



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ  
METAL CONSTRUCTIONS**

№4, ТОМ 15 (2009) 281-286

УДК 624.072.002.2

(09)-0203-1

## **РОЗРАХУНОК СТІЙКОСТІ СТИСНУТИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДВОТАВРОВОГО ПЕРЕТИНУ ПІСЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ НА ЧАСТИНІ ДОВЖИНИ**

**С.І. Скребцов**

*Луганський національний аграрний університет,*

*м. Луганськ, Україна.*

*E-mail: skrebtsovs@ukr.net*

*Отримана 20 жовтня 2009; прийнята 26 листопада 2009*

**Анотація.** Залишкові напруження впливають на стійкість і деформативність конструкцій. Це вплив неоднозначний, тому актуальним є питання про розподіл залишкових напружень у перетинах елементів. У першу чергу це відноситься до елементів з перетинами з двотаврових профілів і таврового з парних куточків. Необхідність проведення дійсних досліджень виникла у зв'язку з відсутністю в нормативній літературі рекомендацій з визначення залишкового напруженого стану і його обліку при розрахунках стиснутих елементів. Розроблено методику розрахунку впливу залишкових напружень на стійкість при їхньому регулюванні на частині довжини елемента наплавленням валиків на крайках поясів у середній частині довжини колони. Виконано перший етап розробки програми розрахунку на ЕОМ, що дозволяє визначити оптимальні параметри регулювання залишкових напружень у колонах двотаврового перетину і кількісно оцінити ефективність.

**Ключові слова:** залишкові напруження, колона, стійкість, середня частина довжини.

## **РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ СЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВУТАВРОВОГО СЕЧЕНИЯ ПОСЛЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА ЧАСТИ ДЛИНЫ**

**С.И. Скребцов**

*Луганский национальный аграрный университет,*

*г. Луганск, Украина*

*E-mail: skrebtsovs@ukr.net*

*Получена 20 октября 2009; принята 26 ноября 2009*

**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 двутавровых профилей и таврового из парных уголков. 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. Разработана методика расчета влияния остаточных напряжений на устойчивость при их регулировании на части длины элемента наплавкой валиков на кромках поясів в средней части длины колонны. Выполнен первый этап разработки программы расчета на ЭВМ, которая позволяет определить оптимальные параметры регулирования остаточных напряжений в колоннах двутаврового сечения и количественно оценить эффективность.

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, колонна, устойчивость, средняя часть длины.

## CALCULATION OF STABILITY OF THE I- SECTION COMPRESSED COMPONENTS AFTER RESIDUAL STRESS ADJUSTMENT ON A PART OF LENGTH

S.I. Skrebtsov

*Lugansk National Agrarian University,*

*Lugansk, Ukraine*

*E-mail: skrebtsovs@ukr.net*

*Received 20 October 2009; accepted 26 November 2009*

**Abstract.** Residual stresses influence a structure stability and deformability. This influence is ambiguous, so, distribution of residual stresses in the component sections is a problem of today. First of all it concerns the I-section components and a T-section of twin angles. A necessity of carrying out these investigations was due to the absence of recommendations on determining a residual stressed state in the normative documents and its accounting in designing compressed components. There has been developed a procedure of calculating the influence residual stresses on stability at their adjustment on a part of a component length by beading at the edges of belts in the middle part of a column length. There was fulfilled the first period of the computer-aided development of the calculation program which allows determining optimal parameters of the adjustment of residual stresses in I-section columns and estimating efficiency quantitatively.

**Keywords:** residual stresses, column, stability, middle length.

### Введение. Постановка проблемы

Одним из факторов, влияющих на свойства элементов стальных конструкций, являются остаточные напряжения (ОН). Как правило, они возникают в процессе изготовления с использованием высокотемпературного нагрева. Экспериментально доказана возможность повышения устойчивости элементов таврового (из парных уголков) сечения после наплавки валиков на части длины [1]. Следует ожидать, что путем регулирования остаточного напряженного состояния (ОНС) на части длины в элементах двутаврового сечения может быть достигнут аналогичный эффект. Это обстоятельство требует проведения комплекса экспериментально-теоретических исследований. Исследования выполняются в соответствии с Постановлением Кабинета Министров Украины №409 от 5 мая 1997 г. "Об обеспечении надежности и безопасной эксплуатации зданий, сооружений и инженерных сетей".

### Анализ последних достижений и публикаций

Состояние вопроса изложено в работах [2, 3 и др.] свидетельствует о необходимости продолжения изучения ОНС, возникающего в элементах стальных конструкций после изготовления

и регулирования, и его влияния на устойчивость. Регулирование ОНС путем наплавки валиков по всей длине элемента достаточно широко изучено, особенно для элементов двутаврового профиля. Экспериментальное изучение ОНС после регулирования путем наплавки валиков на части длины и его влияния на устойчивость выполнены для элементов таврового (из парных уголков) профиля.

Несмотря на наличие большого экспериментального материала, в действующих нормативных документах [4, 5]) отсутствуют рекомендации по определению ОНС и его учету при расчетах на устойчивость. Также отсутствует программное обеспечение, ориентированное на широкий круг пользователей, не владеющих специальными знаниями в этой области.

**Цель работы** — разработка метода расчета НДС и устойчивости стальных стержней после регулирования ОНС на части длины.

### Основная часть

Известно [3 и др.], что наплавка валиков по всей длине элемента двутаврового профиля способствует повышению устойчивости только за счет регулирования ОНС. Вместе с тем, очевидно, что нет необходимости в термичес-

ких воздействиях по всей длине элемента — достаточно это сделать на той части длины элемента, где действуют максимальные усилия. Для заземленных колонн регулирование может быть выполнено на участках у заделки, для элементов с шарнирами на концах — в средней части длины.

Для упрощения расчета ОН в двутавровых элементах и устойчивости стальных стержней после регулирования ОНС на части длины для колонн с шарнирами на концах разрабатывается специальное программное обеспечение. При этом за основу принята методика расчета НДС и устойчивости стальных стержней после регулирования ОНС на части длины [2]. Предложения, изложенные в настоящей статье, развивают известные методики расчета А.И. Голоднова и дополняют их в части реализации

путем создания вычислительной программы IRS. При довольно сложном алгоритме программа IRS позволит пользователю, не владеющему специальными знаниями в этой области, максимально упростить расчет частных случаев, определить оптимальные параметры регулирования остаточных напряжений по длине элемента и предоставит возможность количественно оценить влияние остаточных напряжений на устойчивость конструкции.

Устойчивость элементов с наплавкой валиков на части длины определяется по алгоритму с использованием программы IRS в такой последовательности.

1. Задаются исходными данными:

1.1. Для сварного двутавра: параметрами сечения (шириной полки  $b_f$ , толщиной полки  $t_f$ , высотой стенки  $b_w$ , толщиной стенки  $t_w$ );

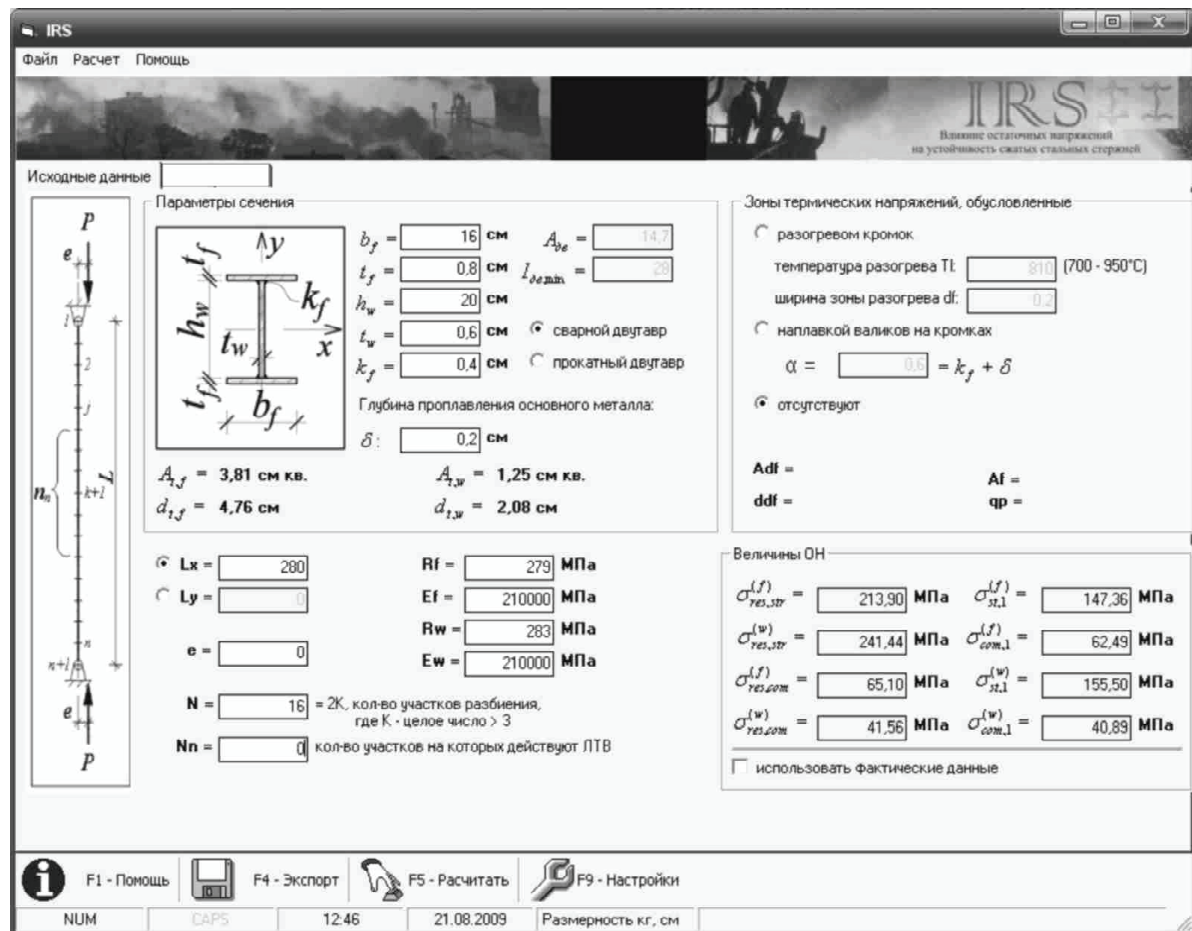


Рис. 1. Общий вид экрана при вводе исходных данных для последующих расчетов влияния ОНС на устойчивость сжатых стальных стержней.

технологическими параметрами (катетом шва  $k_p$ , глубиной проплавления основного металла  $a_{dd}$  (для полуавтоматической сварки можно принять 2...4 мм, для ручной сварки 3...6 мм); прочностными и деформативными характеристиками материалов поясов и стенки ( $R_y^i, E_p, R_y^w, E_w$ ); длиной элемента  $L$  и начальным эксцентриситетом приложения сжимающей силы  $e$ , количеством участков разбиения элемента  $N$ , количеством участков  $N_n$ , на которых было выполнено регулирование ОНС.

1.2. Для прокатного двутавра: параметрами сечения (площадью поперечного сечения  $A_{об}$ , моментом инерции  $I_{об, min}$  (для нахождения эквивалентного сечения двутавра, аналогичного сварному), глубиной проплавления основного металла  $a_{dd}$  прочностными и деформативными характеристиками материалов ( $R_y, E$ ), длиной элемента  $L$  и начальным эксцентриситетом приложения сжимающей силы  $e$ , количеством участков разбиения элемента  $N$ , количеством участков  $N_n$ , на которых было выполнено регулирование ОНС.

1.3. Общий вид экрана при вводе исходных данных для последующих расчетов влияния ОНС на устойчивость сжатых стальных стержней приведен на рис. 1.

2. Определяют ОНС сечений на участках с наплавкой валиков (прогревом) по кромкам поясов и на участках, где швы по кромкам не наплавлялись, по специально разработанному алгоритму [3] для элементов двутаврового профиля, либо задают фактические данные, полученные экспериментальным путем для более точного результата.

3. Для наиболее загруженного  $j$ -го сечения на  $m$ -ом этапе расчета принимают величину радиуса кривизны  $R^m = R_0$  и шага по радиусу кривизны  $\Delta R$ .

4. Определяют значения кривизны в сечениях элемента. Для сечений  $i=1$  и  $i=n+1$  при условии шарнирного закрепления на первой итерации принимают  $k_i = k_{n+1} = 0$ . Для  $j$ -го сечения принимают  $k_j = 1/R_m$ , а для остальных — изменяющимися по линейному закону.

5. По уравнениям метода начальных параметров [3] находят прогибы элемента во всех точках  $y_i$  ( $i=1, 2, \dots, j-1, j+1, \dots, n+1$ ) с учетом условий на концах:

$$y_i = y_1 + \varphi_1 \cdot L \cdot \frac{i-1}{n} + \frac{L^2}{6 \cdot n^2} \cdot [(3 \cdot i - 4) \cdot \kappa_1 + 6 \cdot \sum_{j=2}^{i-1} (i-j) \cdot \kappa_j + \kappa_i], \quad (1)$$

$$\varphi_i = \varphi_1 + \frac{L}{2 \cdot n} \cdot (\kappa_1 + 2 \cdot \sum_{j=2}^{i-1} \kappa_j + \kappa_i), \quad (2)$$

где  $y_i$  — перемещение  $i$ -й точки оси элемента;  $k_i, \varphi$  — соответственно кривизна и угол поворота  $i$ -го сечения колонны;  $n$  — количество участков, на которые разбита длина балки  $L$  (при выборе количества участков следует учитывать, что точность расчета повышается при  $n \rightarrow \infty$ ).

6. На каждом этапе расчета определяют величину нагрузки  $P_k$  ( $k$  — номер итерации расчета) в наиболее загруженном сечении при заданной величине кривизны  $k_j$ .

7. По известной величине продольной силы  $P_k$  определяют НДС и величины кривизны во всех сечениях по длине элемента (на участках с наплавкой валиков или прогревом и без наплавки).

8. Выполняют расчеты по пунктам 5...7 алгоритма, постепенно уточняя кривизны сечений на каждой итерации. Расчет считается оконченным, если для определенного этапа расчета значения продольных сил на смежных итерациях:

$$\left| \frac{P_{k+1}^m - P_k^m}{P_{k+1}^m} \right| < 3,$$

где  $\eta$  — малая величина (примерно 0,001), обусловленная необходимой точностью расчета.

9. Изменяют величину радиуса кривизны для  $j$ -го сечения и продолжают расчет по п.п. 5...8. Величинами кривизны во всех точках задаются по результатам расчета на предыдущей итерации, т.е. ( $i=1, \dots, j-1, j+1, \dots, n+1$ ), с последующим их уточнением на каждой итерации по п. 7.

10. Сравнивают величины продольных сил, полученные на смежных ( $m+1, m$ ) этапах расчета:

$$P^{m+1} - P^m > 0$$

Если условие удовлетворяется, продолжают расчет по п. 9.

Если условие не удовлетворяется, выполняют расчет по п. 11.

11. Возвращаются на предыдущее значение радиуса кривизны  $R^m = R^{m+1} + \Delta R$ , изменяют шаг по радиусу кривизны  $\Delta R = 0,5\Delta R$  и продолжают расчет по п. 9.

12. При достижении максимального значения  $R^m_{max}$  при заданной точности расчет считается оконченным. Дальнейшее уменьшение радиуса кривизны и, соответственно, расчеты по п.п. 5-12 позволят получить точки на кривой состояния "P-f" в закритической (после потери устойчивости) области.

Расчет, соответствующий пунктам 3...12, производится автоматически, нажатием на клавишу "F5" или соответствующую надпись в окне вкладки, при наличии введенных исходных данных в предназначенные для этого ячейки. По результатам выполненных расчетов программа строит графики функций "P-f" элемента, которые позволяют наглядно представить процесс деформирования, а также провести сравнения с результатами экспериментальных исследований. Программой также предусматривается выполнение отчета для последующего вывода на печать. В отчете содержатся исходные данные, полученные в результате расчета величины с пояснениями и иллюстрации для более ясного представления пользователя об остаточных напряжениях в сечениях элементов.

## Выводы

Полученные результаты можно кратко сформулировать таким образом.

1. Усовершенствован алгоритм решения задачи определения НДС и устойчивости сжатых элементов двутаврового профиля, имеющих ОНС на части длины, и разработан механизм его реализации — вычислительная программа IRS. Алгоритм базируется на четких физических гипотезах и допущениях, которые наиболее полно описывают поведение конструкций под нагрузкой.
2. При помощи программы IRS упрощается расчет конструкций и предоставляется возможность применения данных разработок на практике широким кругом пользователей.

## Литература

1. Козлов С.В., Иванов А.П., Голоднов А.И. Экспериментальные исследования сжатых элементов из уголков после наплавки сварных швов // Метал. конструкции: взгляд в прошлое и будущее: Сб. докл. VIII Украинской науч.- техн. конф. — Ч. 1. — К.: Изд-во "Сталь", 2004. — С. 554-560.
2. Голоднов А.И., Скребцов С.И. Устойчивость сжатых элементов после регулирования остаточного напряженного состояния на части длины // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: технічні науки. — Луганськ: Вид-во ЛНАУ, 2008. — №88. — С. 22-27.
3. Голоднов А.И., Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках. — К.: Изд-во "Сталь", 2008. — 150 с.
4. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування /Мінбуд України. — К.: Мінбуд України, 2006. — 359 с.
5. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции /Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. — 96 с.
6. Скребцов С.И. Экспериментальные исследования сжатых стальных элементов после регулирования остаточного напряженного состояния на части длины // Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського/ Під загальною редакцією заслуженого діяча науки і техніки України, д.т.н., професора О.В. Шимановського.—К.:Вид-во "Сталь", 2009, вип.3 — С.130-135.
7. Козлов С.В., Кириллов Ю.В. Применение плазменной сварки как способа снижения остаточных деформаций и напряжений в сварных стальных конструкциях // Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського/ Під загальною редакцією заслуженого діяча науки і техніки України, д.т.н., професора О.В. Шимановського.—К.:Вид-во "Сталь", 2009, вип.3 — С.102-107.
8. Kuo-Chen Yang, Rejia Hsu, Structural behavior of centrally loaded steel columns at elevated temperature, Journal of Constructional Steel Research, Volume 65, Issues 10-11, October-November 2009, Pages 2062-2068.
9. R.H. Leggatt, Residual stresses in welded structures, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Volume 85, Issue 3, March 2008, Pages 144-151.
10. T. Galambos, Guide to stability design criteria for metal structures, John Wiley and sons INC., ny, 1998.
11. M. Jandera, L. Gardner, J. Machacek Residual stresses in cold-rolled stainless steel hollow sections Journal of Constructional Steel Research, Volume 64, Issue 11, November 2008, Pages 1255-1263.

12. S.H. Li, G. Zeng, Y.F. Ma, Y.J. Guo, X.M. Lai  
Residual stresses in roll-formed square hollow sections Thin-Walled Structures, Volume 47, Issue 5, May 2009, Pages 505-513.
13. R. Brockenbrough, F. Merrit, Structural steel designer's handbook AISC, AASHTO, AISI, ASTM, AREMA and ASCE-07 Design standards, McGraw-Hill, 2006.

**Скребцов Сергій Іванович** — аспірант кафедри "Будівельні конструкції" Луганського національного аграрного університету. Наукові інтереси: підвищення стійкості сталевих конструкцій за рахунок регулювання залишкового напруженого стану на частині довжини, створення розрахункових методів для виконання цієї мети.

**Скребцов Сергей Иванович** — аспірант кафедри "Строительные конструкции" Луганского национального аграрного университета. Научные интересы: увеличение устойчивости сжатых стальных элементов за счет регулирования остаточного напряженного состояния на части длины, создание расчетных методов для выполнения этой задачи.

**Skrebtsov Sergey Ivanovich** — a postgraduate of the Department "Building Structures" of Lugansk National Agrarian University. Scientific interests: increase of stability of compressed steel elements by controlling a residual stressed state on a part of the length, development of calculation methods to fulfill this task.