

УДК 624.072.002.2

Остаточный ресурс железобетонных балок, эксплуатирующихся в условиях агрессивной среды

¹Голоднов А.И., д.т.н., ²Слюсар Ю.Н.

¹ООО «Украинский институт стальных конструкций им. В.Н. Шимановского»,
Украина,

²Луганский национальный аграрный университет, Украина

Анотація. Запропоновано комплексну методику оцінки технічного стану та розрахунку залишкового ресурсу залізобетонних конструкцій, які експлуатуються на підприємствах з агресивним середовищем. Визначення технічного стану виконується в порядку, рекомендованому чинними нормативними документами. Основним етапом виконання робіт є розрахунок конструкцій з моделюванням встановленого технічного стану для визначення розрахункових зусиль. Розрахунок виконується методом скінченних елементів.

Аннотация. Предложена комплексная методика оценки технического состояния и расчета остаточного ресурса железобетонных конструкций, которые эксплуатируются на предприятиях с агрессивной средой. Определение технического состояния выполняется в порядке, рекомендованном действующими нормативными документами. Основным этапом выполнения работ является расчет конструкций с моделированием установленного технического состояния для определения расчетных усилий. Расчет выполняется методом конечных элементов.

Abstract. The complex procedure is offered for estimation of the technical state and calculation of residual resource of the reinforce-concrete constructions, which are exploited in the enterprises with aggressive environments. Determination of the technical state is executed in the order recommended by the normative documents in force. The basic stage of the works is calculation of constructions with modeling the set technical state for determination of rated efforts. The calculation is executed by the finite-element method.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, техническое состояние, остаточный ресурс, напряженно-деформированное состояние.

Введение. Постановка проблемы. Строительные конструкции, эксплуатирующиеся в условиях агрессивной среды действующих предприятий, в большинстве случаев получают повреждения бетона и арматуры. Следствием такого воздействия является уменьшение параметров сечения из-за коррозии бетона и арматуры.

Установление действительного технического состояния и резервов несущей способности представляет собой непростую задачу для статически неопределимых конструкций. В первую очередь, это связано с существенным перераспределением усилий вследствие изменения жесткости элементов.

Предлагаемая комплексная методика ориентирована на использование вычислительных комплексов типа ЛИРА, SCAD и т. п., что позволяет выполнить моделирование установленного по результатам обследования технического состояния, определить усилия в элементах, рассчитать остаточный ресурс конструкций, сделать обоснованные выводы о возможности дальнейшей эксплуатации или предусмотреть работы по усилению (защите) конструкций.

Действующая в стране нормативная база по проектированию и оценке технического состояния железобетонных конструкций [1–3] не дает возможности определить остаточный ресурс конструкций, а значит сделать правильные выводы о возможности дальнейшей эксплуатации.

Анализ последних достижений и публикаций. Анализ последних достижений и публикаций (решению таких проблем посвящены системные исследования, проводимые в НАН Украины, в университетах и научно-исследовательских институтах строительного профиля) свидетельствует о необходимости продолжения исследований в области продления срока службы строительных конструкций и определению их остаточного ресурса [4, 5]. Решение этой задачи возможно различными методами, в т. ч. и моделированием НДС конструкций методом конечных элементов. В ходе решения задачи моделируется появление и развитие трещин (характер и расположение трещин определяются по результатам обследования) путем изменения жесткостных характеристик элементов. Усилия, которые могли бы возникнуть в элементах усиления, определяются после изменения жесткостных характеристик или введения в расчетную схему дополнительных элементов.

Целью настоящих исследований является разработка комплексной методики оценки технического состояния и расчета остаточного ресурса железобетонных балок, эксплуатирующихся на предприятиях с агрессивной средой.

Основная часть. В соответствии с [6] ресурсом (техническим ресурсом) называется суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние, а остаточным ресурсом – суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние. Таким образом, основной задачей проведения работ по контролю технического состояния любого объекта является обоснование возможности эксплуатации, а также прогноз поведения и возможного отказа.

Техническое состояние конструкций, в зависимости от способности выполнять в течение прогнозируемого срока все функции, можно классифицировать как [1, 7, 8]:

- нормальное (I), когда фактические усилия в элементах и сечениях не превышают допускаемых по расчету, отсутствуют дефекты и повреждения, препятствующие нормальной эксплуатации или снижающие несущую способность или долговечность;
- удовлетворительное (II), когда по несущей способности состояние конструкций отвечает состоянию нормальному, но имеются дефекты и повреждения, снижающие долговечность конструкций, что требует проведения мероприятий по их защите;
- непригодное к эксплуатации (III), когда конструкция перегружена или имеют место дефекты и повреждения, которые свидетельствуют о снижении несущей способности, но по результатам расчетов и анализа повреждений можно обеспечить целостность конструкции на время проведения усиления;
- аварийное (IV), когда конструкции по виду дефектов находятся в состоянии III, но по результатам расчетов невозможно гарантировать целостность на период усиления, или возможен «хрупкий» характер разрушения.

Предполагается, что элементы и конструкции с самого начала своей эксплуатации, на протяжении всего жизненного цикла, по мере старения и деградации могут последовательно находиться в любом из 4-х технических состояний. Состояние сооружения в целом принимается по худшему состоянию элементов [1].

Основная цель оценки технического состояния – определение возможности дальнейшей эксплуатации конструкций при реализованных режимах и условиях. Этапами работ по оценке технического состояния являются [1, 7, 8]:

- анализ технической документации;
- визуальное обследование конструкций;
- инструментальное обследование конструкций;
- анализ результатов визуального и инструментального обследования;
- выполнение поверочных расчетов (при необходимости);
- оценка технического состояния;
- определение остаточного ресурса;
- выводы о возможности дальнейшей эксплуатации и рекомендации по усилению, замене или ремонту.

Для оценки технического состояния конструкций используются:

- критерий соответствия конструкции (сооружения) рабочей документации (размеры, армирование, конструктивные особенности);

— критерий соответствия конструкции (сооружения) определяющим параметрам технического состояния (наличие или отсутствие недопустимых дефектов, соответствие примененных материалов требованиям проекта и т. п.) и удовлетворения требованиям расчета по предельным состояниям I и II групп.

Техническое состояние конструкций при отсутствии дефектов может считаться нормальным или удовлетворительным, если не выполняются [8]:

— условие отказа конструкций:

$$F > F_u, \quad (1)$$

где F, F_u – величины соответственно наиболее возможного за время эксплуатации усилия в элементе от расчетных нагрузок и наименьшей несущей способности;

— условие достижения конструкцией предельных состояний II группы:

$$f > f_u, \quad (2)$$

где f, f_u – характерное перемещение конструкции (прогиб, угол поворота, крен и т. п.), соответственно определенное в результате расчета или обследования, и предельное, установленное нормами.

Параметрами предельных состояний для железобетонных элементов II группы, достижение которых рассматривается как отказ-препятствие, являются чрезмерное или продолжительное раскрытие трещин.

Предельные состояния этой группы вызывают временное прекращение или частичное нарушение условий нормальной эксплуатации, но, вместе с тем, четкая граница перехода в предельное состояние отсутствует.

Оценка технического состояния производится сопоставлением контролируемых параметров, определенных в ходе проведения обследований, с соответствующими проектными параметрами или определенными в результате расчетов. Переход конструкций в предельное состояние возможен, если достигли предельных величин такие параметры, как геометрические размеры (уменьшение вследствие коррозионного износа арматуры и бетона), прочность бетона, а узлы сопряжения, закладные детали и элементы крепления разрушены или повреждены.

Минимально допустимые величины контролируемых параметров устанавливаются по результатам расчетов изгибаемых или сжатых элементов по известным формулам сопротивления железобетона для определения несущей способности и сравнения ее с максимальным действующим усилием:

$$F_{cr} [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)] > F, \quad (3)$$

где $F_{cr} [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]$ – функция несущей способности элементов.

В качестве параметров $x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)$ принимаются размеры поперечного сечения (высота, ширина, площадь арматуры, величина защитного слоя бетона для арматуры) и прочность бетона и арматуры как функции времени. Определение величины действующего усилия F для статически определимых конструкций не представляет затруднений с принципиальной точки зрения. Для статически неопределимых конструкций из-за перераспределения усилий величина F определяется по результатам математического моделирования технического состояния, установленного по результатам обследования с использованием современных вычислительных комплексов типа ЛИРА, SCAD и др.

Переход неравенства (3) в равенство свидетельствует об исчерпании ресурса конструкции. Дальнейшая эксплуатация возможна после проведения работ по усилению (замене) или ремонту.

Предельное состояние конструкции по контролируемым параметрам считается достигнутым, если неравенства типа (4), (5) превращаются в равенство.

Расчет остаточного ресурса выполняется в такой последовательности:

1. Выполняется обследование конструкций и устанавливаются контролируемые параметры: размеры поперечного сечения, прочность бетона и арматуры, а также уточняется величина и характер действующей нагрузки.
2. Определяется несущая способность конструкции по данным проведенных обследований $F_{cr} [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]$. По результатам расчета устанавливаются максимальные усилия F . Сравниваются:

$$F_{cr} \geq F. \quad (4)$$

Если неравенство выполняется, ресурс не исчерпан.

3. Определяют остаточный ресурс t_R с использованием допущения о линейной зависимости изменения контролируемых параметров от времени

$$t_R = \Delta t \frac{F_{cr} - F}{F_{pr} - F_{cr}}; \quad (5)$$

$$\Delta t = t_1 - t_0, \quad (6)$$

где t_0 – дата начала эксплуатации конструкции или предыдущего обследования, год; t_1 – дата выполнения обследования и установления изменений контролируемых параметров, год; F_{pr} – несущая способность, определенная по проектным данным.

Определение остаточного ресурса целесообразно выполнять, по возможности, на большей базе (6). Более точное решение может быть получено при условии наличия результатов регулярных наблюдений.

Если неравенство (4) не выполняется, элемент находится в состоянии, непригодном к эксплуатации, или аварийном.

В качестве условного примера можно рассмотреть определение остаточного ресурса для железобетонной балки прямоугольного сечения с проектными размерами $b \cdot h = (400 \cdot 800)$ мм. Пролет балки 6 м. Площадь растянутой арматуры $A_s = 32,17 \text{ см}^2$, сжатой – $A'_s = 6,28 \text{ см}^2$. Класс бетона по прочности на сжатие С20/25 ($R_b = 14,5 \text{ МПа}$). Максимальное усилие в балке $F = 500 \text{ кН} \times \text{м}$. Несущая способность по проектным данным $F_{pr} = 757 \text{ кН} \times \text{м}$. В эксплуатации балка находится с $t_0 = 1973$ года.

В 1993 году по результатам обследования было установлено, что из-за коррозионного износа сечение балки составило $b \cdot h = (380 \cdot 800)$ мм, площадь растянутой арматуры – $A_s = 28,5 \text{ см}^2$, сжатой – $A'_s = 5,7 \text{ см}^2$, прочность бетона соответствовала классу по прочности С20/25. Несущая способность по данным обследования: $F_{cr} = 676 \text{ кН} \times \text{м}$.

Остаточный ресурс по формуле (5) для временной базы: $\Delta t = 1993 - 1973 = 20$ лет;

$$t_R = 20 \cdot \frac{676 - 500}{757 - 676} = 43,5 \text{ года.}$$

Мероприятий по усилению или защите выполнено не было. В 2013 году по результатам обследования было установлено, что из-за коррозионного износа сечение балки составляет $b \cdot h = (350 \cdot 800)$ мм, площадь растяну-

той арматури – $A_s = 25,1 \text{ см}^2$, сжатой – $A'_s = 4,8 \text{ см}^2$, прочность бетона соответствовала классу по прочности С20/25. Несущая способность по данным обследования: $F_{cr} = 597 \text{ кН}\times\text{м}$.

Остаточный ресурс по формуле (5) для временной базы: $\Delta t = 2013 - 1973 = 40$ лет.

$$t_R = 40 \cdot \frac{597 - 500}{757 - 597} = 24,3 \text{ года.}$$

Результаты определения величин остаточного ресурса для временных баз 20 и 40 лет с учетом 20 летнего срока эксплуатации практически совпали. Таким образом, при такой скорости коррозионного износа остаточный ресурс балки составляет примерно 24 года. Продление ресурса возможно путем защиты или усиления.

Остаточный ресурс можно определить с помощью зависимости, полученной методом наименьших квадратов. Для трех точек из рассматриваемого примера функция изменения несущей способности имеет вид прямой:

$$F = 757 - 4 \cdot t, \text{ кН}\times\text{м.} \quad (7)$$

Подставляя $F = 500 \text{ кН}\times\text{м}$, получено решение: $t = 64,3$ года, т. е. после 40 лет эксплуатации остаточный ресурс балки составляет $t_R = 24,3$ года.

Выводы

1. Предложена комплексная методика определения технического состояния и расчета остаточного ресурса железобетонных конструкций. Методика не противоречит основным положениям действующих нормативных документов по вопросам обследований, паспортизации и т. п. и дополняет их в части определения остаточного ресурса.
2. Предложенная методика позволяет сделать окончательные выводы о техническом состоянии и разработать обоснованные рекомендации по усилению, замене или защите конструкций.

Литература

- [1] Нормативні документи з питань обстежень, паспортизації, безпечної та надійної експлуатації виробничих будівель і споруд. – К. : Держбуд України, 1999. – 153 с.
- [2] Бетонні і залізобетонні конструкції. Основні положення : ДБН В.2.6-98:2009. – Офіц. вид. – К. : Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с. – (Конструкції будинків і споруд. Державні будівельні норми України).
- [3] Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ : ДБН В.1.2-14-2008. – Офіц. вид. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 43 с. – (Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Державні будівельні норми України).
- [4] Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин / Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України : зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2004–2006 рр.; наук. керівник – академік Б. Є. Патон. – К. : ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – 589 с.
- [5] Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин / Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України : зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2007 – 2009 рр.; наук. керівник – академік Б. Є. Патон. – К. : ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2009. – 709 с.
- [6] Надійність техніки. Терміни та визначення : ДСТУ 2860-94. – Офіц. вид. – К. : Держстандарт України, 1995. – 34 с. – (Державний стандарт України).
- [7] Голоднов А. И. Моделирование напряженно-деформированного состояния – составная часть работ по продлению ресурса строительных конструкций сооружений / А. И. Голоднов // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Дніпропетровськ : ПДАБтаА, 2004. – № 7–8. – С. 34–41.
- [8] Голоднов А. И. Определение остаточного ресурса железобетонных конструкций в условиях действующих предприятий / А. И. Голоднов // Будівельні конструкції : міжвідом. наук.-техн. зб. / НДІБК. – К. : НДІБК, 2005. – Вип. 62. – Т. 2. – С. 138–143.

Надійшла до редколегії 25.09.2013 р.