

УДК 624.015.5

Расчет стержневых элементов с учетом регулирования остаточного напряженного состояния на части длины

¹Голоднов А.И., д.т.н., ²Балашова О.С., ³Скребцов С.И.

¹ООО «Укринсталкон им. В.Н. Шимановского», Украина,
²Донбасский государственный технический университет, Украина,
³Луганский национальный аграрный университет, Украина

Анотація. Розроблена методика расчета стержневых элементов, у которых на части длины выполнено регулирование остаточного напряженного состояния. Предложена инженерная методика расчета таких элементов. Показана целесообразность регулирования остаточного напряженного состояния на части длины сжатых стальных элементов.

Анотація. Розроблено методику розрахунку стрижневих елементів, у яких на частині довжини виконано регулювання залишкового напруженого стану. Запропоновано інженерну методику розрахунку таких елементів. Показано доцільність регулювання залишкового напруженого стану на частині довжини стислих сталевих елементів.

Abstract. The method of calculation of the cored elements at which to pieces lengths are executed adjusting of the remaining tense state is Worked out. Engineering methodology of calculation of such elements is offered. Expediency of adjusting of the residual stress state to pieces of length of the compressed steel elements is shown.

Ключевые слова: стержневой элемент, жесткость, несущая способность, остаточное напряженное состояние.

Введение. Постановка проблемы. При деформировании сжатых, сжато-изогнутых и изгибаемых элементов вследствие развития пластических деформаций происходит падение жесткости сечений в наиболее нагруженной части, что приводит к увеличению прогибов. Это характерно как для стальных элементов, так и для железобетонных (в железобетонных элементах кроме развития пластических деформаций происходит и развитие трещин). Регулирование остаточного напряженного состояния (ОНС) на части длины стальных элементов (наиболее нагруженной) путем наплавки сварных швов или прогрева кромок позволяет выполнить усиление конструкций. Это достигается за счет отдаления момента образования пластических деформаций на кромках поясов [1], что приводит к снижению прогибов элементов и увеличению несущей способности.

Методики расчета, рекомендованные действующими нормативными документами, не всегда дают возможность правильно оценить напряженно-деформированное состояние (НДС) и реальный запас

несущей способности конструкции или сооружения в целом, поскольку в их основу положены предпосылки об упругой работе материала. Положение усугубляется еще и тем, что расчеты ведутся в большинстве случаев с применением недеформированных схем [2, 3]. Это в полной мере относится и к стальным конструкциям, особенно тем, что находятся в эксплуатации и подверглись коррозионному и абразивному износу [1, 4].

Анализ последних достижений и публикаций. Анализ последних достижений и публикаций показывает [1, 4, 5], что наплавка валиков по всей длине элемента двутаврового профиля способствует повышению устойчивости за счет регулирования ОНС. Вместе с тем очевидно, что нет необходимости регулировать ОНС по всей длине – достаточно это сделать на той части длины элемента, где действуют максимальные усилия. Для колонн с шарнирами на концах регулирование может быть выполнено в средней части длины, для защемленных колонн регулирование может быть выполнено на участках у заделки. При этом желательно учитывать поведение как поперечного, так и продольного НДС после регулирования ОНС на части длины. В свою очередь экспериментально доказана возможность повышения устойчивости элементов таврового (из парных уголков) сечения после наплавки валиков на части длины [1].

Цель работы – разработка методики расчета стальных элементов после регулирования остаточного напряженного состояния на части длины.

Основная часть. Расчет на устойчивость сжато-изгибаемых элементов постоянного сечения в плоскости действия момента, совпадающей с плоскостью симметрии, выполняется по формуле (1.6.5) ДБН В.2.6-163:2010 [6]

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

Здесь коэффициент φ_e для сплошностенчатых элементов определяется по таблице К.3 Приложения К ДБН В.2.6-163:2010 [5] в зависимости от условной гибкости $\bar{\lambda}$ и приведенного относительного эксцентриситета $m_{ef} = \eta m$ ($m = eA/W_c$ – относительный эксцентриситет; e – эксцентриситет; A – площадь сечения; W_c – момент сопротивления сечения для наиболее сжатого волокна). При этом влияние ОНС не учитывается.

Для изучения влияния неупругих свойств стали и ОНС на устойчивость сжатых стальных элементов был проведен математический эксперимент. Расчеты были выполнены с использованием разработанных алгоритмов [1]. Были выполнены расчеты сжатых элементов различных гибкостей

($20 \leq \lambda \leq 120$) с различными эксцентриситетами приложения нагрузки ($0,272 \leq m \leq 2,72$). Расчетные сопротивления сталей изменялись в пределах от 205 МПа до 410 МПа. Минимальное значение величины начального эксцентриситета приложения нагрузки было принято равным 1 см. Его величина обусловлена монтажным допуском в соответствии с ДБН В.2.6-163:2010 [6]. Для элементов принималось ОНС трех типов:

- ОН в сечении отсутствуют;
- с ОСН на кромках поясов, обусловленными сваркой поясных швов;
- с ОРН на кромках поясов, обусловленными наплавкой холостых валиков или прогревом кромок.

Всего было просчитано более 1000 моделей элементов. В результате анализа полученных данных было установлено следующее (с учетом данных [1]):

- влияние ОН на поведение элементов под нагрузкой для всего диапазона изменения прочностных свойств материала характеризуется похожими зависимостями: зоны 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 100;
- 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 и относительно небольшим развитием пластических деформаций в стенке при деформировании в плоскости большей жесткости.

Величини коефіцієнта φ_{pl} можна определить по методике [5]. Величину коефіцієнта продольного изгиба предложено определять по формуле

$$\varphi_e = \varphi_{pl} = 0,94\varphi_{el}\gamma_{pl}. \quad (2)$$

В этой формуле:

$$\varphi_{el} = f_1(\bar{R}, m, \tilde{\lambda}) = b_1\bar{R}_y + c_1; \quad (3)$$

$$b_1 = (0,0109\tilde{\lambda}^2 - 0,0896\tilde{\lambda} + 0,0232)m^2 + (-0,0608\tilde{\lambda}^2 + 0,436\tilde{\lambda} - 0,108)m + (0,0952\tilde{\lambda}^2 - 0,639\tilde{\lambda} + 0,146); \quad (4)$$

$$c_1 = (-0,069\tilde{\lambda}^2 + 0,0967\tilde{\lambda} + 0,0635)m^2 + (0,308\tilde{\lambda}^2 - 0,409\tilde{\lambda} - 0,364)m + (-0,378\tilde{\lambda}^2 + 0,456\tilde{\lambda} + 0,785); \quad (5)$$

$$\gamma_{pl} = f_2(\bar{R}, m, \tilde{\lambda}) = b_2\bar{R}_y + c_2; \quad (6)$$

$$b_2 = (-0,320\tilde{\lambda}^2 + 0,456\tilde{\lambda} - 0,07)m^2 + (1,138\tilde{\lambda}^2 - 1,672\tilde{\lambda} + 0,248)m + (-0,196\tilde{\lambda}^2 + 0,288\tilde{\lambda} - 0,039); \quad (7)$$

$$c_2 = (0,153\tilde{\lambda}^2 - 0,105\tilde{\lambda} - 0,102)m^2 + (-0,464\tilde{\lambda}^2 + 0,207\tilde{\lambda} + 0,558)m + (0,126\tilde{\lambda}^2 - 0,227\tilde{\lambda} + 1,062). \quad (8)$$

В приведенных выше функциях приняты следующие обозначения: $\bar{R} = R_y / 410$ - относительное расчетное сопротивление стали ($205 \leq R_y \leq 410$); $\tilde{\lambda} = \lambda / 100$ - относительная гибкость элемента ($20 \leq \lambda \leq 120n$). Коеффициент 0,94 получен после обработки результатов математического эксперимента.

Влияние ОНС предложено учитывать путем введения дополнительного коеффициента $\beta_{f,rs}$, численное значение которого можно определить по формуле

$$\beta_{f,rs} = \sqrt{1 + \frac{\sigma_{str(com)}^{(f)'}}{R_y^f}}, \quad (9)$$

где $\sigma_{str(com)}^{(f)}$ - остаточные растягивающие (сжимающие) напряжения на кромках поясов (ОРН принимаются со знаком «плюс», ОСН – со знаком «минус»). Величины ОН можно определить по методике, изложенной в монографии [1].

Все вышеприведенные формулы применимы для условия постоянства ОНС на всей длине элемента. Наличие регулирования ОНС на части длины может быть учтено введением дополнительного коэффициента β_H . Величину этого коэффициента для интервала гибкостей $60 \leq \lambda \leq 100$ и зоны наплавки H_R ($0 \leq H_R \leq H$) с достаточной для практических целей точностью можно определить по формуле

$$\beta_H = \beta_{f,rs,1} + \frac{\beta_{f,rs,2} - \beta_{f,rs,1}}{H} H_R. \quad (10)$$

Тогда несущую способность сжатых элементов с наплавкой на части длины можно оценить по формуле:

$$\sigma_f = \frac{N}{\varphi_{pl} A} \leq \gamma_c \beta_H R_y^f. \quad (11)$$

В формулах (10) и (11): $\beta_{f,rs,1}$ – величина коэффициента $\beta_{f,rs}$, определенная по формуле (9), с учетом наличия ОСН (для сварных элементов) или их отсутствия; $\beta_{f,rs,2}$ – величина коэффициента $\beta_{f,rs}$, определенная по формуле (9), с учетом наличия ОРН на кромках поясов (после регулирования). Для прокатных элементов условно считается, что $\beta_{f,rs,1} = 1$.

Выводы

Предложена методика расчета устойчивости сжатых стальных элементов с учетом упругопластических свойств материалов и наличия ОНС. Рассматривается возможность регулирования ОНС на части длины.

Методика расчета распространяется на сжатые стержневые стальные элементы. Показана возможность увеличения несущей способности сжатых стальных элементов за счет регулирования ОНС на части длины, что подтверждается данными экспериментальных исследований.

Литература

- [1] Голоднов А.И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках. – К.: Вид-во «Сталь», 2008. – 150 с.
- [2] ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні і залізобетонні конструкції. Основні положення / Мінрегіонбуд України. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.
- [3] Методические рекомендации по уточненному расчету железобетонных элементов с учетом полной диаграммы сжатия бетона / НИИСК Госстроя СССР. – К., 1987. – 24 с.
- [4] Голоднов А.И. Расчет конструкций с резко изменяющимися жесткостными характеристиками / А.И. Голоднов, О.С.Балашова // Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. – К.: Вид-во «Сталь», 2008. – Вип. 2. – С. 18–24.
- [5] 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.
- [6] 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.

Надійшла до редколегії 19.07.2012 р.