

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОСЛЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

### TENSELY-DEFORMED STATE OF THE BENT ELEMENTS AFTER DISPLAY OF PLASTIC PROPERTIES OF MATERIALS

д.т.н., проф. **Голоднов А.И.** (ООО «Украинский институт стальных конструкций имени В.Н.Шимановского», г. Киев), к.т.н., доц. **Псюк В.В.** (Донбасский государственный технический университет), аспирант **Слюсар Ю.Н.** (Луганский национальный аграрный университет)

*Dr. Professor **Golodnov A.I.** (LTD «V. Shimanovsky Ukrsteelconstruction», Kyiv), candidate of engineering sciences, associate professor **Psyuk V.V.** (Donbass State Technical University), graduate student **Slusar J.N.** (Luhansk national agrarian university)*

#### Аннотация

Предложена методика определения напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов из упругопластических материалов при изменении условий закрепления. Методика позволяет определить прогибы в процессе возрастания нагрузки с учетом изменения жесткости элементов. Определены критерии исчерпания несущей способности.

#### Annotation

Methodology of determination of the tensely-deformed state of the bent elements is offered from elastic of plastic materials at the change of terms of fixing. Methodology allows to define bending in the process of growth of loading taking into account the change of inflexibility of elements. The criteria of exhausting of bearing strength are certain.

**Состояние вопроса и задачи исследований.** Деформирование изгибаемых элементов издавна привлекало внимание исследователей, поскольку они имеют широкое распространение. Методики расчета, рекомендуемые действующими нормативными документами, не всегда позволяют правильно оценить реальный запас несущей способности,

поскольку в их основу положены предпосылки об упругой или упругопластической в эксплуатационной стадии работе материала. Положение усугубляется еще и тем, что расчеты ведутся, как правило, с применением недеформированных схем, а также без учета остаточного напряженного состояния (ОНС), возникающего после изготовления конструкций.

Изменение условий закрепления рассматривается как воздействия со стороны основания. Учет изменения условий закрепления позволит более обоснованно подойти к оценке как напряженно-деформированного состояния (НДС), так и остаточного ресурса конструкции или сооружения в целом.

**Цель работы** – разработка методики расчета изгибаемых элементов с учетом упругопластических свойств материалов, остаточного напряженного состояния и изменения условий закрепления для решения практических задач определения напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса.

**Текст статьи.** Для решения поставленной задачи приняты следующие предпосылки и допущения [1, 2, 3, 4, 5 и др.].

1. Рассматривается в общем случае система, состоящая из балки и деформируемого основания (рис. 1). Длина балки  $L$  разбивается на  $n$  участков одинаковой длины  $\Delta L$  (при выборе числа участков следует учитывать, что точность повышается при  $n \rightarrow \infty$ ; для практических целей достаточно, если  $n \rightarrow L/h$ , где  $h$  – высота балки). Реакции основания  $R_i$  и внешние нагрузки  $P_i$  считаются приложенными в каждой точке разбиения. Внешняя нагрузка представляет собой заданный или единичный вектор.

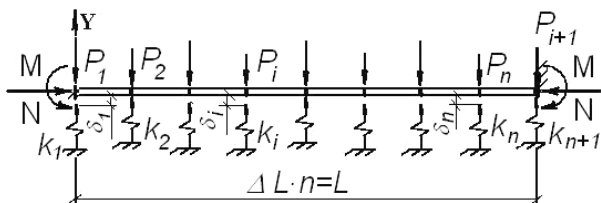


Рис. 1. Расчетная схема изгибаемой системы

2. Опираие балки на основание в общем случае считается сплошным. Модель основания принимается в виде модели переменного коэффициента жесткости [4, 5 и др.]. Коэффициент

жесткости каждой опоры  $k_i$  определяется из диаграммы «нагрузка–осадка», которая строится заранее. В местах отсутствия контакта балки с основанием жесткость опор принимается равной нулю.

3. Независимые от силовых воздействий осадки основания  $\delta_i$  считаются заданными (заданный или единичный вектор).

4. Материал балки обладает упругопластическими свойствами. Деформированное состояние каждого ( $i$ -го) сечения балки на любом этапе нагружения определяется кривизной  $\kappa_i$ . Кривизна сечения в зависимости от действующих усилий определяется из диаграммы «момент–кривизна», параметры которой зависят от материала балки, формы сечения и т.п. [1, 2, 3 и др.]. Диаграмма «момент–кривизна» строится заранее.

5. Несущая способность (работоспособность) системы считается исчерпанной, если:

а) разрушено хотя бы одно сечение элемента (в качестве критериев разрушения сечения рассматриваются достижение на сжатой фибре величин предельных деформаций, разрыв арматуры, потеря местной устойчивости пояса или стенки металлического элемента и т.п.);

б) достигнут максимум на кривой состояния (рис. 2) [1, 2, 3 и др.];

в) разрушена хотя бы одна опора балки;

г) прогибы и перемещения превысили предельные величины.

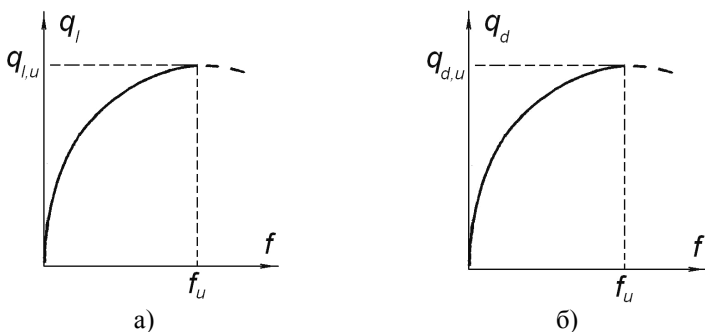


Рис. 2. Диаграммы состояния системы при определении модуля вектора силового (а) или деформационного (б) воздействия

6. Деформирование элемента можно описывать с помощью уравнений метода начальных параметров, полученных на основе аппроксимации

уравнения изогнутой оси кубическим сплайном [1, 2 и др.]. Прогибы и углы поворота определяются по формулам:

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

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

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  $\delta_i$  (при отсутствии вынужденных смещений опор  $\delta_i = 0$ );  $\varphi_i$  – угол поворота  $i$ -го сечения балки;  $q_l, q_d$  – соответственно модуль вектора силового и деформационного воздействия.

7. В зависимости от поставленной задачи расчетом определяются:

- критический (соответствующий исчерпанию несущей способности) модуль вектора силового воздействия  $q_l$  при заданных единичном векторе нагрузки и векторе деформационного воздействия ( $q_d = 1$ ) – расчет по предельным состояниям первой группы;
- критический модуль вектора деформационного воздействия  $q_d$  при известной силовой нагрузке ( $q_l = 1$ ) и заданном единичном векторе деформационного воздействия – расчет по предельным состояниям первой группы;
- усилия и перемещения при заданных нагрузках и воздействиях со стороны основания ( $q_d = 1, q_l = 1$ ) – расчет по предельным состояниям второй группы.

Значения полных кривизн сечений, изгибающих моментов и реакций опор определяются по формулам:

$$\kappa_i = \kappa_{H,i} + \kappa_{p,i}; \quad (3)$$

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

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

$$R_i = k_i \cdot y_i, \quad (6)$$

где  $\kappa_{p,i}$  – кривизна сечения от внешней нагрузки;  $M_i, B_i$  – соответственно изгибающий момент и жесткость в  $i$ -м сечении балки;  $\kappa_{H,i}$  – начальная кривизна  $i$ -го сечения, обусловленная наличием ОНС, предварительного напряжения и т.п.;  $R_j$  – реакция  $j$ -й опоры балки (при отсутствии опор  $R_j = 0$ );  $M_1$  – изгибающий момент в первом сечении балки (при шарнирном опирании  $M_1 = 0$ );  $M_{p,i}$  – изгибающий момент от внешней нагрузки (при заданном векторе нагрузки –  $q_l = 1$ ).

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.

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, толщины металлических элементов, армирование, прочностные и деформативные характеристики материалов, схемы действующих нагрузок, реальные прогибы и перемещения, степень коррозионного или абразивного износа 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.

Проектируемые конструкции рассчитываются по предложенной выше 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**

По результатам проведенных исследований сделаны выводы.

1. Предложена методика деформационного расчета изгибаемых элементов с учетом упругопластических свойств материалов и возможности их деградации. Рассматривается возможность учета изменений геометрических параметров сечений элементов, физико-механических свойств материалов и контактных условий. Определены критерии исчерпания несущей способности. Методика расчета может быть распространена на элементы из железобетона, стали и т.п.
2. Результатами расчетов по данной методике могут быть не только определение НДС, но и прогноз поведения конструкции во времени и оценка остаточного ресурса.

### *Список литературы*

1. Голоднов А.И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках / А.И. Голоднов. – К.: Изд-во «Сталь», 2008. – 150 с.
2. Методические рекомендации по расчету системы "железобетонная балка-деформируемое основание" / НИИСК Госстроя СССР; Сост. В.Я. Бачинский, А.И. Голоднов. – К.: НИИСК Госстроя СССР, 1987. – 12 с.
3. Голоднов А.И. Зависимость «момент – кривизна» для сварных двутавровых балок // Современные строительные конструкции из металла и древесины: Сборник научных трудов / Одесская государственная академия строительства и архитектуры. – Одесса: ОГАСиА, 2003. – С. 55–63.
4. Методические рекомендации по определению коэффициентов жесткости оснований зданий и сооружений / НИИСК Госстроя СССР. – К., 1987. – 32 с.
5. ДБН В.1.1-5-2000. Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах. Часть 2. Здания и сооружения на просадочных грунтах / Государственный комитет строительства, архитектуры и жилищной политики Украины. – К., 2000. – 87 с.