

ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ОПОРНО-ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА КРАНОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Несмотря на высокий технический уровень закупаемой за рубежом грузоподъемной техники, катастрофический отказ опорно-поворотных устройств этих кранов происходит через 3...5 лет срока службы вместо регламентированных 15. Наиболее характерными из них являются: повышенный износ кассет, выполненных из полиамида 6, сепараторов, зубьев шестерни и поворотного круга; выпадение тел качения (материал — подшипниковая сталь) из поворотного круга; выдавливание уплотнительной ленты. Для выявления скрытой причины преждевременного выхода из строя опорно-поворотного устройства кранов фирмы «Liebherr», работающих в средней полосе России, был выполнен натурный эксперимент при проведении погрузочно-разгрузочных работ, на основании проведения которого была установлена тенденция нагрева элементов опорно-поворотного устройства с учетом цикличности работы крана. Установлено, за 5 циклов нагружения тела качения прогреваются на глубину 40 мм до температуры порядка 40...45° С. Учитывая цикличность работы опорно-поворотного устройства крана и происходящее циклическое изменение температурного режима элементов опорно-поворотного устройства проведены теоретические исследования по изменению напряженно-деформированного состояния, например, контактирующих между собой кассет и тел качения изнашивания, работающих в условиях перепада температур. Установлено, что между торцевой поверхностью ролика и кассеты возникают напряжения, действующие в направлении плоскости касания и являющиеся причиной их повышенного изнашивания из-за возникающего внешнего трения.

Ключевые слова: стреловой самоходный кран, расчетные схемы, напряженно-деформированное состояние, опорно-поворотное устройство, отказы, прогрев, изнашивание, рабочий процесс.

Введение. В настоящее время на различных объектах России численность стреловых кранов зарубежного производства ведущих фирм-производителей Европы («Liebherr» и «Grove») и Японии («КАТО» и «Tadano») грузоподъемностью 50 т и выше составляет более 90 % [1]. Импортозамещение подразумевает не отказ от приобретенной ранее зарубежной техники, задействование числа единиц которой в настоящее время на различных объектах народного хозяйства составляет более 90 %. Эта цифра относится, например, к башенным и стреловым самоходным кранам, особенно высокой грузоподъемности. Сейчас отечественный рынок наводнился продукцией производителей из Китая (XCMG, SANY и др.).

Для импортозамещения необходимо сохранять работоспособность имеющейся в наличии техники, у которой произошли отказы, тем более что наложенные санкции со стороны недружественных стран не позволяют получать запасные узлы и детали от фирм-производителей.

Это говорит о том, что, «несмотря на высокий технический уровень закупаемой за рубежом грузоподъемной техники» [2], необходимо привлекать специалистов экспертных организаций для выявления причин отказов.

В частности, речь идет об отказах опорно-поворотных устройств (ОПУ) стреловых самоходных кранов грузоподъемностью свыше 50 т, срок службы которых по определению должен быть равен сроку службы машины в целом. Однако, как было указано в статье [3, 4], катастрофический отказ ОПУ происходит через 3...5 лет. Тем более что любой, даже незначительный, отказ этого элемента конструкции крана, равно как и любого другого вида техники, ведет к ремонтным работам, по трудоемкости сопоставимым с капитальными. Отказы опорно-поворотных устройств, присущие всем стреловым самоходным кранам и влияющие на срок службы, проанализированы в источниках научно-технической литературы [2, 4] многими авторами.



Рис. 1. Характерные отказы ОПУ: а — выпадение тел качения из кассет (сепараторов); б — выдавливание уплотнительной ленты

Таблица 1

Время, затрачиваемое на операции при проведении погрузочно-разгрузочных работ, с

Номер замера	t_1	t_2	t_3	t_4	Время цикла, с
	Угол поворота стрелы крана 45°				
1	16,48	20,67	16,52	18,11	71,78
2	10,56	15,80	16,02	16,37	58,75
3	11,06	16,24	17,47	16,07	60,84
Накопленные суммы	38,10	52,71	50,01	50,55	191,37
Среднее значение времени, с	12,7	17,57	16,67	16,85	63,79
Угол поворота стрелы крана 90°					
1	9,56	23,53	17,05	21,75	71,89
2	12,85	22,33	19,11	25,34	79,63
3	12,65	23,90	19,01	23,77	79,33
Накопленные суммы	35,06	69,76	55,17	70,86	233,63
Среднее значение времени, с	11,69	23,25	18,39	23,62	76,95

Ниже перечислим характерные отказы ОПУ, зафиксированные в процессе эксплуатации, касающиеся конкретно кранов производства «Liebherr» (рис. 1):

- изнашивание кассет (сепараторов);
- выпадение тел качения (рис. 1а, б);
- выдавливание уплотнительной ленты (рис. 1б);
- износ зубьев шестерни и поворотного круга.

Очевидно, что два первых отказа находятся во взаимосвязи.

Цель исследования. Выявить скрытые причины отказов элементов опорно-поворотного устройства.

Основная часть. Причины отказов экспертами, как правило, объясняются традиционными формулировками, связанными с нарушениями режимов эксплуатации техники.

Рассмотрим выявленные отказы и причины их появления исходя из циклического режима работы стрелового самоходного крана в процессе эксплуатации.

Известно, что при проведении погрузочно-разгрузочных работ его рабочий цикл составляет 1... 2 минуты (крепление груза — подъем на заданную высоту — перемещение в точку отгрузки — снятие груза — возвращение в исходное положение). Третья, четвертая и пятая операции сопряжены с по-

воротом стрелы крана в горизонтальной плоскости и имеют незначительный по продолжительности промежуток времени, в течение которого используется поворотный круг. За это время подшипники успевают нагреться до температуры порядка 40...45° С. Если работы проводятся в зимнее время года, то во время первой и второй операций подшипники успевают остыть, выделяя при этом конденсат, который накапливается в течение всей работы крана.

При этом глубина распространения теплового импульса в соответствии с исследованиями А. В. Чичинадзе [5] можно определить по формуле

$$b = 1,73\sqrt{at_i}. \quad (1)$$

Здесь a — температуропроводность материала; t_i — время выполнения i -й операции при погрузочно-разгрузочных работах, определяемая экспериментально, с.

Экспериментальные исследования для оценки длительности операций при погрузочно-разгрузочных работах проводились в реальных условиях эксплуатации на базе стрелового самоходного крана «Liebherr». Для упрощения представим цикл погрузочно-разгрузочных операций из четырех основных этапов.

1. Время крепление груза массой 8 т и подъем на заданную высоту — t_1 ;
2. Время поворота стрелы крана к месту разгрузки — t_2 ;
3. Время опускания груза и его снятия — t_3 ;
4. Время разворота крана в исходное положение — t_4 .

В рассматриваемом цикле время работы ОПУ осуществляется на втором и четвертом этапах.

В процессе эксперимента рассматривался процесс поворота стрелы на 45 и 90 градусов. Число параллельных опытов было равно трем.

Результаты проведения эксперимента представлены в табл. 1.

Время цикла при повороте на 45° составляет 1,063 мин., а при повороте на 90° — 1,283 мин.

Используя зависимость (1), оценим глубину распространения теплового импульса в кассете и ролике при исследуемых циклах работы стрелового самоходного крана. Очевидно, что во время операций поворота стрелы, глубина теплового импульса будет накапливаться, а во время крепления и съема груза — снижаться.

Оценку результатов эксперимента по интенсивности прогрева за n циклов будем проводить по предлагаемой ниже методике, представленной в виде алгоритма из условия, что температуропроводность α полиамида 6 равна $1,47 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, а стали — $1,172 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ [6]. Результаты расчетов на примере кассеты, выполненной из полиамида 6, приведены в табл. 2.

В начальный момент времени за время t_1 принимаем глубину прогрева равной нулю. Далее в процессе поворота крана за время t_2 глубина прогрева составила 2,783 мм. За время t_3 во время отсоединения груза элементы опорно-поворотного устройства остыли, в результате чего глубина прогрева уменьшилась на величину b_3 . Далее при возвращении в исходное состояние температура прогрева увеличится на величину b_4 , так как в работу включается ОПУ, и будет равна 2,7247 мм. При повторном цикле указанные значения b_i будут носить накопительный характер (табл. 2).

Графическая интерпретация полученных расчетов приведена на рис. 2. Здесь n — номер цикла.

Глубина прогревания представляет собой прямую линию.

Сводная таблица (табл. 3) по результатам всех исследований приведена ниже.

Анализ зависимостей, приведенных в табл. 3, свидетельствует о резком увеличении интенсивности прогрева в зависимости от незначительного увеличения (5...7 с) времени работы ОПУ (увеличение тангенса угла наклона к оси абсцисс). В случае прогрева кассет и подшипниковых сталеи интенсивность прогрева увеличивается в 3,63 раза.

Учитывая сказанное, предлагается следующая рабочая гипотеза, поясняющая преждевременный выход из строя ОПУ кранов фирмы «Liebherr», работающих в средней полосе России.

Отсутствие гаражного хранения кранов на объектах ведет к тому, что по окончании работ кран остается на открытом воздухе, где при действии отрицательной температуры конденсат, образовавшийся в процессе эксплуатации, замерзает, образуя пленку льда, располагающуюся между кассетой и телом качения и, возможно, между кассетами.

Рассмотрим случай расположения ледяной пластинки между торцевой поверхностью тела качения и кассеты (рис. 3б).

Таблица 2

Интенсивность прогрева полиамида 6 при угле поворота стрелы крана на 45° , мм

Номер цикла	Глубина прогрева в каждом цикле, мм			
	b_1	b_2	b_3	b_4
	2,3638	2,7830	2,7810	2,7227
1	0	2,783	0,002	2,7247
2	0,3609	3,1439	0,3629	3,0856
3	0,7218	3,5048	0,7238	3,4465
4	1,0827	3,8657	1,0847	3,8074
5	1,4436	4,2266	1,4456	4,1683

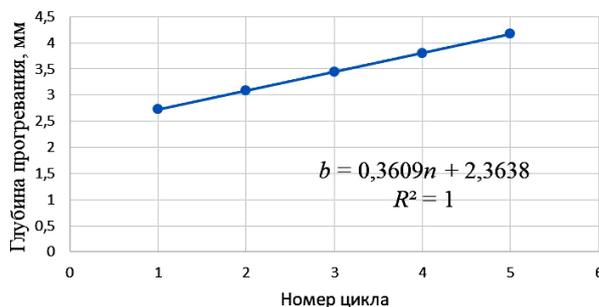


Рис. 2. Изменение глубины прогревания кассеты ОПУ за число циклов

Таблица 3

Интенсивность прогрева элементов ОПУ

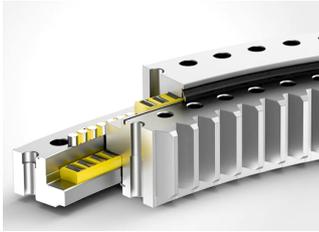
Угол поворота стрелы, град	Функция величины прогрева, мм
Кассета. Материал — полиамид 6	
45	$b = 0,3609n + 2,3638$
90	$b = 1,311n + 2,2680$
Ролик. Материал — подшипниковая сталь	
45	$b = 3,8483n + 21,1060$
90	$b = 11,6990n + 20,2470$

Расчетная схема ледяной пластинки и ее нагруженность представлены на рис. 4. Ледяная пластинка оказывается зажатой с двух сторон боковыми стенками кассеты. Тогда со стороны тела качения (по срединной плоскости) на нее будет действовать равномерно распределенная нагрузка интенсивностью q_1 (рис. 4а), вызывая изменение ее деформации, которая будет оказывать влияние на стенки кассеты, увеличивая их в размере, что является причиной выпадения роликов из кассеты.

Ниже, пользуясь расчетами справочника [7, с. 53], определим основные характеристики нагруженности ледяной пластины:

— опорные реакции, Н

$$A = B = \frac{P}{2}$$



а)

б)

Рис. 3. Опорно-поворотное устройство:
а — элемент опорно-поворотного устройства; б — кассета

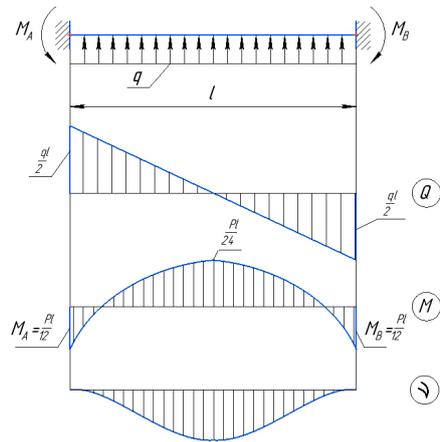


Рис. 4. Нагруженность пластины поперечными силами:
а — расчетная схема; б — эпюра поперечных сил;
в — эпюра изгибающих моментов; г — линия прогиба

— величины изгибающего момента в опорах, Н·м

$$M_A = M_B = \frac{Pl}{12};$$

— поперечная сила, Н

$$Q = \frac{P}{2} \left(1 - \frac{2x}{l} \right); \quad (2)$$

— изгибающий момент, Н·м

$$M = \frac{P}{2} \left(x - \frac{x^2}{l} - \frac{l}{6} \right); \quad (3)$$

— максимальная величина изгибающего момента в середине пролета (при $x = l/2$)

$$M_{\max} = \frac{Pl}{24}; \quad (4)$$

— величина изгибающего момента в точках А и В

$$-M_{\max} = \frac{Pl}{12}; \quad (5)$$

— уравнение линии прогиба

$$v = \frac{Px^2l}{24EJ} \left(\frac{x^2}{l^2} - 2\frac{x}{l} + 1 \right); \quad (6)$$

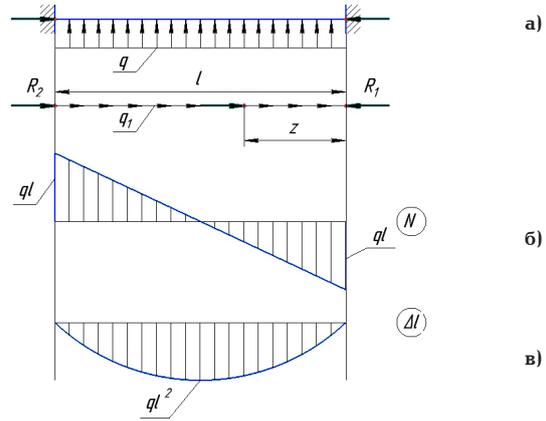


Рис. 5. Нагруженность пластины продольными силами:
а — расчетная схема; б — эпюра растяжения-сжатия;
в — эпюра перемещений

— величина максимального прогиба в середине пролета (при $x = l/2$)

$$f = \frac{Pl^2}{384EJ} \left(\frac{x^2}{l^2} - 2\frac{x}{l} + 1 \right). \quad (7)$$

Одновременно с силой, направленной перпендикулярно оси x , на пластинку будет действовать усилие растяжения-сжатия, возникающее в результате опоры о боковые стенки. Причиной этого усилия является деформация сжатия боковых стенок кассеты (рис. 5) и одновременного расширения пластинки льда. Усилие растяжения-сжатия интенсивностью q_2 считаем также равномерно распределенным вдоль оси x .

Ниже приведем основные характеристики нагруженности при сжатии пластины:

— величина усилий растяжения-сжатия в точках А и В

$$N_A = N_B = q_2 l^2; \quad (8)$$

— величина удлинения в середине

$$\Delta l = \frac{q_2 l^2}{EA}. \quad (9)$$

Здесь в формулах (1..8):

l — ширина кассеты, м;

E — модуль упругости льда, МПа;

J, A — осевой момент инерции (m^4) и площадь сечения (m^2) пластинки льда соответственно.

Учитывая температурную деформацию, произойдет удлинение пластины льда на величину Δl_t :

$$\Delta l_t = \alpha l \Delta t, \quad (10)$$

где α — коэффициент линейного расширения льда, $1/град\ C$;

l — ширина внутренней части кассеты (рис. 2б);

Δt — перепад температур, $^{\circ}C$.

При этом лед будет расширяться, а кассета сжиматься. Тогда суммарная деформация в пространстве между вертикальными стенками кассет от действия температуры будет равна

$$\Delta l_{\Sigma} = \Delta l_{\text{льда}} + \Delta l_{\text{кассеты}}. \quad (11)$$

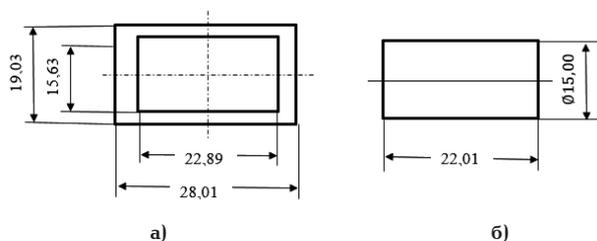


Рис. 6. Расчетные величины кассеты и ролика:
а — кассета; б — ролик

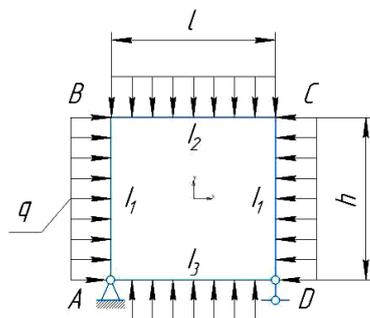


Рис. 7. Расчетная схема кассеты

Тогда с учетом сказанного максимальное напряжение при совместном действии усилий растяжения-сжатия, изгиба и температурной деформации равно [6]:

$$\sigma = \frac{N}{A} \mp \frac{M_x}{W_x} \mp \frac{M_y}{W_y} + \frac{\Delta l_{\text{льда}} E_1}{l} + \frac{\Delta l_{\text{кассеты}} E_2}{l} \leq [\sigma], \quad (12)$$

где W_x и W_y — моменты сопротивления сечения относительно осей x и y , m^3 ;

A — площадь поперечного сечения ледовой пластинки, занимающей пространство между торцевой поверхностью ролика и горизонтальной стенкой кассеты, m^2 ;

E_1 и E_2 — модули упругости (модуль Юнга) льда и полиамида 6 соответственно;

l — расстояние между вертикальными стенками кассеты (ширина кассеты), m .

Расчетные величины кассеты и ролика приведены на рис. 6.

Кроме того, в процессе работы кассета зажата с четырех сторон соседними кассетами и опорной поверхностью направляющих поворотного круга. При этом она во время работы имеет незначительное перемещение. Поэтому расчетную схему кассеты рационально представить в виде шарнирно опертой замкнутой рамы, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой по контуру интенсивностью q (рис. 7).

При такой схеме нагружения величины изгибающих моментов в точках A, B, C, D будут одинаковы [8, с. 366]. При $J_2 = J_3$ величины изгибающего момента выражаются зависимостью (10):

$$M = M_A = M_B = M_C = M_D = -\frac{1+k}{1+k} \frac{h^2}{l^2} \cdot \frac{ql^2}{12}, \quad (13)$$

где k — коэффициент, зависящий от геометрических характеристик сечения элементов кассеты, рассматриваемой как рамная конструкция.

$$k = \frac{J_2 h}{J_1 l}; \quad p = \frac{J_2}{J_1};$$

$$n = 1 + p + 6k; \quad m = 2 + k + \frac{p}{k}(3 + 2k), \quad (14)$$

В соответствии с рис. 3 и рис. 5 очевидно, что между торцевой поверхностью ролика и кассеты возникают напряжения в направлении плоскости касания. В первом случае направленные вдоль оси y , а во втором — вдоль оси x . Учитывая, что направление вектора напряжений совпадает с направлением осей, лежащих в плоскости касания, то считаем, что между контактирующими поверхностями возникает внешнее трение [9], т.е. первая производная равна:

$$\frac{d\sigma_y}{dz} > 0 \quad \text{и} \quad \frac{d\sigma_x}{dz} > 0, \quad (15)$$

где z — координата, перпендикулярная плоскости касания.

Для снижения этого напряжения можно использовать эффект металлического мыла [6, 10, 11], представляющего собой состав моторного масла воды и боратсодержащих соединений ортоборатгексаметилентетрамина, позволяющего снизить коррозию и увеличить противоизносные свойства контактирующих поверхностей.

Закключение. На основании проведенных экспериментальных исследований была установлена скрытая причина отказов основных элементов опорно-поворотного устройства на примере стрелового самоходного крана фирмы «Liebherr» грузоподъемностью выше 50 т. Проведенная количественная оценка степени прогрева опорно-поворотного устройства крана в процессе его работы за время циклов позволила выявить линейный характер этого процесса независимо от материала элемента конструкции (рассматривались полиамид 6 и подшипниковая сталь). За 5 циклов нагружения тела качения прогреваются на глубину 40 мм до температуры порядка 40...45° С.

Перепад температур ведет к образованию конденсата, который при безгаражном хранении в условиях отрицательных температур образует пластинку льда, располагающуюся между кассетой и телом качения и зажаты с двух сторон боковыми стенками кассеты. Таким образом, на кассету с расположенным в ней телом качения действуют нагрузки от изгиба и растяжения, ведущие к увеличению ее напряженно-деформированного состояния и, соответственно к увеличению изнашивания кассет и тел качения, так как между торцевой поверхностью ролика и кассеты возникают напряжения в направлении плоскости касания. Учитывая, что направление вектора напряжений совпадает с направлением осей, лежащих в плоскости касания, то считаем, что между контактирующими поверхностями возникает внешнее трение, для снижения которого можно использовать эффект металлического мыла.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования на основании выявленных отказов, характерных для кранов производства «Liebherr», позволили определить скрытую причину их появления, связанную с прогревом роликов и кассет ОПУ, а также разработать расчетные схемы с учетом изменения температурного фактора для решения новой задачи по оценке напряженно-

деформированного состояния узла «ролик-кассета», используя известные методы теорий прочности.

В данной статье рассмотрены только указанные выше причины, остальные будут учтены в следующих статьях.

Библиографический список

1. Бардышев О. А. Особенности сертификации зарубежных кранов и подъемников // Все краны. 2006. № 3. С. 31–34.
2. Бардышев О. А., Стоцкая Л. В. IV Уральский конгресс подъемно-транспортного оборудования // Механизация строительства. 2011. № 2. С. 27–28. EDN: NECETR.
3. Фокин В. В., Сладкова Л. А. Методика выбора материалов кассеты опорно-поворотного устройства с учетом изменения напряженно-деформированного состояния при эксплуатации // 74 Открытая междунар. студ. науч. конф. СНК-2024, 15–18 апреля 2024 г. Москва, 2024. С. 56–61.
4. Горелова М. В., Сладкова Л. А., Фокин В. В. Методика обеспечения безопасной работы стреловых самоходных кранов // 27-я Московская междунар. межвуз. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, посвященная 95-летию подготовки инженеров-механиков МИСИ – МГСУ, 26–27 апреля 2023 г. Москва, 2023. С. 353–357.
5. Чичинадзе А. В. Определение температуры поверхности трения при кратковременных торможениях // Трение твердых тел. Москва: Наука, 1964. С. 85–99.
6. Пат. 2088570 Российская Федерация, МПК С07 С51/41, 53/126. Способ получения солей металлов жирных кислот С8–С22 (металлических мыл) / Голота А. Ф., Морозов Е. Г., Агапов Р. А. № 95118922/04; заявл. 08.11.1995; опубл. 27.08.1997, Бюл. 47.
7. Справочник машиностроителя / Под ред. С. В. Серенсена. В 6 т. Москва: МАШГИЗ, 1962. Т. 3. 652 с.
8. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1975. 705 с.
9. Крагельский И. В. Трение и износ. Изд. 2-е перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1968. 480 с.

10. Ekemini B. I., Edidiong A. E., Uwemedimo E. U. [et al.]. Oluwaseyi Experimental and theoretical study of corrosion inhibition effect of Cucumeropsis mannii N. seed oil metallic soap of zinc on mild steel surface in sulphuric acid // Advances in Applied Science Research. 2014. № 5 (3). P. 26–53.

11. Успенский И. А., Фадеев И. В., Пестряева Л. Ш. [и др.] Новые ингибиторы коррозии для защиты сельскохозяйственной техники // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 3 (59). С. 1–11. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-03-39. EDN: UMMBAX.

СЛАДКОВА Любовь Александровна, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» Российского университета транспорта (РУТ), г. Москва.

SPIN-код: 9088-6547

AuthorID (РИНЦ): 1024368

ORCID: 0009-0008-6786-0386

AuthorID (SCOPUS): 6128880

Адрес для переписки: rich.cat2012@yandex.ru

ФОКИН Валерий Владимирович, аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» РУТ, г. Москва.

ORCID: 0009-0003-0941-0217

AuthorID (SCOPUS): 6128880

Адрес для переписки: valerafokin@inbox.ru

Для цитирования

Сладкова Л. А., Фокин В. В. Изменение напряженно-деформированного состояния элементов опорно-поворотного устройства кранов при эксплуатации // Омский научный вестник. 2024. № 4 (192). С. 22–28. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-22-28.

Статья поступила в редакцию 27.05.2024 г.

© Л. А. Сладкова, В. В. Фокин

UDC 625.731.8

DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-22-28

EDN: TILVGG

L. A. SLADKOVA

V. V. FOKIN

Russian University of Transport,
Moscow, Russia

MODIFICATION OF CHANGES IN THE STRESS-STRAIN STATE OF CRANE SLEWING GEAR ELEMENTS WHILE OPERATIONAL CONDITIONS

Despite the high technical level of hoisting equipment purchased abroad, a catastrophic failure of the slewing bearings of these cranes occurs after 3-5 years of service instead of the regulated 15 years. The most characteristic are: wear of 6-polyamide cassettes, cages of gear teeth and turntable; rolling elements falling out of the turntable; squeezing out the sealing tape. To identify the hidden cause of premature failure of the slewing rings of «Liebherr» cranes, the authors carried out the experiment during loading and unloading operations, which shows the tendency of warming up the elements of the slewing support, considering the cyclic nature of the crane operation. It has been established that this process is linear both for cassettes (polyamide 6 material), in which the rolling elements are located,

and for the rolling elements themselves (bearing steel). For 5 loading cycles, the rolling elements warm up to a 40 mm depth to a temperature of about 40-45° C. The proposed working hypothesis allows identifying the hidden cause of premature failure of the slewing support of «Liebherr» cranes operating in central Russia. A change in the stress-strain state of the cassette is established, leading to an increase in wear of the cassettes and rolling elements, since stresses arise between the end of the roller surface and the cassette in the direction of the contact plane.

Keywords: self-propelled jib crane, design diagrams, stress-strain state, slewing support, failures, warm-up, wear, working process.

References

1. Bardyshev O. A. Osobennosti sertifikatsii zarubezhnykh kranov i pod'yemnikov [Features of certification of foreign cranes and hoists] // *Vse krany. Vse Krany*. 2006. No. 3. P. 31–34. (In Russ.).
2. Bardyshev O. A., Stotskaya L. V. IV Ural'skiy kongress pod'yemno-transportnogo oborudovaniya [IV Ural Congress of Lifting and Handling Equipment] // *Mekhanizatsiya stroitel'stva. Mekhanizatsiya Stroitel'stva*. 2011. No. 2. P. 27–28. EDN: NECETR. (In Russ.).
3. Fokin V. V., Sladkova L. A. Metodika vybora materialov kassety oporno-povorotnogo ustroystva s uchetom izmeneniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya pri ekspluatatsii [Method of Selection of Materials of the Cassette of the Slewing Support Device Taking into Account the Change in the Stress-Strain State During Operation] // *74 Otkrytaya mezhdunar. stud. nauch. konf. SNK-2024, 15–18 aprelya 2024 g. 74 Open International Student Scientific Conference SNK-2024, 15-18 April 2024*. Moscow, 2024. P. 56–61. (In Russ.).
4. Gorelova M. V., Sladkova L. A., Fokin V. V. Metodika obespecheniya bezopasnoy raboty strelovykh samokhodnykh kranov [Methods for ensuring the safe operation of self-propelled jib cranes] / *27 Moskovskaya mezhdunar. mezhvuz. nauch.-tekhn. konf. studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh. 27 Moscow International Interuniversity Scientific and Technical Conf. of Students, Undergraduate Students, Graduate Students and Young Researchers*. Moscow, 2023. P. 353–357. (In Russ.).
5. Chichinadze A. V. Opredeleniye temperatury poverkhnosti treniya pri kratkovremennykh tormozheniyakh [Determination of friction surface temperature during short-term braking] // *Treniye tverdykh tel. Solid Friction*. Moscow, 1964. P. 85–99. (In Russ.).
6. Patent 22088570 Russian Federation, IPC C07 C51/41, 53/126. Sposob polucheniya soley metallov zhirnykh kislot S8-S22 (metallicheskih myl) [Method of producing C8-C22 - aliphatic acid metal salts (Metallic soap)] / Golota A. F., Morozov E. G., Agapov P. A. No. 95118922/04. (In Russ.).
7. Spravochnik mashinostroitelya [Mechanical Engineer's Handbook] // Ed. by S. V. Serensenni. In 6 vols. Moscow, 1962. Vol. 3. 652 p. (In Russ.).
8. Pisarenko G. S., Yakovlev A. P., Matveyev V. V. Spravochnik po soprotivleniyu materialov [Material Strength Handbook]. Kiev, 1975. 705 p. (In Russ.).
9. Kragelskiy I. V. Treniye i iznos [Friction and wear]. 2nd ed. revised and supplemented. Moscow, 1968. 480 p. (In Russ.).
10. Ekemini B. I., Edidiong A. E., Uwemedimo E. U. [et al.]. Oluwaseyic Experimental and theoretical study of corrosion inhibition effect of Cucumeropsis mannii N. seed oil metallic soap of zinc on mild steel surface in sulphuric acid // *Advances in Applied Science Research*. 2014. No. 5 (3). P. 26–53. (In Russ.).
11. Uspenskiy I. A., Fadeyev I. V., Pestrayeva L. Sh. [et al.] Novyye ingibitory korrozii dlya zashchity sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [New corrosion inhibitors for the protection of agricultural machinery] // *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vyssheye professional'noye obrazovaniye. Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex*. 2020. No. 3 (59). P. 1–11. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-03-39. EDN: UMMBAX. (In Russ.).

SLADKOVA Lyubov Aleksandrovna, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia), Professor of Ground Transportation and Technological Means Department, Russian University of Transport (RUT), Moscow.

SPIN-code: 9088-6547

AuthorID (RSCI): 1024368

ORCID: 0009-0008-6786-0386

AuthorID (SCOPUS): 6128880

Correspondence address: rich.cat2012@yandex.ru

FOKIN Valeriy Vladimirovich, Graduate Student of Ground Transportation and Technological Means Department, RUT, Moscow.

ORCID: 0009-0003-0941-0217

AuthorID (SCOPUS): 6128880

Correspondence address: valerafokin@inbox.ru

For citations

Sladkova L. A., Fokin V. V. Modification of changes in the stress-strain state of crane slewing gear elements while operational conditions // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 4 (192). P. 22–28. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-22-28.

Received May 27, 2024.

© L. A. Sladkova, V. V. Fokin