

УДК 624.015.5-69

к.т.н. Балашова О. С.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## ИНЖЕНЕРНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

*Предложена инженерная методика учёта влияния остаточного напряжённого состояния и неупругих свойств стали на несущую способность сварных элементов путём увеличения или уменьшения расчётного сопротивления стали с помощью коэффициента, позволяющего оценить степень влияния остаточных напряжений. Учёт неупругих свойств стали регулируется коэффициентом продольного изгиба, который зависит от расчётного сопротивления стали, гибкости, эксцентриситета приложения нагрузки, формы поперечного сечения.*

**Ключевые слова:** несущая способность, сварные конструкции, остаточные напряжения, неупругая работа материала, остаточное напряжённое состояние, коэффициент продольного изгиба.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Как известно, все металлы при нагревании расширяются, а при охлаждении сжимаются. В процессе сварки, в результате местного нагрева металла и его последующего охлаждения, в сварном соединении происходит непрерывное изменение температурных деформаций и напряжений, причём в отдельных зонах сварного соединения возможно развитие необратимых объёмных изменений, которые и являются причиной возникновения послесварочных — остаточных напряжений (ОН). Эти напряжения не связаны с действием внешних сил, являются внутренними напряжениями первого рода, которые уравниваются в объёме элемента и вызывают его деформацию [1].

Остаточные напряжения отрицательно сказываются на несущей способности, размерной стабильности сварных конструкций. Они могут привести к снижению работоспособности сварных конструкций, так как изменение формы изделия и отдельных её элементов приводит, как правило, к перераспределению сил от рабочих нагрузок в элементах и к дополнительному нагружению сварного соединения, часто не предусмотренному в расчётах. Поэтому исследование, учёт влияния, регулирование ОН — важная задача как при проектировании сварных конструкций, так и при технологии сварки.

На основании многочисленных исследований [1–3] было отмечено, что остаточные растягивающие напряжения (ОРН), наряду с другими факторами, интенсифицируют в сварных соединениях процессы хрупкого, усталостного и коррозионного разрушения, а остаточные сжимающие напряжения (ОСН), сосредоточенные по кромкам поясов двутавровых элементов, приводят к раннему образованию пластических зон в этих частях сечения и, вследствие удалённости их от осей симметрии, снижению несущей способности.

В связи с этим возникает необходимость создавать такие методы расчёта, которые позволили бы определить величины ОН в телах после всех процессов изготовления, учесть наличие ОНС при расчётах элементов с целью снижения вероятности аварий.

**Постановка задачи.** Разработка инженерной методики расчёта сжатых сварных элементов с учётом влияния остаточного напряжённого состояния (ОНС) и неупругих свойств стали путём увеличения или уменьшения расчётного сопротивления стали с помощью коэффициентов, позволяющих оценить степень влияния остаточных напряжений.

**Изложение материала и его результаты.** В соответствии с требованиями действующих нормативных документов [8], расчёт на прочность сжато-изгибаемых

элементов по формуле (49) выполнять не требуется при значении приведённого эксцентриситета  $m_{ef} \leq 20$ , отсутствии ослабления сечения и одинаковых значениях изгибающих моментов, принимаемых в расчётах на прочность и устойчивость.

Расчёт на устойчивость сжато-изгибаемых элементов выполняется как в плоскости действия момента (плоская форма потери устойчивости), так и из плоскости (изгибно-крутильная форма потери устойчивости).

Расчёт на устойчивость сжато-изгибаемых элементов постоянного сечения в плоскости действия момента, совпадающей с плоскостью симметрии, выполняется по формуле

$$\frac{P}{\varphi_e \cdot A} \leq R_y \cdot \gamma_c. \quad (1)$$

Здесь коэффициент  $\varphi_e$  для сплошностенчатых элементов определяется по таблице 74 [8] в зависимости от условной гибкости  $\bar{\lambda}$  и приведённого относительного эксцентриситета  $m_{ef}$  ( $m = e \cdot A / W_c$  — относительный эксцентриситет;  $e$  — эксцентриситет;  $A$  — площадь сечения;  $W_c$  — момент сопротивления сечения для наиболее сжатого волокна). При этом в нормах проектирования стальных конструкций [8] методика определения коэффициента продольного изгиба не учитывает наличие ОНС.

Сжатые элементы, изгибаемые в плоскости наименьшей жёсткости ( $I_y < I_x$  и  $e_y \neq 0$ ), при гибкостях  $\lambda_x > \lambda_y$  рассчитываются по формуле (1), а также проверяются на устойчивость из плоскости действия момента, как центрально-сжатые элементы, по формуле

$$\frac{P}{\varphi_x \cdot A} \leq R_y \cdot \gamma_c, \quad (2)$$

где  $\varphi_x$  — коэффициент, принимаемый согласно требованию п. 5.3 [2]. При гибкостях  $\lambda_x \leq \lambda_y$  проверку устойчивости из плоскости действия момента выполнять не требуется.

Таким образом, в действующих нормативных документах [7, 8] серьёзных предложений по учёту влияния ОНС не имеется. В [7] даны предложения по учёту влияния ОНС при расчётах на устойчивость элементов из прокатных и сварных двутавров путём введения понижающих коэффициентов продольного изгиба, но при этом отсутствует методика определения ОНС. Методики расчёта сжатых элементов коробчатого сечения с учётом влияния ОНС отсутствуют.

В отличие от традиционного способа учёта ОНС путём уменьшения или увеличения коэффициента продольного изгиба [7] в данной работе принят иной подход, позволяющий учитывать влияние вида ОНС путём введения дополнительного коэффициента условий работы  $\beta_{f,rs}$ , а влияние неупругих свойств стали — коэффициентом продольного изгиба  $\varphi_{pl}$ , зависящим от формы поперечного сечения.

Тогда, с учётом выше приведённых коэффициентов, несущую способность сжатых сварных элементов, подверженных осевому сжатию с изгибом, с учётом влияния остаточных напряжений и неупругих свойств стали предлагается оценивать по формуле

$$\sigma_f = \frac{N}{\varphi_{pl} \cdot A} \leq \gamma_c \cdot \beta_{f,rs} \cdot R_y^f, \quad (3)$$

где  $\sigma_f$  — напряжения на кромках сечений;  $\beta_{f,rs}$  — коэффициент, учитывающий наличие и вид ОН в поясах и, соответственно, возможность более раннего или позднего перехода материала поясов в пластическое состояние;  $\varphi_{pl}$  — коэффициент продольного изгиба;  $R_y^f$  — расчётное сопротивление стали поясов;  $A$  — площадь поперечного сечения;  $\gamma_c$  — коэффициент условий работы.

В формуле (3) численное значение дополнительного коэффициента  $\beta_{f,rs}$ , учитывающего влияние ОНС, предлагается определять по формуле

$$\beta_{f,rs} = \sqrt{1 + \frac{\sigma_{str(com)}^{(f)'} (\sigma_{res,str}^{(f)})}{R_y^f}}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{str(com)}^{(f)'}$  — растягивающие (сжимающие) напряжения на кромках поясов (ОРН принимаются со знаком «плюс», ОСН — со знаком «минус»), определяемые по методике [1];  $\sigma_{res,str}^{(f)}$  — растягивающие напряжения в поясах при предварительном напряжении вытяжкой поясов способом упреждающего разогрева [5].

Влияние неупругих свойств металла в формуле (3) учтено коэффициентом продольного изгиба  $\varphi_{pl}$  [4]. В общем виде формулу для вычисления коэффициента продольного изгиба для интервала величин гибкости  $20 \leq \lambda \leq 120$ , расчётных сопротивлений стали  $205 \leq R_y \leq 410$  МПа и относительных эксцентриситетов  $0,272 \leq m \leq 2,7$  можно записать в виде

$$\varphi_{pl} = \varphi_{el} \cdot \gamma_{pl}, \quad (5)$$

где  $\varphi_{el}$  — коэффициент продольного изгиба для такого состояния сжатого элемента, при котором в наиболее напряжённом сечении напряжения не превышают предела упругой работы стали;  $\gamma_{pl}$  — коэффициент, учитывающий развитие пластических деформаций (его величина зависит от формы поперечного сечения).

Для получения зависимостей коэффициентов  $\varphi_{el}$  и  $\gamma_{pl}$  был проведён математический эксперимент. В ходе последовательной аппроксимации результатов математического эксперимента методом наименьших квадратов получены зависимости, позволяющие перейти от недеформированной расчётной схемы к деформированной при выполнении инженерных расчётов несущей способности стальных элементов, подверженных осевому сжатию с изгибом, что позволяет получить результат с более высокой точностью. Формулы для

вычисления коэффициентов приведены в источнике [4].

Вышеизложенную методику проиллюстрируем примером.

При изменении строительных условий привязки проекта одноэтажного каркасного здания [6] к другой климатической зоне стал вопрос о выполнении поверочных расчётов несущей способности каркаса запроектированного здания. Поверочные расчёты металлических конструкций заключались в определении усилий, действующих в несущих элементах каркаса здания. Все несущие элементы поперечных рам запроектированы из сварных двутавровых профилей переменного сечения. Соединения колонн поперечных рам с фундаментами, а также ригелей с колоннами жёсткие.

Для оценки влияния ОН на несущую способность колонн, подверженных осевому сжатию с изгибом, и обоснования возможности применения в проекте конструкций, в частности сварных двутавровых колонн, без изменения их размеров, формы и ОНС был выполнен расчёт каркаса здания по определению усилий, действующих в несущих элементах каркаса.

С целью определения напряжённо-деформированного состояния, возникающего в строительных конструкциях каркаса, предварительно выполнен расчёт каркаса с использованием программного комплекса «Lira-Windows», в основу которого положен МКЭ в перемещениях. Конечно-элементная модель каркаса разработана в линейной постановке. Прогоны смоделированы КЭ типа 10 «Универсальный пространственный стержневой конечный элемент» соответствующих размеров. Колонны и ригели смоделированы плоскими оболочечными КЭ типа 41 «Четырёхугольный элемент оболочки» соответствующей толщины (по проекту 10 мм). Компьютерная модель каркаса состоит из 81648 конечных элементов и 79863 узлов. Общий вид модели приведён на рисунке 1. На рисунке 2 представлен фрагмент компьютерной модели колонн, подстропильных балок, ригелей поперечных рам и прогонов.

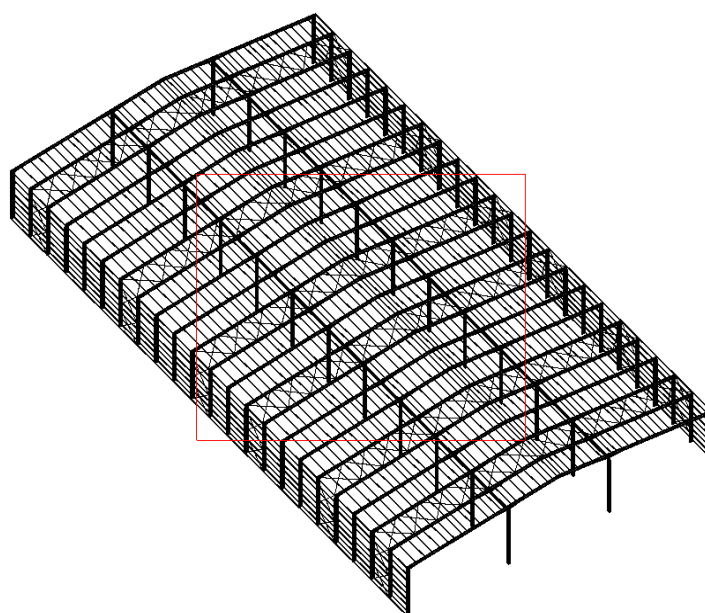


Рисунок 1 Общий вид компьютерной модели каркаса

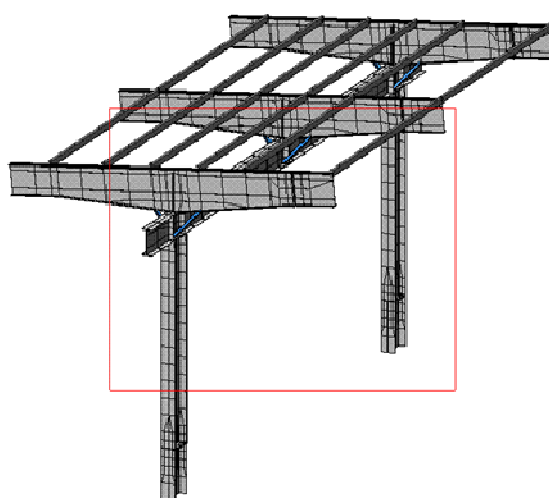


Рисунок 2 Фрагмент компьютерной модели колонн, подстропильных балок, ригелей поперечных рам и прогонов

По результатам выполненных расчётов была установлена величина фактических нагрузок на несущие конструкции, в частности, максимальные усилия в опорных узлах колонн среднего ряда (рис. 2) при действии ветровой и снеговой нагрузки в соответствии с изменёнными климатическими условиями:  $N=940,5$  кН; изгибающий момент в плоскости поперечных рам  $M_y=-16,65$  кНм; изгибающий момент из плоскости попереч-

ных рам  $M_z=16,92$  кНм. Для наружных колонн усилия превышают ограничения ( $0,272 \leq m \leq 2,72$ ).

Сечение колонны среднего ряда представлено на рисунке 3.

Величина эксцентриситета приложения нагрузки из плоскости рамы

$$e_{\max} = \frac{M_{\max}}{N_{\max}} = \frac{16,92}{940,5} = 0,018 \text{ м.}$$

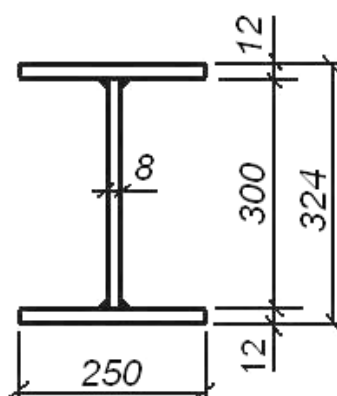


Рисунок 3 Сечение колонны среднего ряда

Геометрические параметры сечения: площадь поперечного сечения  $A=84 \text{ см}^2$ ; момент инерции сечения  $I=3125 \text{ см}^4$ ; момент сопротивления сечения для наиболее сжатого волокна  $W=250 \text{ см}^3$ ; радиус инерции сечения  $i=6,1 \text{ см}$ ; гибкость сжатого элемента  $\lambda = \frac{\mu \cdot L}{i} = \frac{0,5 \cdot 1420}{6,1} = 116,4$ .

Относительные параметры: относительное расчётное сопротивление стали  $\bar{R} = 0,915$ ; относительная гибкость элемента  $\bar{\lambda} = 1,164$ ; относительный эксцентриситет  $m = \frac{e_{\max} A}{W} = 1,8 \cdot 84 / 250 = 0,605$ .

Коэффициент продольного изгиба определён по формуле (1) источника [4]:  $\varphi_{el} = 0,3024$ . Коэффициент, учитывающий развитие пластических деформаций, определён по формуле (4) источника [4]:  $\gamma_{pl} = 1,016$ . Коэффициент продольного изгиба с учётом развития пластических деформаций определён по формуле (11) источника [4]:  $\varphi_{pl} = 0,307$ .

Вычислим значение коэффициента  $\beta_{f,rs}$  по формуле (4):

$$\beta_{f,rs} = \sqrt{1 + \frac{\sigma_{com}^{(f)}}{R_y^f}} = \sqrt{1 + \frac{-66,8}{375}} = 0,907.$$

Тогда несущая способность колонны с учётом влияния ОНС проверяется по формуле

$$N = 940,50 \text{ кН} \leq \gamma_c \cdot \beta_{f,rs} \cdot \phi_{pl} \cdot R_y^f \cdot A,$$

$$N = 1 \cdot 0,907 \cdot 0,307 \cdot 37,50 \cdot 84 = 877,11 \text{ кН}.$$

Условие не выполняется, значит, несущая способность колонн среднего ряда не обеспечена.

Проверим несущую способность колонны без учёта влияния ОНС, то есть принимаем коэффициент  $\beta_{f,rs} = 1$ :

$$N = 940,50 \text{ кН} \leq \gamma_c \cdot \beta_{f,rs} \cdot \phi_{pl} \cdot R_y^f \cdot A,$$

$$N = 1 \cdot 1 \cdot 0,307 \cdot 37,50 \cdot 84 = 967,05 \text{ кН}.$$

В этом случае условие выполняется.

Таким образом, недооценка влияния ОНС при расчётах строительных конструкций может привести к преждевременному отказу. В действующих нормативных документах влияние ОНС на работу конструкций игнорируется.

#### Выводы и направление дальнейших исследований:

1. Остаточные напряжения отрицательно сказываются на несущей способности, размерной стабильности сварных конструкций.

2. Оценка влияния ОНС и неупругих свойств стали на несущую способность сжатых элементов обычно проводится путём увеличения или уменьшения коэффициента продольного изгиба, но при этом не учитывается методика определения ОНС. При таком подходе учёт степени влияния ОНС на величину коэффициента продоль-

ного изгиба, как правило, основывается на данных экспериментальных исследований.

3. Разработанная инженерная методика оценки влияния нелинейной работы материала и ОНС на несущую способность сжатых элементов даёт возможность определять величины коэффициента продоль-

ного изгиба и условий работы с учётом ОНС и нелинейных свойств стали. Данная методика позволяет путём несложных расчётов оценить степень влияния ОНС на несущую способность сжатых элементов с достаточной для практических целей точностью.

### Библиографический список

1. Голоднов, А. И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках [Текст] / А. И. Голоднов. — К. : Сталь, 2008. — 150 с.
2. Винокуров, В. А. Теория сварочных деформаций и напряжений [Текст] / В. А. Винокуров, А. Г. Григорьянц. — М. : Изд-во «Машиностроение», 1984. — 280 с.
3. Николаев, Г. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций [Текст] : учеб. пособие / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. — М. : Изд-во «Высш. школа», 1982. — 272 с.
4. Балашова, О. С. Несущая способность сжатых сварных элементов при наличии остаточного напряжённого состояния [Текст] / О. С. Балашова, А. И. Голоднов // Сб. науч. тр. ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2011. — Вып. 34. — С. 187–198.
5. Балашова, О. С. К расчёту сжатых сварных элементов различного сечения [Текст] / О. С. Балашова // Сб. науч. тр. ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2010. — Вып. 30. — С. 241–248.
6. Проектная документация job № W1-C729 «MIRGOROD» / Design Calculations Ver 99.11 ZS Building 01, Dated 24/08/06. — К. : Industrial Building Technologies LTD, 2006. — 249 с.
7. Правила проектирования. Споруди транспорту. Мости та труби. [Текст] : ДБН В.2.3-14 : утв. М-вом строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства (Минстрой Украины) 06.05.2006. — Введ. 2007–02–01. — К. : Мінбуд України, 2006. — 359 с.
8. Стальные конструкции [Текст] : СНиП II-23-81\*: утв. постановлением Госстроя СССР 14.08.1981 № 144. — М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1990. — 96 с.

© Балашова О. С.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. СК ДонГТУ Псюком В. В., к.т.н., проф., зав. каф. ЗСАиГ ГОУ ЛНР «ЛНАУ» Рогулиным В. В.*

Статья поступила в редакцию 21.09.18.

**к.т.н. Балашова О. С.** (ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

### ІНЖЕНЕРНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗВАРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ

Запропоновано інженерну методику врахування впливу залишкового напруженого стану та непружних властивостей сталі на несучу здатність зварних елементів шляхом збільшення або зменшення розрахункового опору сталі за допомогою коефіцієнта, який дозволяє оцінити ступінь впливу залишкових напружень. Вплив непружних властивостей сталі регулюється коефіцієнтом позовжнього вигину в залежності від розрахункового опору сталі, гнучкості, ексцентриситету прикладення навантаження, форми поперечного перерізу.

**Ключові слова:** несуча здатність, зварні конструкції, залишкові напруження, непружна робота матеріалу, залишковий напружений стан, коефіцієнт позовжнього вигину.

**PhD Balashova O. S.** (*DonSTU, Alchevsk, LPR*)

**ENGINEERING APPROACH TO DETERMINING THE BEARING CAPACITY OF WELDED ELEMENTS WITH REGARD TO THE RESIDUAL STRESS**

*An engineering technique has been proposed for regarding the influence of the residual stress state and inelastic properties of steel on the bearing capacity of welded elements by increasing or decreasing the design resistance of steel using a coefficient to estimate the degree of influence of residual stresses. Accounting for the inelastic properties of steel is controlled by the buckling index, which depends on the design resistance of the steel, flexibility, eccentricity of the applied load, and cross-sectional shape.*

**Key words:** *bearing capacity, welded structures, residual stresses, inelastic material operation, residual stress state, buckling index.*