

УДК 624.072.002.2

## Обоснование продления срока эксплуатации стальных балок

<sup>1</sup>Фомина И.П., <sup>2</sup>Голоднов А.И., д.т.н.

<sup>1</sup>ПАО «ХК «Киевгорстрой», Украина

<sup>2</sup>ООО «Кринсталькон им. В.Н. Шимановского», Украина

**Анотація.** Викладено доцільність використання комплексної методики оцінки напружено-деформованого стану конструкцій на основі результатів візуального й інструментального обстеження та методів математичного моделювання технічного стану. Визначення технічного стану здійснюється в рекомендованому чинними нормативними документами порядку. Моделювання встановленого технічного стану для визначення розрахункових зусиль виконується методом скінченних елементів. Запропоновано методику розрахунку залишкового ресурсу сталевих балок з урахуванням встановленого технічного стану і обґрунтування можливості продовження експлуатації конструкцій.

**Аннотация.** Изложена целесообразность использования комплексной методики оценки напряженно-деформированного состояния конструкций на основе результатов визуального и инструментального обследования и методов математического моделирования технического состояния. Определение технического состояния осуществляется в рекомендованном действующими нормативными документами порядке. Моделирование установленного технического состояния для определения расчетных усилий выполняется методом конечных элементов. Предложена методика расчета остаточного ресурса стальных балок с учетом установленного технического состояния и обоснования возможности продления эксплуатации конструкций.

**Abstract.** Expediency to use the complex procedure for estimation of the deflected mode of constructions is expounded on the basis of visual and instrumental inspection results and methods of mathematical modeling the technical state. Determination of the technical state is carried out according to the procedure recommended by the normative documents in force. The modeling of the set technical state for determination of rated efforts is executed by the method of eventual elements. The procedure of residual resource calculation for of steel beams of is offered taking into account the determined technical state and grounded possibility to extend the service life of the constructions.

**Ключевые слова:** эксплуатация стальных балок, дефекты и повреждения, оценка технического состояния, остаточный ресурс, продление эксплуатации

**Введение. Постановка проблемы.** Наряду с новым строительством все чаще возникает необходимость в проведении работ по восстановлению эксплуатационной пригодности строительных конструкций зданий и сооружений. При этом необходимо решать вопросы, связанные с определением напряженно-деформированного состояния (НДС) и выполнением работ по продлению срока эксплуатации стальных конструкций зданий и сооружений.

Указанные работы необходимо решать в комплексе, т. е. прогнозу возможного продления срока эксплуатации должны предшествовать работы по оценке технического состояния. Эти работы необходимо выполнять в соответствии с требованиями действующих нормативных документов [1, 2].

Оценка технического состояния выполняется на основании результатов визуального и инструментального обследования, поверочных расчетов и т. п. Поверочные расчеты выполняются, как правило, с применением упрощенных расчетных схем без учета фактического состояния конструкций и прогноза деградации свойств материалов. Такой подход не позволяет смоделировать НДС сооружений в динамике развития процессов деградации и не дает возможности принять правильное решение о составе мероприятий, обеспечивающих возможность продления срока эксплуатации.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Как известно [1–4], диагностика и продление срока эксплуатации стальных конструкций зданий и сооружений представляет собой довольно сложную и трудоемкую проблему, решение которой в общем виде в настоящее время отсутствует. При ее решении необходимо определить механические свойства материала, учесть специфику работы конструкций под нагрузкой и возможное изменение их технического состояния, а также прогноз возможного развития неравномерных деформаций основания. Для решения поставленной проблемы необходимо разумно сочетать разрушающие и неразрушающие методы контроля, применять расчетные модели и вычислительные комплексы, которые позволят решить задачу с достаточной для практических целей точностью.

Решению отдельных аспектов отмеченной выше проблемы обоснования продления срока эксплуатации стальных конструкций, в т. ч. и с учетом влияния остаточных напряжений [5–7], посвящена настоящая статья.

**Цель работы.** Целью настоящих исследований является разработка предложений по моделированию действительного НДС сооружений с учетом их фактического технического состояния, а также применение расчетных моделей и вычислительных комплексов, позволяющих учесть неупругие свойства материалов и возможность развития неравномерных деформаций основания.

**Основная часть.** При оценке технического состояния стальных конструкций, зданий и сооружений в целом выполняются такие виды работ [3, 4]:

- анализ технической документации;
- предварительное установление параметров и критериев технического состояния;
- анализ отказов и повреждений;
- установление механизмов старения;
- визуальное обследование состояния конструкций;
- предварительная оценка технического состояния конструкций (сооружения) на основании анализа технической документации и визуального обследования;
- разработка программы инструментальных исследований (при необходимости);
- инструментальное обследование состояния конструкций;
- анализ результатов визуального и инструментального обследования;
- выполнение поверочных расчетов (при необходимости);
- подготовка заключения о техническом состоянии конструкций;
- рекомендации по приведению конструкций в пригодное для дальнейшей эксплуатации состояние;
- обоснование возможности продления срока эксплуатации.

Для оценки технического состояния стальных конструкций используются:

- критерии соответствия конструкции (сооружения) рабочей документации (размеры, конструктивные особенности и т. п.);
- критерии 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.

По результатам визуального обследования при обнаружении существенных дефектов, влияющих на несущую способность и долговечность конструкций, выполняется инструментальное обследование.

При инструментальном обследовании уточняют:

- физико-механические характеристики материалов;
- в поврежденных конструкциях – геометрические размеры элементов, состояние узлов сопряжения;
- прогибы и перемещения;
- трещины в основном металле и сварных швах;
- коррозию металла и т. п.;
- остаточное напряженное состояние (ОНС) в стальных конструкциях, возникшее в процессе изготовления (монтажа).

По результатам анализа технической документации, визуального и инструментального обследований технического состояния принимается решение о необходимости выполнения поверочного расчета.

Критериями для принятия решения о необходимости выполнения поверочных расчетов стальных конструкций, зданий и сооружений в целом являются:

- дефекты, влияющие на снижение несущей способности конструкций;
- снижение прочностных характеристик материалов в сравнении с проектными (устанавливаются путем проведения обследования конструкций методами разрушающего и неразрушающего контроля);
- уменьшение площади рабочего сечения элемента;
- превышение величин фактических эксплуатационных нагрузок их проектных значений;
- наличие технологических воздействий, не предусмотренных проектом;
- наличие ОНС, отрицательно влияющего на работу конструкций [5–7];
- развитие неравномерных деформаций основания.

В ходе выполнения поверочных расчетов предусматривается [3, 4]:

- математическое моделирование конструкций методом конечных элементов (МКЭ) с учетом установленного технического (деформированного) состояния;
- расчет конструкций и определение усилий и деформаций в элементах расчетной схемы;
- сравнение характера деформирования реального объекта и математической модели и уточнение, в случае необходимости, жесткостных характеристик материалов элементов модели;
- расчет уточненной модели, определение усилий и перемещений;
- проверка соблюдения условий, обеспечивающих несущую способность и деформативность строительных конструкций, зданий и сооружений в целом;
- окончательная оценка технического состояния конструкций, зданий и сооружений в целом;
- корректировка расчетной схемы сооружения с учетом установки элементов усиления и расчет новой модели;
- проектирование усиления.

Оценка технического состояния стальных конструкций (сооружения) производится путем сопоставлением контролируемых параметров, определенных в ходе проведения визуального и инструментального обследований, с параметрами, которые установлены в проектной или нормативной документации.

По результатам проведенных работ готовится заключение о техническом состоянии строительных конструкций и сооружения в целом и делается вывод о возможности продления срока эксплуатации или о необходимости выполнения работ по приведению конструкции в состояние, обеспечивающее эксплуатационную пригодность и работоспособность.

Критерии предельных состояний устанавливаются в соответствии с требованиями действующих нормативных документов [1, 2, 7–11]. Условие отказа конструкций (достижение предельных состояний первой группы) [3, 4, 10, 11]:

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

где  $F, F_u$  – соответственно наибольшее возможное за время эксплуатации усилие в элементе (конструкции) от расчетных нагрузок и его наименьшая несущая способность.

Условие достижения предельных состояний конструкций второй группы [3, 4, 11]:

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

где  $f, f_u$  – соответственно прогиб конструкции, определенный в результате расчета, и предельный прогиб, установленный нормами.

Элемент (конструкция) считается работоспособным, а его техническое состояние – нормальным или удовлетворительным, если условия (1) или (2) не выполняются.

Каждое из неравенств (1)–(2) можно преобразовать к виду:

$$\Phi_u [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t), y_1, y_2, \dots, y_n] < \Phi, \quad (3)$$

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 в соответствии с требованиями действующих нормативных документов с учетом изменения входящих параметров во времени;  $\Phi$  – действующее максимальное усилие (деформация) в элементе (конструкции).

В неравенстве (3) аргументы первой группы  $x_1, x_2, \dots, x_m$  зависят от времени, а аргументы второй группы  $y_1, y_2, \dots, y_n$  от времени не зависят и являются константами. Вид функциональной зависимости следует определить после алгебраических преобразований неравенства (3) с включением в состав аргументов всех величин, зависящих от времени, если это представляется возможным.

Параметры, входящие в неравенство (3), определяются по результатам анализа технической документации, визуального и инструментального обследования.

Оценку возможности продления срока эксплуатации по несущей способности следует выполнять в такой последовательности:

- определить несущую способность элемента 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 конкретного элемента (конструкции) и определить несущую способность этого элемента (конструкции)  
 $F_{cr} = \Phi_u[x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t), y_1, y_2, \dots, y_n]$ ;
- по результатам выполненного моделирования и расчетов определить максимальные усилия  $F$  в элементе (конструкции). Сравнить:

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

- и если неравенство выполняется, срок эксплуатации конструкции не исчерпан;
- определить остаточный ресурс  $t_R$  с использованием допущения относительно линейной зависимости изменения контролируемых параметров от времени

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

где  $\Delta t$  – временная база, лет.

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.

В качестве первого примера выполнено расчетное обоснование возможности продления срока эксплуатации по несущей способности стальной балки пролетом 6 м. Сечение – прокатный двутавр № 20,

площадь  $A=26,8 \text{ см}^2$ ,  $W=184 \text{ см}^3$ . Несущая способность по проектным данным  $M_{pr} = F_{pr} = 4500 \text{ кг}\cdot\text{м}$ . Максимальное усилие, действующее в сечении балки, –  $M_{\max} = F = 4000 \text{ кг}\cdot\text{м}$ . Балка находится в эксплуатации с 1993 года.

В 2013 году по результатам обследования было установлено, что из-за коррозионного износа сечение уменьшилось, и его площадь составила  $24,5 \text{ см}^2$ , а момент сопротивления  $W=168 \text{ см}^3$ . Несущая способность балки по результатам обследования с учетом износа –  $M_{cr} = F_{cr} = 4120 \text{ кг}$ .

Проверяется условие (4). Сравниваются:  $F_{cr} = 4120 \text{ кН} \geq F = 4000 \text{ кН}$ . Неравенство выполняется, значит, несущая способность балки не исчерпана.

Определяется остаточный ресурс при такой скорости коррозии  $t_R$  с использованием допущения относительно линейной зависимости изменения контролируемых параметров от времени:

$$\Delta t = 2013 - 1993 = 20 \text{ лет};$$
$$t_R = 20 \cdot \frac{4120 - 4000}{4500 - 4000} = 4,8 \text{ года.}$$

Таким образом, при такой скорости коррозии балка может эксплуатироваться 4,8 года. Остаточный ресурс конструкции может быть увеличен за счет проведения работ по восстановлению защитного покрытия или усиления.

### **Выводы**

Наряду с новым строительством все чаще возникает необходимость в проведении работ по восстановлению эксплуатационной пригодности строительных конструкций зданий и сооружений. При этом должны быть решены вопросы, связанные с оценкой технического состояния, определением НДС конструкций и выполнением работ по обоснованию возможности продления срока эксплуатации строительных конструкций.

Предложена методика оценки технического состояния стальных конструкций, включающая анализ технического состояния, проведение визуального и инструментального обследования, математическое моделирование НДС конструкций с применением МКЭ. Методика позволяет сделать выводы о техническом состоянии конструкций и рассчитать их остаточный ресурс с учетом возможной деградации материала и уменьшения рабочей площади сечения. Выполнение расчетов с использованием предложенной методики позволит также разработать комплекс мероприятий для последующего переназначения ресурса.

## **Литература**

- [1] Оценка технического состояния стальных конструкций эксплуатируемых производственных зданий и сооружений : ДБН 362-92. – Офіц. вид. – К. : Держбуд України, 1993. – 47 с. – (Державні будівельні норми).
- [2] Нормативні документи з питань обстежень, паспортизації, безпечної та надійної експлуатації виробничих будівель і споруд. – К. : Держбуд України, 1999. – 152 с.
- [3] Голоднов А. И. Моделирование напряженно-деформированного состояния – составная часть работ по продлению ресурса строительных конструкций сооружений / А. И. Голоднов // Вісн. Придніпр. Держ. акад. будів. та арх. – Дніпропетровськ : ПДАБтаА, 2004. – № 7–8. – С. 34–40.
- [4] Голоднов А. И. Определение остаточного ресурса железобетонных конструкций в условиях действующих предприятий / А. И. Голоднов // Буд. Конструкції : міжвідом. наук.-техн. зб. / НДІБК. – К. : НДІБК, 2005. – Вип. 62. – Т. 2. – С. 138–143.
- [5] Masubuchi K. Analysis of welded structures. Residual stresses, distortion and their consequences / K. Masubuchi. – London : Pergamon Press, 1980. – 642 p.
- [6] Голоднов А. И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках / А. И. Голоднов. – К. : Вид-во «Сталь», 2008. – 150 с.
- [7] Мости та труби. Правила проектування : ДБН В.2.3-14:2006. – Офіц. вид. – К. : Мінбуд України, 2006. – 359 с. – (Споруди транспорту. Державні будівельні норми).
- [8] 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).
- [9] Навантаження і впливи. Норми проектування : ДБН В.1.2-2:2006. – Офіц. вид. – К. : Мінбуд України, 2006. – 60 с. – (Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Державні будівельні норми України).
- [10] 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.
- [11] Прогини і переміщення. Вимоги проектування : ДСТУ Б В.1.2-3:2006. – Офіц. вид. – К. : Мінбуд України, 2006. – 10 с.

*Надійшла до редколегії 27.05.2013 р.*