

УДК 624.015.5

Особенности расчета остаточного ресурса изгибаемых элементов после термических воздействий

¹Голоднов А.И., ²Риблов В.В., ²Слюсар Ю.Н., ³Отрош Ю.А.,
³Ткачук И.А., ³Семиног Н.Н.

¹ООО «Укринсталькон им. В.Н. Шимановского», Украина

²Луганский национальный аграрный университет, Украина

³Академия пожарной безопасности им. Героев Чернобыля, Украина

Анотація. Запропоновано методику визначення напружено-деформованого стану згинальних елементів з пружно-пластичних матеріалів при зміні умов закріплення і термічних впливах. Методика дозволяє визначити прогини в процесі зростання навантаження з урахуванням зміни жорсткості елементів. Визначено критерії вичерпання несучої здатності. Наведено рекомендації щодо розрахунку залишкового ресурсу.

Аннотация. Предложена методика определения напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов из упругопластических материалов при изменении условий закрепления и термических воздействиях. Методика позволяет определить прогибы в процессе возрастания нагрузки с учетом изменения жесткости элементов. Определены критерии исчерпания несущей способности. Даны рекомендации по расчету остаточного ресурса.

Abstract. Methodology is offered concerning determination of the tensely-deformed state of the bent elements from elastic of plastic materials at the change of fixing conditions and thermal influences. Methodology allows to define bending in the process of loading growth taking into account the change of elements inflexibility. The criteria for exhausting of bearing strength are determined. Recommendations are given upon settlement of residual resource.

Ключевые слова: изгибаемые элементы, бетон, арматура, прокат, пластические деформации, термические воздействия, расчет, остаточный ресурс.

Состояние вопроса и задачи исследований. Деформирование изгибаемых железобетонных и сталежелезобетонных 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 Украины [1–4], 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 после изготовления или разгрузки конструкций, например, при реконструкции.

Опыт эксплуатации шатровых плит перекрытий и современных зданий с монолитным железобетонным каркасом свидетельствует о развитии прогибов и перемещений таких конструкций во времени. В ряде случаев такое обстоятельство приводит просто к неудобствам при обитании, но иногда приводит и к аварийным ситуациям. Поэтому при проектировании необходимо выполнять расчеты с учетом нелинейных свойств железобетона и изменения их в процессе эксплуатации, в т. ч. и после термических воздействий.

Усиление изгибаемых конструкций зданий, которые получили повреждение в результате развития неравномерных деформаций основания и термических воздействий, выполняется, как правило, путем подведения металлических элементов. При этом основным остается выполнение расчета конструкций для обоснованного назначения сечений элементов усиления.

Решение этой задачи возможно разными методами, в первую очередь, моделированием работы конструкций с использованием МКЭ и современных вычислительных комплексов. В ходе решения задачи моделируется появление и развитие трещин (характер и расположение трещин определяются по результатам обследования) путем изменения характеристик жесткости элементов. Усилия, которые могли бы возникнуть в элементах усиления, определяются после изменения характеристик жесткости или введения в расчетную схему дополнительных стержневых элементов. Такой подход дает несколько завышенные данные об усилиях в элементах, что идет в запас прочности.

Усиления конструкций металлическими элементами требует дополнительных мероприятий защиты при действии пожара. Такой вопрос вообще остался не изученным, поскольку не всегда можно смоделировать такое состояние конструкций, при котором элементы здания и усиления подвержены термическим воздействиям в локальной или глобальной области.

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, термических воздействий и изменения условий закрепления для решения практических задач определения напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса конструкций.

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 ΔL (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.

2. Опираемость балки на основание в общем случае считается сплошной. Модель основания принимается в виде модели переменного коэффициента жесткости [6, 7]. 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 δ_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 K_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.

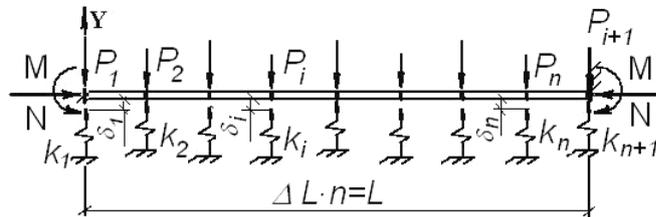


Рис. 1. Расчетная схема изгибаемой системы

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].

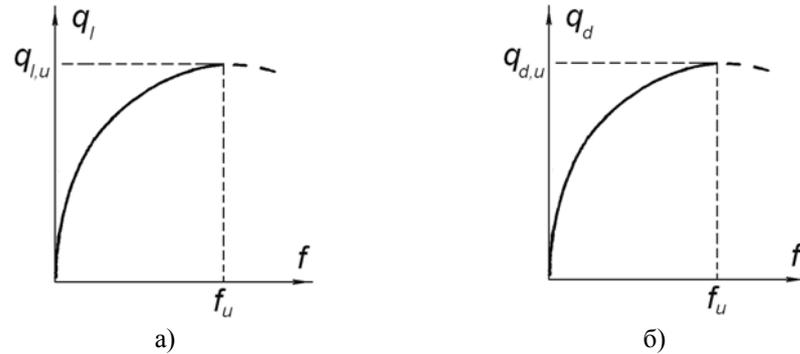


Рис. 2. Диаграммы состояния системы при определении модуля вектора силового (а) или деформационного (б) воздействия

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

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

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

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 δ_i (при отсутствии вынужденных смещений опор $\delta_i = 0$); φ_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 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;
- 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;
- усилия и перемещения при заданных нагрузках и воздействиях со стороны основания ($q_d = 1, q_l = 1$) – 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.

8. Зависимости изменения характеристик прочности бетона установлены методом наименьших квадратов по экспериментальным данным [8]. Формулы, которые учитывают изменение прочности бетона при нагревании, имеют вид:

— для керамзитобетона:

$$\frac{R_{b,tem}}{R_b} = 0,98 + 0,102\left(\frac{T}{100}\right) - 0,02555\left(\frac{T}{100}\right)^2; \quad (3)$$

— для тяжелого бетона на участке от 60 °С до 700 °С:

$$\frac{R_{b,tem}}{R_b} = 0,6184 + 0,232\left(\frac{T}{100}\right) - 0,03608\left(\frac{T}{100}\right)^2. \quad (4)$$

Увеличение температуры материала способствует снижению его модуля упругости. Формулы, которые учитывают изменение модуля упругости при нагревании, имеют вид:

— для керамзитобетона:

$$\frac{E_{b,tem}}{E_b} = 1,025 - 0,121\left(\frac{T}{100}\right) + 0,00367\left(\frac{T}{100}\right)^2; \quad (5)$$

— для тяжелого бетона на участке от 120 °С до 800 °С

$$\frac{E_{b,tem}}{E_b} = 1,2 - 0,14\left(\frac{T}{100}\right) - 0,0012\left(\frac{T}{100}\right)^2. \quad (6)$$

9. Характеристики прочности арматурной стали с увеличением температуры уменьшаются [9] и имеют вид пологих кривых (рис. 3, 4).

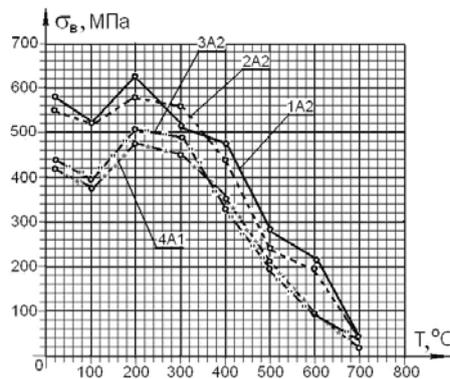


Рис. 3. Зависимости предела прочности арматурной стали от температуры

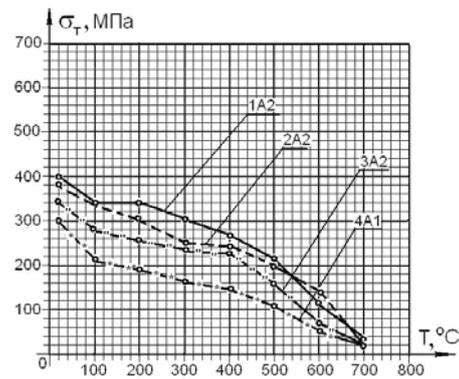


Рис. 4. Зависимость предела текучести арматурной стали от температуры

Снижение расчетного сопротивления арматурной стали можно учесть путем введения коэффициента снижения нормативного сопротивления в зависимости от температуры K_s , функцию для расчета которого можно установить в первом приближении по полученным экспериментальным данным [9]. Для разных классов арматуры с использованием метода наименьших квадратов установлены следующие аналитические зависимости:

— для арматуры класса А240С:

$$K_s^{240} = 1 - 0,134\left(\frac{T}{100}\right) + 0,0016\left(\frac{T}{100}\right)^2; 0 \quad (7)$$

— для арматуры класса А400С:

$$K_s^{400} = 0,91 - 0,04\left(\frac{T}{100}\right) - 0,0106\left(\frac{T}{100}\right)^2; \quad (8)$$

— для арматуры класса А500С:

$$K_s^{A500} = 0,942 - 0,046 \left(\frac{T}{100} \right) - 0,0115 \left(\frac{T}{100} \right)^2; \quad (9)$$

— для арматуры класса А600С:

$$K_s^{A600} = 0,951 - 0,025 \left(\frac{T}{100} \right) - 0,0131 \left(\frac{T}{100} \right)^2. \quad (10)$$

Кроме того, было получено уравнение для определения усредненного значения коэффициента снижения нормативного сопротивления. Оно имеет следующий вид:

$$K_s^{red} = 1 - 0,06 \left(\frac{T}{100} \right) - 0,01 \left(\frac{T}{100} \right)^2. \quad (11)$$

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 [1–4].

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 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.).

В соответствии с требованиями действующих нормативных документов [1 – 4] элемент (конструкция) считаются работоспособными, а их техническое состояние нормальным или удовлетворительным, если не выполняются [10]:

— условие отказа конструкций (достижение предельных состояний первой группы):

$$F \geq F_u, \quad (12)$$

— условие достижения конструкцией предельных состояний второй группы:

$$f \geq f_u, \quad a_{cre} \geq a_{cre,u}. \quad (13)$$

Ввиду того, что во всех конструкциях вследствие коррозионных процессов, воздействий со стороны основания и термических воздействий происходят изменения во времени, некоторые (или все) компоненты неравенств, приведенных выше, являются функциями времени. Каждое из неравенств (12), (13) можно преобразовать к виду:

$$\Phi_u [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t), y_1, y_2, \dots, y_n] < \Phi(t), \quad (14)$$

где $\Phi_u [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t), y_1, y_2, \dots, y_n]$ – функция несущей способности (деформативности) элементов (конструкций), устанавливается по рекомендациям нормативных документов с учетом изменения входящих параметров во времени; $\Phi(t)$ – действующее максимальное усилие (деформация) в элементе (конструкции).

Вид функциональной зависимости можно определить после алгебраических преобразований неравенств вида (14) с включением в состав аргументов всех величин, зависящих от времени, если это представляется возможным.

В соответствии с этим, в неравенстве (14) аргументы функции $\Phi(t)$ разбиты на две группы. Аргументы первой группы x_1, x_2, \dots, x_m зависят от времени и называются определяющими параметрами. Аргументы второй группы y_1, y_2, \dots, y_n от времени не зависят и являются константами.

Оценку возможности продления ресурса конструкций осуществляется по физической (детерминистической) модели, разработанной на основе полученных при обследовании и оценке технического состояния данных о параметрах старения и достижения предельных значений в элементах, анализе отказов и повреждений рассматриваемых элементов, условий и режимов эксплуатации.

Модель оценки возможности переназначения ресурса должна обеспечивать:

- адекватную оценку изменения параметров технического состояния во времени;
- возможность достижения предельного состояния.

При оценке возможности продления срока эксплуатации по условию сохранения несущей способности использовать представление неравенств в формуле (14). Зависимость определяющих параметров от времени рекомендуется принять линейной вида

$$x_i(t) = x_i^0 + s_i t \quad (i = 1, 2, \dots, m), \quad (15)$$

где x_i^0 – значение определяющего параметра с номером i в момент обследования; s_i – скорость изменения определяющего параметра с номером i ; t – время, исчисляемое от момента обследования.

Скорость изменения определяющего параметра можно установить на основании замеров этого параметра в натуре в два различных момента времени t_1 и t_2 . Для получения достоверных результатов временная база

$$\Delta t = t_2 - t_1 \quad (16)$$

должна быть значительной (измеряться годами).

Скорость изменения определяющего параметра x_i можно вычислить по формуле

$$s_i = \frac{x_i^2 - x_i^1}{\Delta t} \quad (i = 1, 2, \dots, m), \quad (17)$$

где x_i^1 – значение определяющего параметра x_i в момент времени $t = t_1$,
 x_i^2 – значение определяющего параметра x_i в момент времени $t = t_2$.

Рекомендуется выполнять как можно больше независимых измерений одного и того же определяющего параметра. В этом случае x_i^1 – среднее арифметическое результатов измерений параметра x_i в момент времени $t = t_1$, x_i^2 – то же, параметра x_i в момент времени $t = t_2$.

Если измерения сделать нельзя, скорость изменения определяющего параметра можно определить на основании теоретических или лабораторных исследований.

Оценку возможности продления срока эксплуатации конструкций по несущей способности необходимо выполнить в такой последовательности:

- установить несущую способность элемента (конструкции) по проектным данным F_{pr} ;
- на основании проведенного обследования установить параметры функции несущей способности $\Phi_u[x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t), y_1, y_2, \dots, y_n]$ для элемента и определить его несущую способность $F_{cr} = \Phi_u[x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t), y_1, y_2, \dots, y_n]$;
- по результатам расчета установить максимальные усилия F в элементе (конструкции). Сравнить

$$F_{cr} \geq F, \quad (18)$$

и если неравенство выполняется, срок эксплуатации не исчерпан;

- определить остаточный ресурс t_R с использованием допущения относительно линейной зависимости изменения контролируемых параметров от времени

$$t_R = \Delta t \frac{F_{cr} - F}{F_{pr} - F_{cr}}, \quad (19)$$

Если отказ возможен для двух и более элементов статически неопределимой системы, расчет системы необходимо выполнить с учетом перераспределения усилий после исключения разрушенных элементов из расчетной схемы.

Выводы

Предложена методика деформационного расчета изгибаемых элементов с учетом влияния упругопластических свойств материалов, возможности их деградации и термических воздействий. Рассмотрена возможность учета изменений геометрических параметров сечений элементов, физико-механических свойств материалов в зависимости от термических воздействий 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] Мости та труби. Правила проектування : ДБН В.2.3-14:2006. – Офіц. вид. – К. : Мінбуд України, 2006. – 359 с. – (Споруди транспорту. Державні будівельні норми).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] 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).
- [5] Голоднов А. И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках / А. И. Голоднов. – К.: Изд-во «Сталь», 2008. – 150 с.
- [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. – (Конструкції будівель і споруд. Державні будівельні норми України).
- [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. Державні будівельні норми України).

- [8] Милованов А. Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций / А. Ф. Милованов. – М. : Стройиздат, 1986. – 224 с.
- [9] Голоднов О. І. Визначення характеристик міцності арматури і бетону при високотемпературних впливах / [О. І. Голоднов, М. П. Гордіюк, І. А.Ткачук, М. М. Семиног] / Пожежна безпека: теорія і практика : матеріали міжнародної науково-практичної конференції. – Черкаси; АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2011. – С. 96–99.
- [10] Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ : ДБН В.1.2-14-2009. – Офіц. вид. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 32 с. – (Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Державні будівельні норми України).

Надійшла до редколегії 25.07.2014 р.