

*Балашова О.С.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

К РАСЧЕТУ СЖАТЫХ СВАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РАЗЛИЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Розроблена інженерна методика визначення несучої здатності стислих зварних елементів двутаврового та коробчастого профілів з урахуванням впливу залишкових напружень, яка базується на рекомендаціях чинних норм. Значення залишкових напружень в перетинах елементів визначаються за відомими методиками.

Ключові слова: *залишкові напруження, стиснуті сталеві елементи, несуча здатність.*

Разработана инженерная методика определения несущей способности сжатых сварных элементов двутаврового и коробчатого профилей с учетом влияния остаточных напряжений, которая базируется на рекомендациях действующих норм. Значения остаточных напряжений в сечениях элементов определяются по известным методикам.

Ключевые слова: *остаточные напряжения, сжатые стальные элементы, несущая способность.*

Как известно, технологические процессы изготовления стальных конструкций сопровождаются локальным термическим разогревом (сварка, резание с применением высокотемпературного нагревания, нагрев и т.п.) и вызывают появление остаточных деформаций (ОД) и напряжений (ОН). Эти напряжения не связаны с действием внешних сил, являются внутренними напряжениями первого рода, уравновешиваемыми в объеме элемента и вызывающими его деформацию [1].

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 [1-7].

Индустриальные способы предварительного напряжения (на стадии изготовления) можно разделить на три группы [1]:

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

К беззатяжным относится метод предварительного напряжения вытяжкой поясов способом упреждающего разогрева. Предварительное напряжение осуществляется путем приварки к стенке двух поясов, которые перед сваркой поясных швов разогреваются газовыми горелками до заданной температуры. После сварки и остывания в поясах возникают остаточные растягивающие напряжения, а в стенке – уравнивающие их сжимающие [4-7].

Цель работы – усовершенствование методики расчета сжатых сварных элементов с учетом влияния остаточного напряженного состояния (ОНС).

Постановка задачи. Основной задачей настоящей работы является разработка инженерной, ориентированной на действующие нормы, методики расчета сжатых сварных элементов двутаврового и коробчатого профилей с учетом наличия ОН и сравнение результатов расчета с данными экспериментальных исследований.

Изложение материала и его результаты. Обычно учет влияния ОНС на несущую способность сжатых элементов производится путем увеличения или уменьшения коэффициента продольного изгиба $\varphi(\varphi_e)$ [1, 5-8]. Такой способ требует применения зависимостей для определения степени влияния ОНС на величину коэффициента $\varphi(\varphi_e)$, основанных, как правило, на данных экспериментальных исследований.

ОНС (эпюры ОД и ОН) принимается идеализированным. Элемент двутаврового или коробчатого сечения условно расчленяется на составляющие полосы (рисунки 1–3) [1].

ОНС определяется как в полосе, сваренной встык (пояса двутавра при сварке поясных швов), так и в полосе с наплавленными валиками на кромках (стенка при сварке поясных швов и пояса при наплавке или термических воздействиях по кромкам). Элемент коробчатого сечения условно расчленяется на составляющие полосы с наплавленными валиками на кромках или наплавленными односторонними швами. Распределение деформаций после остывания принято по рисунку 7.8 [7].

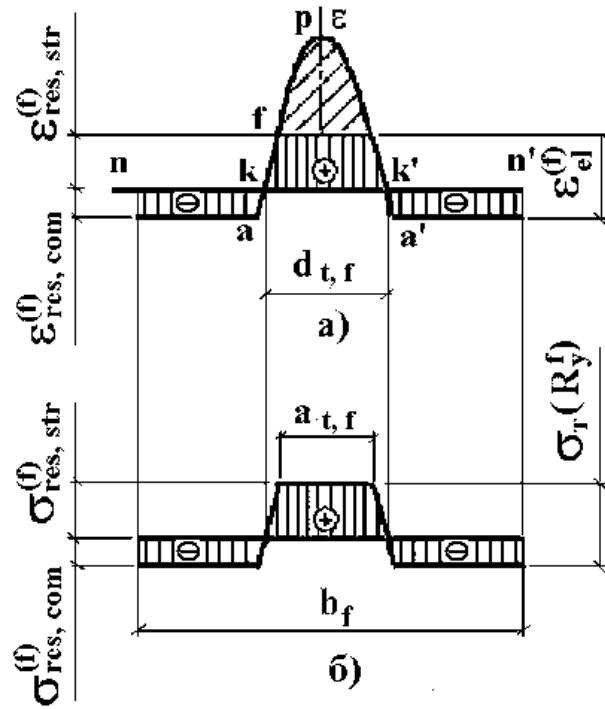


Рисунок 1 – Идеализированная схема распределения ОД (а) и ОН (б) в поясах двутаврового сечения при сварке поясных швов

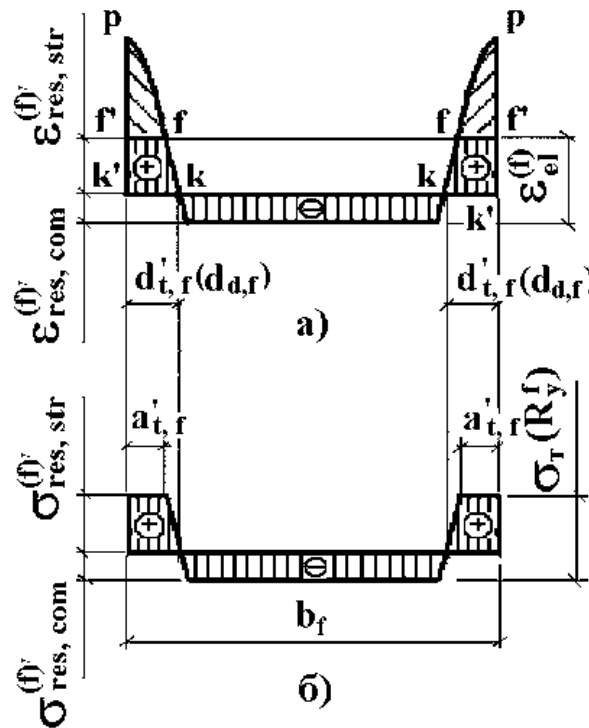


Рисунок 2 – Идеализированная схема распределения ОД (а) и ОН (б) в поясах двутаврового сечения при наплавке валиков или термических воздействиях на кромках

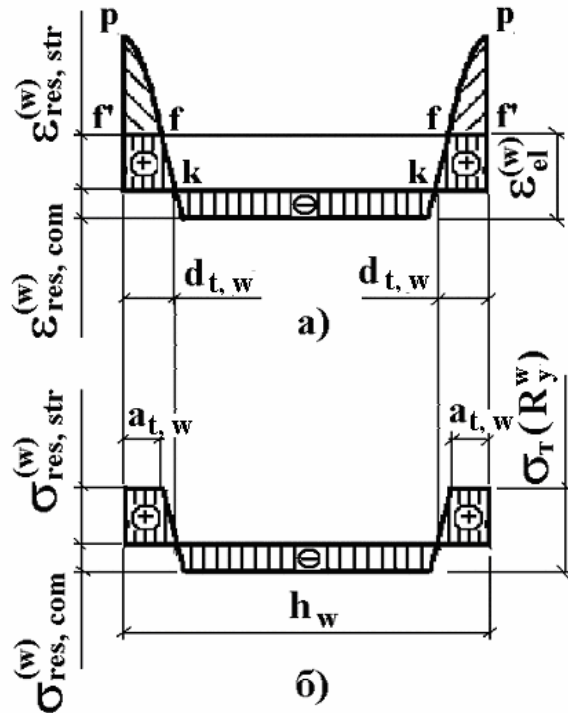


Рисунок 3 – Идеализированная схема распределения ОД (а) и ОН (б) в стенке двутаврового при сварке поясных швов и в элементах коробчатого сечений

На эпюрах ОД и ОН (рисунки 1-3): $\varepsilon_{res, str}^{(f)}$, $\sigma_{res, str}^{(f)}$ – соответственно остаточные растягивающие деформации (ОРД) и остаточные растягивающие напряжения (ОРН), возникающие в поясах при сварке поясных швов и элементах коробчатого сечения; $\varepsilon_{res, com}^{(f)}$, $\sigma_{res, com}^{(f)}$ – соответственно остаточные сжимающие деформации (ОСД) и остаточные сжимающие напряжения (ОСН), возникающие в поясах при сварке поясных швов и элементах коробчатого сечения; $\varepsilon_{res, str}^{(f)'}$, $\sigma_{res, str}^{(f)'}$ – соответственно ОРД и ОРН, возникающие в поясах и элементах коробчатого сечения при термических воздействиях на кромках; $\varepsilon_{res, com}^{(f)'}$, $\sigma_{res, com}^{(f)'}$ – соответственно ОСД и ОСН, возникающие в поясах и элементах коробчатого сечения при термических воздействиях на кромках; $\varepsilon_{res, str}^{(w)}$, $\sigma_{res, str}^{(w)}$ – соответственно ОРД и ОРН, возникающие в стенке и элементах коробчатого сечения при сварке поясных швов; $\varepsilon_{res, com}^{(w)}$, $\sigma_{res, com}^{(w)}$ – соответственно ОСД и ОСН, возникающие в стенке и элементах коробчатого сечения при сварке поясных швов. Единица измерения напряжений – МПа. Знак «плюс» соответствует растягивающим напряжениям, знак «минус» – сжимающим.

Методики определения ОНС в элементах при сварке поясных швов и после регулирования приведены в работах [1, 5-7].

При вытяжке поясов способом упреждающего разогрева [3] в двутавровом сечении возникает ОНС, идеализированный вид которого приведен на рисунке 4.

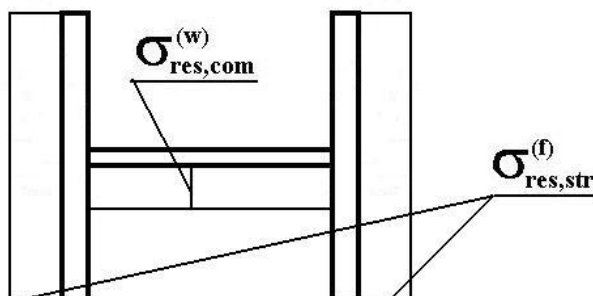


Рисунок 4 – Идеализированная схема распределения ОН в предварительно напряженном вытяжкой поясов способом упреждающего разогрева сварном двутавровом сечении

Расчет несущей способности может быть выполнен с помощью известных методик, учитывающих свойства материала, конструкций и особенности ОНС [1, 8]. В то же время остаются актуальными инженерные методы расчета, ориентированные на использование рекомендуемых нормами методик с учетом поправки на влияние ОНС.

Несущая способность сжатых элементов с учетом влияния ОНС путем увеличения или уменьшения расчетного сопротивления стали проверяется по формуле [8]:

$$\sigma_f = \frac{N}{\varphi(\varphi_e) \cdot A} \leq \gamma_c \cdot \beta_{f,rs} \cdot R_y^f; \quad (1)$$

где σ_f – напряжения на кромках двутавровых и коробчатых 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. Численное значение коэффициента $\beta_{f,rs}$ может быть определено по формуле:

$$\beta_{f,rs} = \sqrt{1 + \frac{\sigma_{str(com)}^{(f')} (\sigma_{res,str}^{(f)})}{R_y^f}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{str(com)}^{(f')}$ – растягивающие (сжимающие) напряжения на кромках поясов (ОРН принимаются со знаком «плюс», ОСН – со знаком «минус»); d ($d'_{t,f}$, $d_{d,f}$) – для ОРН на кромках поясов принимаются в

соответствии с указаниями подраздела 2.3 [1]; $\sigma_{res, str}^{(f)}$ – растягивающие напряжения в поясах при предварительном напряжении вытяжкой поясов способом упреждающего разогрева [3].

Для проверки положений разработанного метода расчета ОНС и его влияния на несущую способность сжатых элементов использованы данные экспериментальных исследований [4]. Были использованы данные о трех образцах серии СЛ, СНУ, СТ с одинаковыми параметрами сечения и примененными материалами, но различной технологией изготовления и различным ОНС. Образец СНУ был изготовлен предварительно напряженным вытяжкой поясов способом упреждающего разогрева [2, 3]. Образец СТ был изготовлен, как обычный сварной СЛ, но с последующим, после изготовления, регулированием ОНС путем разогрева всех кромок до температуры 850...950°C и остыванием на воздухе. Ширина зоны разогрева составляла 25...30 мм.

Параметры сечения экспериментальных образцов: пояса – 300x10 мм, стенка – 300x14 мм, катет шва $k_f = 8$ мм, глубина проплавления основного металла $\delta = 2$ мм. Расчетное сопротивление стали поясов $R_y^f = 344$ МПа, стенки $R_y^w = 577$ МПа. Гибкость образцов составляла $\lambda = 42$, коэффициент продольного изгиба – $\varphi = 0,86$.

Все образцы были испытаны на сжатие с эксцентриситетом 2,5 мм. Несущая способность образцов по результатам эксперимента составила: образец серии СЛ - 3000 кН, образец серии СНУ – 3800 кН, а образец серии СТ – 4100 кН.

Определение ОНС выполнено по методике, изложенной в монографии [1]. Значения коэффициентов $\beta_{f,rs}$ и несущей способности N для экспериментальных образцов вычислим по формулам (1) и (2):

– для обычного сварного образца серии СЛ:

$$\beta_{f,rs} = 0,87; \quad N_{СЛ} = 2630 \text{ кН};$$

– для предварительно напряженного образца серии СНУ:

$$\beta_{f,rs} = 1,16; \quad N_{СНУ} = 3500 \text{ кН};$$

– для предварительно напряженного образца серии СТ:

$$\beta_{f,rs} = 1,3; \quad N_{СТ} = 3920 \text{ кН}.$$

Сравнение результатов численного определения несущей способности с экспериментальными данными (таблица 1) показывает, что расхождения в этих величинах составляют: для образца СЛ – 12,3%; для образца СНУ – 7,9%; для образца СТ – 4,4%.

Таблица 1 – Несущая способность образцов

Серия исследуемых образцов	Несущая способность образцов – N, кН	
	Экспериментальные данные	Численные результаты
Образец серии СЛ	3000	2630
Образец серии СНУ	3800	3500
Образец серии СТ	4100	3920

Такое расхождение приемлемо для инженерных расчетов, поэтому методика учета влияния ОНС может быть рекомендована к применению.

Выводы

На основе проведенных исследований можно сделать выводы.

1. Остаточные напряжения неизбежно возникают в элементах стальных конструкций в процессе изготовления вследствие применения технологических операций, связанных с локальным разогревом.

2. Обычно влияние ОНС на несущую способность сжатых элементов производится путем увеличения или уменьшения коэффициента продольного изгиба $\varphi(\varphi_e)$. Такой способ требует применения формул для определения степени влияния ОНС на величину коэффициента $\varphi(\varphi_e)$, основанных, как правило, на данных экспериментальных исследований.

3. Предложена инженерная методика учета влияния ОНС путем увеличения или уменьшения расчетного сопротивления стали. Методика позволяет путем несложных расчетов 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. – К.: Изд-во «Сталь», 2008. – 150 с.

2. А.с. 729327 СССР, МКИ E04 C 21/12. Способ предварительного напряжения металлических колонн / И.И. Набоков, Е.П. Лукьяненко, В.А. Нелидов, В.А. Муляев (СССР); Оpubл. 25.04.80, Бюл. № 14. – 2с.

3. 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.

4. Голоднов А.И., Балашова О.С. *Методика и результаты экспериментального определения остаточного напряженного состояния в сечениях сварных двутавровых элементов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць / Національний університет водного господарства та природокористування. – Рівне: НУВГП, 2009. – Вип. 19. – С. 116–123.*

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

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

7. Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А. *Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций: Учеб. пособие. – М.: Высш. школа, 1982. – 272 с.*

8. Голоднов А.И., Балашова О.С. *Расчет стержневых элементов при сжатии с эксцентриситетом в двух плоскостях // Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. – К.: Вид-во «Сталь», 2008. – Вип. 4. – С. 232–245.*

9. Голоднов А.И., Балашова О.С. *К вопросу учета влияния остаточных напряжений при расчетах сжатых стальных двутавровых стержней // Баштові споруди: матеріали, конструкції, технології: Вісник ДонНАБА/ Зб. наук. праць Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – Макіївка: ДонНАБА, 2009. – Вип. 4(78). – С. 221–225.*

Рекомендовано к печати д.т.н., проф.. Дрозд Г.Я.