

# ОЦЕНКА СРОКОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТАЛЬНЫХ ПОДКРАНОВЫХ БАЛОК

**А.А. Свентиков доктор технических наук, доцент; М.Л. Кикаа**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

*Аннотация.* В статье приводится описание вероятностной оценки сроков эксплуатации подкрановых стальных балок. В качестве вероятностного критерия напряженно-деформированного состояния используется технический отказ. Для его вычисления применяется метод двух моментов. Предложенная методика оценки надежности апробирована на примере расчета стальной подкрановой балки пролетом 6 м со средним и тяжелым режимом работы. В качестве критериев выступали предельное значение риска и допустимое. На основании оценки технического риска определены границы сроков эксплуатации подкрановых балок со средним и тяжелым режимом работы.

*Ключевые слова:* стальная конструкция, подкрановая балка, мостовой кран, усталостная прочность, долговечность, надежность, технический риск, срок эксплуатации.

## ВВЕДЕНИЕ



*Свентиков  
Андрей Александрович*



*Кикаа  
Мохаммед Латиф*

Металлические конструкции нашли широкое применение в современном промышленном и гражданском строительстве. Сроки эксплуатации сооружений с использованием данного типа строительных конструкций во многих случаях имеют значительную величину. Вследствие этого вопросы прогнозирования надежности строительных металлических конструкций имеют большое значение как при проектировании новых зданий и сооружений, так и для оценки возможности дальнейшей работоспособности конструкций, находящихся в эксплуатации. В первом случае прогноз надежности подтверждает правильность принятых конструктивных решений, а во втором дает ответ на вопрос о том, возможно ли продление эксплуатации, на какой срок и при каких условиях.

Также отметим, что большое число стальных конструкций в условиях эксплуатации подвергаются воздействию переменных нагрузок. Как показывает строительная практика, подобного типа нагрузки могут привести к разрушению конструкции при напряжениях существенно меньших, чем расчетное сопротивление стали. Такое разрушение принято называть «усталостным». К числу наиболее подверженных усталостному разрушению строительных элементов относятся подкрановые конструкции. Необходимо отметить, что большинство работ по оценке сроков службы конструкций не рассматривает вероятностную составляющую.

На основании указанного целью настоящей работы является разработка вероятностной методики оценки напряженно-деформированного состояния стальных подкрановых конструкций с учетом усталостной прочности стали.

### 1. Моделирование усталостной прочности стали

В области исследований многоциклового усталости материалов описание долговечности как функции от характеристик цикла напряжений является общепринятым классическим описанием [1,2]. Кривая усталости в данном случае носит название кривой Веллера (Wöhler). Достаточно часто в зарубежной литературе подобный подход носит название SN подхода, а кривая усталости при таком описании – SN кривой (название связано с аббревиатурой от названий осей координат на кривой Веллера: напряжение vs. число циклов до отказа).

Для аналитического описания кривых усталости стали, как правило, используют зависимость Басквин (Basquin):

$$\sigma_{MAX} = C \cdot N^b, \quad (1)$$

где  $\sigma_{MAX}$  - предел выносливости материала;  $N$  - число циклов;  $C, b$  - постоянные зависимости.

Для сталей постоянные зависимости Басквина в большинстве случаев принимаются следующие:

$$C = 1,62; b = -0,085 \quad [1,2].$$

В качестве циклической нагрузки в настоящей работе использована нагрузка от мостового крана. Число циклов нагружения мостового крана за срок его службы  $C_T$  определим согласно технических требований по их эксплуатации [3]:

$$C_T = C_c \cdot n_{дн} \cdot t_k, \quad (2)$$

где  $C_c$  - среднесуточное число циклов работы крана;  $n_{дн}$  - число рабочих дней в году;  $t_k$  - нормативный срок службы крана.

В зависимости от числа циклов  $C_T$  определяется класс использования крана (С0÷С8).

Нагружение крана характеризуется следующим коэффициентом  $K_p$ :

$$K_p = \sum \left( \frac{Q_i}{Q_{ном}} \right)^3 \cdot \frac{C_i}{C_T}, \quad (3)$$

где  $Q_i$  - масса груза, перемещаемого краном с числом цикла  $C_i$ ;  $Q_{ном}$  - номинальная грузоподъемность крана.

Режим работы крана (К) зависит от класса использования (С) и класса нагружения (Q) [3].

## 2. Методика расчёта надёжности строительных конструкций

Основной целью требований к конструктивной безопасности строительной системы является предотвращение аварий и обрушений здания или сооружения в целом или составляющих его конструктивных частей. В настоящее время под надёжностью понимается свойство системы и ее элементов выполнять установленные показатели в заданных пределах в течение требуемого времени (согласно ГОСТ 27751-88 «Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчёту»). В качестве основной количественной характеристики, оценивающей данное свойство, используется вероятность безотказной работы и вероятность отказа. Вероятность отказа или разрушения также часто назы-

вают «техническим риском» [4,5,6,7]. Условием отказа будет выполнение неравенства:

$$\tilde{G} = \tilde{R} - \tilde{Q} < 0, \quad (4)$$

где  $\tilde{G}$  - резерв несущей способности или отказ;  $\tilde{R}, \tilde{Q}$  несущая способность и нагрузочный эффект.

Вероятностью отказа будет являться вероятность реализации неравенства (4):

$$P_f = \int_0^\infty R(x) \cdot P_Q(x) dx. \quad (5)$$

Зависимость (2) для случая распределения случайных величин по нормальному закону распределения представляет собой так называемый интеграл Гаусса [4].

Для вычисления вероятности  $P_f$  используем метод двух моментов [4,5]. Согласно данному подходу принимаем, что случайные величины  $R$  и  $Q$  подчиняются нормальному закону распределения случайных величин. Тогда можно записать:

$$P_f = \frac{1}{2} - \Phi\left(\frac{x-G_m}{S_G}\right) = \frac{1}{2} - \Phi(\beta), \quad (6)$$

где  $\Phi$  - интеграл вероятности Гаусса;  $-\beta = \frac{x-G_m}{S_G}$

характеристика безопасности или индекс надёжности (согласно А.Р. Ржаницина [4]: число стандартов, укладываемых в интервале от  $\bar{G} = 0$  до  $\bar{G} = G_m$ ).

Синицыным А.П. [6] было предложено оценивать безопасную работу строительной конструкции по так называемому показателю риска:

$$Q_f = \lg \frac{1}{P_f}. \quad (7)$$

Для анализа напряженно-деформированного состояния конструкции учитываются следующие два условия:

1) предельное значение коэффициента безопасности принято 3. Превышение данного значения означает разрушение конструкции, что соответствует «недопустимому состоянию» конструкции.

2) согласно европейским нормам проектирования [8], уровень риска аварии  $R$  оценивается по следующей зависимости:

$$R = 3,5 - C - D, \quad (8)$$

где  $C$  - параметр населенности или посещаемости (в работе принят 1,5);  $D$  - конструктивный параметр, зависящий от вида разрушения (в настоящей работе принят 0).

В том случае, если риск превысит допустимое значение согласно зависимости (8), то состояние конструкции необходимо будет ограничивать.

### 3. Исследование сроков службы

В качестве расчетной модели мы принимаем подкрановые балки со следующими режимами работы: средний режим и тяжелый режим. Их технические характеристики:

1) средний режим работы, подкрановая балка длиной 6 м, грузоподъемность 32 т (тип балки Б6-8-1 согласно серии 1.426.2-7).

Нормативный срок службы крана 25 лет. Нормативное число циклов  $C_T = 2,25 \cdot 10^5$ . Согласно технической документации, группа режима работы 4К; класс использования С4, класс нагружения Q2.

2) средний режим работы, подкрановая балка длиной 6 м, грузоподъемность 100 т (тип балки ДБ6 согласно серии КЭ-01-57).

Нормативный срок службы крана 25 лет. Нормативное число циклов  $C_T = 7,5 \cdot 10^5$ . Согласно технической

Предел выносливости стали

Таблица 1.

Продолжительность эксплуатации, лет	Средний режим эксплуатации		Тяжелый режим эксплуатации	
	Число циклов	Предел выносливости, МПа	Число циклов	Предел выносливости, МПа
5	$4.5 \cdot 10^4$	241.09	$1.5 \cdot 10^5$	217.65
10	$9 \cdot 10^4$	227.30	$3 \cdot 10^5$	205.20
15	$1.35 \cdot 10^5$	219.60	$4.5 \cdot 10^5$	198.24
20	$1.8 \cdot 10^5$	214.29	$6 \cdot 10^5$	193.45
25	$2.25 \cdot 10^5$	210.27	$7.5 \cdot 10^5$	189.82

Вероятностная оценка риска подкрановых балок

Таблица 2.

Продолжительность эксплуатации, лет	Средний режим эксплуатации			Тяжелый режим эксплуатации		
	$P_f, 10^{-4}$	$\beta$	$Q_f$	$P_f, 10^{-4}$	$\beta$	$Q_f$
5	0,44	3,921	4,355	0,80	3,780	4,097
10	1,75	3,576	3,758	2,60	3,475	3,585
15	3,79	3,368	2,422	4,90	3,295	3,310
20	6,46	3,218	3,190	7,70	3,168	3,114
25	9,68	3,100	3,014	10,7	3,069	2,971

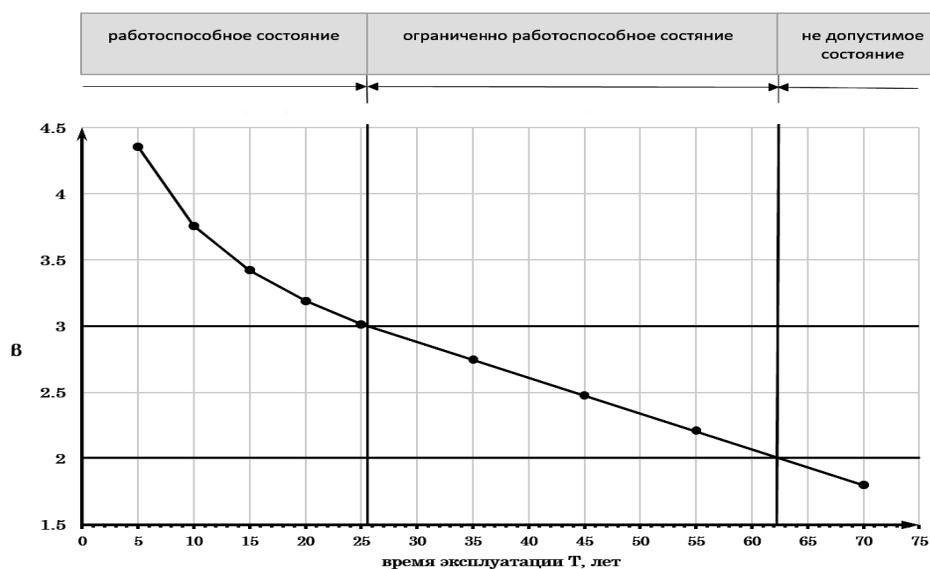


Рис. 1. График зависимости показателя риска от времени эксплуатации (средний режим эксплуатации работы крана)

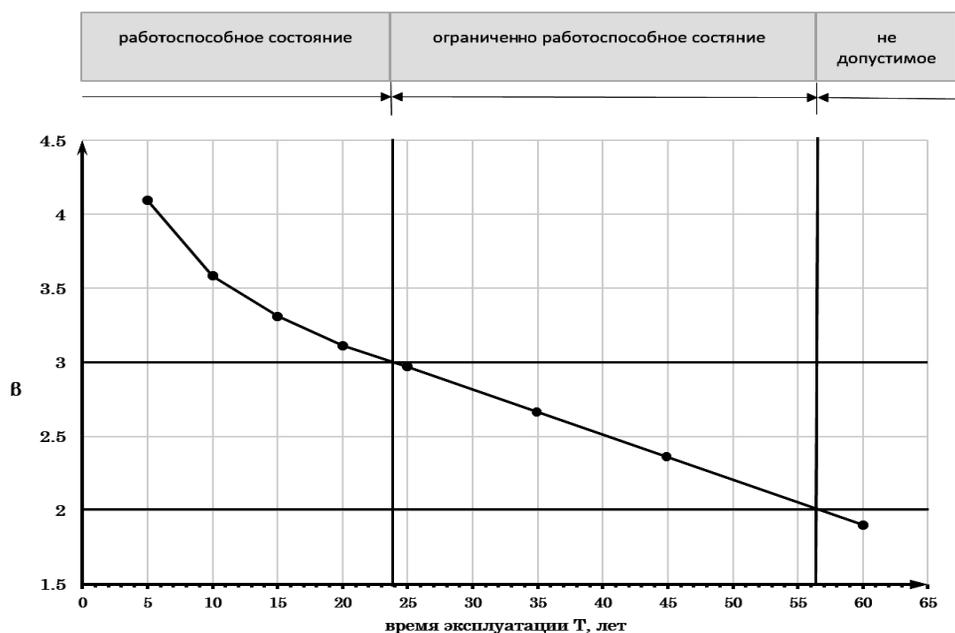


Рис. 2. График зависимости показателя риска от времени эксплуатации (тяжелый режим эксплуатации работы крана)

документации, группа режима работы 7К; класс использования С6, класс нагружения Q3.

С использованием зависимости (1) и по исходным данным вычислим предел выносливости стали. Результаты вычислений приведены в табл. 1

Используя зависимости (6), (7), (8), вычислены вероятность отказа, индекс надежности и риск аварии. Для нормативных сроков службы результаты вычислений приведены в табл. 2.

Для оценки сроков эксплуатации подкрановых балок с использованием зависимости (8) построены графики изменения риска аварии во времени в соответствии с ранее описанной методикой оценки.

Из анализа полученных результатов видно, что работоспособная зона работы подкрановых балок составляет порядка 25 лет, что соответствует их нормативному сроку службы.

Предельный срок эксплуатации подкрановых балок составляет от 57 до 62 лет. Это соответствует техническому риску порядка  $1,84 \div 1,88 \cdot 10^{-2}$ . Такое значение риска следует считать достаточно существенным, что говорит о большой надежности подкрановых стальных балок.

## ВЫВОДЫ

1. Предложена вероятностная оценка сроков службы стальных подкрановых балок с учетом усталостной прочности стали.

2. Срок службы подкрановых балок в работоспособном состоянии как для среднего режима работы, так и для тяжелого режима сопоставим с нормативным сроком и составляет порядка 25 лет.

3. Критический срок службы стальных подкрановых балок составляет от 57 до 62 лет, что говорит о высокой надежности данных конструктивных элементов.

## Список литературы:

1. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов: в 2. ч. Ч. 1. — Киев, Наукова думка, 1987. — 320 с.
2. Берендеев Н.Н. Сопротивление усталости. Основы. Учебно-методическое пособие. — Н. Новгород, Нижегородский госуниверситет, 2010. — 64 с.
3. Справочник по кранам / под ред. М.М. Гохберта. — М., Наука, 1988. — Т. 1.
4. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. — М., Стройиздат, 1978. — с. 239.
5. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании. — М., изд-во АСВ, 1998. — с. 304.
6. Синицын А.П. Расчет конструкций на основе теории риска. — М., Стройиздат, 1985. — с. 304.
7. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. — М., Изд-во АСВ, 2007. — с. 256.

## REFERENCE

1. Troshchenko V.T., Sosnovsky L. A. Fatigue Resistance of metals and alloys: 2. part 1. — Kyiv, Naukova Dumka, 1987. — 320 p.
2. Berendeys N.N. Fatigue. Basics. Educational and methodical manual. — N. Novgorod, Nizhny Novgorod state University, 2010. — 64 p.
3. A guide to cranes, ed. by M. M. Gombert. — Moscow, Science, 1988. — Vol. 1.
4. Rzhantsyn A. R. Theory of calculation of building structures on duty. — M., Stroizdat, 1978.— 239 c.
5. Rayzer V.D. Theory of reliability in structural design.— Moscow, Publishing house ABH, 1998.— 304 p.
6. Sinitsyn A.P. calculation of structures on the basis of risk theory. — M., Stroizdat, 1985.— 304 s.
7. Perelmuter A.V. Selected problems of reliability and safety of building structures.— M., Publishing house of ABH, 2007.— 256 p.