



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

№3, ТОМ 13 (2007) 123-129

УДК 624.072.002.2

(07)-0139-1

ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОДОВЖЕННЯ ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

О.І. Голоднов

*Відкрите акціонерне товариство “Український науково-дослідний та проектний інститут
сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського”*

(ВАТ “УкрНДІпроектстальконструкція ім. В.М. Шимановського”),

просп. Визволителів, 1, Київ, 02660, Україна.

E-mail: golodnow@ukr.net

Отримана 19 квітня 2007; прийнята 18 червня 2007

Анотація. Тематика статті присвячена вирішенню актуального питання – оцінці технічного стану і можливості продовження експлуатації будівельних конструкцій. Викладено доцільність використання комплексної методики оцінки напружено-деформованого стану конструкцій на основі результатів візуального та інструментального обстеження і методів математичного моделювання технічного стану. Визначення технічного стану здійснюється в рекомендованому чинними нормативними документами порядку. Моделювання усталеного технічного стану для визначення розрахункових зусиль виконується методом скінченних елементів. Запропоновано методику визначення залишкового ресурсу конструкцій з урахуванням усталеного технічного стану й обґрунтування можливості продовження експлуатації конструкцій. Методика може бути використана при проектуванні конструкцій для підприємств з агресивним середовищем і територій із можливим розвитком нерівномірних деформацій основи. Визначення залишкового ресурсу конструкцій дозволить зробити остаточні висновки про можливість подальшої експлуатації і рекомендувати підсилення або захист від дії агресивного середовища.

Ключові слова: експлуатація конструкцій, дефекти та пошкодження, оцінка технічного стану, залишковий ресурс, продовження експлуатації.

ОБОСНОВАНИЕ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА ЭКСПЛУАТАЦИИ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А.И. Голоднов

*Открытое акционерное общество “Украинский научно-исследовательский и проектный институт
стальных конструкций имени В.Н. Шимановского”*

(ОАО “УкрНИИпроектстальконструкция им. В.Н. Шимановского”),

просп. Освободителей, 1, Киев, 02660, Украина.

E-mail: golodnow@ukr.net

Получена 19 апреля 2007; принята 18 июня 2007

Аннотация. Тематика статьи посвящена решению актуального вопроса – оценке технического состояния и возможности продления эксплуатации строительных конструкций. 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 усталого

технического состояния для определения расчетных усилий выполняется методом конечных элементов. Предложена методика расчета остаточного ресурса конструкций с учетом установленного технического состояния и обоснования возможности продления эксплуатации конструкций. Методика может быть использована при проектировании конструкций для предприятий с агрессивной средой и территорий с возможным развитием неравномерных деформаций основания. Определение остаточного ресурса конструкций позволит сделать окончательные выводы о возможности дальнейшей эксплуатации и рекомендовать усиление или защиту от действия агрессивной среды.

Ключевые слова: эксплуатация конструкций, дефекты и повреждения, оценка технического состояния, остаточный ресурс, продление эксплуатации.

SUBSTANTIATION OF A SERVICE LIFE EXTENSION FOR STEEL STRUCTURES

O.I. Golodnov

*Open Joint-Stock Company "V.Shimanovsky Ukrainian Research and Design Institute of Steel Construction",
1, Osvoboditelei Ave., 02660 Kyiv, Ukraine.
E-mail: golodnow@ukr.net*

Received 19 April 2007; accepted 18 June 2007

Abstract. The paper is devoted to the solution of an urgent problem of estimating operating conditions and a possibility of extending the operation life of building structures. There is considered a practicability of using a complex procedure of estimating a structure stressed-deformed state relying on the results of visual and instrumental examination and mathematical simulation methods aimed at the evaluation of operating conditions. Determination of operating conditions is carried out according to the normative documents in force. Simulation of the established operating conditions to determine rated forces is done by the finite elements method. There is put forward a procedure of calculating a residual life of structures keeping in mind the established operating conditions and a possibility of extending structure service life. This procedure can be used on designing structures for enterprises with a hostile environment and for areas where the development of uneven deformations in the base is possible. Determination of the residual life of structures will make it possible to come to final conclusions as to the potentials of a further use and to prepare recommendations for reinforcement or protection from the hostile environment action.

Keywords: operation of structures, defects and damages, estimation of operating conditions, residual life, extension of operation.

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 строительных 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.

Работа является одним из этапов исследований, выполняющихся в ОАО «УкрНИИпроект-стальконструкция им. В.Н. Шимановского» по проблеме продления срока эксплуатации строительных конструкций, в т.ч. конструкций АЭС.

Анализ последних достижений и публикаций

Как известно [1-4 и др.], диагностика и продление срока эксплуатации строительных 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, 6, 7 и др.], 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 конструкций и сооружений в целом выполняются такие виды работ [1-4 и др.]:

- 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 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.

При отсутствии или незначительных дефектах, обнаруженных при визуальном обследовании, а также соответствии конструкции (построенного сооружения) технической документации, может быть сделана окончательная оценка технического состояния.

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 др.;
- 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 конструкций 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, 6, 7 и др.];
- развитие неравномерных деформаций основания.

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

- математическое моделирование конструкций 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 конструкций (сооружения) производится путем сопоставления 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 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, 7-13] и др. Условие отказа конструкций (достижение предельных состояний первой группы)

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

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 [10, 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; Φ – 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

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

где Dt – 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 стойки высотой 2,6 м. Расчетная высота стойки 2,75 м. Сечение – из парных швеллеров №18, сваренных в коробочку, площадь – 41,4 см². Максимальная гибкость $\lambda=50$. Материал – сталь Ст3 ($R_y = 240$ МПа). Максимальное усилие в стойке $F=750$ кН. Несущая способность по проектным данным $F_{pr} = 850$ кН. Стойка находится в эксплуатации с 1986 года.

Расчет выполнен без учета влияния ОНС. В 2006 году по результатам обследования было установлено, что из-за коррозионного износа сечение уменьшилось и его площадь составила 38,5 см². Несущая способность стойки по результатам обследования с учетом износа – $F_{cr} = 787$ кН.

Проверяется условие (4). Сравниваются: $F_{cr} = 787$ кН $\geq F = 750$ кН.

Неравенство выполняется, значит, несущая способность стойки не исчерпана.

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

$$Dt = 2006 - 1986 = 20 \text{ лет};$$

$$t_R = 20 \cdot \frac{787 - 750}{850 - 787} = 11,75 \text{ лет.}$$

Таким образом, при такой скорости коррозии стойка может эксплуатироваться 11,75 лет. Остаточный ресурс конструкции может быть увеличен за счет проведения работ по восстановлению защитного покрытия или усиления.

В качестве второго примера рассмотрено определение остаточного ресурса для стальной двутавровой колонны. Колонна (сварной двутавр 50Ш1-С) расчетной длины в плоскости

Таблица 1. Расчет остаточного ресурса колонны.

Определяемые параметры	Вычисление коэффициента продольного изгиба φ		
	по методике [8]	по методике [7]	по методике [6]
Площадь сечения, A , см ²	150	150	150
Коэффициент продольного изгиба, φ	0,805	0,73	0,694
Несущая способность по проектным данным, F_{pr} , кН	2900	2630	2500
Площадь сечения после 20 лет эксплуатации, A , см ²	129	129	129
Коэффициент продольного изгиба после 20 лет эксплуатации, φ	0,805	0,73	0,668
Несущая способность по данным обследования, F_{cr} , кН	2490	2260	2070
Остаточный ресурс, t , лет	23,9	14,1	3,3

меньшей жесткости 4,2 м была запроектирована под нагрузку $F=2000$ кН. В эксплуатации колонна находится с $t_0 = 1987$ года. Первоначальное сечение: пояса – (300x16) мм, стенки – (450x12) мм, катета шва $k_f = 8$ мм, $i_y = 6,93$ см, площади поперечного сечения $A=150$ см², гибкости $l_y = 60$. Расчетное сопротивление стали $R_s = 240$ МПа. Величина остаточных сжимающих напряжений на кромках поясов $\sigma_{res,com}^{(t)} = 49$ МПа.

За время эксплуатации колонна получила коррозионный износ поясов и стенки. По состоянию на $t_1 = 2007$ год сечение поясов составило (300x14) мм, стенки – (450x10) мм, $i_y = 6,97$ см, площадь поперечного сечения $A=129$ см², гибкость $l_y = 60$. Временная база $\Delta t = 20$ лет. Расчет остаточного ресурса с применением различных методик приведен в табл. 1.

Следовательно, при такой скорости коррозионного износа остаточный ресурс колонны, с учетом влияния ОНС, составляет 3,3 года. Без учета влияния ОНС остаточный ресурс составляет 23,9 лет.

Выводы

1. Наряду с новым строительством все чаще возникает необходимость в проведении ра-

бот 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 обновлению возможности продления срока эксплуатации строительных конструкций.

2. Предложена методика оценки технического состояния, 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 наличия ОНС, возможной деградации материала и развития неравномерных деформаций основания. Показано, что игнорирование фактом наличия ОНС в сварных двутавровых колоннах может привести к переоценке несущей способности и ошибкам в принятии решения о возможности продления срока эксплуатации. Выполнение расчетов с использованием предложенной методики позволит также разработать комплекс мероприятий для последующего переназначения ресурса.

Литература

1. ДБН 362-92. Оценка технического состояния стальных конструкций эксплуатируемых производственных зданий и сооружений. – К.: Государственный комитет Украины по делам архитектуры, строительства и охраны исторической среды, 1993. – 47 с.
2. Нормативні документи з питань обстежень, паспортизації, безпечної та надійної експлуатації виробничих будівель і споруд. – Київ: Держбуд України, 1999. – 152 с.
3. Голоднов А.И. Моделирование напряженно-деформированного состояния – составная часть работ по продлению ресурса строительных конструкций сооружений // Вісн. Придніпр. Держ. академії будівництва та архітектури. – Дніпропетровськ: ПДАБтаА, 2004. – № 7-8. – С. 34-40.
4. Голоднов А.И. Определение остаточного ресурса железобетонных конструкций в условиях действующих предприятий // 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. – London: Pergamon Press, 1980. – 642 p.
6. Голоднов А.И. К вопросу учета остаточных напряжений в сечениях сжатых двутавровых стержней при их расчетах // Автомат. сварка. – 2001. – № 5. – С. 8-10.
7. ДБН В.2.3-14:2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування / Мінбуд України. – К.: Мінбуд України, 2006. – 359 с.
8. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
9. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування / Мінбуд України – Київ: Мінбуд України, 2006. – 60 с.
10. ГОСТ 27751-88 (СТ СЭВ 384-87). Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету. – Введен впервые; Введ. 01.07.88. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 6 с.
11. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Прогни і переміщення. Вимоги проектування. – Введ. вперше; Введ. 01.01.2007. – К.: Мінбуд України, 2006. – 10 с.
12. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings / European Standard ENN 1993-1-1. – Brussels: Management Centre, 2005.
13. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings / European Standard ENN 1994-1-1. – Brussels: Management Centre, 2004.

Голоднов Олександр Іванович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач науково-дослідним і проектним відділом будівельних конструкцій ВАТ “УкрНДІпроектстальконструкція ім. В.М. Шимановського”. Наукові інтереси: залишкові напруження та їхній вплив на роботу будівельних конструкцій; будівельна механіка стержневих систем, які взаємодіють з деформованою основою; технічний стан і залишковий ресурс конструкцій.

Голоднов Александр Иванович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий научно-исследовательским и проектным отделом строительных конструкций ОАО “УкрНИИпроектстальконструкция им. В.М. Шимановского”. Научные интересы: остаточные напряжения и их влияние на работу сварных конструкций; строительная механика стержневых систем, взаимодействующих с деформируемым основанием; техническое состояние и остаточный ресурс конструкций.

Golodnov Olexander Ivanovych – Dr. Sc. (Eng), a senior scientist, Head of the Research and Design Department of Building Structures of the OJSC “V. Shimanovsky UkrRDIsteelconstruction”. His scientific interests are residual stresses and their influence upon the behavior of welded structures; structural mechanics of pivotal systems interacting with a deformed base; operating conditions and a residual resource of structures.