

УДК 624.015.5

## **Напряженно-деформированное состояние изгибаемых элементов с учетом развития пластических деформаций**

<sup>1</sup>Голоднов А.И., д.т.н., <sup>2</sup>Слюсар Ю.Н.

<sup>1</sup>ООО «Укринсталькон им. В.Н. Шимановского», Украина

<sup>2</sup>Луганский национальный аграрный университет, Украина

**Анотація.** Запропоновано методику визначення напружено-деформованого стану елементів, що згинаються, з пружно-пластичних матеріалів при зміні умов закріплення. Методика дозволяє визначити прогини в процесі зростання навантаження з урахуванням зміни жорсткості елементів. Визначено критерії вичерпання несучої здатності.

**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 is offered concerning tensely-deformed state determination of the bent elements 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 elements inflexibility. The criteria of exhausting of bearing strength are certain.

**Ключевые слова:** изгибаемые элементы, бетон, арматура, прокат, пластические деформации, расчет.

**Введение. Постановка проблемы.** Деформирование изгибаемых железобетонных элементов издавна привлекало внимание исследователей. Этому способствует то обстоятельство, что прогибы слабоармированных элементов, как правило, увеличиваются со временем даже при постоянной нагрузке. Методики расчета, рекомендуемые действующими нормативными документами [1–5], не всегда позволяют правильно прогнозировать как рост деформаций конструкций, так и оценить реальный запас несущей способности, особенно при вынужденных смещениях опор. Положение усугубляется еще и тем, что расчеты ведутся, как правило, с применением недеформированных схем, а также без учета остаточного напряженного состояния (ОНС), возникающего в процессе нагружения и последующей разгрузки конструкций, например, при реконструкции.

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.

**Основная часть.** Для решения поставленной задачи приняты следующие предпосылки и допущения [1–5].

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.

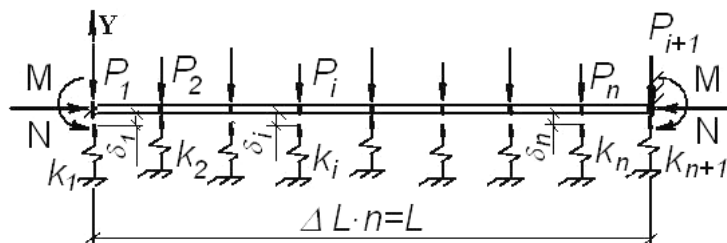


Рис. 1. Расчетная схема изгибаемой системы

2. Опирание балки на основание в общем случае считается сплошным. Модель основания принимается в виде модели переменного коэффициента жесткости [4, 5]. 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 (сталь, железобетон) 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. [1–5]. 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];

в) разрушена хотя бы одна опора балки;

г) прогибы и перемещения превысили предельные величины [6, 7].

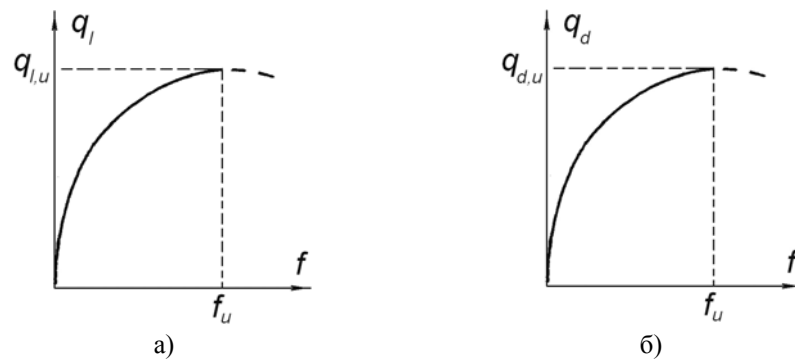


Рис. 2. Диаграммы состояния системы при определении модуля вектора силового (а) или деформационного (б) воздействия

6. Деформирование элемента можно описывать с помощью уравнений метода начальных параметров, полученных на основе аппроксимации уравнения изогнутой оси кубическим сплайном [1]. Прогибы и углы поворота определяются по формулам:

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

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

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 ( $q_l = 1, q_d = 1$ ) – расчет по предельным состояниям второй группы.

Величину изгибающего момента от внешней нагрузки находят 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 строятся 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. Построение зависимостей «момент-кривизна» необходимо выполнять в соответствии с требованиями действующих нормативных документов [2–5].

Параметры технического состояния должны быть определены неразрушающими методами контроля. Например, определение параметров армирования должно быть выполнено магнитным методом. Определение прочности бетона должно быть выполнено ультразвуковым методом. Для определения прочности бетона в местах контроля необходимо использовать базовую градуировочную зависимость «скорость-прочность», установленную для используемого прибора по многолетним статистическим данным результатов сравнительных ультразвуковых и механических испытаний образцов из бетонов различных классов по прочности. Профиль арматурных стержней необходимо устанавливать в ходе вскрытий. Характеристики арматуры и стали проката необходимо устанавливать в процессе исследования образцов, взятых из конструкций.

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**

Предложена методика деформационного расчета изгибаемых элементов с учетом влияния 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, сталежелезобетонные конструкции и т. п.

Результатами расчетов по данной методике могут быть не только определение НДС, но и прогноз поведения конструкции во времени и оценка остаточного ресурса.

## **Литература**

- [1] Голоднов А. И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках / А. И. Голоднов. – К. : Изд-во «Сталь», 2008. – 150 с.
- [2] Мости та труби. Правила проектування : ДБН В.2.3-14:2006. – Офіц. вид. – К. : Мінбуд України, 2006. – 359 с. – (Споруди транспорту. Державні будівельні норми).
- [3] Сталезалізобетонні конструкції. Норми проектування : ДБН В. 2.6-160:2010. – Офіц. вид. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 55 с. (Конструкції будівель і споруд. Державні будівельні норми України).
- [4] Залізобетонні конструкції. Норми проектування : ДБН В.2.6-98:2009. – Офіц. вид. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с. (Конструкції будівель і споруд. Державні будівельні норми України).
- [5] Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу : ДБН В.2.6-163:2010. – Офіц. вид. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 202 с. – (Конструкції будівель і споруд. Державні будівельні норми України).
- [6] Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных грунтах. Часть 2. Здания и сооружения на просадочных грунтах: ДБН В.1.1-5-2000. – Офіц. изд. – К. : Госстрой Украины, 2000. – 87 с. – (Конструкции зданий и сооружений. Государственные строительные норма Украины).
- [7] Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування : ДБН В.2.1-10-2009. – Офіц. вид. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 82 с. – (Об'єкти будівництва та промислова продукція будівельного призначення. Основи та фундаменти будинків і споруд. Державні будівельні норми України).

*Надійшла до редколегії 15.09.2014 р.*