

УСТОЙЧИВОСТЬ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ, ПОДВЕРЖЕННЫХ ОСЕВОМУ СЖАТИЮ С ИЗГИБОМ

STABILITY OF STEEL ELEMENTS OF OPEN PROFILE, SUBJECT TO AXIAL COMPRESSION WITH BEND

Д.т.н., проф. Голоднов А.И., инженер Иванова И.А. (ООО «Укринсталъкон им. В.Н.Шимановского»), инженер Балашова О.С. (Донбасский государственный технический университет)

Dr. Professor Golodnov A.I., eng. Ivanova I.A. (LTD V. Shimanovsky Ukrsteelconstruction, Kyiv) , eng. Balashova O.S. (Donbass State Technical University)

Аннотация. Разработана упрощенная методика оценки устойчивости стальных элементов открытого профиля, подверженных осевому сжатию с изгибом в одной или двух плоскостях. Учет неупругой работы стали осуществляется путем введения дополнительных коэффициентов условий работы.

Ключевые слова: стальные конструкции открытого профиля, осевое сжатие с изгибом, неупругая работа стали, устойчивость.

Анотація. Розроблено спрощену методику оцінки стійкості сталевих елементів відкритого профілю, які піддано осьовому стиску з вигином в одній або двох площинах. Врахування непружної роботи сталі здійснюється шляхом введення додаткових коефіцієнтів умов роботи.

Ключові слова: сталеві конструкції відкритого профілю, осьовий стиск з вигином, непружна робота сталі, стійкість.

Annotation. The simplified methodology of estimation of stability of steel elements of open profile, subject to the axial compression with a bend in one or two planes, is worked out. The account of unresilient work of steel comes true by introduction of additional coefficients of terms of work.

Keywords: steel constructions of open profile, axial compression with a bend, unresilient work became, stability.

Введение. Постановка проблемы. Несущая способность стальных конструкций при действии статических нагрузок определяется

прочностью или устойчивостью. В первом случае это отвечает достижению такого состояния, при котором увеличение внешней нагрузки невозможно из-за того, что элементы конструкции имеют хотя бы в одном сечении напряжения, равные предельным (предел прочности для хрупких материалов или предел текучести для пластичных). В этом состоянии происходит либо разрушение конструкции, либо нарастание ее деформаций. Во втором случае это отвечает потере устойчивости, что сопровождается сильным развитием деформаций.

Для конструкций, работающих при однократном нагружении (нагрузка монотонно увеличивается до исчерпания несущей способности), учет развития пластических деформаций актуален и позволяет учесть специфику деформирования сжатых элементов из упругопластического материала.

Для конструкций, работающих при циклических нагрузках, развитие пластических деформаций может привести к появлению и последующему возрастанию дополнительных (остаточных) прогибов после каждого цикла нагружения, которые при дальнейшей эксплуатации могут привести к преждевременному отказу конструкций. Ограничение (устранение) остаточных прогибов может быть достигнуто путем принятия для расчетов подобных конструкций такого подхода, когда величина коэффициента продольного изгиба может быть принята равной φ_{el} , а величина коэффициента, учитывающего развитие пластических деформаций, принимается равной $\gamma_{pl} = 1$ [1].

Цель настоящих исследований – разработка упрощенной методики оценки устойчивости стальных элементов открытого профиля при осевом сжатии с изгибом.

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

Расчет на устойчивость внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых элементов постоянного сечения в плоскости действия момента, совпадающей с плоскостью симметрии, выполняется в соответствии с пунктом 1.6.2.2 по формуле [2]:

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

В этой формуле коэффициент φ_e для сплошностенчатых элементов определяется по таблице К.3 приложения К [2] в зависимости от величины условной гибкости $\bar{\lambda}$ и приведенного относительного эксцентриситета m_{ef}

Анализ рекомендуемых нормативными документами [2, 3] методик позволил сделать следующие выводы.

1. Расчетные значения продольной силы N и изгибающего момента M принимаются для одного и того же сочетания нагрузок из расчета системы по недеформированной схеме в предположении упругих деформаций стали. Подобное предположение не отвечает фактическим условиям эксплуатации конструкций средних гибкостей ($60 \leq \lambda \leq 120$) как в части недеформирования при нагружении, так и упругой работы материала.

2. Учитывая изложенное в п. 1.1.3.8 ДБН В.2.6-163:2010 [2], расчет на устойчивость необходимо выполнять по деформированной схеме с учетом возможного развития пластических деформаций. Развитие пластических деформаций при циклическом нагружении и их влияние на устойчивость может быть учтено путем введения коэффициента продольного изгиба φ_{el} [1]. Это отвечает требованиям пункта 1.1.3.7 [1]. Для элементов, подверженных однократному нагружению, влияние развития пластических деформаций может быть учтено введением дополнительного коэффициента $\gamma_{pl} \geq 1$

3. В настоящее время разработаны методы расчета элементов двутаврового сечения с учетом влияния неупругих свойств стали и ОНС при осевом сжатии с изгибом в плоскости большей или меньшей жесткости [3 и др.]. Методы расчета элементов при изгибе в двух плоскостях по деформированной схеме отсутствуют.

После обработки результатов математического эксперимента были установлены следующие зависимости:

- формула для определения коэффициента продольного изгиба для такого состояния сжатого элемента, при котором в наиболее напряженном сечении напряжения не превышают предела упругой работы стали (сечение работает упруго, максимальные напряжения в сечении $\sigma_{\max} \leq R_y$, развитие пластических деформаций отсутствует),

$$\varphi_{el} = f_1(\bar{R}, m, \bar{\lambda});$$

- формула для определения коэффициента, учитывающего влияние пластических деформаций в наиболее напряженном сечении,

$$\gamma_{pl} = f_2(\bar{R}, m, \bar{\lambda}).$$

Напряженно-деформированное состояние (НДС), возникающее в двутавровых элементах, показано на рис. 1 и рис. 2.

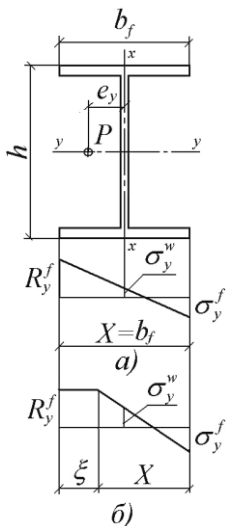


Рис. 1. Развитие пластических деформаций в поясах при изгибе в плоскости меньшей жесткости: а) НДС сечения при достижении расчетного сопротивления стали в поясах («упругая» несущая способность); б) НДС сечения при развитии упругопластических деформаций в поясах

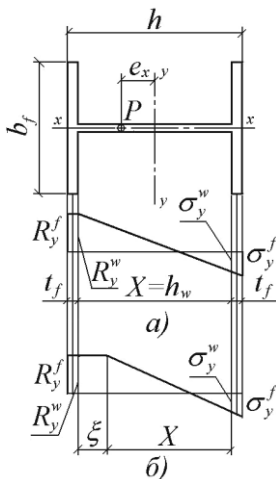


Рис. 2. Развитие пластических деформаций в стенке при изгибе в плоскости меньшей жесткости: а) НДС сечения при достижении расчетного сопротивления стали в поясе («упругая» несущая способность); б) НДС сечения при развитии упругопластических деформаций в стенке

Аналогичное НДС возникает и в элементах швеллерного сечения. Такой подход был принят по следующим соображениям. Известно, что коэффициент продольного изгиба зависит от гибкости, которая, в свою очередь, зависит от приведенной длины элемента и радиуса инерции сечения. При условии упругой работы материала можно считать, что для различных сечений, но с одинаковыми параметрами (\bar{R} , m , $\bar{\lambda}$),

величина коэффициента продольного изгиба будет одинакова. При циклическом нагружении высокого уровня развитие пластических деформаций будет способствовать появлению остаточных прогибов при разгрузке, поэтому при проектировании таких конструкций нельзя допускать развития пластических деформаций.

Развитие пластических деформаций в сечении может быть учтено коэффициентом γ_{pl} . Его величина в первую очередь зависит от формы поперечного сечения. Физический смысл коэффициента γ_{pl} – это отношение величины коэффициента продольного изгиба, определенного при расчетах с учетом развития пластических деформаций φ_{pl} , к величине коэффициента φ_{el} , т.е. $\gamma_{pl} = \varphi_{pl} / \varphi_{el}$.

Формулы для определения коэффициентов φ_{el} и γ_{pl} приведены в работе [1]. Эти формулы получены в ходе проведения математического эксперимента.

Всего было просчитано более 1000 моделей элементов с различными параметрами \bar{R} , m , $\bar{\lambda}$ и видами остаточного напряженного состояния (ОНС). В результате анализа полученных данных установлено следующее:

- влияние ОНС на поведение элементов под нагрузкой для всего диапазона изменения прочностных свойств материала характеризуется похожими зависимостями: зоны остаточных растягивающих напряжений (ОРН), расположенные на кромках поясов, способствуют увеличению, а зоны ОРН в районе поясных швов способствуют снижению величин несущей способности;
- наиболее существенные расхождения в величинах несущей способности для сжатых сварных элементов с поясными швами и без поясных швов наблюдаются в диапазоне величин гибкости от 60 до 80;
- для элементов с зонами ОРН на кромках поясов расхождения начинаются с величин гибкости, превышающих 40;
- была подтверждена необходимость учета упругопластических свойств стали при расчетах элементов на устойчивость. Для двутавровых элементов, деформирующихся в плоскости меньшей жесткости, отношение несущей способности, определенной для сжатых элементов с учетом развития пластических деформаций, к аналогичной величине, определенной без учета развития пластических деформаций («упругая» несущая способность) доходило до 1,736 (для $R_y = 205$ МПа, $\lambda = 20$ и $m = 2,72$). Для элементов, деформирующихся в плоскости большей жесткости, такое соотношение величин несущей

способности не превышало 1,054. Подобное обстоятельство можно объяснить существенным развитием пластических деформаций в поясах и, соответственно, существенным ростом несущей способности при деформировании в плоскости меньшей жесткости (рис. 1) и относительно небольшим развитием пластических деформаций в стенке при деформировании в плоскости большей жесткости (рис. 2);

- влияние ОНС учитывается с помощью коэффициента $\beta_{f,rs}$ [1].

Таким образом, в ходе проведения математического эксперимента получены зависимости, позволяющие перейти от недеформированной расчетной схемы к деформированной при выполнении инженерных расчетов несущей способности стальных элементов, подверженных осевому сжатию с изгибом, что позволяет получить результат с более высокой точностью.

ВЫВОДЫ

На основе проведенных исследований можно сделать выводы.

1. Остаточные напряжения возникают в элементах стальных конструкций в процессе изготовления вследствие применения технологических операций, связанных с локальным разогревом.
2. Предложена инженерная методика учета влияния неупругих свойств стали и ОНС при выполнении инженерных расчетов несущей способности стальных элементов, подверженных осевому сжатию с изгибом, путем введения дополнительных коэффициентов φ_{el} , γ_{pl} и $\beta_{f,rs}$. Методика позволяет оценить степень влияния отмеченных выше факторов на несущую способность элементов с достаточной для практических целей точностью.

Список литературы

1. Голоднов А.И. Упрощенный метод расчета сварных элементов, подверженных осевому сжатию с изгибом / А.И. Голоднов, О.С.Балашова // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2011. – № 2. – С. 30–34.
2. ДБН В.2.6-163:2010. Державні будівельні норми України. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу / Мінрегіонбуд України. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 202 с.
3. Голоднов А.И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках. – К.: Сталь, 2008. – 150 с.