

УДК 624.072.002.2

Деформативность изгибаемых элементов при наличии остаточных напряжений

Селифонов Е. А.

Луганский национальный аграрный университет, Украина

Аннотация. Предложена методика определения напряженно-деформированного состояния стальных изгибаемых элементов при наличии остаточных напряжений. Рассматриваются остаточные напряжения, возникающие при сварке поясных швов или при регулировании локальными термическими воздействиями. Методика позволяет определить прогибы в процессе возрастания нагрузки. Определены критерии исчерпания несущей способности.

Анотація. Запропоновано методику визначення напружено-деформованого стану сталевих елементів, що згинаються, за наявності залишкових напружень. Розглядаються залишкові напруження, що виникають при зварюванні поясних швів або при регулюванні локальними термічними впливами. Методика дозволяє визначити прогини в процесі зростання навантаження. Визначено критерії вичерпання несучої здатності.

Abstract. The method of determination of the tensely deformed state of the steel bent elements is offered at presence of residual stress. Residual stresses, arising up at welding of half-length guy-welds or at adjusting local thermal influences, are examined. The method allows defining deflections in process of loading growth. The criteria of exhausting of bearing strength are determined.

Ключевые слова. Стальные балки, остаточные напряжения, регулирование остаточного напряженного состояния, прогиб, предельное состояние.

Введение. Постановка проблемы. Остаточные напряжения (ОН) возникают в элементах стальных конструкций в процессе изготовления с применением высокотемпературных воздействий на локальных участках (сварки, резки и т.п.). Получаемое в результате этого остаточное напряженное состояние (ОНС) не всегда способствует повышению несущей способности и снижению деформаций конструкций, поэтому зачастую приходится прибегать к регулированию ОНС.

В связи с этим деформирование стальных балок с учетом наличия ОН издавна привлекало внимание исследователей, поскольку такие конструкции имеют широкое распространение. Это, в первую очередь, ригели каркасных зданий, стропильные и подкрановые конструкции и т.п. Методики расчета, рекомендуемые действующими нормативными документами, не всегда дают возможность правильно оценить реальный запас несущей способности, поскольку в их основу положены предпосылки об упругой или упругопластической работе материала в

эксплуатационной стадии. Положение усугубляется еще и тем, что расчеты ведутся, как правило, с применением недеформированных схем.

Работа является одним из этапов исследований, выполняющихся в рамках научно-исследовательской работы кафедр строительных конструкций ДонГТУ и ЛНАУ по теме «Влияние локальных термических воздействий на прочность и устойчивость элементов металлических строительных конструкций» № ГР 0109U008624 (НИР № 21К).

Анализ последних достижений и публикаций. Анализ последних достижений и публикаций (решению таких проблем посвящены регулярно проводимые конференции как в нашей стране, так и за рубежом) свидетельствует о необходимости продолжения исследований, направленных на решение важной народно-хозяйственной задачи, которая заключается в проектировании зданий и сооружений для нового строительства и продлении срока службы строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений с оценкой их ресурса [1, 2, 3, 4 и др.]. Решение этой задачи возможно различными методами. При этом учет ОНС, упругопластических свойств материалов конструкций и изменения условий закрепления производится не всегда адекватно, что не позволяет сделать правильные выводы о возможности дальнейшей эксплуатации и оценке остаточного ресурса.

Цель работы – разработка методики расчета изгибаемых элементов с учетом упругопластических свойств материалов и изменения условий закрепления для решения практических задач определения ресурса конструкций.

Основная часть. Деформирование изгибаемого элемента можно описывать с помощью уравнений метода начальных параметров, полученных на основе аппроксимации уравнения изогнутой оси кубическим сплайном. Прогобы и углы поворота определяются по следующим формулам [5]:

$$y_i = y_1 + \varphi_1 \cdot L \cdot \frac{i-1}{n} + \frac{L^2}{6 \cdot n^2} \cdot [(3 \cdot i - 4) \cdot \kappa_1 + 6 \cdot \sum_{j=2}^{i-1} (i-j) \cdot \kappa_j + \kappa_i] + (\delta_1 - \delta_i); \quad (1)$$

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

где y_i – совместное перемещение i -й точки оси балки и i -й опоры (рис. 1), которое определяется как разность полного перемещения указанной точки балки и вынужденного перемещения опоры δ_i (для точек балки в

пролете $\delta_i = 0$); φ_i – угол поворота i -го сечения балки; K_i – кривизна i -го сечения балки; n – количество участков, на которые разбита длина балки L (при выборе числа участков следует учитывать, что точность повышается при $n \rightarrow \infty$. Для практических целей достаточно, если $n \geq L/h$, где h – высота балки).

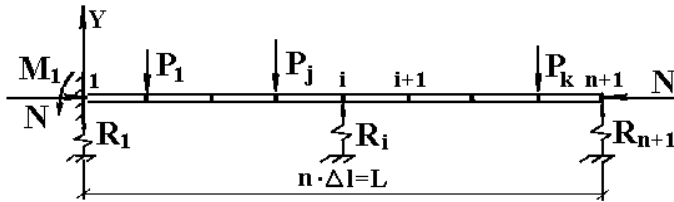


Рис. 1. Расчетная схема изгибаемой системы

Значения полных кривизн сечений определяются по формулам:

$$K_{s,i} = K_{H,i} + K_{p,i}; \quad (3)$$

$$K_{p,i} = \frac{M_i}{B_i}; \quad (4)$$

$$M_i = M_1 + \frac{L^2}{n^2} \cdot \sum_{j=1}^{i-1} (i-j) \cdot R_j - M_{p,i}; \quad (5)$$

$$R_j = k_j \cdot y_j, \quad (6)$$

где $K_{p,i}$ – кривизна сечения от внешней нагрузки; M_i , B_i – соответственно, изгибающий момент и жесткость в i -м сечении балки; $K_{H,i}$ – начальная кривизна i -го сечения, обусловленная наличием предварительного напряжения или усадкой бетона; R_j – реакция j -й опоры балки (при отсутствии опор в сечениях балки $R_j = 0$); y_j , k_j – соответственно, совместное перемещение j -й точки балки с опорой и коэффициент жесткости j -й опоры; M_1 – изгибающий момент в первом

сечении балки (при шарнирном опирании $M_i = 0$); $M_{p,i}$ – изгибающий момент от внешней нагрузки.

Величина изгибающего момента от внешней нагрузки ищется для всех сечений от сил, расположенных слева от сечения, на основании общих правил строительной механики. В процессе расчетов они не изменяются, за исключением тех случаев, когда по условию задачи изменяется характер нагружения.

Как видно, для расчетов по предложенным формулам необходимо обладать информацией об изменении кривизны в сечениях по длине элемента. Зависимости «момент-кривизна» определяются заранее по методикам [6, 7]. Жесткостные характеристики опор определяются в первом приближении по известным методикам НИИСК, нормативных документов [8, 9 и др.].

Несущая способность считается исчерпанной, если:

- разрушено хотя бы одно сечение элемента (в качестве критериев разрушения сечения рассматриваются достижение на сжатой фибре величин предельных деформаций, разрыв арматуры, потеря местной устойчивости сжатого пояса или стенки металлического элемента и т. п.);
- достигнут максимум на кривой состояний [6, 7 и др.];
- разрушена хотя бы одна опора балки;
- прогибы и перемещения превысили предельные величины, оговоренные нормативными документами.

Подстановка уравнений (3)...(6) в уравнения (1) и (2) позволяет получить систему линейных алгебраических уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned}
 & y_1 \cdot \left\{ \frac{L^4}{6 \cdot n^4} \cdot k_1 \cdot \left[\sum_{k=2}^{i-1} 6 \cdot \frac{(i-k) \cdot (k-1)}{B_k} + \frac{(i-1)}{B_i} \right] - 1 \right\} + \\
 & \frac{L^4}{6 \cdot n^4} \cdot \left\{ \sum_{j=2}^{i-1} y_j \cdot k_j \cdot \left[\sum_{k=j+1}^{i-1} 6 \cdot \frac{(i-k) \cdot (k-j)}{B_k} + \frac{(i-j)}{B_i} \right] \right\} + y_i - \\
 & - \varphi_1 \cdot L_1 \cdot \frac{i-1}{n} + M_1 \cdot \left(\frac{L^2}{6 \cdot n^2} \right) \cdot \left[\frac{(3 \cdot i - 4)}{B_1} + 6 \cdot \sum_{j=2}^{i-1} \frac{i-j}{B_j} + \frac{1}{B_i} \right] = \\
 & = (\delta_i - \delta_1), \quad (i = 2, \dots, n+1); \\
 & \frac{L}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n+1} y_i \cdot k_i = \bar{Y}; \\
 & \left(\frac{L}{n} \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (n-i+1) \cdot y_i \cdot k_i + M_1 - M_{n+1} = \bar{M}_{n+1}; \\
 & \Phi(y, k, \delta, M_1, \varphi_1) = 0,
 \end{aligned} \right\}; \quad (7)$$

В этих формулах: \bar{Y} – сумма проекций всех сил на ось Y; M_1 – изгибающий момент в сечении $i=1$ (при шарнирном опирании $M_1 = 0$); M_{n+1} – изгибающий момент в сечении $i=n+1$ (при шарнирном опирании $M_{n+1} = 0$); \bar{M}_{n+1} – изгибающий момент в сечении $i=n+1$ от внешней нагрузки; $\Phi(y, k, \delta, M_1, \varphi_1) = 0$ – при отсутствии заделки в сечении $i=n+1$; φ_1 – угол поворота сечения $i=1$ (при жестком защемлении $\varphi_1 = 0$, при наличии заданного или прогнозируемого угла поворота $\varphi_1 = \theta_1$). Если в сечении $i=n+1$ расположена заделка, функция $\Phi(y, k, \delta, M_1, \varphi_1)$ имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \Phi(y, k, \delta, M_1, \varphi_1) = & \left(\frac{L^3}{2 \cdot n^3} \right) \cdot \left\{ \sum_{j=1}^{n-1} y_j \cdot k_j \cdot \left[2 \cdot \sum_{k=j+1}^n \frac{(k-j)}{B_k} + \frac{n-j+1}{B_{n+1}} \right] + \frac{y_n \cdot k_n}{B_{n+1}} \right\} + \\
 & + M_1 \cdot \left(\frac{L}{2 \cdot n} \right) \cdot \left(\frac{1}{B_1} + 2 \cdot \sum_{j=2}^n \frac{1}{B_j} + \frac{1}{B_{n+1}} \right) - \left(\frac{L}{2 \cdot n} \right) \cdot \left(\frac{M_{p,1}}{B_1} + 2 \cdot \sum_{j=2}^n \frac{M_{p,j}}{B_j} + \frac{M_{p,n+1}}{B_{n+1}} \right) = \theta_{n+1},
 \end{aligned} \quad (8)$$

где θ_{n+1} – заданный (прогнозируемый) угол поворота $i=n+1$ сечения.

Расчеты по определению несущей способности и прогнозу ресурса сооружения выполняются как для эксплуатируемых, так и для проектируемых конструкций.

Для конструкций, находящихся в эксплуатации, устанавливаются параметры технического состояния (геометрические размеры, армирование, прочностные и деформативные характеристики материалов, схемы действующих нагрузок, реальные прогибы и перемещения и т. п.). На основании собранных материалов определяются зависимости «момент-кривизна», обосновывается возможность потери местной устойчивости поясов или стенки металлических балок вследствие износа. При наличии данных (в том числе и прогнозных) о характере деградации материала (разрушении бетона, изменении физико-механических характеристик, коррозии арматуры, стали поясов и стенок и т. п.) определяют зависимости «момент-кривизна» для определенных моментов времени с учетом деградации. Используя систему уравнений (7) и формулу (8), формируется система линейных алгебраических уравнений с количеством неизвестных, равным количеству уравнений. Кроме этого, неизвестными являются также жесткости (кривизны) сечений и жесткостные характеристики.

Задача решается итерационным путем по следующему алгоритму.

- Задают исходные данные: параметры сечения, прочностные и деформативные характеристики материалов, схему приложения нагрузки и т. п.
- Определяют зависимости «момент-кривизна» для сечений и жесткостные характеристики опор в первом приближении.
- Формируют систему уравнений. На первом этапе задают упругие жесткостные характеристики сечений и опор.
- По результатам выполненных расчетов уточняют величины действующих усилий и жесткостные характеристики сечений и опор.
- Расчет по пунктам 3...4 продолжают до тех пор, пока для двух смежных итераций расчета распределение жесткостей и кривизн определится с достаточной для практических целей точностью.
- При наличии информации о деформировании эксплуатируемой конструкции, последовательно уточняя жесткостные характеристики опор, добиваются соответствия реальной конструкции и модели. Оценивают состояние конструкции, полученное по результатам расчета. При наличии данных о прогнозе деградации материала

и/или развития осадок основания выполняют расчет на прогнозные воздействия.

- Расчеты по пунктам 3...6 производят до тех пор, пока не выполнится любой из критериев исчерпания несущей способности. На основании выполненных расчетов делают выводы о ресурсе сооружения, необходимости усиления или замены как отдельных элементов, так и сооружения в целом.

Проектируемые конструкции рассчитываются по предложенной выше расчетной схеме с той, однако, разницей, что в процессе расчета имеется возможность моделировать деградацию элемента и уже на стадии проектирования внести коррективы (подобрать сечения элементов с запасом, предусмотреть защитные мероприятия и т. п.).

Выводы

Предложена методика деформационного расчета изгибаемых элементов с учетом упругопластических свойств стали и опор и возможности их деградации. Рассматривается возможность учета изменений геометрических параметров сечений элементов и физико-механических свойств материалов.

Методика расчета распространяется на элементы из упругопластических материалов. Определены критерии исчерпания несущей способности.

Результатами расчетов по данной методике могут быть не только определение напряженно-деформированного состояния системы, но и прогноз ее поведения во времени и оценка остаточного ресурса, т. е. суммарной наработки элемента от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние.

Литература

- [1] Захист від корозії і моніторинг залишкового ресурсу промислових будівель, споруд та інженерних мереж : матеріали міжнародної конференції / Українська асоціація металевих конструкцій. – Донецьк : УАМК, 2003. – 550 с.
- [2] Науковий вісник будівництва: збірник наукових праць / Харківський державний технічний університет будівництва та архітектури. – Харків : ХДТУБА, 2003. – Вип. 23/2003. – 266 с.
- [3] Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин : зб. наук. стат. за результ., отрим. в 2004–2006 рр. / Наук. кер. академік Б. Є. Патон / Інститут електродварювання ім. Є.О. Патона НАН України. – К. : ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – 589 с.

- [4] Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин : зб. наук. стат. за результ., отрим. в 2007–2009 рр. / Наук. кер. академік Б. Є. Патон / Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. – К. : ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2009. – 709 с.
- [5] 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.
- [6] Голоднов А. И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках / А. И. Голоднов. – К. : Вид-во «Сталь», 2008. – 150 с.
- [7] Голоднов А. И. Зависимость «момент-кривизна» для сварных двутавровых балок / А. И. Голоднов // Современные строительные конструкции из металла и древесины : сб. науч. тр. / Одесская государственная академия строительства и архитектуры. – Одесса : ОГАСА, 2003. – С. 55–63.
- [8] Методические рекомендации по определению коэффициентов жесткости оснований зданий и сооружений / НИИСК Госстроя СССР. – К., 1987. – 32 с.
- [9] Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах : ДБН В.1.1-5-2000 : в 2 ч. / Государственный комитет строительства, архитектуры и жилищной политики Украины. – Часть 2. Здания и сооружения на просадочных грунтах. – Офиц. изд. – К., 2000. – 87 с.

Надійшла до редколегії 21.07.2011 р.