

ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ОСЕВОМУ СЖАТИЮ С ИЗГИБОМ

Балашова О.С.

Донбасский государственный технический университет, Алчевск

Как известно [1, 2 и др.], при изготовлении металлических конструкций неизбежно появление остаточного напряженно-деформированного состояния (ОНС), поразному влияющего на работу сжатых элементов под нагрузкой. Так, наличие остаточных напряжений растяжения, обусловленных сваркой поясных швов, вызывает появление уравнивающих сжимающих напряжений в остальной части сечения, в т.ч. и на кромках поясов. Появление остаточных напряжений сжатия на кромках приводит к снижению величин критических сил.

Изменение характера распределения остаточных напряжений в сечениях сварных двутавров и исправление структурных изменений, вызванных технологическими процессами, возможно двумя способами. Во-первых, остаточные напряжения могут быть сведены к минимуму после отжига изделия при температуре около 600°C как минимум в течение 4 часов с последующим остыванием образцов вместе с печью. Этот способ весьма энергоемок (получаемый результат несоизмерим с затратами). Во-вторых, остаточные напряжения могут быть оптимизированы путем предварительного напряжения локальными термическими воздействиями (ЛТВ), т.е. разогревом кромок поясов до температуры на $30...50^{\circ}\text{C}$ выше температуры A_{c3} или наплавкой холостых валиков по кромкам поясов. Появление зон остаточных растягивающих напряжений, изменение структуры и повышение механических характеристик на кромках поясов затрудняют переход кромок в пластическое состояние и приводят к повышению несущей способности сжатых стержней.

Требования к несущей способности, деформативности, долговечности и надежности элементов и конструкций при одновременном уменьшении металлоемкости возрастают и вызывают необходимость анализа их ОНС с учетом технологии изготовления и условий эксплуатации. Несмотря на успехи в развитии современных методов строительной механики, теории упругости и пластичности, механики разрушения и численных методов с использованием вычислительной техники, число задач, имеющих точное решение, ограничено и не удовлетворяет запросы инженерной практики.

Работа является одним из этапов исследований, выполняющихся в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины и в Донбасском государственном техническом университете в соответствии с ГНТП 5.4. «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии, оборудование и материалы для сварки и родственных процессов».

Анализ последних достижений и публикаций свидетельствует о необходимости проведения исследований, направленных на решение важной народно-хозяйственной задачи – повышения несущей способности строительных конструкций строящихся и эксплуатируемых зданий и сооружений. Решение этой задачи возможно различными методами, в том числе и регулированием ОНС элементов [1, 2, 3 и др.]. Такие исследования в больших объемах проводились для сжатых с малыми эксцентриситетами элементов двутаврового сечения при деформировании в плоскости меньшей жесткости. Экспериментально была доказана возможность повышения несущей способности сжатых элементов с оптимально расположенными полями остаточных напряжений до 40 % по сравнению с элементами без предварительного напряжения. Для внецентрично сжатых элементов двутаврового сечения, деформирующихся в плоскости большей жесткости, такие исследования проводились в ограниченных объемах. Развитию методов расчета стальных элементов, подверженных осевому сжатию с изгибом, с учетом влияния ОНС посвящена настоящая статья.

Целью настоящих исследований является разработка метода расчета стальных элементов, подверженных осевому сжатию с изгибом, с учетом влияния остаточных напряжений.

Для описания деформирования стальных элементов, подверженных осевому сжатию с изгибом, с учетом влияния ОНС принимаются известные предпосылки [1, 2, 3, 4 и др.]. Кроме этого, принята предпосылка о возможной потере устойчивости стержня с остаточными сжимающими напряжениями на кромках полок при достижении деформациями кромок величин, при которых происходит потеря устойчивости (достижение максимума на кривой состояния) колонны без остаточных напряжений.

Условно-приближенное решение базируется на понятии кривизны «второго расчетного сечения» (по А.В. Геммерлингу [4]). Деформированное состояние «второго расчетного сечения» в направлении осей X или Y характеризуется соответственно кривизной κ_x или κ_y .

С учетом принятой предпосылки о синусоидальной форме изогнутой оси элемента не представляет затруднений определение выгиба и величины критической нагрузки. Выгиб элемента в направлении осей X или Y (соответственно f_x или f_y) можно определить по формуле (по аналогии с [3]):

$$f = \frac{L^2 \cdot \kappa}{\pi^2}, \quad (1)$$

где f – выгиб элемента в направлении осей X или Y (соответственно f_x или f_y);

L, κ – приведенная длина и кривизна элемента соответственно в направлении осей X (L_x, κ_x) или Y (L_y, κ_y).

Общий прогиб элемента определяется по формуле:

$$f_{red} = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}. \quad (2)$$

Уравнение изогнутой оси может быть принято в виде полуволны синусоиды или записано в форме метода начальных параметров (аппроксимация кубическим сплайном). Влияние закрепления концов учитывается условиями на концах [3 и др.].

Если изогнутая ось записана в форме метода начальных параметров (аппроксимация кубическим сплайном), прогибы точек оси колонны определяются по формулам [3]:

$$f_i = f_1 + \varphi_1 \cdot L \cdot \frac{i-1}{n} + \frac{L^2}{6 \cdot n^2} [(3 \cdot i - 4) \cdot \kappa_1 + 6 \cdot \sum_{j=2}^{i-1} (i-j) \cdot \kappa_j + \kappa_i]; \quad (3)$$

$$\varphi_i = \varphi_1 + \frac{L}{2 \cdot n} \cdot (\kappa_1 + 2 \cdot \sum_{j=2}^{i-1} \kappa_j + \kappa_i), \quad (4)$$

где f_1, f_i – прогибы соответственно первой и i -ой точки длины колонны;

φ_1, φ_i – угол поворота первого и i -го сечений по длине колонны;

n – количество участков, на которые разбита длина колонны L ;

κ_1, κ_i – кривизны соответственно первого и i -го сечения.

С помощью уравнения (4) можно учесть влияние закрепления концов колонны.

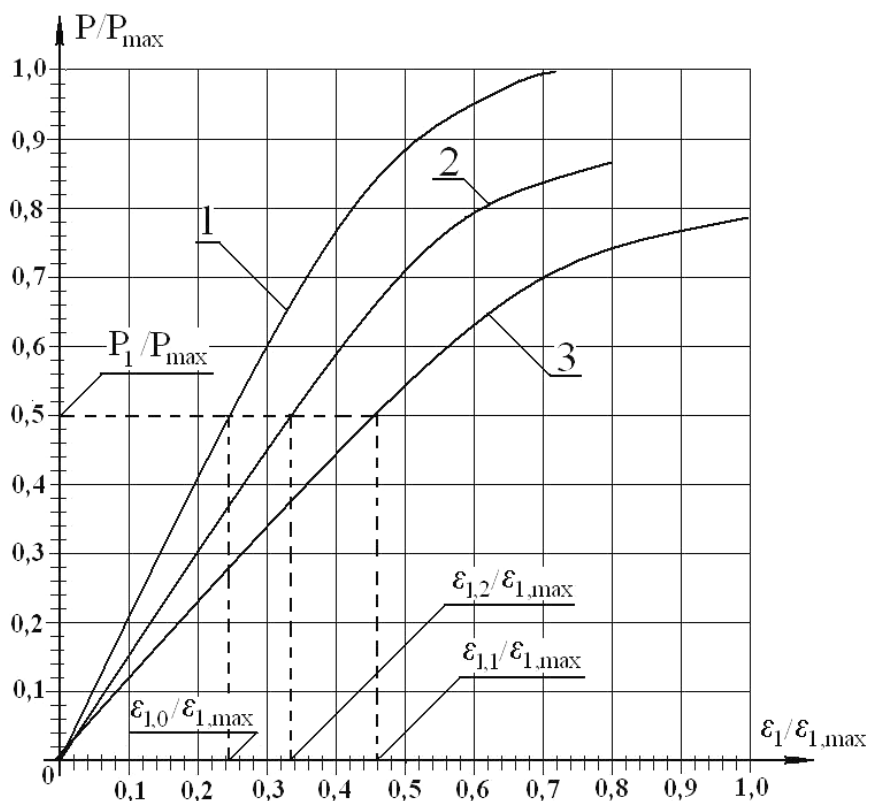
Решение задачи в явном виде невозможно в силу большего числа неизвестных, чем число уравнений равновесия. В связи с этим последовательно решаются три задачи:

- определение НДС и несущей способности элемента при отсутствии эксцентриситетов приложения нагрузки (условно абсолютно жесткий центрально-сжатый элемент) – алгоритм ЦЕНТР-0;
- определение НДС и несущей способности элемента при сжатии с изгибом в плоскости меньшей жесткости (эксцентриситет приложения нагрузки в плоскости большей жесткости равен нулю) – алгоритм ЦЕНТР-Х;
- определение НДС и несущей способности элемента при сжатии с изгибом в плоскости большей жесткости (эксцентриситет приложения нагрузки в плоскости меньшей жесткости равен нулю) – алгоритм ЦЕНТР-У.

Полученные в ходе такого расчета данные позволяют получить зависимости «нагрузка–прогиб», «нагрузка–деформация на сжатой фибре» и «нагрузка–кривизна» для трех идеализированных нагружений сжатого элемента. Аналитические выражения для таких зависимостей можно получить с использованием метода наименьших квадратов. Наличие зависимостей позволит выбрать «активную» плоскость деформирования, т.е. плоскость минимальной или максимальной жесткости, в которой наиболее вероятно будет происходить основное деформирование элемента при сжатии с изгибом.

Общий алгоритм решения задачи определения устойчивости элемента, подверженного сжатию с изгибом с учетом наличия ОНС, может быть записан в таком виде.

1. Задаются: геометрическими параметрами двутаврового или коробчатого сечения и элемента в целом, технологическими параметрами, прочностными и деформационными характеристиками материалов элементов (поясов и стенки), условиями на концах и начальными эксцентриситетами приложения нагрузки.
2. Вычисляют ОНС в сечениях элементов двутаврового или коробчатого сечений по известным методикам, например, [3].
3. Выполняют расчет по алгоритмам ЦЕНТР-0, ЦЕНТР-Х и ЦЕНТР-У. По результатам расчета строят графики зависимостей «нагрузка–прогиб» и «нагрузка–деформация на сжатой фибре» для трех идеализированных схем нагружения (рис. 1).
4. Выбирают «активную» плоскость деформирования (кривая 3 на рис. 1) и задаются относительной деформацией на сжатой фибре $\varepsilon_{1,1}$. Используя зависимость «нагрузка–деформация на сжатой фибре» для «активной» плоскости деформирования, получают величину нагрузки P_1 , а из других кривых для данной нагрузки получают соответствующие величины деформаций $\varepsilon_{1,2}$ и $\varepsilon_{1,0}$ на сжатой фибре (рис. 1), а по этим деформациям – величины кривизн и прогибов.
5. Определяют величины деформаций по граням сечения и, используя уравнения (1), (2) и уравнение равновесия сечения $\sum X = 0$, находят усилие в сечении. Используя второе уравнение равновесия $\sum M_0 = 0$, проверяют равновесие сечения. Если условия равновесия не удовлетворяются, уточняют соответствующие параметры НДС до тех пор, пока уравнения равновесия не выполняются с заданной точностью.
6. Принимают новое значение деформаций на сжатой фибре $\varepsilon_{1,1}$ и продолжают расчет по пунктам 4, 5. Расчет считается окончательным, если при последующем значении $\varepsilon_{1,1}$ величина нагрузки P_1 будет меньше, чем при предыдущем значении.



- 1 – кривая, полученная при расчетах по алгоритму ЦЕНТР-0;
 2 – «пассивная» кривая, полученная при расчетах по алгоритму ЦЕНТР-X (ЦЕНТР-Y);
 3 – «активная» кривая полученная при расчетах по алгоритму ЦЕНТР-Y (ЦЕНТР-X)

Рис. 1. Зависимости «нагрузка–деформация на сжатой фибре»

Приведенный алгоритм легко реализуется на ЭВМ и позволяет расчетным путем получить напряженно-деформированное состояние стальных элементов, подверженных осевому сжатию с изгибом, с учетом неупругих деформаций стали и ОНС.

Предложенная методика расчета позволяет получить зависимости «нагрузка–прогиб», которые могут быть использованы для экспериментальной проверки разрабатываемого аналитического аппарата, а также для изучения характера деформирования элементов при изгибе с эксцентриситетами в двух плоскостях. Расчет по предложенной методике предпочтительнее, чем по рекомендованной действующими нормами, поскольку позволяет проследить деформирование на всех этапах нагружения.

Выводы

По результатам сделаны следующие выводы.

1. Расчетные значения продольной силы N и изгибающего момента M при расчетах по методикам норм принимаются из расчета системы по недеформированной схеме в предположении упругих деформаций стали. Переход к деформированной схеме выполняется путем введения коэффициентов продольного изгиба. Влияние ОН при расчетах на устойчивость сжатых элементов в должной мере не учитывается.
2. В настоящее время существуют методы расчета двутавровых и тавровых (из спаренных уголков) элементов, подверженных осевому сжатию с изгибом в плоскости большей или меньшей жесткости. Методы расчета элементов двутаврового и коробчатого сечения при

изгибе с эксцентриситетами в двух плоскостях по деформированной схеме с учетом неупругой работы материала и наличия ОН отсутствуют. Учитывая изложенное в п. 1.8 СНиП II-23-83* [5], расчет на устойчивость необходимо выполнять по деформированной схеме с учетом возможного развития пластических деформаций. Наличие ОН и их влияние на устойчивость может быть учтено путем увеличения или уменьшения коэффициентов φ или φ_e по аналогии с [3, 6 и др.].

3. Разработана методика расчета элементов двутаврового и коробчатого профилей при сжатии с изгибом в двух плоскостях и с учетом влияния ОН. Методика базируется на предпосылках и допущениях, традиционно используемых при решении такого рода задач, и позволяет учесть физическую и геометрическую нелинейность материала и конструкции. Расчет по предложенной методике предпочтительнее, чем по рекомендованной действующими нормами, поскольку позволяет проследить деформирование на всех этапах нагружения с учетом развития неупругих деформаций.

Литература

1. Голоднов А.И. О необходимости учета остаточных напряжений при проектировании металлических конструкций // Метал. конструкции: взгляд в прошлое и будущее: Сб. докл. VIII Украинской науч.-техн. конф. – Ч. 1. – К.: Изд-во «Сталь», 2004. – С. 314-323.
2. Голоднов А.И. Улучшение свойств стальных конструкций за счет предварительного напряжения // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2007. – № 1. – С. 27–32.
3. Голоднов А.И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках. – К.: Сталь, 2008. – 150 с.
4. Геммерлинг А.В. Несущая способность стержневых стальных конструкций. – М.: Госстройиздат, 1958. – 207 с.
5. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции // Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
6. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування // Мінбуд України. – К.: Мінбуд України, 2006. – 359 с.