

РАСЧЕТ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ С УЧЕТОМ РИСКА

В.И. Кычкин, Л.А. Рыбинская

Пермский государственный технический университет

Рассмотрен расчетный метод определения остаточного ресурса металлоконструкции грузоподъемных механизмов, основанный на совместном использовании численных процедур и данных обследования машин и результатов испытания материалов элементов изделий. Дается описание оценки метода с привлечением мнений экспертов по уровню риска принимаемых решений.

Современные методы проектирования, расчета, моделирования, производства металлоконструкций средств механизации и существующие нормы позволяют реализовывать качественную продукцию для рынка предложений грузоподъемных механизмов (ГПМ).

В значительной степени качество продукции ГПМ обеспечивается надежностью. Надежность как показатель является свойством, характеризующим ГПМ на стадии проектирования и производства, а проявляется этот показатель при эксплуатации машин у определенного потребителя и в определенных условиях. Факт надежности машин в реальных условиях эксплуатации называют «эксплуатационной надежностью» [1]. Это сохранение работоспособности конструкции и механизмов при использовании в течение определенного промежутка времени. В качестве меры продолжительности может быть выбран любой неубывающий параметр, характеризующий длительность эксплуатации ГПМ. Наиболее универсальной единицей является единица времени.

В соответствии с ГОСТ 27.002–89 суммарная наработка конструкции определяется как ресурс. Ресурс тесно связан со сроком службы ГПМ, определяющим переход конструкции в предельное состояние. Нормирование ресурса требует измерение ресурса как в единицах наработки, так и в единицах времени. Для ГПМ, находящихся в эксплуатации, основным индикатором является индивидуальный остаточный ресурс. Если измерение осуществляется в единицах времени, то это

продолжительность функционирования ГПМ от некоторого начала до достижения времени, в котором состояние металлоконструкций машины достигнет предельного уровня. При этом учитываются межремонтные периоды в зависимости от индивидуального технического состояния. Расчет индивидуального остаточного ресурса можно рассматривать как систему управления процессом технического обслуживания и функционирования ГПМ. Однако любая методика расчета остаточного ресурса имеет свои преимущества и недостатки, влияющие на величину фактического ресурса и его допустимый уровень.

Возможны ситуации, когда специалисты, оценивая ресурс определенного типа ГПМ, получают существенные расхождения итоговых оценок в абсолютном виде [5]. Таким образом, возникает необходимость оценки риска прогнозирования остаточного ресурса ГПМ, представляющая собой установление предельно допустимых остаточных сроков эксплуатации объекта при возрастающем риске и, соответственно, выдаче рекомендаций о мерах по повышению безопасности. Прогноз всегда содержит элементы вероятностного характера, поэтому в случае расчета остаточного ресурса с учетом возникающих при этом рисков представляет собой математическую формализацию интуитивных представлений, используемых специалистами-экспертами при решении вопроса о продолжении эксплуатации конкретных ГПМ.

С учетом вышеизложенного рассмотрим практическую задачу оценки риска принятия решения о сроках эксплуатации ферменной конструкции мостового крана, схема которого приведена на рис. 1.

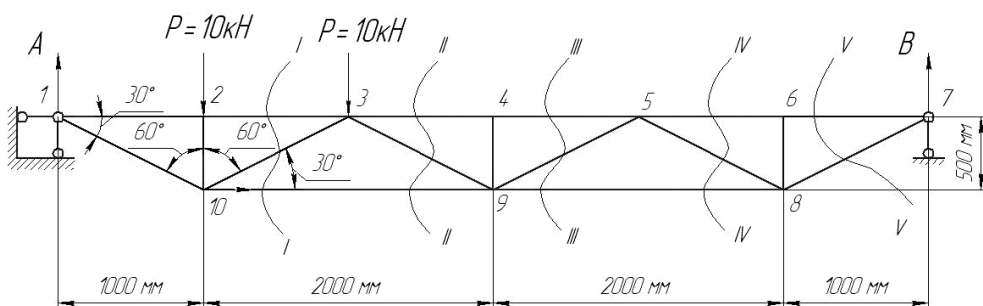


Рис. 1. Схема фермы мостового крана

На первом этапе анализа осуществим необходимые расчеты нагрузок и уровни напряжений в элементах фермы. Базируясь на методе

вырезания узлов получим значения усилий в элементах фермы, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета нагрузок в элементах фермы

Номер стержня	N_{1-2}	N_{1-10}	N_{2-3}	N_{2-10}	N_{3-10}	N_{3-9}	N_{3-4}	N_{9-10}	
Усилие, кН	-30	30	-30	-10	-10	-10	-30	40	
Номер стержня	N_{4-5}	N_{4-9}	N_{5-8}	N_{5-9}	N_{5-6}	N_{6-7}	N_{6-8}	N_{7-8}	N_{8-9}
Усилие, кН	-30	0	-10	10	-10	-10	0	10	20

В процессе эксплуатации конструкция, в общем случае, подвергается воздействию сложного спектра внешних нагрузок. При анализе напряженного состояния элементов конструкции ГПМ необходимо использовать статистические данные о материале, компонентах и элементах фермы, нагрузках, воздействиях и условиях климатического характера и т. п. При недостаточном количестве статистических данных необходимо привлекать экспертов.

По рекомендованным значениям параметров [1] эксплуатационной надежности были проведены исследования влияния факторов на остаточный ресурс металлоконструкции по двум детерминированным методикам.

Прогнозирование остаточного ресурса ГПМ на основе зависимости $P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right]$, где $P(t)$ – вероятность отказа; $\lambda(t)$ – интенсивность отказов, не исследуется в данной статье. В этом случае прогнозирование надежности осуществляется на основе случайных процессов наработки металлоконструкции до отказа, при котором особенности протекания режимов эксплуатации во времени и их статистические характеристики хотя и устойчивы, но вызывают трудности анализа состояния конкретного образца металлоконструкции [8]. В таких случаях могут быть применены численные методы, в частности метод статистических испытаний, базирующийся на моделировании случайных величин.

Основной первой методики (схема 1) является постоянство произведения числа циклов нагружения элемента металлоконструкции и амплитуды напряжений, возведенных в степень с учетом принципа линейного суммирования повреждений:

$$\sum_{i=0}^n \sigma^m N = \text{const},$$

где N – число циклов нагружения, m – показатель степени усталостной кривой.

Напряжения в наиболее нагруженном элементе фермы крана считаем изменяющимися по симметричному циклу $R = -1$.

По этому методу остаточный ресурс вычисляется как разность наработки крана до возникновения усталостного повреждения и фактической наработки с начала эксплуатации по формуле [1]:

$$N_{\text{ост}}^I = k_{RA}N_I - k_{UI}N_U, \quad (1)$$

где $N_1 = \frac{N_0}{\zeta_e} \left(\frac{\gamma_n \gamma_d \gamma_m \sigma_{-1K}}{k_\alpha \sigma_{ef}} \right)^m$, $N_0 \sim 2 \cdot 10^6$ – число циклов нагружения;

$\gamma_d = 0,9$ – коэффициент условий работы; $\gamma_n = 0,85$ – коэффициент надежности по назначению конструкции и ее элемента; $\gamma_m = 0,95$ – коэффициент надежности по характеристике материала; $\sigma_{-1k} = k_t \sigma_{-1KB}$ – значение предела выносливости сварного шва (k_t – коэффициент влияния толщины основного элемента сварного узла; σ_{-1KB} – базовый предел выносливости); $\zeta_e = 1,5$ – значение коэффициента циклического нагружения; $k_\alpha = 0,85$ – конструктивный коэффициент;

$m = \frac{3,3}{\lg \sigma_B - \lg \sigma_{RK}}$ – показатель степени усталостной кривой;

$\sigma_{ef} = \sigma_{-1k} \left(\frac{\sigma_{\max}}{\gamma_d \sigma_{RK1}} \right)^{m_1/m}$ – эквивалентное напряжение, где σ_{RK1} , m_1 –

предел выносливости и показатель наклона усталостной кривой; σ_{\max} – наибольшее напряжение в расчетной зоне, вычисленное по нагрузкам при наиболее неблагоприятном варианте нагружения.

Второй вариант расчета остаточного ресурса (схема 2) построен на основании рекомендаций системы расчета по предельным состояниям. Наиболее опасным предельным состоянием металлоконструкции является хрупкое разрушение, которое может наблюдаться и при весьма низком уровне напряжений [6]. Для территории России, где преобладают пониженные температуры, вероятность хрупкого разрушения велика.

В данном случае оценка остаточного ресурса основана на предположении о том, что при обследовании ГПМ могла быть не замечена трещина в основном сечении, размер a_0 которой зависит от методики обследования и доступности основных элементов для обзора и дефектоскопии. Остаточный ресурс определяется как наработка металлоконструкции, в течение которой возможная трещина, развиваясь под действием эксплуатационного нагружения, достигнет предельно допустимого размера a_c :

$$N_{\text{ост}}^H = k_{RB} N_a, \quad (2)$$

где $N_a = \frac{\gamma_{dN} (\gamma_n \gamma_{m*} \Delta K_*)^q}{(0,5q-1) \xi_{ea} V_* (\xi_K \Delta \sigma_1 \sqrt{\pi})^q} \left[\frac{1}{a_0^{0,5q-1}} - \frac{1}{a_c^{0,5q-1}} \right]$, $\gamma_{dN} = 0,7$ – коэффициент надежности методики расчета; $\gamma_n = 0,85$ – коэффициент надежности по назначению конструкции или ее элемента; $\gamma_{m*} = 1$ – коэффициент надежности по характеристике материала; $\Delta K_* = (0,05\sigma_B - 9)$ – размах КИН; $q = 3$ – показатель степени; $\xi_{ea} = \sum_i [\mu_i (\frac{\sigma_i}{\Delta \sigma_1})^q]$ – коэффициент циклического нагружения; $V_* = 10^{-8}$ м/цикл – скорость развития трещины; $\Delta \sigma_1 = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ – размах напряжений; a_0 – наибольший размер трещины, которая может быть пропущена (не замечена) при обследовании конструкции; a_c – максимальный безопасный размер трещины для рассчитываемого элемента конструкции при максимальных эксплуатационных нагрузках.

В приведенных формулах $N_{\text{ост}}^I$, $N_{\text{ост}}^H$ – значения расчетного остаточного ресурса по схемам 1 и 2; N_I – расчетный ресурс – наработка СДМ от начала эксплуатации до возникновения в расчетной зоне усталостной трещины с характерным размером 5–10 мм; N_U – наработка крана за период с начала эксплуатации до момента обследования; N_a – запас живучести конструкции, равный наработке ГПМ, в течение кото-

рой происходит развитие трещины от размера a_0 до a_c ; k_{RA}, k_{RB} – коэффициенты надежности по расчетному ресурсу в случаях 1 и 2; k_U – коэффициент надежности по фактической наработке.

Были проведены расчеты остаточного ресурса элемента N_{10-9} крановой фермы. Результаты вычислений представлены на рис. 2.

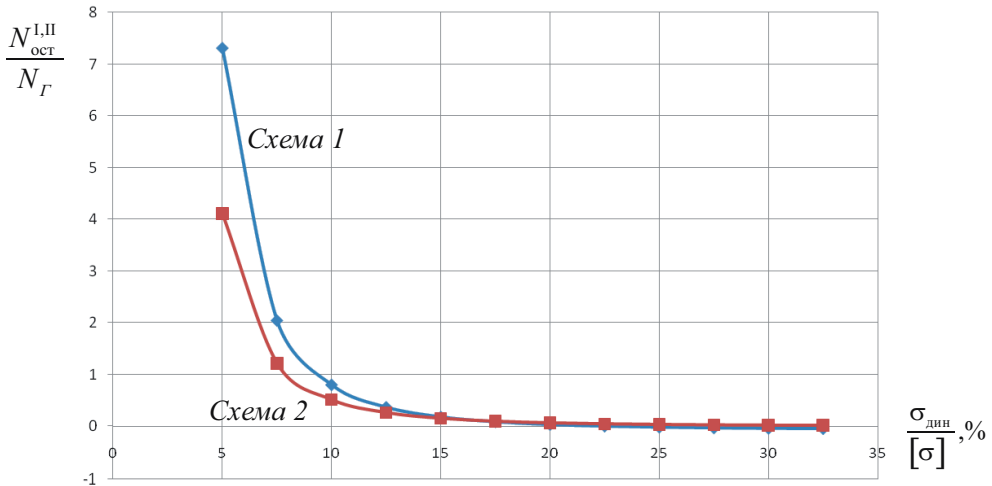


Рис. 2. График зависимости остаточного ресурса от динамических напряжений (N_T – срок службы крана по проекту, $[\sigma]$ – допускаемые напряжения)

Зоны интенсивного трещинообразования совпадают с зонами концентрации напряжений. Следовательно, одной из причин снижения ресурса и разрушения являются повышенные напряжения.

Анализ зависимостей $N=f(\sigma)$ позволяет формулировать особенности принятия решений. Можно указать на три диапазона: первый – малые циклические напряжения (до 5–7 % от статического уровня) и значительные различия в уровне остаточного ресурса (до 25 %); второй – средние напряжения, значения остаточного ресурса по схеме 1 и 2 отличаются на 5 % и, наконец, третий диапазон – практически полные совпадения результатов при высоких циклических напряжениях и малых ресурсах.

Расчет по схеме 1 с учетом коэффициента циклического нагружения дает зависимости остаточного ресурса от уровня циклических напряжений, представленные на рис. 3.

Уточненная оценка напряженного состояния ГПМ методами конечных элементов (МКЭ) позволяет выявить количественную картину распределения внутренних силовых факторов.

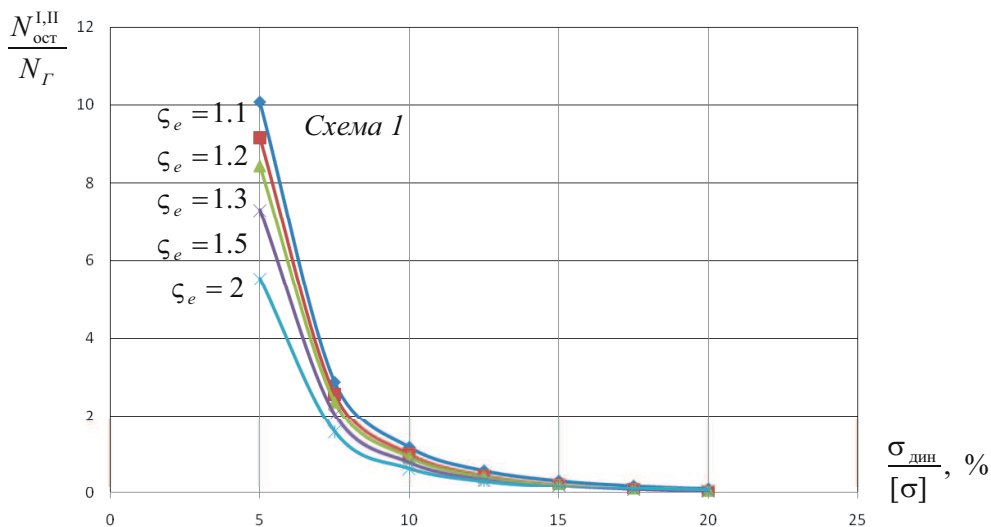


Рис. 3. График зависимости остаточного ресурса от уровня циклических напряжений

Расчет остаточного ресурса конструкции предполагает получение достоверной информации о состоянии металла и действующих на ГПМ нагрузок. В этом случае диагностирование технического состояния металлоконструкции методами неразрушающего контроля (НК) устанавливает механизм и количественную оценку развития повреждаемости. Остаточный ресурс ГПМ определяется методами визуального контроля, акустической эмиссии, магнитной памяти металла, ультразвукового контроля, магнитопорошкового метода, капиллярным, радиографическим, радиоскопическим методом, с применением углеродных волокон, с использованием датчиков интегрального типа (ДДИТ) и другие [4, 7].

Качество прогноза остаточного ресурса ГПМ можно оценить с использованием теории риска в несколько этапов [2]. В первую очередь определяется состав факторов, влияющих на абсолютное значение остаточного ресурса. Эти факторы включены в соотношения (1, 2). Затем экспертным методом определяется значимость каждого фактора, которая отражает степень его влияния на уровень расчетного остаточного ресурса ГПМ (табл. 2). На заключительном этапе выбираем варианты сравнения (это расчеты по схеме 1 и по схеме 2).

Данные опроса экспертов

№, п/п	Фактор	Обозначение фактора	Достоверность фактора [P(x) _j]	Характеристика метода	
				Схема 1 [a _{1j}]	Схема 2 [a _{2j}]
1	Коэффициент надежности по расчетному ресурсу	k_{RA}, k_{RB}	9	10^{-8}	10^{-8}
2	Коэффициент надежности по назначению конструкции или ее элемента	γ_n	8	$2 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$
3	Коэффициент надежности по характеристике материала	γ_n	8	$2 \cdot 10^{-8}$	10^{-8}
4	Толщина элемента узла	t	9	$5 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-8}$
5	Временное сопротивление	σ_B	7	$8 \cdot 10^{-8}$	10^{-7}
6	Напряжения в расчетной зоне	$\sigma_{max}, \sigma_{min}$	4	$8 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$
7	Коэффициент циклического нагружения	ζ_e	5	$9 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$
8	Число циклов нагружения	N	7	$5 \cdot 10^{-7}$	–
9	Показатель угла наклона усталостной кривой	m	6	$4 \cdot 10^{-6}$	–
10	Коэффициент асимметрии	R	7	$2 \cdot 10^{-7}$	–
11	Наработка крана	Z_U	6	$3 \cdot 10^{-6}$	–
12	Критическое значение КИН	K_c	7	-	$2 \cdot 10^{-6}$
13	Скорость развития трещины	V^*	4	-	$5 \cdot 10^{-6}$
14	Начальный размер трещины	a_0	3	-	$5 \cdot 10^{-7}$
15	К-гарировка	ξ_K	6	-	$2 \cdot 10^{-7}$
16	$\sum P(x)_j \cdot a_{ij}$	–	-	0,000125	0,000119

Уровень риска (R) определяем с помощью метода экспертных оценок путем суммы произведений достоверности фактора ($P(x)_j$) и характеристики метода (a_{ij}): $R = \sum_{j=1}^{15} P(x)_j \cdot a_{ij} (i=1, 2)$.

Определив уровень риска по двум схемам, можно найти относительный риск:

$$r = \frac{R}{[R]},$$

где $[R]$ – частота риска, для мостовых кранов можно принять $[R]=2,6 \cdot 10^{-4}$.

Тогда по схеме 1: $r_1 = \frac{0,000125}{2,6 \cdot 10^{-4}} = 0,482$, по схеме 2:
 $r_2 = \frac{0,000119}{2,6 \cdot 10^{-4}} = 0,458$.

Полученные результаты позволяют принять решение о степени приближения мнений экспертов к оценке остаточного ресурса металлоконструкции и уменьшить зону неопределенности уровня возможности дальнейшей эксплуатации крана.

Приведенный пример расчета остаточного ресурса элемента ферменной конструкции с использованием двух схем алгоритмов и комплекса возможных параметров усталостного и хрупкого разрушений показывает возможность оценки риска безопасности эксплуатации металлоконструкции и ориентирует на выполнение работ по повышению точности и достоверности обоснования рекомендаций по эксплуатации ГПМ в соответствии с ГОСТ Р 53006–2008 [3].

Список литературы

1. Соколов С.А. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин: учебное пособие. – СПб.: Политехника, 2005. –423 с.
2. Саульев В.К. Математическая теория принятия решений. – М.: МАИ, 1974.–39 с.
3. ГОСТ Р53006–2008. «Техническая диагностика. Оценка ресурса потенциально опасных объектов промышленности и транспорта на основе экспресс-методов. Общие требования»

4. Кузьмин А.Н., Филиппов С.Ю. Акустико-эмиссионная дефектоскопия грузоподъемных механизмов// Технология машиностроения. – 2009. – №1. – С. 36–38.

5. Болотин В.В. Прогнозирование и нормирование ресурса машин// Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2009. – № 7. – С. 3–10.

6. Вершинский А.В., Ряднова Л.В., Базарбаев С.А. Несущая способность узлов крановых металлоконструкций при пониженных температурах: обзор. – М.: ЦНИИТЭИТЯЖМАШ, 1992. – 32 с.

7. Сызранцев О.Н., Голофаст С.Л., Троценко Д.А. Диагностика остаточного ресурса несущих элементов металлоконструкций машин// Известия вузов. Машиностроение. – 2005. – № 6. – С. 25–30.

8. Болотин В. В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1971.– 255 с.

Получено 16.08.2010