

*Филатова Л.Н.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## **К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАЛЬНЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК**

*Розроблено інженерну методику визначення оптимальних параметрів сталевих балок двотаврового профілю з урахуванням впливу залишкових напружень. Значення величин залишкових напружень в перетинах балок визначаються за відомими методиками.*

**Ключові слова:** *залишкові напруження, сталеві балки, оптимальні параметри.*

*Разработана инженерная методика определения оптимальных параметров стальных балок двутаврового профиля с учетом влияния остаточных напряжений. Значения величин остаточных напряжений в сечениях балок определяются по известным методикам.*

**Ключевые слова:** *остаточные напряжения, стальные балки, оптимальные параметры.*

**Анализ исследований и публикаций.** Эффективность конструкций определяется их конструктивными формами [1], теория образования которых опирается на ряд прогрессивных принципов:

- применение предварительного напряжения;
- создание конструктивных форм, обеспечивающих наибольшую концентрацию материала, совмещение функций элементами;
- максимальное использование работы на растяжение отдельных элементов и поверхностей;
- типизация конструктивных решений;
- обеспечение жесткости и аэродинамической прочности систем.

Опираясь на эти принципы, можно не только установить рациональную конструктивную форму сооружения с заданным технологическим процессом и обеспечить ее надежную и долговременную эксплуатацию, но и добиться наибольшей экономии расхода материалов, включая снижение трудоемкости изготовления конструкции и уменьшение затрат на монтаж [1].

Существующие технологические процессы изготовления стальных конструкций сопровождаются локальным термическим разогревом (сварка, резание с применением высокотемпературного нагрева, нагрев

отдельных участков и т.п.), что приводит к появлению остаточных деформаций (ОД) и напряжений (ОН). Эти напряжения не связаны с действием внешних сил, являются внутренними напряжениями первого рода, уравниваемыми в объеме элемента и вызывающими его деформацию [2].

ОН возникают и при предварительном напряжении, которое применяется в различных конструкциях для улучшения их свойств: расширения области упругой работы материала, перераспределения усилий, уменьшения деформативности, повышения устойчивости. Предварительное напряжение осуществляется на стадии изготовления, монтажа или в процессе эксплуатации [2, 3, 4 и др.].

Индустриальные способы предварительного напряжения стержневых элементов (на стадии изготовления) можно разделить на три группы [2]:

- методы с использованием дополнительных элементов типа затяжек;
- методы, основанные на предварительном деформировании элементов с последующей фиксацией сваркой;
- методы предварительного напряжения путем локальных термических воздействий (ЛТВ).

К методам, основанным на предварительном деформировании элементов с последующей фиксацией сваркой, относится метод предварительного напряжения вытяжкой нижнего пояса способом упреждающего разогрева. Предварительное напряжение осуществляется путем приварки к исходному тавру (верхний пояс и стенка) предварительно разогретого нижнего пояса. После сварки и остывания в верхнем поясе и примыкающем участке стенки, которые при эксплуатационной нагрузке воспринимают сжимающие усилия, возникают остаточные растягивающие напряжения (ОРН). В нижней части стенки, где при эксплуатационной нагрузке возникают растягивающие усилия, возникают остаточные сжимающие напряжения (ОСН). В нижнем поясе, который при эксплуатационной нагрузке воспринимает растягивающие напряжения, возникают ОРН. Таким образом, при загрузке эксплуатационной нагрузкой вначале погашаются ОН, возникающие в верхнем поясе и стенке, и, тем самым, увеличивается зона упругой работы материала. Что касается нижнего пояса, то при таком способе предварительного напряжения материал нижнего пояса должен иметь повышенные, по сравнению с материалом исходного тавра, прочностные характеристики [2, 3, 4 и др.].

**Постановка задачи.** Основной задачей настоящей работы является разработка инженерной, ориентированной на действующие нормы,

методики определения оптимальных параметров сварных балок двутаврового профиля с учетом наличия ОН.

**Цель работы** – усовершенствование методики определения оптимальных параметров сварных балок двутаврового профиля с учетом влияния остаточного напряженного состояния (ОНС).

**Изложение материала и его результаты.** Настоящие предложения разработаны в соответствии с рекомендациями действующих нормативных документов [5, 6] и распространяются на изгибаемые элементы с сечениями из составных сварных двутавров, работающие в условиях ограниченной динамики и нормальных температур.

Изготовление и искусственное регулирование ОНС в сечениях сварных двутавров должно осуществляться в заводских условиях.

Компоновка сечений изгибаемых элементов, предварительно напряженных различными способами, начинается с определения расчетной высоты сечения. Такой высотой может быть наибольшая высота  $h_{opt}$ , получаемая из условий прочности (в большинстве случаев диктуется экономическими соображениями) или минимальная высота  $h_{min}$ , которая обеспечивает необходимую жесткость при полном использовании несущей способности материала [2, 4, 7, 8 и др.].

Приравнивая  $h_{opt} = h_{min}$  и решая соответствующие уравнения прочности и деформативности относительно  $R_y$ , можно получить оптимальную прочность стали  $R_{opt}$ , т.е. на стадии проектирования решать задачу о выборе марки стали оптимальной прочности.

Подбор сечений осуществляется в такой последовательности (алгоритм «ИЗГИБ») [2, 4, 7 и др.].

1. Задаются прочностными и деформативными характеристиками материалов поясов и стенки (при проектировании сечений балок, скомпонованных из различных марок сталей) или принимают марку стали, соответствующую оптимальной прочности.

2. Определяют оптимальную высоту сечения (при проектировании моностаальной балки из стали, соответствующей  $R_{opt}$ ), оптимальную и минимальные высоты  $h_{opt}$  и  $h_{min}$  без учета влияния ОН и остаточного выгиба [3, 4, 5 и др.].

При проектировании предварительно напряженных балок оптимальную высоту сечения определяют по формуле:

$$h_w^{\text{opt}} = \sqrt{\frac{M \cdot [\bar{\lambda}_w] \cdot \sqrt{\frac{E_w}{R_y^w}} \cdot (n_3 + 1)}{\gamma_c \cdot R_y^f \cdot [1 + \frac{1}{3} \cdot (n_1 + n_2) - \frac{1}{6} \cdot (n_2 \cdot n_3 + \frac{n_1}{n_3})]}}. \quad (1)$$

В этой формуле:

$$n_1 = [\sigma_w^{\text{com}}] / R_y^{\text{f,com}}; \quad (2)$$

$$n_2 = R_y^w / R_y^f; \quad (3)$$

$$n_3 = R_y^f / R_y^{\text{f,com}}, \quad (4)$$

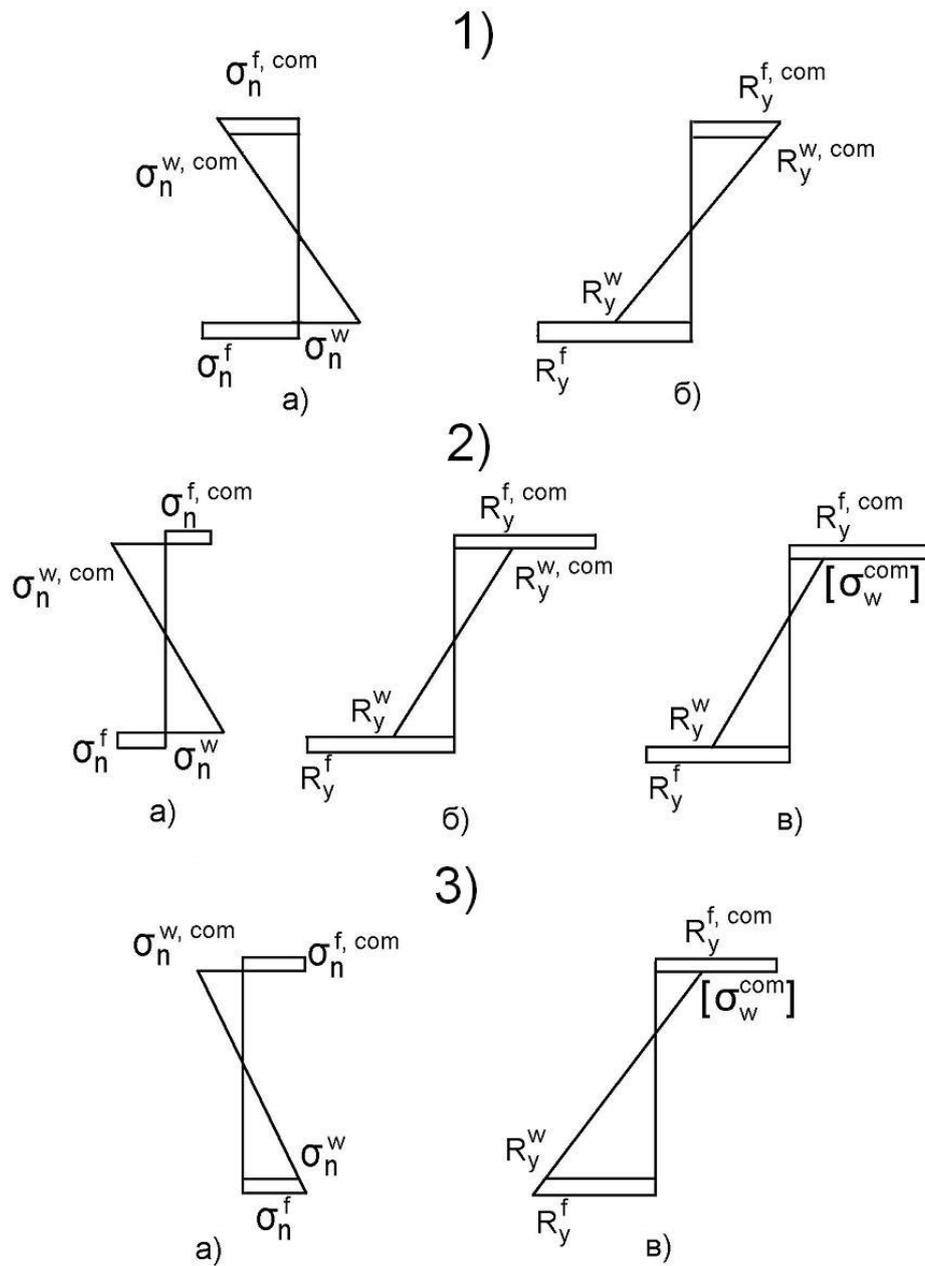
где  $0,3 \cdot R_y^w \leq \sigma_w^{\text{com}} \leq R_y^w$  – допускаемые напряжения в стенке, следует принимать близкими к нижнему пределу;  $R_y^{\text{f,com}}, R_y^f, R_y^w$  – расчетные сопротивления стали соответственно сжатого, растянутого поясов и стенки;  $[\bar{\lambda}_w]$  – предельное значение гибкости стенки, при которой устойчивость стенки не требуется проверять в соответствии с пунктом 7.3 [6];  $M$  – максимальный изгибающий момент в сечениях балки;  $\gamma_c$  – коэффициент условий работы (раздел 4 [6]).

Напряженное состояние сечений балок, предварительно напряженных различными способами, приведено на рисунке 1.

3. Находят минимальную толщину стенки:

$$t_w^{\text{min}} = \frac{h_w \cdot \sqrt{\frac{\sigma_w^{\text{com}}}{E_w}}}{[\bar{\lambda}_w]}, \quad (5)$$

где  $\sigma_w^{\text{com}}$  – допускаемые напряжения в верхней части стенки, которые, в зависимости от способа предварительного напряжения, принимаются в соответствии с пунктом 2; для моностальных балок  $\sigma_w^{\text{com}} = R_y^w$ .



1) балки, предварительно напряженные вытяжкой нижнего пояса;  
 2) балки, предварительно напряженные изгибом стенки;  
 3) балки, предварительно напряженные вытяжкой участка стенки;  
 а) распределение остаточных напряжений после изготовления балок;  
 б), в) распределение напряжений в сечениях балок в предельном состоянии соответственно при достижении в сжатой фибре стенки напряжений  $R_y^{w, com}$  и с ограничением напряжений  $[\sigma_w^{com}]$ .

Рисунок 1- Напряженное состояние сечений предварительно напряженных балок

При учете ОН, обусловленных предварительным напряжением ЛТВ, наличием сварочных ОН, высота стенки  $h$  принимается равной эффективной высоте ( $h_w = h_{ef}$ ), а напряжения  $\sigma_w^{com}$  определяются по методике, изложенной в монографии [2] или другой известной методике.

4. Назначают толщину стенки в соответствии с сортаментом листового проката и определяют значения средних касательных напряжений:

$$\frac{\tau_x}{R_y^w} = \frac{Q_x}{h_w \cdot t_w \cdot R_y^w} \leq 0,6. \quad (6)$$

5. При отсутствии поперечных ребер находят местные сминающие напряжения и проверяют условие:

$$\frac{\sigma_{loc}}{R_y^w} = \frac{P_{loc}}{t_w \cdot l_{ef} \cdot R_y^w} \leq \gamma_c, \quad (7)$$

где  $l_{ef}$  – условная длина распределения нагрузки, определяемая в соответствии с указаниями п.5.13 [5];  $P_{loc}$  – расчетное значение нагрузки (силы).

6. Вычисляют коэффициенты компоновки сечения:

$$\alpha_{.f}^{com} = \frac{M/h_w + N}{R_y^{f,com} \cdot A_w} - \frac{n_1}{3} + \frac{n_2 \cdot n_3}{6}, \quad (8)$$

$$\alpha_f = \frac{M/h_w - N}{R_y^f \cdot A_w} - \frac{n_2}{3} + \frac{n_1}{6 \cdot n_3}, \quad (9)$$

где  $A_w$  – площадь стенки;  $N$  – продольное усилие в сечении (знак "+" при сжатии, "-" при растяжении).

7. Определяют площади верхнего и нижнего поясов балки:

$$A_f^{com} = \alpha_{.f}^{com} \cdot A_w, \quad (10)$$

$$A_f = \alpha_f \cdot A_w. \quad (11)$$

8. Определяют параметры предварительного напряжения:  
для верхнего пояса

$$\beta_f^{\text{com}} = 1 - \frac{(1 - n_1) \cdot (4 \cdot \alpha_f + 1) - 2 \cdot \alpha_f \cdot n_3 \cdot (1 - n_2)}{(4 \cdot \alpha_f^{\text{com}} + 1) \cdot (4 \cdot \alpha_f + 1) - 4 \cdot \alpha_f^{\text{com}} \cdot \alpha_f}; \quad (12)$$

для нижнего пояса

$$\beta_f = 1 - \frac{1 - n_2 - [2 \cdot \alpha_f^{\text{com}} \cdot (1 - \beta_f^{\text{com}}) / n_3]}{4 \cdot \alpha_f + 1}; \quad (13)$$

для кромки стенки, прилегающей к верхнему (сжатому) поясу

$$\beta_w^{\text{com}} = \beta_f^{\text{com}} / n_1; \quad (14)$$

для кромки стенки, прилегающей к нижнему (растянутому) поясу

$$\beta_w = \beta_f / n_2. \quad (15)$$

9. Определяют установившиеся напряжения в стенке

$$\sigma_w = [\sigma_w^{\text{com}}] \cdot (\beta_w^{\text{com}} - 1) \leq R_y^w. \quad (16)$$

Если условие (16) не выполняется, необходимо либо уменьшить расчетное сопротивление материала верхнего пояса, либо увеличить расчетное сопротивление материала стенки и повторить расчет. Если условие (16) выполняется, продолжают расчет по пункту 10.

10. Находят требуемые размеры поясов:

$$b_f^{\text{com}} = \sqrt{A_f^{\text{com}} \cdot \frac{E_f}{R_y^{f,\text{com}}}}; \quad (17)$$

$$t_f^{\text{com}} = \frac{A_f^{\text{com}}}{b_f^{\text{com}}}; \quad (18)$$

$$b_f = \sqrt{A_f \cdot \sqrt{\frac{E_f}{R_y}}}; \quad (19)$$

$$t_f = \frac{A_f}{b_f}. \quad (20)$$

11. Подбирают сечения поясов, вычисляют геометрические характеристики сечений.

12. Определяют напряжения в поясах и стенке:

$$\sigma_f^{\text{com}} = \frac{M \cdot y_c}{I_x} + \frac{N}{A} \leq \gamma_c \cdot \beta_f^{\text{com}} \cdot R_y^{f, \text{com}}; \quad (21)$$

$$\sigma_f = \frac{M \cdot y_c}{I_x} - \frac{N}{A} \leq \gamma_c \cdot \beta_f \cdot R_y^f; \quad (22)$$

$$\sigma_w^{\text{com}} = \frac{M \cdot (y_c - t_f^{\text{com}})}{I_x} + \frac{N}{A} \leq \gamma_c \cdot \beta_w^{\text{com}} \cdot [\sigma_w^{\text{com}}]; \quad (23)$$

$$\sigma_w = \frac{M \cdot (y_p - t_f)}{I_x} - \frac{N}{A} \leq \gamma_c \cdot \beta_w \cdot R_y^w, \quad (24)$$

где  $\sigma_f^{\text{com}}$ ,  $\sigma_f$ ,  $\sigma_w^{\text{com}}$ ,  $\sigma_w$  – напряжения от расчетной нагрузки соответственно в сжатом поясе, растянутом поясе, кромке стенки, прилегающей к сжатому и растянутому поясам;  $I_x$ ,  $A$  – момент инерции и площадь сечения;  $y_c$ ,  $y_p$  – расстояния от центра тяжести балки соответственно до сжатой и растянутой граней.

13. Если неравенства (21)–(24) не удовлетворяются, увеличивают размеры поясов и стенки и выполняют расчеты по пунктам 10–12. Расчет считается окончанным, если недонапряжения в поясах или стенке не превышают 5%.

14. Проверяют деформативность балки:

$$f - f_{\text{cur}} \leq [f] \quad (25)$$

где  $f$  – прогиб балки, определяется по любой известной методике (см., например, [2]);  $[f]$  – допускаемый прогиб, определяется в соответствии с требованиями ДСТУ Б В.1.2-3:2006 [9];  $f_{cur}$  – выгиб балки.

Сечение считается оптимально подобранным, если недонапряжения не более 5%, а прогиб меньше предельного не более, чем на 20%.

Подбор сечений изгибаемых элементов с учетом влияния ОНС, возможен по приведенному выше алгоритму «ИЗГИБ» с учетом некоторых дополнений (алгоритм «ИЗГИБ-ОНС»).

1. Производят вычисления по пунктам 1–12 алгоритма «ИЗГИБ».
2. Определяют ОНС сечения по любому алгоритму (например, [2]).
3. Выполняют проверки прочности сечений по формулам:

$$(\sigma_f^{com})_2 = \sigma_f^{com} + \sigma_{H,f}^{com} \leq \gamma_c \cdot \beta_f^{com} \cdot R_y^{f,com}; \quad (26)$$

$$(\sigma_f)_2 = \sigma_f + \sigma_{H,f} \leq \gamma_c \cdot \beta_f \cdot R_y^f; \quad (27)$$

$$(\sigma_w^{com})_2 = \sigma_w^{com} + \sigma_{H,w}^{com} \leq \gamma_c \cdot \beta_w^{com} \cdot [\sigma_w^{com}]; \quad (28)$$

$$(\sigma_w)_2 = \sigma_w + \sigma_{H,w} \leq \gamma_c \cdot \beta_w \cdot R_y^w, \quad (29)$$

где напряжения  $\sigma_f^{com}$ ,  $\sigma_f$ ,  $\sigma_w^{com}$ ,  $\sigma_w$  – определяются по формулам (21)– (24), а напряжения  $\sigma_{H,f}^{com}$ ,  $\sigma_{H,f}$ ,  $\sigma_{H,w}^{com}$ ,  $\sigma_{H,w}$  – по формулам, приведенным в [2] со своими знаками.

Технологические характеристики сварного изделия (высота катета сварного шва, ширина зоны термического влияния при разрезке листов, высота наплавленного валика, ширина зоны термического воздействия) принимаются на этой стадии проектирования по справочным данным.

4. Выполняют расчеты по пунктам 13–14 алгоритма «ИЗГИБ».

### **Выводы**

1. ОНС неизбежно возникает в элементах стальных конструкций в процессе изготовления вследствие применения технологических операций, связанных с локальным разогревом.

2. Разработана инженерная методика определения оптимальных параметров стальных балок двутаврового профиля с учетом влияния ОНС. Значения величин ОН в сечениях балок определяются по известным методикам.

### **Библиографический список**

8. Трофимович В.В. *Оптимальное проектирование металлических конструкций* / В.В. Трофимович, В.А. Пермяков. – К.: Будівельник, 1981. – 136 с.

9. Голоднов А.И. *Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках*. – К.: Сталь, 2008. – 150 с.

10. А.с. 1527393 СССР, МКИ E04 C 3/10. *Способ изготовления предварительно напряженной металлической балки* / А.И. Голоднов, Е.П. Лукьяненко, И.И. Набоков (СССР); *Опубл.* 07.12.89, Бюл. №45. – 2 с.

11. Голоднов А.И. *Принципы компоновки составных двутавровых сечений изгибаемых элементов из сталей различных марок* / А.И. Голоднов, Л.Н. Филатова, И.И. Набоков // *Соврем. проблемы стр-ва: Ежегод. науч.-техн. сб.* / Донецкий ПромстройНИИпроект. – Донецк: ООО «Лебедь», 2001. – С. 234-239.

12. ДБН В.2.3-14:2006. *Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування* / Мінбуд України. – К.: Мінбуд України, 2006. – 359 с.

13. СНиП II-23-81\*. *Стальные конструкции* / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.

14. *Методические рекомендации по применению облегченных предварительно напряженных сварных двутавров для реконструкции промышленных предприятий* / НИИСП Госстроя УССР; *Сост.* И.И. Набоков, А.И. Голоднов, Е.П. Лукьяненко и др. – К.: НИИСП, 1988. – 45 с.

15. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. *Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Прогини і переміщення. Вимоги проектування*. – Введено вперше (із скасуванням в Україні розділу 10 СНиП 2.01.07-85); *Введ.* 01.01.2007. – К.: Мінбуд України, 2006. – 10 с.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. Должиковым П.Н.**