

УДК 624.072.002.2

К определению оптимальных параметров стальных двутавровых балок

¹Фомина И.П., ²Голоднов А.И., д.т.н.

¹ПАО «ХК «Киевгорстрой», Украина

²ООО «Укринсталькон им. В.Н. Шимановского», Украина

Анотація. Розроблено інженерну методіку визначення оптимальних параметрів сталевих балок двутаврового профілю з урахуванням впливу залишкових напружень. Значення величин залишкових напружень у перетинах балок визначаються за відомими методиками.

Аннотация. 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.

Abstract. Engineering methodology for determination of optimal parameters of double-T profile steel beams is worked out taking into account influence of remaining tensions. The values of sizes of residual stress in the sections of beams are determined on the known methodologies.

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

Введение. Постановка проблемы. Современное производство сварных конструкций характеризуется широкой номенклатурой изделий. На основе научных разработок отечественных и зарубежных исследователей разработаны весьма экономичные строительные конструкции, которые требуют применения новых подходов к проектированию и технологий изготовления. Вместе с тем технологические процессы изготовления конструкций неизбежно связаны с изменением их остаточного напряженного состояния (ОНС), т. е. напряженного состояния до приложения внешних нагрузок, поскольку основными операциями технологических процессов производства двутавровых балок остаются прокатка, термическая резка листового проката и сварка. Эти операции сопряжены с нагревом стали до высокой температуры и являются причиной возникновения фазовых и термических напряжений, которые существенно влияют на дальнейшую работу конструкций под нагрузкой.

Анализ последних достижений 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 [2–4].

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 и 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 [2–4].

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 ОНС.

Основная часть. 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].

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].

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 моностальной балки из стали, соответствующей R_{opt}), оптимальную и минимальные высоты h_{opt} и h_{min} без учета влияния ОН и остаточного выгиба [3 – 5].

При проектировании предварительно напряженных балок оптимальную высоту сечения определяют по формуле [2]:

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

В этой формуле:

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

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

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

где $0,3 \cdot R_y^w \leq \sigma_w^{com} \leq R_y^w$ – допускаемые напряжения в стенке (принимать ближе к нижнему пределу); $R_y^{f,com}, R_y^f, R_y^w$ – 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 ДБН В.2.6-163:2010 [6]; M – максимальный изгибающий момент в сечениях балки; γ_c – коэффициент условий работы в соответствии с ДБН В.2.6-163:2010 [6].

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

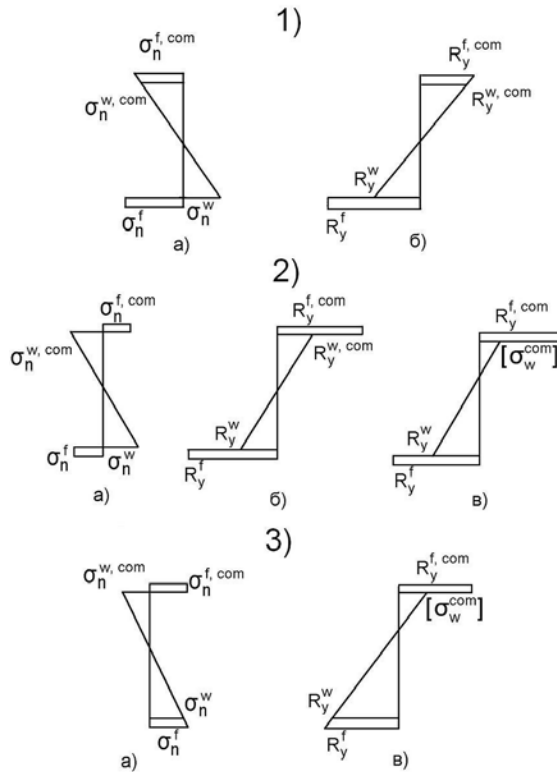


Рис. 1. Напряженное состояние сечений предварительно напряженных балок:
 1) балки, предварительно напряженные вытяжкой нижнего пояса;
 2) балки, предварительно напряженные изгибом стенки;
 3) балки, предварительно напряженные вытяжкой участка стенки;
 а) распределение остаточных напряжений после изготовления 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 $[\sigma_w^{com}]$.

3. Находят минимальную толщину стенки:

$$t_w^{\min} = \frac{h_w \cdot \sqrt{\frac{\sigma_w^{com}}{E_w}}}{[\lambda_w^-]}, \quad (5)$$

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

При учете ОН, обусловленных предварительным напряжением ЛТВ, наличием сварочных ОН, высота стенки h принимается равной эффективной высоте ($h_w = h_{\text{ef}}$), а напряжения σ_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:

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

где l_{ef} – условная длина распределения нагрузки, определяемая в соответствии с указаниями ДБН В.2.6-163:2010 [6]; P_{loc} – расчетное значение нагрузки (силы).

6. Вычисляют коэффициенты компоновки сечения:

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

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

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

7. Определяют площади верхнего и нижнего поясов балки:

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

$$A_{\text{f}} = \alpha_{\text{f}} \cdot A_w. \quad (11)$$

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:

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

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

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

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

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 σ_f^{com} , σ_f , σ_w^{com} , σ_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 окончательным, 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:

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

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

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

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

где напряжения σ_f^{com} , σ_f , σ_w^{com} , σ_w – определяются по формулам (21)...(24), а напряжения $\sigma_{H,f}^{\text{com}}$, $\sigma_{H,f}$, $\sigma_{H,w}^{\text{com}}$, $\sigma_{H,w}$ – 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».

Таким образом, использование приведенных выше алгоритмов подбора сечений изгибаемых элементов позволит оценить ОНС изгибаемых элементов и его влияние на несущую способность и деформативность конструкций.

Выводы

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

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

Литература

- [1] Трофимович В. В. Оптимальное проектирование металлических конструкций / В. В. Трофимович, В. А. Пермяков. – К. : Будівельник, 1981. – 136 с.
- [2] Голоднов А. И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках / А. И. Голоднов. – К. : Сталь, 2008. – 150 с.

- [3] А.с. 1527393 СССР, МКИ Е04 С 3/10. Способ изготовления предварительно напряженной металлической балки / А. И. Голоднов, Е. П. Лукьяненко, И. И. Набоков (СССР); – Оpubл. 07.12.89, Бюл. №45. – 2 с.
- [4] Голоднов А. И. Принципы компоновки составных двутавровых сечений изгибаемых элементов из сталей различных марок / А. И. Голоднов, Л. Н. Филатова, И. И. Набоков // Современ. проблемы стр-ва : Ежегод. науч.-техн. сб. / Донецкий ПромстройНИИпроект. – Донецк : ООО «Лебедь», 2001. – С. 234–239.
- [5] Мости та труби. Правила проектування : ДБН В.2.3-14:2006. – Офіц. вид. – К. : Мінбуд України, 2006. – 359 с. – (Споруди транспорту. Державні будівельні норми).
- [6] Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу : ДБН В.2.6-163:2010. – Офіц. вид. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 202 с. – (Конструкції будівель і споруд. Державні будівельні норми України).
- [7] 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.
- [8] Металлические конструкции. Общий курс : учеб. Для вузов / [Г. С. Веденников, Е. И. Беленя, В. С. Игнатьева, и др.] ; под ред. Г. С. Веденикова. – 7 изд., перераб. – М. : Стройиздат, 1998. – 760 с.
- [9] Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Прогини і переміщення. Вимоги проектування : ДСТУ Б В.1.2-3:2006. – Офіц. Вид. – К. : Мінбуд України, 2006. – 10 с. – (Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Національний стандарт України).

Надійшла до редколегії 10.08.2014 р.