УДК 699.841

© Н. Н. Панасенко, д-р техн. наук, профессор
(Астраханский государственный технический
университет)

E-mail: psastr@mail.ru

© А. В. Синельников, канд. техн. наук, доцент
(Астраханский государственный архитектурно-
строительный университет)

E-mail: laex@bk.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-5-151-159

© N. N. Panasenko, Dr. Sci. Tech., Professor
(Astrakhan State Technical University)

E-mail: psastr@mail.ru

© A. V. Sinelschikov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Astrakhan State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: laex@bk.ru

РАЗВИТИЕ СТАНДАРТА СТО 032.03.1 ПО ОЦЕНКЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПОРТАЛЬНЫХ КРАНОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

DEVELOPMENT OF STANDARD STO 032.03.1 ON ESTIMATION OF RESIDUAL RESOURCE OF PORTAL CRANES BY THE METHOD OF FINITE-ELEMENT COMPUTING EXPERIMENT

Рассмотрены тенденции оценки остаточного ресурса грузоподъемных кранов, предложено развитие методики расчета остаточного ресурса кранов, представленной в СТО 032.03.1–2008 Ассоциации портов и судовладельцев речного транспорта, на основе расчета параметров характерных технологических циклов грузовых операций кранов методом пространственных конечных элементов. Приведены результаты расчета остаточного ресурса портального крана «АБУС» грузоподъемностью 16 т по трем предельным состояниям.

Ключевые слова: остаточный ресурс, нормативно-технические документы, портальный кран, метод конечных элементов, предельные состояния, дефекты несущих металлоконструкций крана, остаточный срок службы.

The article presents analysis results referring to the trends in estimation of the residual resource of portal cranes presented in STO 032.03.1-2008 of the Association of Ports and Shipowners of the River Transport (AP-SRT) based on calculation of the parameters of characteristic technological cycles of cranes' cargo operations using the method of spatial finite elements. The results of the calculation of the residual life of the portal crane «ABUS» with a lifting capacity of 16 tons for three limiting states are submitted.

Keywords: residual resource, normative and technical documents, portal crane, finite element method, limiting states, defects of load-carrying metal structures of the crane, residual service life.

Большинство методик^{1,2,3,4} [1], посвященных расчетно-аналитическим способам оценки остаточного ресурса грузоподъемных кранов

(далее — кранов), зона эксплуатации которых определяется как опасный производственный объект (ОПО)⁵, свидетельствует о двух факторах: 1) актуальность проблемы, 2) необходимость дальнейшего совершенствования методик.

В связи с этим авторы настоящей работы преследуют цель не только кратко обобщить состояние проблемы определения ресурса грузоподъемных кранов⁶, но и усовершенствовать способ

¹ РД 09-102-95. Методические указания по определению остаточного ресурса потенциально опасных объектов, подконтрольных Госгортехнадзору России / Утв. пост. ГТН России 17.11.95 № 57. 7 с.

² РД 10-112-01–2004. Рекомендации по экспертному обследованию грузоподъемных машин. Общие положения / Одобрены НТС по подъемным сооружениям РТН, прот. от 26.04.2004. 74 с.

³ ИСО 4301/1–86. Краны грузоподъемные. Классификация // ПБ 10-382-00 «Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов». М.: РТН, 1999. С. 154–157.

⁴ СТО Ассоциации портов и судовладельцев речного транспорта (АПСРТ) 032.03.1–08. Оценка остаточного ресурса портальных кранов / Согласовано РТН 11.10.07. М.: ТК 032 ПК 3, 2008. 35 с. — Далее в статье обозначается как СТО 032.03.1.

⁵ ФНП «Правила безопасности ОПО, на которых используются подъемные сооружения» / Приказ РТН от 12.11.13 № 533. 69 с. (ред. от 12.04.2016).

⁶ ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения. М.: Госстандарт, 1989. 27 с.

ее решения, представленный в СТО 032.03.1⁷, на основе теории МКЭ. По наиболее общему подходу ресурс кранов оценивается либо по числу рабочих циклов подъема груза [2], либо по числу циклов максимальных приведенных к симметричному циклу переменных напряжений, возникающих в расчетных зонах (РЗ) конструкции крана за характерный технологический цикл (ХТЦ) [3].

Согласно действующим российским⁸ и международным нормам ISO 4301⁹, группу режима определяет сочетание класса использования (U_0-U_9), который характеризуется числом циклов работы крана за нормативный срок службы (C_T), и режима нагружения (Q_1-Q_4), характеристикой которого является коэффициент распределения нагрузок

$$K_p = \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_i}{C_T} \left(\frac{Q_i}{Q_H} \right)^m \right], \quad (1)$$

где C_i — количество циклов работы крана с грузом массой Q_i ; C_T — общее число циклов работы крана за срок службы; Q_H — номинальная грузоподъемность; $m = 3$ — показатель степени усталостной кривой; n — число перегружаемых грузов массой Q_i .

Величину C_p называют характеристическим числом [4]:

$$C_p = K_p C_T. \quad (2)$$

Фактическое текущее характеристическое число (2) с учетом (1) определяется из формулы

$$C_{\text{тек}} = C_T K_p = C_T \cdot \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_i}{C_T} \left(\frac{Q_i}{Q_H} \right)^3 \right], \quad (3)$$

в которой разность нормативной¹⁰

$$C_n = Q_{(1...4)} \cdot U_{(0...9)} \quad (4)$$

и фактической наработки (3) является резервом либо остаточным ресурсом его наработки:

$$C_{\text{рез}} = C_n - C_{\text{тек}}. \quad (5)$$

Следует отметить, что согласно ИСО 4301/1–86 коэффициент нагружения K_p (1) связан с режимом нагружения Q_1-Q_4 выражением

$$K_p = a 2^Q, \quad (6)$$

где $a = 0,0625$; $Q = 1...4$.

Наряду с этим характеристическое число C_p из (2) связано с классом использования крана U формулой¹¹

$$C_p = b 2^U, \quad (7)$$

в которой $b = 0,16 \cdot 10^5$, $U = 0,9$.

С другой стороны, (7) выражается через срок службы крана в годах L и число циклов нагружения за один год C_T :

$$C_p = C_T L. \quad (8)$$

С учетом того, что группа классификации режима работы крана A , режим нагружения Q и класс использования U связаны зависимостью

$$A = Q + U - 2, \quad (9)$$

и учетом (1) и (6)–(8) паспортный режим работы крана A_n равен

$$A_n = \frac{\lg \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i}{Q_{\max}} \right)^m \frac{C_i}{ab}}{\lg 2} - 2, \quad (10)$$

а режим (10), выраженный через срок службы крана L , примет вид

$$A_n = \frac{\lg (K_p C_T L \cdot 10^{-3})}{\lg 2} - 2, \quad (11)$$

откуда получим нормативный срок службы крана L_n , указанный в РД 10-112-01-04¹²,

$$L_n = \frac{2^{(A_n+2)} \cdot 10^3}{K_p C_T}. \quad (12)$$

Если обозначить фактический срок эксплуатации крана в годах как $L_{\text{ф}}$, остаточный ресурс крана (в годах) с учетом (12) будет [5]

$$L_{\text{ост}} = L_n - L_{\text{ф}} = \frac{2^{(A_n+2)} \cdot 10^3}{K_p C_T} - L_{\text{ф}}. \quad (13)$$

Кроме того, из (11) и (12) на стадии эксплуатации можно определить действительный режим работы крана A_p по его фактической загруженности и нормативному сроку службы L_n (12):

$$A_p = 3,33 \lg (K_p C_{\text{гф}} L_n) \cdot 10^{-3} - 2, \quad (14)$$

где $C_{\text{гф}}$ — фактическое число циклов нагружения крана за год

$$C_{\text{гф}} = C_{\text{сут}} \text{ДВ}, \quad (15)$$

⁷ СТО Ассоциации портов и судовладельцев речного транспорта (АПСРТ) 032.03.1–08. Оценка остаточного ресурса порталных кранов / Согласовано РТН 11.10.07. М.: ТК 032 ПК 3, 2008. 35 с.

⁸ ФНП «Правила безопасности ОПО, на которых используются подъемные сооружения» / Приказ РТН от 12.11.13 № 533. 69 с. (ред. от 12.04.2016).

⁹ ИСО 4301/1–86. Краны грузоподъемные. Классификация. С. 154–157.

¹⁰ Там же.

¹¹ Там же.

¹² РД 10-112-01–2004. Рекомендации по экспертному обследованию грузоподъемных машин. Общие положения / Одобрены НТС по подъемным сооружениям РТН, прот. от 26.04.2004. 74 с.

где D — количество дней работы крана в год; B — коэффициент, учитывающий достоверность информации о загруженности крана, предоставляемой владельцем крана.

В настоящей работе установлено, что, в отличие от кранов мостового типа, применительно к стреловым самоходным и порталным кранам, имеющим переменные грузовые характеристики и, более того, уравновешенные стреловые системы, при анализе K_p (1) допущения¹³, представленные формулами (4)–(9), далеки от действительности, так как циклическая нагруженность разных элементов их конструкций зависит от множества переменных эксплуатационных состояний таких кранов. Поэтому, если известны наибольшие напряжения в отдельном расчетном элементе конструкции крана $\sigma_{\max}$ при расчете на циклическую прочность, то наработка за срок службы крана по СТО 032.03.1 будет

$$N_L = \left(\frac{\sigma_{rk}}{\sigma_{\max}} \right)^m \frac{N_6 \xi}{N_3}, \quad (16)$$

где σ_{rk} — неограниченный предел выносливости материала; N_6 — базовое число циклов напряжений; N_3 — число циклов эквивалентных напряжений, которые приводят расчетный элемент конструкции крана к разрушению; ξ — коэффициент пропорциональности между годовой наработкой $n_3^{(1)}$ отдельного элемента и годовой наработкой крана $n_{кр}^{(1)}$:

$$\xi = n_{кр}^{(1)} / n_3^{(1)}. \quad (17)$$

Рассмотрим поставленную задачу, когда любой расчетный элемент конструкции крана находится в условиях сложного сопротивления под действием нагрузок на его несущую конструкцию, а внутренние усилия в расчетных элементах вычисляются в результате силового анализа системы крана с помощью МКЭ, в основе которого для кранов как статических систем лежит известное матричное уравнение статического деформационного равновесия [6] со многими (n) степенями свободы (рис. 1):

$$[K(\{Q\}_i)]\{V\}_{i-1} = \{R_p\}. \quad (18)$$

Внутренние усилия, возникающие в стержневом КЭ под действием внешней нагрузки на текущем шаге итерационного решения, вычисляются по матричной формуле:

$$\{Q\}_i = [S]_{14 \times 14} [K^{jk}]_{14 \times 14}^{xyz} (\{v\}_{Oxyz}^{jk})_i, \quad (19)$$

где $[K^{jk}]_{14 \times 14}^{xyz}$ — матрица жесткости jk -го КЭ, скорректированная с учетом кинематических условий его закрепления; $\{v\}_{Oxyz}^{jk}$ — вектор вычисленных из (18) узловых (j и k) перемещений КЭ в местной системе координат; $[S]_{14 \times 14}$ — знаковая матрица блочного вида.

Итерационный метод расчета на основе (18) учитывает нелинейности расчетной модели крана, обусловленные как свойствами материала КЭ (физическая нелинейность), так и присутствием в расчетной модели нелинейных КЭ (например, демпфер механизма изменения вылета стрелы, зазор-ограничитель опорно-поворотного устройства и др.) [6].

Эквивалентные напряжения в любой точке сечения КЭ jk определяются по третьей теории прочности:

$$\sigma_j^{(k)} = \sqrt{(\sigma^{(k)})^2 + 4(\tau^{(k)})^2}, \quad (20)$$

где нормальные и касательные напряжения $\sigma^{(k)}$ и $\tau^{(k)}$ вычисляются, будучи обусловленными 7-компонентным вектором внутренних усилий (19).

Изменения эквивалентных напряжений (20) в наиболее нагруженных элементах несущих металлоконструкций рассмотрим на примере порталного крана «АБУС» грузоподъемностью 16 т, зав. № 1071987 (рис. 1, 2) в течение ХТЦ, для которого напряжения определены, в отличие от приближенных формул (А.12)–(А.23) СТО 032.03.1, методом конечно-элементного вычислительного эксперимента и приведены на рис. 3, а, причем при разработке расчетной модели крана «АБУС» учтен опыт оценки эксплуатационной надежности порталных кранов, накопленный СТО 032.03.1, ВНИПТМАШ и СПБГУВК^{14,15}, ООО «НИИ краностроения»¹⁶ и др., кранов заводов Kranbau Eberswalde выпуска после 1970 г. («Альбатрос», «Сокол», «Кондор») и ПТО им. Кирова (КПП 12,5/20, 16/32).

¹⁴ РД 10-112-01-2004. Рекомендации по экспертному обследованию грузоподъемных машин. Общие положения / Одобрены НТС по подъемным сооружениям РТН, прот. от 26.04.2004. 74 с.

¹⁵ РД 10.112-04-98. Методические указания по проведению обследования порталных кранов с целью определения возможности их дальнейшей эксплуатации. М.: ВНИПТМАШ-СПБГУВК, 1998. 83 с.

¹⁶ РД 10-112-02-09. Методические рекомендации по экспертному обследованию грузоподъемных машин. Часть 2. Краны стреловые общего назначения. М.: ООО «НИИКраностроения», 2009. 35 с.

¹³ ИСО 4301/1-86. Краны грузоподъемные. Классификация. С. 154-157.

Рис. 1. Расчетно-статическая конечно-элементная модель портального крана «АБУС» г/п 16 т зав. № 1071487 з-да Kranbau Eberswalde 1965 г. выпуска, материал — Сталь3сп ГОСТ 380-71*, масса — 169,5 т: КЭ — 830, степеней свободы 11 466; а — общий вид расчетных зон; б, в — наиболее нагруженные элементы металлоконструкции крана

Рис. 2. Расчетно-статические модели ХТЦ портального крана «АБУС» г/п 16 т л = 11 466, 830 КЭ (1146 пластин, 4 КЭ типа «канат», 4 объемных элемента, 194 жестких и шарнирных связи (условных элемента)) и 1638 узлов (см. рис. 1)

б)

в)

Рис. 3. Изменение эквивалентных напряжений в наиболее нагруженных несущих металлоконструкциях портального крана «АБУС» г/п 16 т зав. № 1071987 в течение ХТЦ (см. рис. 2): а — эквивалентные напряжения, переменные во времени: 1 — КЭ № 271; 2 — КЭ № 274; 3 — КЭ № 1148; 4 — КЭ № 1160; 5 — КЭ № 1159; 6 — КЭ № 1144; 7 — КЭ № 1156; 8 — КЭ № 1121; 9 — КЭ № 311; 10 — КЭ № 308; б, в — расчетные зоны металлоконструкции крана в условиях экспертного обследования по РД 10-112-04-98

Согласно СТО 032.03.1 расчетный остаточный ресурс крана определяется по следующим предельным состояниям^{17,18,19}:

1) возникновение предельного усталостного повреждения (усталостная прочность);

¹⁷ РД 10-112-01-2004. Рекомендации по экспертному обследованию грузоподъемных машин. Общие положения / Одобрены НТС по подъемным сооружениям РТН, прот. от 26.04.2004. 74 с.

¹⁸ РД 10.112-04-98. Методические указания по проведению обследования портальных кранов с целью определения возможности их дальнейшей эксплуатации.

¹⁹ РД 10-112-02-09. Методические рекомендации по экспертному обследованию грузоподъемных машин. Часть 2. Краны стреловые общего назначения.

2) достижение трещины предельного размера (трещиностойкость);

3) коррозионное повреждение элементов металлоконструкции крана.

Ресурс по первому предельному состоянию, согласно ГОСТ 28609-90 «Краны грузоподъемные. Основные положения расчета», определяется как количество циклов работы крана (см. рис. 2), при котором будет исчерпана несущая способность ($\sigma_{\text{экв}}$ из (20) достигает R_v) несущих металлоконструкций, исходя из числа

циклов истощения сопротивления усталостному разрушению

$$N_{\Sigma} = \frac{n_{\Sigma}^I}{n_a}, \quad (21)$$

где n_{Σ}^I — общее количество циклов изменения напряжений за фактический срок службы крана (см. РД 10-112-01-2004) в рассматриваемой точке металлоконструкции при заданном (известном) законе плотности распределения вероятности амплитуд симметричных циклов напряжений; n_a — количество циклов изменения напряжений за один характерный цикл работы крана (см. рис. 2)

$$n_a = t_{\Sigma} \left(\frac{1}{\tau_b} + \frac{1}{\tau_n} \right), \quad (22)$$

где t_{Σ} — средняя продолжительность цикла работы крана; $\tau_b = 1$ с — период изменения высокочастотной составляющей процесса нагружения (для порталных кранов, согласно рекомендациям СТО 032.03.1, значения τ_b принимаются в диапазоне от 0,8 до 1,2 с); τ_n — период изменения низкочастотной составляющей процесса нагружения

$$\tau_n \approx 2\sqrt{l_K}, \quad (23)$$

где l_K — средняя длина гибкой подвески груза. Значение n_a из (22) также может быть вычислено по формуле

$$n_a = t_{\Sigma} \nu, \quad (24)$$

где ν — эффективная частота нагружения (для несущих элементов металлоконструкций порталных кранов составляет от 0,5 до 5 Гц, при отсутствии данных о частоте нагружения расчетного элемента допускается определять эквивалентную частоту (24) расчетным путем либо принимать равной 1 Гц).

В (21) общее количество циклов изменения напряжений (20) за фактический срок службы крана n_{Σ}^I определялось по формуле

$$n_{\Sigma}^I = \frac{aN_0 R_v^m}{\int_{\sigma=0,7R_v}^{\sigma=\sigma_{\max}} \sigma^m f(\sigma) d\sigma}, \quad (25)$$

где $N_0 = 5 \cdot 10^6$ — базовое число циклов; R_v — расчетное сопротивление усталости, принимаемое по СТО 24.09-5821-01-93²⁰ в зависимости от группы расчетного элемента металлоконструк-

ции крана по критерию концентрации напряжений; m — показатель степени усталостной кривой (см. формулу (1)); $\sigma_{\max}$ — максимальное амплитудное приближенное значение по СТО 032.03.1 приведенных напряжений; a — коэффициент влияния недогрузок ($a \geq 0,2$)

$$a = \frac{\sigma_{\text{ср}} - 0,4R_v}{\sigma_{\max} - 0,4R_v}, \quad (26)$$

здесь $\sigma_{\text{ср}}$ — среднее значение напряжений (20) при суммировании в пределах от $\sigma = 0,4R_v$ до $\sigma = \sigma_{\max}$;

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{\int_{\sigma=0,4R_v}^{\sigma=\sigma_{\max}} \sigma f(\sigma) d\sigma}{\int_{\sigma=0,4R_v}^{\sigma=\sigma_{\max}} f(\sigma) d\sigma}, \quad (27)$$

которые, как и $s_{\max}$, в МКЭ вычисляются в режиме вычислительного эксперимента.

В (25) и (27) $f(\sigma)$ — плотность распределения вероятностей амплитуд приведенных к симметричному циклу действительных напряжений. Согласно рекомендациям СТО 032.03.1 $f(\sigma)$ с достаточной степенью точности описывается полунормальным законом распределения случайных величин

$$f(\sigma) = \frac{2}{\pi m_{\sigma}} \exp \left(-\frac{\sigma^2}{\pi m_{\sigma}^2} \right), \quad (28)$$

где m_{σ} — математическое ожидание приведенных к симметричному циклу действительных напряжений.

Согласно рекомендациям СТО 032.03.1 $\sigma_{\max}$ в (25) и (27) рекомендуется принимать в диапазоне от $4,75 m_{\sigma}$ до σ_{Π} (напряжения в расчетном элементе, соответствующие второму случаю максимальных расчетных нагрузок рабочего состояния крана [3]). Значение m_{σ} определяется в зависимости от математического ожидания напряжений среднего уровня от высоко- и низкочастотной составляющих нагружения (приведенных сил и моментов), которые в соответствии с СТО 032.03.1 приближенно могут быть вычислены по отдельным формулам для каждого (укрупненного) расчетного элемента металлоконструкции крана (хобот, стрела, оттяжка и др.).

Теперь становится очевидным, что, в отличие от приближенных вычислений $\sigma_{\max}$ по методике СТО 032.03.1, при использовании авторами настоящей работы МКЭ действительные напряжения $\sigma_{\max}$ могут быть получены в любом расчетном элементе расчетно-статической модели металлоконструкции крана (см. рис. 3) на про-

²⁰ СТО 24.09-5821-01-93. Краны грузоподъемные промышленного назначения. Нормы и методы расчета элементов стальных конструкций: Стандарт ВНИИПТМАШ-Подъемтранстехника. М.: ВНИИПТМАШ, 1993. 135 с.

тяжении одного (любого) характерного цикла, при этом перевод действительных расчетных напряжений в эквивалентный симметричный цикл осуществляется двухпараметрическим методом схематизации «потоков дождя»²¹ [7]. После чего остаточный ресурс крана в циклах работы по (21), аналогично (13), определяется по формуле

$$N_{\text{ост}}^I = N_{\text{ц}} - N_{\text{ф}}, \quad (29)$$

в которой $N_{\text{ф}}$ — фактическое количество ХТЦ работы, выполненное краном на момент проведения расчета,

$$N_{\text{ф}} = L_{\text{ф}} C_{\text{сут}} C_{\text{дн}}, \quad (30)$$

где $L_{\text{ф}}$ — фактический срок службы крана (лет); $C_{\text{сут}}$ — количество циклов работы крана в сутки; $C_{\text{дн}}$ — количество дней работы крана в год.

Очевидно, что остаточный срок службы крана в годах при условии сохранения его режима эксплуатации (22) с учетом (29) определяется по формуле

$$L_{\text{ост}}^I = \frac{N_{\text{ост}}^I}{C_{\text{сут}} \cdot C_{\text{дн}}}. \quad (31)$$

Расчет остаточного ресурса крана **по второму предельному состоянию** (ГОСТ 28609–90) ведется в предположении, что зарождение усталостной трещины $a_0 = 2,5\text{--}5$ мм происходит в ограниченной зоне, где имеет место наиболее неблагоприятное сочетание высокой концентрации напряжений и значительной амплитуды изменения переменных во времени напряжений от максимальной внешней нагрузки рабочего состояния. При этом перечень зон развития усталостных трещин устанавливается индивидуально (рис. 3, б, в), для каждого крана на основе анализа его конструктивно-технического устройства, условий нагружения его металлоконструкций и наработанных за истекший срок службы дефектов.

Количество циклов работы крана до достижения второго предельного состояния, в отличие от (21), определяется по формуле

$$N_{\text{цж}} = \frac{n_{\Sigma}^{\text{II}}}{n_a}, \quad (32)$$

где n_{Σ}^{II} — расчетное количество циклов изменения напряжений, необходимое для роста трещины от начальной ($a_0 = 2,5\text{--}5$ мм) до критической длины; n_a — количество циклов изменения напряжений за один ХТЦ работы крана.

²¹ ГОСТ 25.101–83. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. М.: Изд-во стандартов, 1983. 21 с.

Значение n_{Σ}^{II} в (32) определяется в зависимости от характеристик трещиностойкости — параметров C и n в уравнении Пэриса [7, 8] для различной вероятности, по формулам (СТО 032.03.1)

$$n_{\Sigma}^{\text{II}} = \frac{1}{C \Delta \sigma_{\text{экв}}^2 \pi F} \ln \left(\frac{a_{\text{кр}}}{a_0} \right) \text{ для } n = 2; \quad (33)$$

$$n_{\Sigma}^{\text{II}} = \frac{1}{C \Delta \sigma_{\text{экв}}^n (\sqrt{\pi})^n F^n} \left(\frac{1-n}{a_{\text{кр}}^2} - \frac{1-n}{a_0^2} \right) \text{ при } n > 2,$$

где F — геометрическая поправочная функция, учитывающая стеснение деформаций в вершине трещины (для приближенных расчетов $F = 1$); $a_0 = 0,005$ м — стартовый и $a_{\text{кр}}$ — критический расчетный размер трещины, определяемой, например, по методике СТО 032.03.1; $\Delta \sigma_{\text{экв}}$ — эквивалентное значение приведенных к нулевому циклу действительных напряжений, вычисленных по конечно-элементной теории.

После вычисления (32) остаточный срок службы крана в годах при условии сохранения режима эксплуатации по второму предельному состоянию определяется по формуле

$$L_{\text{ост}}^{\text{II}} = \frac{N_{\text{цж}}}{C_{\text{сут}} C_{\text{дн}}}, \quad (34)$$

где $C_{\text{сут}}$ — количество циклов работы крана в сутки; $C_{\text{дн}}$ — количество дней работы крана в год.

Расчет остаточного срока службы узла крана до достижения заданного коррозионного повреждения (**третье предельное состояние**, согласно требованиям СТО 032.03.1) зависит от скорости коррозии и условий окружающей среды в месте установки крана. При отсутствии документально подтвержденных сведений об изменении толщины металла допускается принимать скорость коррозии $V_{\text{корр}} = 0,05$ мм/год при вероятности $p = 0,9$ (СТО 032.03.1). При этом полагается, что коррозии подвержены все поверхности рассматриваемого МКЭ сечения (площади поперечного сечения — ППС) как с наружной, так и с внутренней стороны. Предельным значением считается уменьшение ППС несущих металлоконструкций крана в результате коррозии на 10 %.

Выводы

В результате расчета остаточного ресурса portalного крана «АБУС» г/п 16 т, рег. № 34557 по методике СТО 032.03.1 с применением конечно-элементного вычислительного эксперимента для расчета числа циклов до достижения

металлоконструкцией крана предельного состояния установлено, что наибольшие напряжения возникают:

1. В элементах хобота крана (см. рис. 3), в режиме изменения вылета стрелы и поворота верхнего строения:

- в положении 1 (см. рис. 2) при подъеме груза $Q_{cp} = 10$ т на вылете $L = 30$ м: $\sigma_{экв} = 215$ МПа;
- в положении 7 при изменении вылета стрелы при $Q_{cp} = 10$ т на вылете $L = 30$ м при угле поворота 180° относительно положения 1: $\sigma_{экв} = 209$ МПа.

2. В горизонтальных балках поворотной платформы:

- в положении 6 при повороте верхнего строения с грузом $Q_{cp} = 10$ т на вылете $L = 30$ м: $\sigma_{экв} = 180$ МПа.

Полученные результаты практически совпадают с материалами экспертизы крана в части технического диагностирования по РД 10-112-04-98.

Минимальный остаточный срок службы крана (в годах) по критерию предельного усталостного повреждения (усталостная прочность) получен для несущего элемента поворотной платформы — $I_{ост}^I = 4,16$ года; то же по критерию достижения трещины предельного размера (трещиностойкость) получено для несущих элементов металлоконструкции хобота — $I_{ост}^{II} = 1,1$ года.

Библиографический список

1. Техническая диагностика и оценка остаточного ресурса грузоподъемных кранов: сб. ст. / под общ. ред. А. В. Вершинского. Екатеринбург: ЗАО «УЭЦ», 2007. 164 с.
2. Маковский А. М. Классификация грузоподъемных кранов по режимам работы и циклическая прочность деталей кранов // Подъемно-транспортная техника. 2005. № 1 (13). С. 34–43.
3. Соколов С. А. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. СПб.: Политехника, 2005. 423 с.
4. Котельников В. С., Зарецкий А. А., Самойлов С. С. Алгоритм оценки выработки грузоподъемным краном нормативного срока службы // Безопасность труда в промышленности. 1998. № 8. С. 38–40.
5. Белогуров В. Д., Суглобов В. В., Сагиров Ю. Г. Оценка технического состояния грузоподъемных кранов // Подъемно-транспортная техника. 2003. № 2 (6). С. 38–43.

6. Юзиков В. П., Панасенко Н. Н. Строительная механика тонкостенных стержней / под ред. Н. Н. Панасенко. Волгоград: Волгоградское научное издательство, 2013. 316 с.

7. Коган В. П., Дроздов Ю. Н. Прочность и износостойкость деталей машин. М.: Высшая школа, 1991. 319 с.

8. Коган В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: справочник. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.

References

1. *Tekhnicheskaya diagnostika i otsenka ostatochnogo resursa gruzopod'emnykh kranov*. Sb. st. [Technical diagnosis and assessment of residual life of lifting cranes. Coll. of works]. Ed. by Vershinskiy A. V. Ekaterinburg, ZAO UETs Publ., 2007, 164 p.
2. Makovskiy A. M. *Klassifikatsiya gruzopod'emnykh kranov po rezhimam raboty i tsiklicheskaya prochnost' detaley kranov* [Classification of lifting cranes according to the operation modes and cyclic strength of crane parts]. *Pod'emno-transportnaya tekhnika – Lifting and transport equipment*, 2005, no. 1 (13), pp. 34–43.
3. Sokolov S. A. *Metallicheskie konstruksii pod'emno-transportnykh mashin* [Metal constructions of hoisting and transport machines]. St. Petersburg, Politekhnik Publ., 2005, 423 p.
4. Kotelnikov V. S., Zaretskiy A. A., Samoylov S. S. *Algoritm otsenki vyrabotki gruzopod'emnym kranom normativnogo sroka sluzhby* [Algorithm of estimation of standard service life of the lifting crane]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – Labour safety in industry*, 1998, no. 8, pp. 38–40.
5. Belogurov V. D., Suglobov V. V., Sagirov Yu. G. *Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya gruzopod'emnykh kranov* [Evaluation of the technical state of lifting cranes]. *Pod'emno-transportnaya tekhnika – Lifting and transport equipment*, 2003, no. 2 (6), pp. 38–43.
6. Yuzikov V. P., Panasenko N. N. *Stroitel'naya mekhanika tonkostennykh stержney* [Building mechanics of thin-walled beams]. Ed. by Panasenko N. N. Volgograd, Volgogradskoe nauchnoe izdatel'stvo Publ., 2013, 316 p.
7. Kogaev V. P., Drozdov Yu. N. *Prochnost' i iznosostoykost' detaley mashin* [The strength and durability of machine parts]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991, 319 p.
8. Kogaev V. P., Makhutov N. A., Gusenkov A. P. *Raschety detaley mashin i konstruksiy na prochnost' i dolgovechnost'* [Calculations of machine parts and structures for strength and durability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 224 p.