубы ( $H_{350}$ ) были наплавлены три валика в средней части длины, а другая труба ( $H_0$ ) испытывалась без наплавки. Труба  $H_{350}$  потеряла устойчивость при нагрузке 96,5 т, труба  $H_0$  – при 82,5 т, т.е. только за счет регулирования ОНС было достигнуто повышение устойчивости почти на 17%.

Влияние ОНС на поведение сжатых элементов из труб отмечено в работе Я. Августына [4]. В качестве экспериментальных образцов применялись бесшовные трубы диаметром 40, 44 и 60 мм при толщине стенки 3–4 мм. На образцах производилась односторонняя и двусторонняя наплавка, а также исследовались образцы без наплавки. Перед наплавкой образцы отпускались при температуре 640 °С. Принимались во внимание только остаточные напряжения, направленные параллельно продольной оси элементов. Толщина стенки гарантировала отсутствие местного выпучивания. По результатам работы сделаны выводы о снижении критической нагрузки для шарнирно опертых элементов небольших гибкостей.

### Цель работы

Целью настоящих исследований является обоснование необходимости определения остаточного напряженного состояния, в т.ч. и после регулирования, и его учета при расчетах сжатых элементов из стальных труб.

### Основная часть

Как известно [5, 6 и др.], при наплавке валиков по центру в полосе формируется ОНС, вид которого показан на рис. 1. Тогда площадь остаточных растягивающих напряжений в зоне наплавки холостого валика:

$$A_f = d_f \cdot t; \quad (1)$$

$$d_f = \frac{10,28 \cdot (k_f + 2 \cdot \delta)^2}{t}. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2):  $k_f$  – катет сварного шва, мм;  $\delta$  – глубина проплавления основного металла (2–4 мм – при полуавтоматической и 3–6 мм – при ручной сварке);  $b$ ,  $t$  – размеры поперечного сечения полосы, мм.

Величины остаточных сжимающих  $\sigma_{res, com}$  и растягивающих  $\sigma_{res, ten}$  напряжений в полосе (рис. 1) с учетом предпосылки

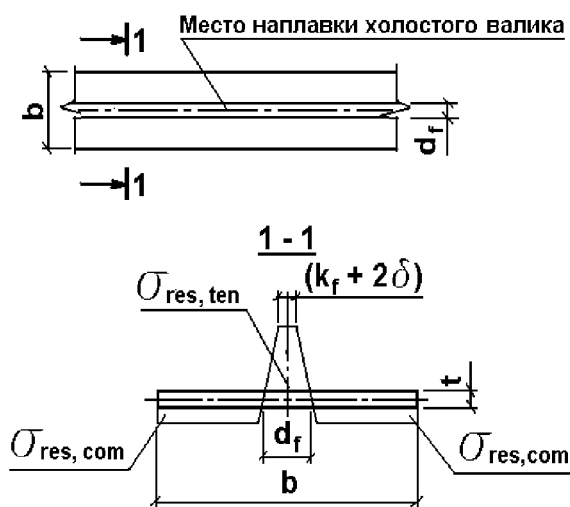


Рис. 1. Распределение напряжений по ширине полосы после наплавки холостого валика.

$$\sigma_{res, ten} + \sigma_{res, com} = R_y \text{ [5,6]:}$$

$$\sigma_{res, com} = \frac{R_y \cdot (d_f + k_f + 2 \cdot \delta)}{2 \cdot b - d_f + k_f + 2 \cdot \delta}; \quad (3)$$

$$\sigma_{res, ten} = \frac{2 \cdot \sigma_{res, com} \cdot (b - d_f)}{(d_f + k_f + 2 \cdot \delta)}, \quad (4)$$

где  $R_y$  – расчетное сопротивление стали полосы, МПа.

С достаточной для практических целей точностью аналогичным образом можно определить ОНС в сечении трубы при условии, что толщина стенки значительно меньше диаметра ( $t/D \leq 0,1$ ). Схема распределения остаточных напряжений в сечении трубы после регулирования путем наплавки валиков по кромкам под углом  $120^\circ$  приведена на рис. 2, а.

Общий алгоритм определения несущей способности сжатого элемента с учетом влияния ОНС можно представить в следующем виде.

1. Задаются геометрическими и технологическими параметрами элемента (диаметром трубы, толщиной стенки, высотой элемента, схемой наплавки валика и величиной катета шва и т.п.), прочностными и деформативными характеристиками стали, условиями на концах.
2. Вычисляют ОНС по изложенной выше методике [форм. (1)–(4)]. Разбивают площадь трубы на элементарные участки (рис. 2, б).
3. Задаются радиусом кривизны сечения  $\rho_j$ , где  $j$  – номер этапа расчета. Находят величину кривизны по формуле:

$$\kappa_j = \frac{1}{\rho_j}. \quad (5)$$

4. Принимают кривизну второго расчетного сечения  $\kappa_j$  и вычисляют прогиб элемента по формуле

$$f_j = \frac{(L^2 \cdot \kappa_j)}{\pi^2}, \quad (6)$$

где  $L$  – приведенная длина;  $\kappa_j$  – кривизна «второго расчетного сечения» (по А.В. Геммерлингу [7]).

Условия на концах элемента учитываются коэффициентом приведения длины.

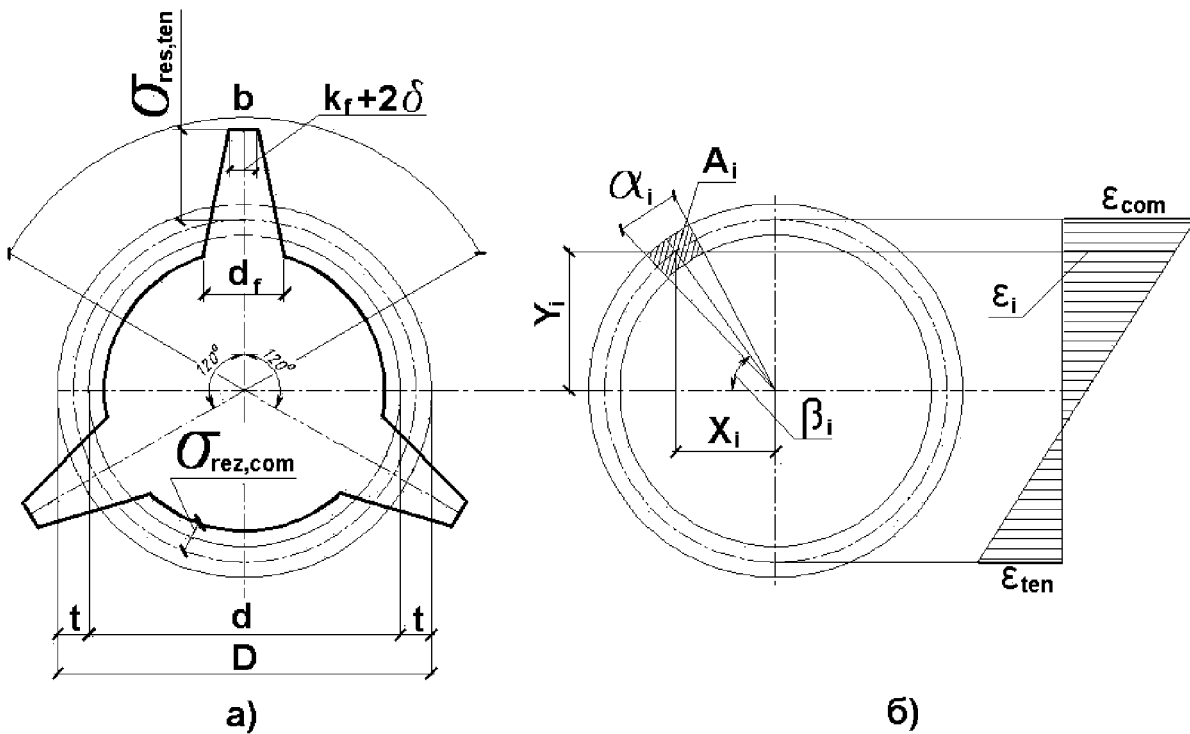


Рис. 2. Схемы распределения остаточных напряжений в сечении трубы после наплавки валиков (а) и разбиения площади трубы на элементарные участки (б).

5. Зная кривизну расчетного сечения  $\kappa_j$  и прогиб элемента, находят величину действующего продольного усилия, рассматривая напряженно-деформированное состояние (далее НДС) с использованием известных уравнений равновесия внутренних и внешних сил в сечении:  $\sum X = 0$  и  $\sum M_0 = 0$ . НДС при кривизне  $\kappa_j$  определяется путем последовательного изменения деформаций в сжатой части сечения трубы  $\epsilon_c$  (рис. 2,б) до тех пор, пока величины продольного усилия, определенные из двух уравнений равновесия, не будут равны с заданной точностью. Распределение деформаций  $\epsilon_i$  и напряжений  $\sigma_i$  по площади сечения трубы ищется с использованием гипотезы плоских сечений и определенного ранее ОНС, а также принятой диаграммы работы материала. Последовательно уточняя параметры НДС «второго расчетного сечения», получают опорную (j) точку зависимости "P - f" («нагрузка-прогиб»).

6. Изменяют радиус кривизны «второго расчетного сечения» ( шаг по радиусу кривизны) и по форм. (5) находят кривизну .
7. Производят вычисления по п. 5 алгоритма и получают новое значение опорной (j+1)-й точки кривой .
8. Сравнивают значение нагрузки P на двух смежных этапах расчета:
- если производят вычисления по п. 6;
  - если возвращаются на предыдущее значение радиуса кривизны , изменяют и продолжают вычисления по п. 6.

Расчет считается законченным после выполнения условия

$$\left| \frac{P_{j+1} - P_j}{P_j} \right| < \eta, \quad (7)$$

где  $\eta = 0,001 - 0,01$  – необходимая точность расчета.

Дальнейший расчет при увеличивающейся кривизне позволяет получить точки на ниспадающей (после потери устойчивости сжатого элемента) ветви кривой деформирования.

Приведенный алгоритм расчета нуждается в экспериментальной проверке как в части определения ОНС после регулирования, так и в части определения несущей способности элементов из стальных труб при наличии ОНС.

### Выводы

1. Сжатые элементы из стальных труб имеют широкое распространение в конструкциях большепролетных пространственных покры-

тий и перекрытий, высотных и башенных сооружений. Влияние ОНС при проектировании таких элементов не учитывается.

2. Экспериментально подтверждена возможность увеличения несущей способности сжатых элементов из труб до 17% только за счет регулирования ОНС.
3. Обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований в области определения ОНС и его влияния на несущую способность и деформативность сжатых элементов позволило разработать методику определения ОНС и несущей способности сжатых элементов из стальных труб. Предложенная методика нуждается в экспериментальной проверке.

### Литература

1. Голоднов А.И. К вопросу учета остаточных напряжений в сечениях сжатых двутавровых стержней при их расчетах // Автомат. сварка. – 2001. – № 5. – С. 8-10.
2. Голоднов А.И. Расчет сжатых стальных двутавровых стержней с учетом влияния остаточных напряжений // Буд. конструкції: Міжвідом. наук.-техн. зб. / НДІБК. – Київ: НДІБК, 2002. – Вип. 57. – С. 43 - 49.
3. Патон Е.О., Горбунов Б.Н., Берштейн Д.И. Влияние усадочных напряжений на прочность сварных конструкций // Автоген. дело. – 1937. – № 7. – С. 4-15.
4. Августын Я. Влияние остаточных напряжений на поведение сжатых стержней // Свароч. пр-во. – 1961. – № 11. – С. 15 - 18.
5. Голоднов А.И. О распределении остаточных напряжений в сечениях составных двутавровых стержней // Вісник Донбаської держ. академії будівництва і архітектури: Зб. наук. праць: Будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Макіївка: ДонДАБА, 2002. – Вип. 2002-2 (33). – С. 72-78.
6. Голоднов А.И. Использование термических воздействий при усилении строительных конструкций металлическими элементами // Буд. конструкції: Міжвідом. наук.-техн. зб. / НДІБК. – Київ: НДІБК, 2003. – Вип. 58. – С. 14 - 20.
7. Геммерлинг А.В. Несущая способность стержневых стальных конструкций. – М.: Госстройиздат, 1958. – 207 с.
8. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування / Мінбуд України – Київ: Мінбуд України, 2006. – 60 с.
9. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Прогни і переміщення. Вимоги проектування. – Введ. вперше; Введ. 01.01.2007. – К.: Мінбуд України, 2006. – 10 с.
10. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings / European Standard ENN 1993-1-1. – Brussels: Management Centre, 2005.

**Голоднов Олександр Іванович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач науково-дослідним і проектним відділом будівельних конструкцій ВАТ «УкрНДІпроектстальконструкція ім. В.М. Шимановського». Наукові інтереси: залишкові напруження та їхній вплив на роботу будівельних конструкцій; будівельна механіка стержневих систем, які взаємодіють з деформованою основою; технічний стан і залишковий ресурс конструкцій.

**Козлова Ольга Миколаївна** – молодший науковий співробітник науково-дослідного і проектного відділу будівельних конструкцій ВАТ «УкрНДІпроектстальконструкція ім. В.М. Шимановського». Наукові інтереси: залишкові напруження та їхній вплив на роботу будівельних конструкцій; технічний стан і залишковий ресурс конструкцій.

**Голоднов Александр Иванович** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий научно-исследовательским и проектным отделом строительных конструкций ОАО «УкрНИИпроектстальконструкция им. В.М. Шимановского». Научные интересы: остаточные напряжения и их влияние на работу сварных конструкций; строительная механика стержневых систем, взаимодействующих с деформируемым основанием; техническое состояние и остаточный ресурс конструкций.

**Козлова Ольга Николаевна** – младший научный сотрудник научно-исследовательского и проектного отдела строительных конструкций ОАО «УкрНИИпроектстальконструкция им. В.М. Шимановского». Научные интересы: остаточные напряжения и их влияние на работу сварных конструкций; техническое состояние и остаточный ресурс строительных конструкций.

**Golodnov Alexander Ivanovych** – DSc. (Eng), senior scientific employee, Head of research and design Department of building structures of the OJSC «V. Shimanovsky UkrRDSteelconstruction». Research interests: residual stresses and their influence upon behavior welded structures; structural mechanics of the pivotal systems, interacting with deformed by base; the technical condition and residual resource of the structures.

**Kozlova Olga Mykolayvna** – junior scientific employee of research and design Department of building structures of the OJSC «V. Shimanovsky UkrRDSteelconstruction». Research interests: residual stresses and their influence upon behavior welded structures; the technical condition and residual resource of the structures.