



## ДО ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ В ЗВАРНИХ ЕЛЕМЕНТАХ КОРОБЧАТОГО ПРОФІЛЮ

**О. С. Балашова<sup>а</sup>, О. І. Голоднов<sup>б</sup>**

*<sup>а</sup>Донбаський державний технічний університет,  
пр. Леніна, 16, м. Алчевськ, Луганська обл., Україна, 94204.*

*<sup>б</sup>ВАТ УкрНДІпроектстальконструкція ім. В. Н. Шимановського,  
пр. Визволителів, 1, м. Київ, Україна, 02660.*

*E-mail: sukachser@rambler.ru*

*Отримана 31 серпня 2010; прийнята 24 вересня 2010.*

**Анотація.** Технологічні процеси виготовлення сталевих конструкцій супроводжуються локальним термічним розігріванням і викликають появу залишкового напруженого стану. Метал при розігріванні подовжується, а що оточує зону розігрівання «холодний» метал перешкоджає температурній деформації окремих ділянок. В результаті таких дій виникають локальні пластичні деформації і залишкова напруга. Коробчаті елементи мають широке застосування в якості таких, що несуть. Застосування конструкцій коробчатого профілю виправдане, оскільки вони рівностійкі. Експериментально підтверджено зниження надійної здатності стислих зварних двотаврових елементів до 37 %. Несприятливий вплив залишкової напруги розмежує коефіцієнти подовжнього вигину для розрахунку стислих елементів одного профілю. У нормах проектування сталевих конструкцій методика розрахунку на стійкість не враховує наявності залишкового напруженого стану. Нині існують методи розрахунку двотаврових і таврових елементів, схильних до осевого стискування з вигином в площині більшої або меншої жорсткості. Методи розрахунку елементів коробчатого перерізу з урахуванням непружної роботи матеріалу і наявності залишкового напруженого стану відсутні. Вирішенню цього питання присвячена ця стаття.

**Ключові слова:** сталеві конструкції, коробчатий профіль, залишкова напруга, стійкість.

## К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСТАТОЧНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В СВАРНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ КОРОБЧАТОГО ПРОФИЛЯ

**О. С. Балашова<sup>а</sup>, А. И. Голоднов<sup>б</sup>**

*<sup>а</sup>Донбасский государственный технический университет,  
пр. Ленина, 16, г. Алчевск, Луганская обл., Украина, 94204.*

*<sup>б</sup>ОАО УкрНИИпроектстальконструкция им. В. Н. Шимановского,  
пр. Освободителей, 1, г. Киев, Украина, 02660.*

*E-mail: sukachser@rambler.ru*

*Получена 31 августа 2010; принята 24 сентября 2010.*

**Аннотация.** Технологические процессы изготовления стальных конструкций сопровождаются локальным термическим разогревом и вызывают появление остаточного напряженного состояния. Металл при разогреве удлиняется, а окружающий зону разогрева «холодный» металл препятствует температурной деформации отдельных участков. В результате таких воздействий возникают локальные пластические деформации и остаточные напряжения. Коробчатые элементы имеют широкое применение в качестве несущих. Применение конструкций коробчатого профиля оправдано, поскольку они равноустойчивы. Экспериментально подтверждено снижение несущей способности сжатых сварных двутавровых элементов до 37 %. Неблагоприятное влияние остаточных напряжений разграничивает коэффи-

циенты продольного изгиба для расчета сжатых элементов одного профиля. В нормах проектирования стальных конструкций методика расчета на устойчивость не учитывает наличие остаточного напряженного состояния. В настоящее время существуют методы расчета двутавровых и тавровых элементов, подверженных осевому сжатию с изгибом в плоскости большей или меньшей жесткости. Методы расчета элементов коробчатого сечения с учетом неупругой работы материала и наличия остаточного напряженного состояния отсутствуют. Решению этого вопроса посвящена настоящая статья.

**Ключевые слова:** стальные конструкции, коробчатый профиль, остаточные напряжения, устойчивость.

## DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSED STATE IN BOX SECTION WELDING ELEMENTS

O. S. Balashova<sup>a</sup>, O. I. Golodnov<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Donbass State Technical University,

16, Lenin Av., Alchevsk, Lugansk Region, Ukraine, 94204.

<sup>b</sup>OJSC V. Shimanovsky Research and Design Institute of Steel Structures,

1, Osvoboditeley Av., Kiev, Ukraine, 02660.

E-mail: sukachser@rambler.ru

Received on August 31, 2010; accepted September 24, 2010.

**Abstract.** The production processes of steel structures are accompanied with the local heat building-up and initiate residual stressed state. Metal is extended at heating-up and «cold» metal, surrounding heating-up area, prevents temperature deformation of separate areas. The local plastic strains and stressed states have resulted from such effects. The box section elements have ever-widening applications as bearing ones. The use of box-type constructions has been justified because they are of equal stability. The decline of bearing strength of the compressed weld-fabricated I-girders has been experimentally confirmed up to 37 %. Unfavorable effect of residual stressed states differentiates the coefficients of longitudinal bend for analysis of the compressed elements of one type. In the planning standards of steel structures, the design method to stability does not take into account the residual stressed state. Nowadays, there are design methods of I-girders and T-beams subjected to the axial compression with a plane bending of greater or less stiffness. At present, there are no design methods of elements of box-type section of rigid work of material and with residual stressed state. The present paper is devoted to the solution of this problem.

**Keywords:** steel structures, box section welding elements, residual stress, stability.

### Введение. Постановка проблемы

Как известно, при изготовлении стальных конструкций с использованием локального нагрева возникает остаточное напряженное состояние (ОНС). Появление остаточных напряжений (ОН) по-разному влияет на несущую способность сжатых элементов. Экспериментально подтверждено снижение несущей способности сжатых сварных двутавровых элементов до 37 %. Неблагоприятное влияние ОН разграничивает коэффициенты продольного изгиба для расчета сжатых элементов одного профиля. Различия в величинах коэффициентов продольного изгиба для стальных конструкций двутаврового и

Н-образного сечения без ОН и с остаточными сжимающими напряжениями (ОСН) на кромках поясов свыше 49 МПа может достигать 15...17 % (см. ДБН В.2.3-14:2006 [2]). В нормах проектирования стальных конструкций (СНиП II-23-81\* [3]) методика определения коэффициента продольного изгиба не учитывает наличие ОНС [1].

В настоящее время существуют методы расчета двутавровых и тавровых (из спаренных уголков) элементов, подверженных осевому сжатию с изгибом в плоскости большей или меньшей жесткости. Методы расчета элементов коробчатого сечения с учетом неупругой работы материала и наличия ОНС отсутствуют.

**Цель работы** – разработка методики расчета остаточного напряженного состояния, возникающего в сварных элементах коробчатого сечения при изготовлении.

**Основная часть**

Коробчатые элементы находят и находят в настоящее время широкое применение в качестве несущих. В первую очередь, это колонны многоэтажных зданий, конструкции других сооружений, работающих при сложном нагружении. Применение конструкций коробчатого профиля оправдано, поскольку они, в отличие от двутавровых элементов, как правило, равноустойчивы.

В сварных элементах коробчатого профиля после изготовления появляется ОНС, которое характеризуется наличием остаточных растягивающих напряжений (ОРН) в угловых зонах и уравновешивающими ОСН в остальной части сечения (рис. 1).

Величины ОН (МПа) [4]:

– для зон ОРН в поясах после сварки швов

$$\sigma_{res, str}^{(f)} = \frac{R_y^f \cdot \left[ (b_f - 2 \cdot a_{t,f}) + \sqrt{(b_f - 2 \cdot a_{t,f})^2 - 4 \cdot (d'_{t,f} - a_{t,f}) \cdot b_f} \right]}{2 \cdot b_f}; \quad (1)$$

– для зон ОРН по краям стенок после сварки поясных швов

$$\sigma_{res, str}^{(w)} = \frac{R_y^w \cdot \left[ (h_w - 2 \cdot a_{t,w}) + \sqrt{(h_w - 2 \cdot a_{t,w})^2 - 4 \cdot (d'_{t,w} - a_{t,w}) \cdot h_w} \right]}{2 \cdot h_w}; \quad (2)$$

$$A_{t, f} = 10,28 \cdot K(f) \cdot (k_f + \delta)^2 + k_f \cdot t_w; \quad (3)$$

$$A_{t, w} = 5,14 \cdot K(w) \cdot (k_f + \delta)^2 + k_f \cdot t_w; \quad (4)$$

$$K(f) = \frac{2 \cdot t_f}{2 \cdot t_f + t_w}; \quad (5)$$

$$K(w) = 1 - K(f), \quad (6)$$

$$d'_{t, f} = \frac{A_{t, f}}{t_f}; \quad (7)$$

$$a_{t, f} = k_f + \delta; \quad (8)$$

$$d'_{t, w} = \frac{A_{t, w}}{t_w}; \quad (9)$$

$$a_{t, w} = k_f + \delta. \quad (10)$$

В этих формулах:  $h_w, t_w, b_f, t_f$  – размеры элементов коробчатого сечения (см) приняты по рис. 1;  $k_f$  – катет сварного шва (см);  $\delta$  – глубина проплавления основного металла (0,3...0,6 см – при ручной и 0,2...0,4 см – при полуавтоматической сварке;  $K(f), K(w)$  – коэффициенты перераспределения энергии сварки соответственно на пояса и на стенку;  $d'_{t, f}, d'_{t, w}$  – ширина зоны ОРН, возникающих соответственно в поясах и стенке после сварки швов (см);  $A_{t, f}, A_{t, w}$  – площади зон ОРН, возникающих соответственно в поясах и стенке после сварки швов (см<sup>2</sup>);  $a_{t, f}, a_{t, w}$  – ширина зоны пластических деформаций соответственно в поясах и стенке (см).

Величины ОСН в поясах и стенке (МПа):

$$\sigma_{res, com}^{(f)} = R_y^f - \sigma_{res, str}^{(f)}; \quad (11)$$

$$\sigma_{res, com}^{(w)} = R_y^w - \sigma_{res, str}^{(w)}; \quad (12)$$

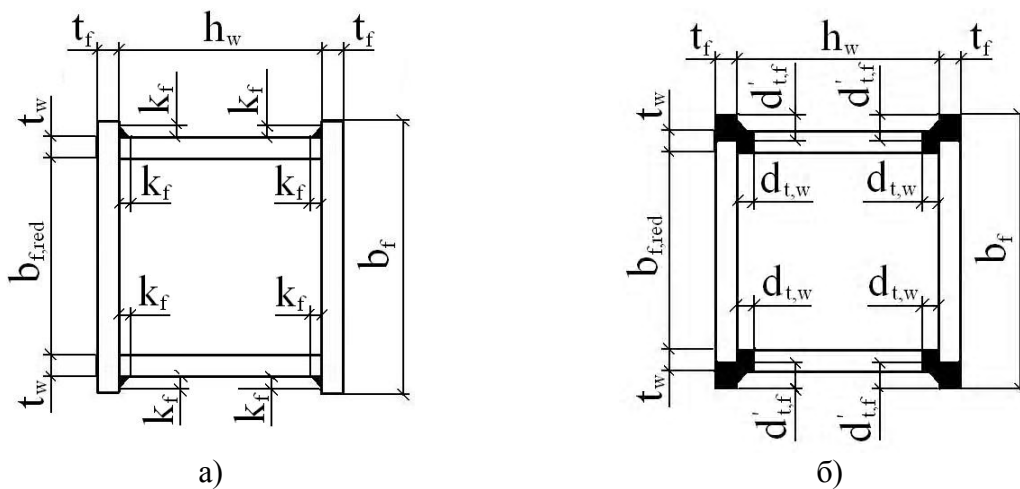


Рисунок 1. Параметры коробчатого сечения (а) и расположение зон ОРН (б).

Для дальнейших расчетов целесообразно заменить полученные трапециевидальные эпюры ОСН и ОРН прямоугольными. Тогда:

– для поясов в районе сварных швов

$$\sigma_{str}^{(f)} = \sigma_{res, str}^{(f)} \cdot \frac{(d'_{t,f} + a_{t,f})}{2 \cdot d'_{t,f}}; \quad (13)$$

$$\sigma_{com}^{(f)} = \sigma_{str}^{(f)} \cdot \frac{2 \cdot d'_{t,f}}{(b_f - 2 \cdot d'_{t,f})}; \quad (14)$$

– для стенок в районе поясных швов

$$\sigma_{str}^{(w)} = \sigma_{res, str}^{(w)} \cdot \frac{(d_{t,w} + a_{t,w})}{2 \cdot d_{t,w}}; \quad (15)$$

$$\sigma_{com}^{(w)} = \sigma_{str}^{(w)} \cdot \frac{2 \cdot d_{t,w}}{(h_w - 2 \cdot d_{t,w})}. \quad (16)$$

Ниже приводятся методика и результаты вычислений параметров ОНС для сварного элемента коробчатого сечения. Сечение элемента (рис. 2): пояса – 320×12 мм, стенка – 256×12 мм, катет шва  $k_f = 5$  мм,  $\delta = 2$  мм. Расчетное сопротивление стали поясов и стенки  $R_y^f = R_y^w = 245$  МПа.

Определение ОНС выполняется в такой последовательности (алгоритм «Коробчатое сечение»).

1. По формулам (5) и (6) находят коэффициенты перераспределения энергии соответственно на пояса  $K(f)$  и стенку  $K(w)$ :

$$K(f) = \frac{2 \cdot t_f}{2 \cdot t_f + t_w} = \frac{2 \cdot 1,2}{2 \cdot 1,2 + 1,2} = 0,667;$$

$$K(w) = 1 - K(f) = 1 - 0,667 = 0,333.$$

2. По формулам (3), (4), (7)–(10) вычисляют площади зон ОРН в поясах  $A_{t,f}$  и стенке  $A_{t,w}$ :

$$A_{t,f} = 10,28 \cdot K(f) \cdot (k_f + \delta)^2 + k_f \cdot t_f = \\ = 10,28 \cdot 0,667 \cdot (0,5 + 0,2)^2 + 0,5 \cdot 1,2 = 3,96 \text{ см}^2;$$

$$d'_{t,f} = \frac{A_{t,f}}{t_f} = \frac{3,96}{1,2} = 3,3 \text{ см};$$

$$a_{t,f} = k_f + \delta = 0,5 + 0,2 = 0,7 \text{ см};$$

$$A_{t,w} = 5,14 \cdot K(w) \cdot (k_f + \delta)^2 + k_f \cdot t_w = \\ = 5,14 \cdot 0,333 \cdot (0,5 + 0,2)^2 + 0,5 \cdot 1,2 = 1,44 \text{ см}^2;$$

$$d_{t,w} = \frac{A_{t,w}}{t_w} = \frac{1,44}{1,2} = 1,2 \text{ см};$$

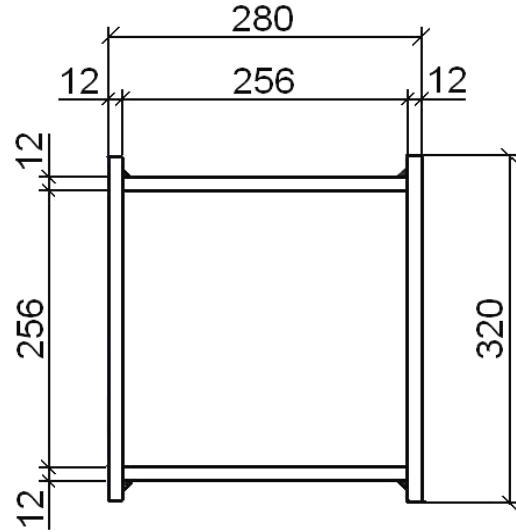


Рисунок 2. Сечение коробчатого элемента.

$$a_{t,w} = k_f + \delta = 0,5 + 0,2 = 0,7 \text{ см}.$$

3. Определяют величины ОН:

– ОРН в поясах после сварки поясных швов по формуле (1)

$$\sigma_{res, str}^{(f)} = \frac{R_y^f \cdot \left[ (b_f - 2 \cdot a_{t,f}) + \sqrt{(b_f - 2 \cdot a_{t,f})^2 - 4 \cdot (d'_{t,f} - a_{t,f}) \cdot b_f} \right]}{2 \cdot b_f} = \\ = \frac{245 \cdot \left[ (32 - 2 \cdot 0,7) + \sqrt{(32 - 2 \cdot 0,7)^2 - 4 \cdot (3,3 - 0,7) \cdot 32} \right]}{2 \cdot 32} = 211,18 \text{ МПа};$$

– ОРН в стенке после сварки поясных швов по формуле (2)

$$\sigma_{res, str}^{(w)} = \frac{R_y^w \cdot \left[ (h_w - 2 \cdot a_{t,w}) + \sqrt{(h_w - 2 \cdot a_{t,w})^2 - 4 \cdot (d_{t,w} - a_{t,w}) \cdot h_w} \right]}{2 \cdot h_w} = \\ = \frac{245 \cdot \left[ (25,6 - 2 \cdot 0,7) + \sqrt{(25,6 - 2 \cdot 0,7)^2 - 4 \cdot (1,2 - 0,7) \cdot 25,6} \right]}{2 \cdot 25,6} = 219,53 \text{ МПа};$$

– ОСН в поясах по формуле (11)

$$\sigma_{res, com}^{(f)} = R_y^f - \sigma_{res, str}^{(f)} = 245 - 211,18 = 33,82 \text{ МПа};$$

– ОСН в стенке по формуле (12)

$$\sigma_{res, com}^{(w)} = R_y^w - \sigma_{res, str}^{(w)} = 245 - 219,53 = 25,47 \text{ МПа}.$$

4. Определяют параметры прямоугольных (замененных) эпюр ОН:

– для поясов в районе поясных сварных швов по формулам (13), (14)

$$\sigma_{str}^{(f)} = \sigma_{res, str}^{(f)} \cdot \frac{(d'_{t,f} + a_{t,f})}{2 \cdot d'_{t,f}} = 211,18 \cdot \frac{3,3 + 0,7}{2 \cdot 3,3} = 128 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{com}^{(f)} = \sigma_{str}^{(f)} \cdot \frac{2 \cdot d'_{t,f}}{(b_f - 2 \cdot d'_{t,f})} = 128 \cdot \frac{2 \cdot 3,3}{(32 - 2 \cdot 3,3)} = 33 \text{ МПа};$$

– для стенок в районе поясных швов по формулам (15), (16)

$$\sigma_{str}^{(w)} = \sigma_{res, str}^{(w)} \cdot \frac{(d_{t,w} + a_{t,w})}{2 \cdot d_{t,w}} = 219,53 \cdot \frac{(1,2 + 0,7)}{2 \cdot 1,2} = 173 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{com}^{(w)} = \sigma_{str}^{(w)} \cdot \frac{2 \cdot d_{t,w}}{(h_w - 2 \cdot d_{t,w})} = 219,53 \cdot \frac{2 \cdot 1,2}{(25,6 - 2 \cdot 1,2)} = 22,7 \text{ МПа}.$$

Прямоугольные эпюры ОН приведены на рис. 3.

Как видно из полученных результатов расчета, в коробчатом сечении возникает ОНС, которое характеризуется наличием ОРН в углах сечения (средней интенсивностью порядка 0,5...0,7  $R_y$ ), т. е. с позиций дальнейшей работы элемента на сжатие такое ОНС может рассматриваться, как способствующее повышению несущей способности.

### Выводы

По результатам проведенного исследования сделаны следующие выводы.

1. Учитывая изложенное в п. 1.8 СНиП II-23-83\* [3], расчет на устойчивость необходимо выполнять по деформированной схеме с учетом возможного развития пластических деформаций. Наличие ОНС и его влияние на устойчивость элементов коробчатого сечения в расчетных методиках действующих нормативных элементов [2, 3] в должной мере не учитывается.
2. Разработана методика определения ОНС, возникающего в элементах коробчатого профиля после изготовления. Методика базируется на предпосылках и допущениях, традиционно используемых при решении такого рода задач.
3. Расчеты ОНС, возникающего в коробчатом сечении после изготовления, свидетельствуют, что в угловых зонах возникают ОРН высокого уровня (средней интенсивностью по-

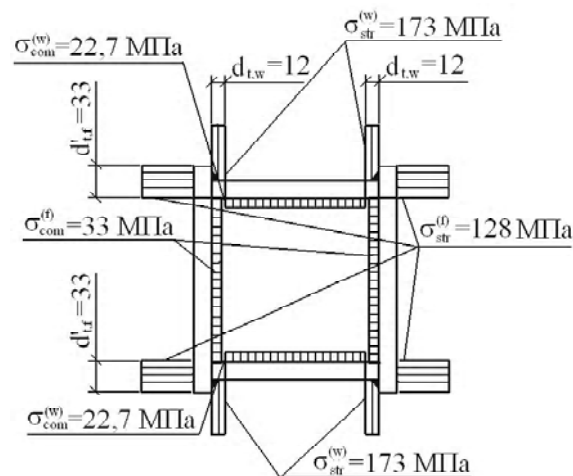


Рисунок 3. Прямоугольные (замененные) эпюры ОН в коробчатом сечении.

рядка 0,5...0,7). Наличие таких ОРН способствует расширению зоны упругой работы материала, т. е. с позиций работы элемента на сжатие такое ОНС может рассматриваться, как способствующее повышению несущей способности.

### Литература

1. Голоднов А. И. К вопросу учета остаточных напряжений в сечениях сжатых двутавровых стержней при их расчетах / А.И. Голоднов. – 2001. – № 5. – С. 8–10. – (Автоматическая сварка)
2. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування : ДБН В.2.3-14 – К. : Мінбуд України, 2006. – 359 с.
3. Стальные конструкции : СНиП II-23-81\*. / Госстрой СССР. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
4. Голоднов А. И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках / А. И. Голоднов. – К. : Вид-во «Сталь», 2008. – 150 с.

**Голоднов Александр Иванович** – доктор технічних наук, учений секретар, завідувач науково-дослідним і проектним відділом будівельних конструкцій Відкритого акціонерного товариства Український науково-дослідний та проектний інститут сталевих конструкцій ім. В. М. Шимановського (ВАТ Укрдідпроектстальконструкція ім. В. М. Шимановського), дійсний член Академії будівництва України. Наукові інтереси: нелінійна будівельна механіка стрижнів і пластин, залишкові напруження та їхній вплив на стійкість сталевих конструкцій, надійність будівельних конструкцій при силових, деформаційних і високотемпературних впливах.

**Балашова Ольга Стефанівна** – інженер, Донбаський державний технічний університет. Наукові інтереси: нелінійна будівельна механіка стрижнів і пластин, залишкові напруження та їхній вплив на стійкість сталевих конструкцій.

**Голоднов Александр Иванович** – доктор технических наук, ученый секретарь, заведующий научно-исследовательским и проектным отделом строительных конструкций Открытого акционерного общества Украинский научно-исследовательский и проектный институт стальных конструкций им. В. Н. Шимановского (ОАО Укрдидпроектстальконструкция им. В. Н. Шимановского), действительный член Академии строительства Украины. Научные интересы: нелинейная строительная механика стержней и пластин, остаточные напряжения и их влияние на устойчивость стальных конструкций, надежность строительных конструкций при силовых, деформационных и высокотемпературных воздействиях.

**Балашова Ольга Стефановна** – инженер, Донбасский государственный технический университет. Научные интересы: нелинейная строительная механика стержней и пластин, остаточные напряжения и их влияние на устойчивость стальных конструкций.

**Golodnov Aleksandr Ivanovich**, D. Sc. (Engineering) – the Scientific Secretary, the Head of the Research and Design Office of Building Structures of the Open Joint-Stock Company Shimanovsky Ukrainian Research and Design Institute of Steel Structures (OJSC V. Shimanovsky Research and Design Institute of Steel Structures), a Full Member of Civil Engineering Academy of Ukraine. Research interests: nonlinear structural mechanics of bars and plates, residual stresses and their effect on stability of steel structures, reliability of building structures at power, deformation and high temperature actions.

**Balashova Olga Stephanovna** – an engineer of the Donbas State Technical University. Research interests: nonlinear structural mechanics of bars and plates, residual stresses and their effect on stability of steel structures.