

УДК 621.874

Т. В. ЛУЦКО, А. В. БАРТЕНЬЕВ

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА НАГРУЖЕНИЯ НА ПРОДЛЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ МОСТОВОГО КРАНА

Аннотация. В статье рассмотрены нормативные требования по продлению срока службы мостовых кранов общего назначения, проведен численный анализ напряженно-деформированного состояния пролетного строения крана КМ 20 и обоснованы рекомендации по продлению срока службы крана. Прочностной анализ конструкции проводился в программной среде АРМ FEM. По результатам сочетаний нагрузений крана выявлены наибольшие концентрации напряжений в средней части пролета, а также в местах соединения главных балок с концевыми. Выполнен расчет прогибов моста при разных нагрузениях. Полученные результаты показали, что группа классификации крана существенно влияет на требования по предельным прогибам конструкции, а также на продление срока службы (остаточного ресурса) машины, что рекомендуется учитывать при модернизации и реконструкции мостовых кранов.

Ключевые слова: кран, мост, нагружение, напряженно-деформированное состояние, режим, срок службы.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Мостовые краны применяются в различных отраслях производства: в закрытых промышленных цехах предприятий различного профиля, на станциях, на закрытых и открытых складских комплексах, при монтаже строительных конструкций и т. д. Мостовые краны общего назначения отличаются простотой управления, долговечностью, многофункциональностью, высокой производительностью при минимальных затратах, а также экономией рабочего пространства.

В среднем нормативный срок службы общепромышленного мостового крана составляет 25–30 лет. По экспертным оценкам за пределами нормативного срока службы в настоящее время эксплуатируется около 40...70 % мостовых кранов общего назначения и около 80 % металлургических мостовых кранов [1–5]. В связи с этим вопрос продления срока службы мостовых кранов является актуальным.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В настоящее время разрабатываются различные методики определения остаточного ресурса, в частности с помощью программного обеспечения [4], с использованием теории риска, учитывая данные опроса экспертов, проводящих обследования кранов [6], кроме этого существуют инженерные методики расчета остаточного ресурса грузоподъемных кранов – методические указания и руководящие документы. Однако для всех этих методик характерен существенный недостаток – отсутствие универсальности [3]. Поэтому в данный момент продолжают исследования в этом направлении.

Целью настоящего исследования является обоснование продления срока службы мостового крана общего назначения путем коррекции его режима работы.

Для достижения поставленной цели выполнены следующие задачи:

1. Анализ нормативных требований по продлению срока службы мостовых кранов.
2. Численный анализ напряженно-деформированного состояния мостового крана общего назначения в зависимости от режима нагружения.
3. Обоснование рекомендаций по продлению срока службы мостового крана.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Ресурс машины – суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние [7]. Ресурс измеряется как в единицах наработки, так и в единицах времени [6]. Срок службы крана – это календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации машины или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние, измеряется в единицах времени.

По истечении срока службы экспертная комиссия решает: 1) списать кран, если он не подлежит восстановлению и представляет опасность при дальнейшей эксплуатации; 2) назначить капитальный ремонт для восстановления показателей надежности; 3) назначить остаточный срок службы, если кран находится в исправном состоянии, и разрешить дальнейшую эксплуатацию.

В качестве нормативных документов, регламентирующих требования по продлению срока службы мостовых кранов, являются:

- 1) РД 24-112-5Р «Руководящий документ по оценке остаточного ресурса кранов мостового типа»;
- 2) РД 10-112-5-97 «Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы. Часть 5. Краны мостовые и козловые»;
- 3) РД 10-112-1 «Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы. Часть 1. Общие положения»;
- 4) РДС РК 1.04-13-2002 «Методические указания по проведению обследования металлоконструкций мостовых электрических кранов и стреловых самоходных кранов общего назначения (на автомобильном, пневматическом и гусеничном ходу) с истекшим сроком службы с целью определения возможности их дальнейшей эксплуатации».

В соответствии с нормативным документом РД 24-112-5Р «Руководящий документ по оценке остаточного ресурса кранов мостового типа» рекомендуется экспертный метод продления остаточного ресурса для кранов мостового типа групп классификации А1-А5. Для кранов более высоких групп рекомендуется экспериментально-расчетный метод.

По экспертному методу остаточный ресурс назначается на основе данных о фактической группе классификации крана и результатов оценки его технического состояния при выполнении работ, предусмотренных РД 10-112-5-97 «Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы». При этом также должны учитываться данные о конструктивных особенностях рассматриваемого крана и о наиболее характерных дефектах и повреждениях, встречающихся в кранах подобной конструкции. Также для определения ресурса должны использоваться такие признаки, как средний срок службы грузового каната, средняя периодичность ремонта или замены узлов механизмов крана, качество технического обслуживания при эксплуатации кранов.

По экспериментально-расчетному методу для определения остаточного ресурса, помимо данных, необходимых для экспертного метода, должен также быть произведен расчет одного или нескольких предельных состояний металлоконструкции крана, наиболее вероятных по мнению экспертов. Расчет рекомендуется проводить согласно нормам и методам расчета элементов стальных конструкций СТО 24.09-5281-91-93 «Краны грузоподъемные промышленного назначения. Нормы и методы расчета элементов стальных конструкций».

Среди наиболее важных факторов, влияющих на дальнейшую эксплуатацию крана, является состояние его металлоконструкции. В соответствии с требованием ГОСТ 27584-88 «Краны мостовые и козловые электрические. Общие технические условия»: пролетные балки в мостовых кранах при пролете L свыше 17 м должны иметь строительный подъем, равный $L/1000$. Допускается отклонение $\pm 20\%$.

В РД 10-112-5-97 «Методические указания по обследованию грузоподъемных машин с истекшим сроком службы. Часть 5. Краны мостовые и козловые» приводятся величины предельно допустимых остаточных деформаций металлоконструкций. В частности мостовой кран может эксплуатироваться до следующего очередного обследования при отрицательном остаточном прогибе каждой из главных балок $f \leq 0,0022L$, что соответствует прогибу $L/450$. Указанная величина получается немного ниже предельного прогиба, закладываемого в расчет металлоконструкции мостового крана для самой легкой группы режима работы, $L/400$, приведенного в СТО 24.09-5281-91-93 «Краны грузоподъемные промышленного назначения. Нормы и методы расчета элементов стальных конструкций». При отрицательном остаточном прогибе $0,0022L \leq f \leq 0,0035L$ эксплуатация крана допускается на срок не более 1 года или до достижения прогиба предельной величины, при условии выполнения контрольных замеров f не реже 1 раза в 4 месяца. При возрастании остаточной деформации до $f > 0,0035L$ эксплуатация крана должна быть прекращена, а его металлоконструкция – подвергнута реконструкции.

Данными требованиями будем руководствоваться при анализе напряженно-деформированного состояния крана.

Стандарт ИСО 4301/1-86 «Краны и подъемные устройства. Классификация» [8] устанавливает классификацию кранов (режим работы) грузоподъемного крана на основании двух параметров: 1) класса использования, определяющего число рабочих циклов, выполняемых в течение ожидаемого срока их службы; 2) коэффициента распределения нагрузки, определяющего номинальный режим нагружения.

Режим нагружения крана ($Q_1 \dots Q_i$) характеризуется величиной коэффициента распределения нагрузок K_p , который определяется по формуле 8:

$$K_p = \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_i}{C_T} \cdot \left(\frac{P_i}{P_{\max}} \right)^m \right], \quad (1)$$

где C_i – среднее количество рабочих циклов с частным уровнем массы груза P_i ;
 C_T – суммарное число рабочих циклов за весь срок службы крана;
 P_i – значение частных масс отдельных грузов (уровня нагрузки) при типичном применении крана;
 P_{\max} – масса наибольшего груза (номинальный груз), который разрешается поднимать краном;
 $m = 3$ – показатель степени.

$$C_T = \sum_{i=1}^n C_i = M \cdot D \cdot T, \quad (2)$$

где M – число циклов работы крана в сутки;
 D – число рабочих дней в году;
 T – время эксплуатации крана в годах.

По найденному по формуле (1) значению K_p определяется класс нагружения крана (принимается ближайшее большее значение по таблице. При найденном по формуле (2) суммарном числе рабочих циклов за весь срок службы крана C_T определяется, какому классу использования U_i кран соответствует по ИСО 4301/1-86 (всего 10 классов использования $U_0 - U_9$) [8]. Выписывается ближайшее большее нормативное (максимальное) значение количества рабочих циклов $N_H \geq U_i$ по таблице. Нормативный срок службы будет выработанным, когда C_T окажется равным N_H .

На основании полученных результатов K_p и $N_H \geq U_i$ определяется по таблице группа классификации (режим работы) крана в целом А1–А8.

Таким образом, если $C_T < N_H$ то кран не выработал свой ресурс.

Согласно РД 24-112-5Р «Руководящий документ по оценке остаточного ресурса кранов мостового типа», исходя из того, что для каждой группы классификации (режима работы) по ИСО 4301/1-86 значение показателя $s = C_T \cdot K_p$ величина постоянная, рассчитывается ресурс (число нагружений).

Расчет остаточного ресурса технического состояния крана выполняется по формуле, лет:

$$t = \frac{N_H - C_T}{M \cdot D}, \quad (3)$$

где N_H – нормативное (максимальное) число циклов для определенного режима нагружения (группы классификации) грузоподъемного крана;
 C_T – суммарное число рабочих циклов за весь срок службы крана;
 M – число циклов работы крана в сутки;
 D – число рабочих дней в году.

Формула (3) требует уточнения, поскольку необходимо учитывать различные факторы: нерегулярность нагружения, ремонты, возникновение трещин в конструкции и пр.

В частности предлагается учитывать время на ремонты при расчете числа рабочих дней в году следующей зависимостью, дн/год:

$$D = \frac{T_{РАБ}}{\frac{1}{k_{СМ}} + t_{СМ} \cdot D_p}, \quad (4)$$

где $T_{РАБ}$ – фонд рабочего времени машины в году, дн/год;
 $k_{СМ}$ – средний коэффициент сменности работы машины, см/дн;

Таблица – Группы классификации (режима работы) кранов по ИСО 4301/1-86 8

Режим нагружения	K_p	Характеристика грузов, поднимаемых кранами	Класс использования									
			Нерегулярное использование				Регулярное использование в легких условиях	Регулярное использование с перерывами	Регулярное интенсивное использование	Интенсивное использование		
			U_0	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8	U_9
			Минимальное количество рабочих циклов									
			$1,6 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^4$	$6,3 \cdot 10^4$	$1,25 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^6$	$>4 \cdot 10^6$
Q1 – легкий	0,125	легкие – регулярно, номинальные – изредка			A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Q2 – средний	0,25	средние – регулярно, а номинальные – довольно часто		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	
Q3 – тяжелый	0,5	тяжелые – регулярно, а номинальные часто	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8		
Q4 – весьма тяжелый	1,0	близкие к номинальным	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8			

t_{CM} – средняя продолжительность рабочей смены, часов, $t_{CM} = 8$ ч;
 D_p – количество дней нахождения машины в ремонте, приходящееся на 1 маш-ч/работы, дн/маш-ч.

Тем не менее даже в первом приближении понятно, что при уменьшении числа рабочих циклов крана увеличивается остаточный ресурс машины. На рисунке 1 представлены графики зависимости остаточного ресурса от числа циклов нагружений для режимов работы A5 и A6 для крана КМ 20 (при условии, что кран спроектирован для режима работы A6, а по факту эксплуатации считали наработки для режимов A5 и A6).

Определив остаточный ресурс, рекомендуют дальнейшую эксплуатацию крана (в случае удовлетворительного значения). Причем для увеличения срока службы можно рекомендовать перейти крану на более легкий режим работы, поскольку в этом случае суммарное число рабочих циклов крана меньше (рисунок 1). Либо по исчерпанию остаточного ресурса по результатам диагностического обследования назначить капитальный ремонт или списать кран.

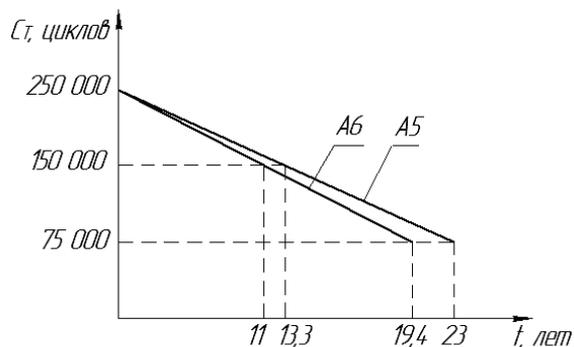


Рисунок 1 – График зависимости суммарного числа рабочих циклов C_T крана от его остаточного ресурса t для режимов работы A5 и A6.

Таким образом, в зависимости от числа наработки принимается решение о дальнейшей эксплуатации крана.

В настоящем исследовании также проводился численный анализ напряженно-деформированного состояния пролетного строения крана КМ 20 (грузоподъемностью 20 т и пролетом 28 м) при различных сочетаниях нагружений.

На рисунке 2 представлена модель пролетного строения крана КМ 20 в программном комплексе Компас – 3D APM FEM.

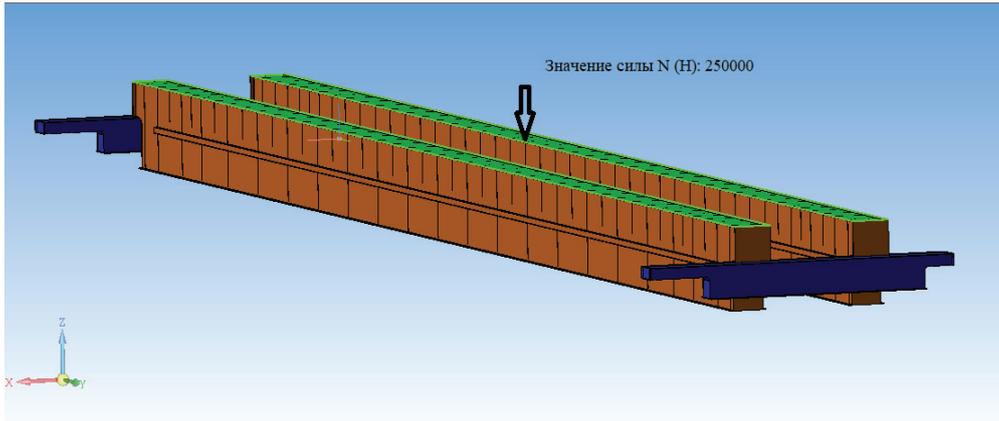


Рисунок 2 – Схема формирования нагрузок на металлоконструкцию.

Мост крана испытывает нагрузки от собственного веса, от максимальной грузоподъемности 20 т и массы грузовой тележки 5 т. Режим работы крана А6. Материал металлоконструкции моста сталь 09Г2С.

На рисунке 3 представлены результаты перемещений моста в вертикальной плоскости при нагружении. Максимальные перемещения в средней части пролета крана. На рисунке 4 представлены гистограммы напряжений и прогибов при различных сочетаниях нагружений. Максимальные концентрации напряжений в средней части пролета, а также в местах соединения главных балок с концевыми балками.

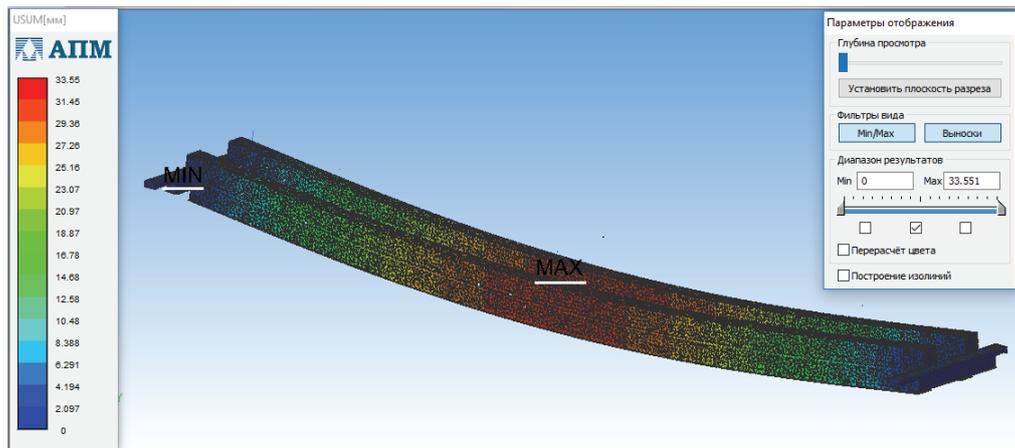


Рисунок 3 – Перемещения в вертикальной плоскости.

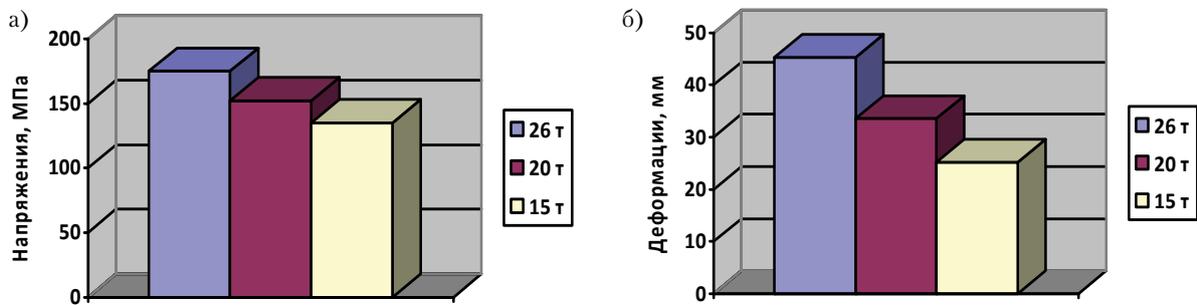


Рисунок 4 – Гистограммы напряжений (а) и прогибов (б), возникающих в главной балке металлоконструкции крана КМ 20.

В качестве режимов нагружений принимались: 1) подъем номинального груза 20 т; 2) подъем груза на 30 % больше максимальной грузоподъемности (то есть масса груза составила 26 т); 3) подъем груза на 25% меньше максимальной грузоподъемности (то есть масса груза составила 15 т). При данных нагрузках определялись напряжения и перемещения.

Согласно вышеуказанным нормам, величина прогиба балки, определенного при действии постоянных нагрузок, не должна превышать 1/700 пролета балки для режима работы А6, то есть для 28 м должна быть не более 40 мм. Жесткость главных балок обеспечивается, поскольку максимальный прогиб при подъеме номинального груза составил 33,55 мм (рисунки 3 и 4), что не превышает предельного значения.

При увеличении нагрузки на 30 % прогиб увеличился на 35 % и составил 45,3 мм, что превышает предельное значение. В результате можно рекомендовать в соответствии со СТО 24.09-5281-91-93 перейти на режим работы более низкий при увеличении грузоподъемности, то есть с А6 на А5, для последнего режима предельный прогиб составляет 1/500 пролета балки, то есть 56 мм.

При уменьшении нагрузки на 25 % прогиб уменьшился на 25 % и составил 25,2 мм.

Что касается напряжений, то максимальные нормальные напряжения составили 152 МПа при подъеме груза 20 т, 175 МПа при подъеме груза 26 т и 135 МПа при подъеме груза 15 т. Таким образом, рассматриваемый кран имеет достаточно большой запас прочности.

ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ нормативных документов показал, что определяющим на продление срока службы является группа классификации (режим работы) крана. Данный вопрос решается при проведении диагностирования при обследовании кранов.

2. Расчет остаточного ресурса технического состояния мостового крана показал, что с переходом на более легкий режим работы снижается как уровень нагрузки, так и число циклов, что способствует продлению срока службы машины.

3. Определяющее влияние на дальнейшую эксплуатацию крана оказывает достижение предельного отрицательного прогиба металлоконструкции моста. Проведенный численный анализ напряженно-деформированного состояния металлоконструкции мостового крана КМ 20 пролетом 28 м в программном комплексе Компас – 3D APM FEM позволил смоделировать разные сочетания нагружений и показал, что у крана достаточно большой запас прочности. И только при значительных перегрузках можно рекомендовать перейти с базового режима работы А6 на режим А5, тем самым продлив срок его эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лагерев, И. А. Моделирование эксплуатационной нагруженности металлоконструкции мостового крана общего назначения [Текст] / И. А. Лагерев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2015. – № 1. – С. 49–54.
- Недельский, В. О. Конъюнктура отечественного рынка тяжелых и специальных мостовых кранов [Текст] / В. О. Недельский, К. Ф. Вольхин // Тяжелое машиностроение. – 2005. – № 3. – С. 36–38.
- Развитие инженерных расчетов остаточного ресурса грузоподъемных кранов [Текст] / К. Д. Никитин, В. А. Баранов, Н. И. Ивашков, Л. Н. Горбунова // Подъемно-транспортное дело. – 2007. – № 5(43). – С. 6–8.
- Оценка остаточного ресурса мостовых кранов коробчатого сечения [Текст] / В. М. Сниткин, И. П. Фролов, Е. М. Овсянников, В. Е. Овсянников // Инженерный вестник Дона. – 2015. – № 3(37). – С. 89.
- Эффективная эксплуатация строительных машин в условиях Донбасса [Текст] : справочное пособие / Под общей редакцией В. А. Пенчука. – Донецк : Изд-во «Ноулидж» (Донецкое отделение), 2012. – 787 с.
- Кычкин, В. И. Расчет остаточного ресурса металлоконструкции с учетом риска [Текст] / В. И. Кычкин, Л. А. Рыбинская // Вестник Пермского государственного технического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2010. – № 2. – С. 108–117.
- Подъемно-транспортная техника [Текст] : словарь-справочник : в 2 т. Т. 2 / Л. Н. Горбунова, К. Д. Никитин и др. ; ред. К. Д. Никитин, Л. Н. Горбунова. – Красноярск : ИПК СФУ. – 2008. – 598 с.
- ИСО 4301/1-86. Краны и подъемные устройства. Классификация. Часть 1. Общие положения [Текст]. – Взамен ИСО 4301/1-80 ; 2-е изд. / Технический комитет ИСО/ТК 96. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 11 с.

Получено 07.11.2019

Т. В. ЛУЦЬКО, О. В. БАРТЕНЬЄВ
ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМУ НАВАНТАЖЕННЯ НА ПРОДОВЖЕННЯ
СТРОКУ СЛУЖБИ МОСТОВОГО КРАНА
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. У статті розглянуто нормативні вимоги щодо продовження строку служби мостових кранів загального призначення, проведено чисельний аналіз напружено-деформованого стану прогонової будови крана КМ 20 і обґрунтовані рекомендації щодо продовження строку служби крана. Міцнісний аналіз конструкції проводився у програмному середовищі АРМ FEM. За результатами комбінацій навантажень крана виявлені найбільші концентрації напружень у середній частині прольоту, а також у місцях з'єднання головних балок з кінцевими. Виконано розрахунок прогинів моста при різних навантаженнях. Отримані результати показали, що група класифікації крана суттєво впливає на вимоги щодо граничного прогину конструкції, а також на продовження строку служби (залишкового ресурсу) машини, що рекомендується враховувати при модернізації і реконструкції мостових кранів.

Ключові слова: кран, міст, навантаження, напружено-деформований стан, режим, строк служби.

TATYANA LUTSKO, ALEXEY BARTENEV
DETERMINING THE EFFECT OF THE LOADING REGIME ON THE
EXTENSION OF SERVICE LIFE OF BRIDGE CRANE
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. The article describes the regulatory requirements for extending the service life of general purpose bridge cranes, presents a numerical analysis of the stress-strain state of the span structure of the crane KM 20 and substantiates the recommendations for extending the service life of the crane. Strength analysis of the structure was carried out in the program environment APM FEM. By results of combinations of loadings of the crane the greatest concentration of stresses in an average part of span, and also in places of connection of the main beams with end beams are revealed. Calculation of deflections of the bridge at different loadings is carried out. The results showed that the classification group of the crane significantly effects the requirements for the maximum deflection of the structure, as well as the extension of the service life (final resource) of the machine, which is recommended to take into account when upgrading and reconstructing bridge cranes.

Key words: crane, bridge, loading, stress-strain state, regime, service life.

Луцко Татьяна Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры наземных транспортно-технологических комплексов и средств ГОУ ВПО «Донбасской национальной академии строительства и архитектуры». Научные интересы: статика и динамика грузоподъемных кранов.

Бартењев Алексей Владимирович – магистрант ГОУ ВПО «Донбасской национальной академии строительства и архитектуры». Научные интересы: исследование напряженно-деформированного состояния металлоконструкций грузоподъемных машин.

Луцько Тетяна Василівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри наземних транспортно-технологічних комплексів та засобів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва та архітектури». Наукові інтереси: статика і динаміка вантажопідійомних кранів.

Бартењев Олексій Володимирович – магистрант ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва та архітектури». Наукові інтереси: дослідження напружено-деформованого стану металлоконструкцій вантажопідійомних машин.

Lutsko Tatyana – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, of Land Transport and Technological Complexes and Facilities Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: static's and dynamics of lifting cranes.

Bartenev Alexey – master's student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: research of stress-strain state of metal structures of lifting machines.