

# ПЛАНИРОВАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИЧИН УСКОРЕННОГО ИЗНОСА ОПОРНО-ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА БАШЕННЫХ КРАНОВ

В. А. Пенчук<sup>1</sup>, д.т.н, профессор; В. А. Сидоров<sup>2</sup>, д.т.н., доцент

<sup>1</sup> ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

<sup>2</sup> ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

**Аннотация.** В работе проведен анализ причин возникновения видов механического износа беговых дорожек и тел качения трёхрядного роликового подшипника, являющегося основным элементом опорно-поворотного устройства башенных кранов. Установлено, что основными причинами повреждений: абразивный износ, возникающий в результате нарушения режимов смазывания и накопления продуктов износа в смазочном материале; осевидный износ из-за возникающих динамических нагрузок при ослаблении резьбовых соединений и неравномерности в работе многодвигательного электромеханического привода механизма поворота. Определены направления дальнейших исследований: анализ равномерности нагружения электродвигателей привода по токовым характеристикам, анализ параметров вибрации опорного кольца, распределение напряжений по телам качения и беговым дорожкам, суточные колебания температур и их влияние на характеристики смазочного материала, движение смазочного материала в полостях опорного кольца.

**Ключевые слова:** опорно-поворотное устройство, трёхрядный роликовый подшипник, износ, исследования.



**Пенчук**  
Валентин Алексеевич



**Сидоров**  
Владимир Анатольевич

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В конструкциях опорно-поворотных устройств (ОПУ) башенных кранов всё чаще используют трёхрядные роликовые подшипники, имеющие высокую точность изготовления, повышенную грузоподъёмность, наличие закалённых беговых дорожек. Это обеспечивает устойчивость поворотных башен, стабильную работу опорных устройств. Однако, специфические условия эксплуатации, особенности конструкции, нарушения при обслуживании и др. приводят к ускоренному износу беговых дорожек и тел качения, значительно сокращая расчётный срок службы.

## АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Тенденция последних лет связана с увеличением разнообразия конструкций (ОПУ) выпускаемых фирмами: SKF, Rothe Erde, Rotis d.o.o., Liebherr, Iraundi S.A., FAG INA и др. [1...5]. Одновременно увеличивается количество предложений по ремонту опорно-поворотных устройств [6...10]. В результате проведения визуального осмотра установлено, что на беговых дорожках появляется неравномерный механический износ. Одной из операций при ремонте ОПУ является замена тел качения, следовательно, фиксируется их износ. Определены основные операции при восстановлении колец — наплавка, замена резьбовых соединений, очистка, проточка и др. В целом это совпадает с перечнем неисправностей ОПУ, приведенном в ГОСТ 13556-91 [11]: перекося за счёт технологического люфта и износа дорожек катания более 4/1000; разрушение или разворот тел роликов, разрушение сепараторов; ослабление затяжки болтов ОПУ и др. Эти повреждения могут быть устранены при проведении восстановительных работ.

В работах [12, 13] отмечается необходимость своевременного определения технического состояния ОПУ безразборными методами, в частности методы анализа смазки для повышения степени безопасности и надёжности работы. В тоже время отсутствуют комплексные исследования по установлению причины механического износа, а не контроля за формами проявления данного износа.

Современные верхнеповоротные краны, обладая грузоподъёмностью более 10 т, неподвижной башней, могут быть переоборудованы в — наиболее универсальные, использующиеся в качестве самоподъёмных и передвижных [14]. Наиболее вероятно увеличение количества именно этих конструкций кранов. Поэтому работа по определению причины снижения долговечности основного элемента крана — ОПУ является актуальной.

**ЦЕЛЬ СТАТЬИ**

Планирование последовательности исследования причин ускоренного износа опорно-поворотного устройства башенных кранов, использующих трёхрядные роликовые подшипники, на основе оценки приоритетности влияния отдельных причин на общее значение износа.

**ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ**

На основании опыта исследования причин ускоренного износа опорных колец механизмов поворота металлургических машин [15], с учётом особенностей конструкции и эксплуатации разработан граф развития повреждений элементов ОПУ башенного крана, с учётом взаимного влияния причин, показанный на рис. 1. Относительно предложенной последовательности рассматриваются причины и следствия и возможности их контроля в полевых условиях или моделирования в лабораторных.

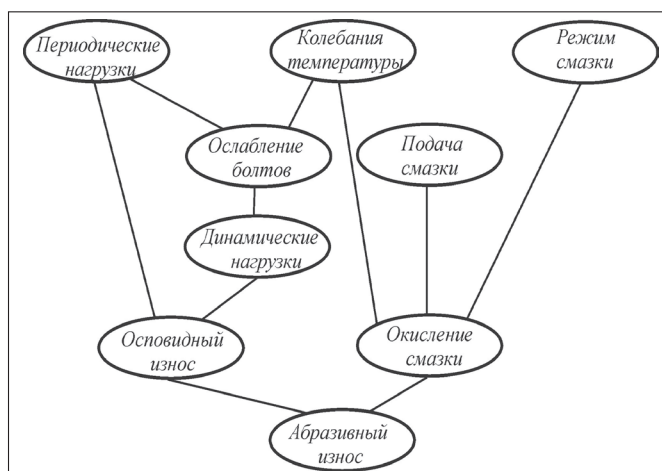


Рис. 1. Граф развития повреждений элементов ОПУ башенного крана

Периодические нагрузки являются основным режимом в технологическом цикле работы башенного крана. Данные нагрузки должны соответствовать нагрузочным характеристикам опорных колец и находиться в зоне статических нагрузок. Расчёт долговечности опорного кольца проводится в соответствии с методикой фирмы Rothe Erde GmbH [2]. Исходными данными являются суммарная вертикальная нагрузка  $F_a$  и суммарный опрокидывающий момент  $M_k$  (рис. 2а). Исходя из теоретического графика допустимых значений нагрузки для базовых 30000 циклов (рис. 2б) определяется коэффициент нагрузки подшипника  $f_L$  для вертикальной нагрузки  $F_a$  и опрокидывающего момента  $M_k$ :

$$f_L = F_{a0} / F_a; \tag{1}$$

$$f_L = M_{k0} / M_k. \tag{2}$$

Полученное значение используется для определения срока службы опорного кольца, как допустимого числа циклов работы, рассчитываемого по формуле:

$$G = (f_L)^p \times 30000, \tag{3}$$

где  $p = 3$  – показатель степени.

Данный подход является типовым для определения долговечности подшипников качения. Одновременно, каждая фирма-изготовитель приводит индивидуальные характеристики для базовых 30000 циклов работы. Данные, приведенные на рис. 3 соответствуют опорному кольцу с внешним зубчатым зацеплением (внешний диаметр ~ 2800 мм, внутренний диаметр ~ 2300 мм, высота – 147 мм). Это указывает на особенности технологических процессов изготовления, термообработки и применяемых материалов.

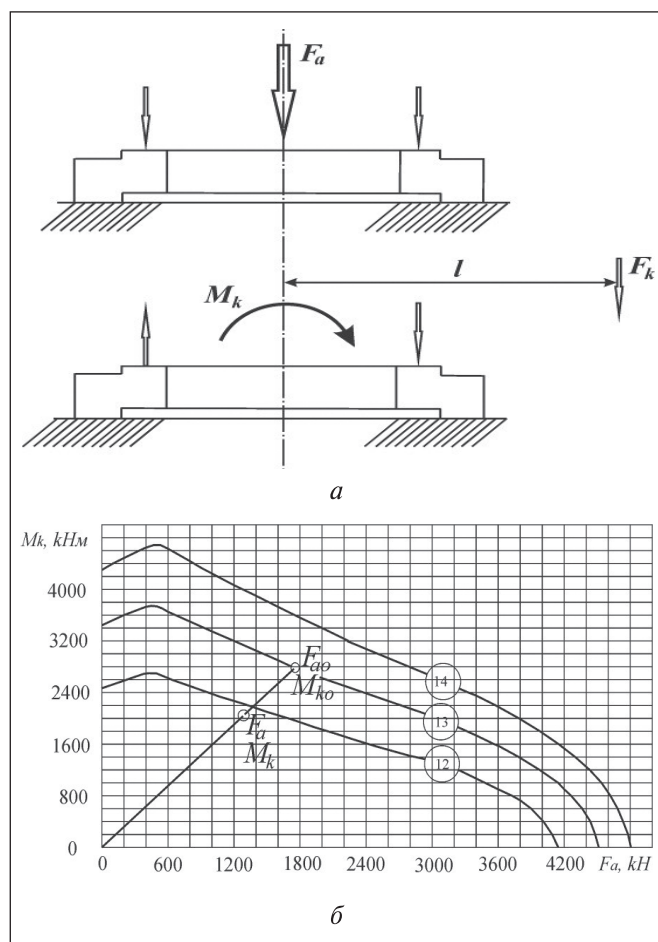


Рис. 2. Схема к определению коэффициента нагрузки опорного кольца с условным обозначением 13: а) расположение действующих сил; б) график допустимых значений нагрузки для различных размеров опорных колец с условными обозначениями – 12, 13, 14

Изменение вращения при работе башенного крана, сопровождаются выборкой бокового зазора в зубчатом зацеплении и появлением дополнительных нагрузок. В случае многодвигательного электромеханического привода наиболее эффективным методом общей оценки состояния является определение разности между эталонным и фактическим значением КПД, определённом при подъёме грузов разной массы  $Q$  с различной скоростью  $V$ . Эталонное значение КПД аппроксимируется зависимостью вида:

$$\eta_\phi = a + b \cdot \ln(Q/Q_n) + c / (V/V_n), \tag{4}$$

где  $a, b, c$  – коэффициенты регрессии.

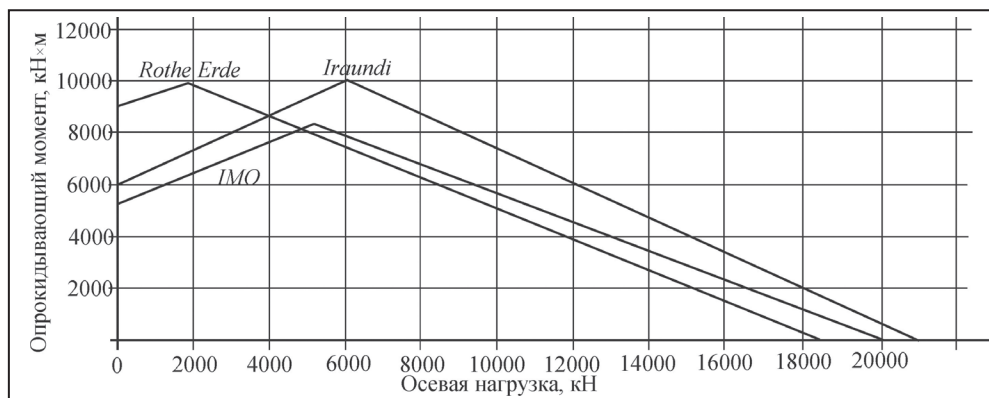


Рис.3. Индивидуальные характеристики фирм-изготовителей для базовых 30000 циклов работы опорного кольца одного типоразмера

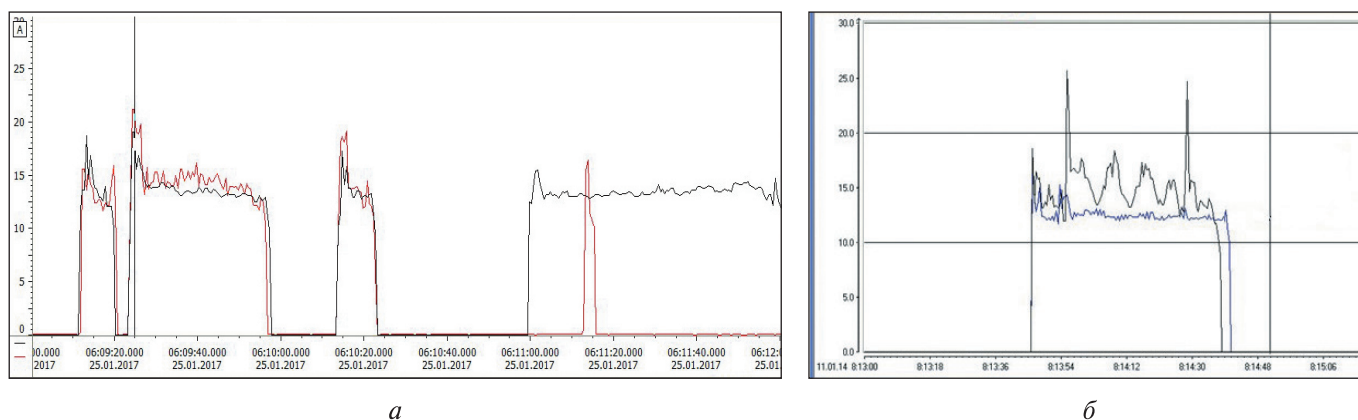


Рис. 4. Токовые характеристики исправного (а) и неисправного (б) электромеханического привода механизма поворота башни

Полученная зависимость должна оставаться неизменной при сохранении исправного технического состояния механизма. Появление начальных повреждений приведёт вначале к снижению КПД в определённом режиме, а затем во всём контролируемом диапазоне. Это позволяет использовать КПД в качестве первичного диагностического признака, свидетельствующего об ухудшении технического состояния механизма подъёма. Индивидуальное состояние оценивается по отклонениям токовых характеристик, пример такого отклонения приведен на рис. 4.

Суточные колебания температуры опорного кольца могут составлять 20..30°C и совместно с воздействием периодических сил приводят к ослаблению резьбовых соединений и возникновению динамических нагрузок. Изменение вибрационных характеристик, в этом случае наиболее эффективный метод диагностирования. Среди современных средств для измерения вибрационных параметров следует отметить комплекс первичных преобразователей, соединительных кабелей, универсального 16-ти канального измерительного блока UMS-16 и рабочего места оператора с ПК или ноутбуком, монитором, принтером, устройствами периферии и источником бесперебойного питания. Настройка, управление измерениями, сбор, обработка, запись, просмотр, анализ и хранение данных, формирование протоколов осуществляется в программном обеспечении SAFE PLANT.

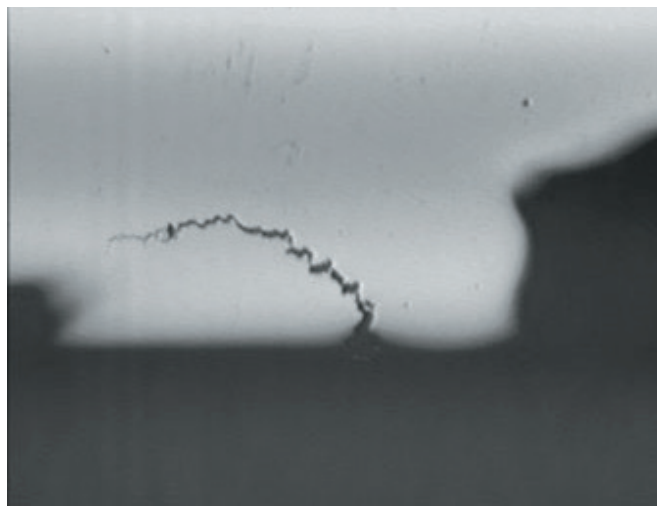
Следствием воздействия многократных нагрузок (достигающих предела выносливости) является осповидный износ, сопровождающийся шелушением (на ранних стадиях) поверхности беговых дорожек и появлением продуктов износа (рис. 5).

Трёхрядный роликовый подшипник, типовой конструкции фирмы «Rothe Erde» – Standard series RD 900, в металлургической промышленности используется со середины 80-х годов прошлого века, в качестве привода бесконусного загрузочного устройства доменной печи. В это время происходили отказы данного опорного кольца из-за заклинивания, разрушения сепаратора и разворота роликов вдоль беговой дорожки. Причина – нарушения режима смазывания в результате накопления окисленных продуктов смазки. Были предприняты конструкторские попытки решить данную задачу изменением количества и расположения каналов, подающих смазочный материал. Известны решения с двумя, тремя и четырьмя уровнями подвода смазки в 6-ти или 8-ми точках, равномерно расположенных по окружности (рис. 6). Наиболее вероятно, что задача будет решена после определения закономерностей движения потоков смазочного материала в полостях опорного кольца. При этом необходимо учесть последовательность подачи смазочного материала по уровням.



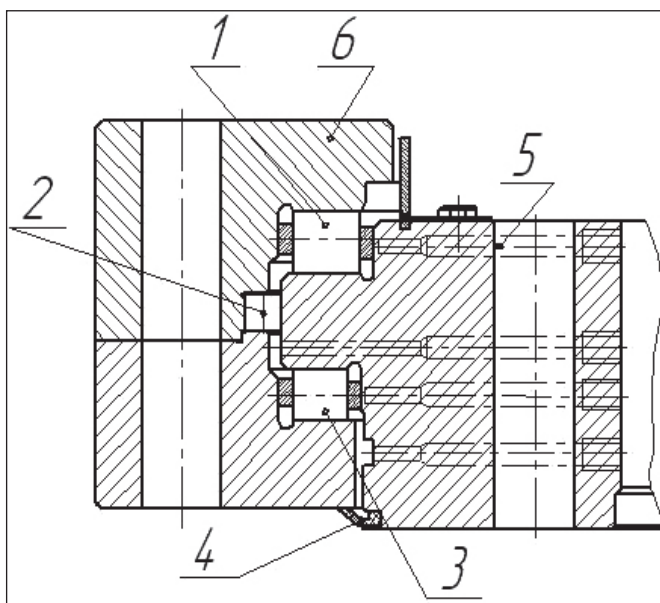


а

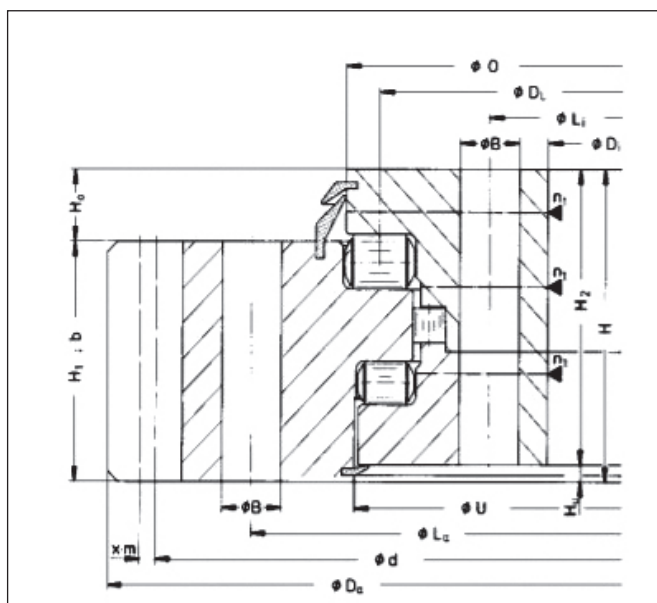


б

Рис. 5. Осповидный износ на беговых дорожках (а), фрагменты микроструктуры в разрушенном ролике (б) при  $\times 100$  увеличении



а



б



в

Рис. 6. Общий вид (а) трёхрядного роликоподшипникового поворотного кольца: ролики: 1 – опорные; 2 – радиальные; 3 – контропорные; 4 – пыльник; 5 – неподвижное кольцо с каналами для подачи смазки; 6 – подвижное кольцо;  
б) пример конструкции с тремя уровнями подвода смазочного материала;  
в) расположение точек подвода смазочного материала по окружности



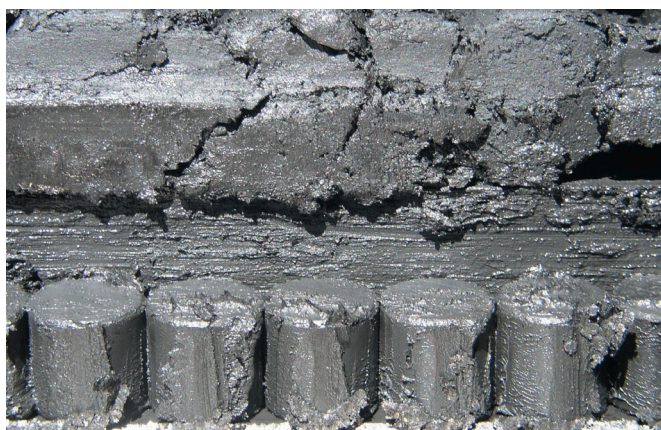
В настоящее время, при нарушении режима смазывания, при суточных колебаниях температур, происходит коксование смазочного материала по верхнему ряду роликов. Более частое смазывание позволяет исключить коксование смазки (рис. 7), однако продукты окислительного выкрашивания всё равно присутствуют в поворотном кольце. В результате происходит повышение коэффициента трения и разворот роликов вдоль беговой дорожки с последующей деформацией и разрушением.

Износые повреждения имеют различную скорость, которая увеличивается в 3...5 раз после износа твёрдого поверхностного слоя. Значения фактического

линейного износа опорного кольца позволяют своевременно обнаружить начало ускоренного износа, принять меры по снижению скорости изнашивания и своевременно подготовиться к замене. Износ измеряется штатным мерительным инструментом периодически или индикаторами перемещения при подъёмопуске груза.

Наличие продуктов износа в смазочном материале приводит к абразивному износу, разрушению сепаратора, деформации и разрушению тел качения (рис. 8).

Преобладание абразивного износа позволяет использовать предположение о пропорциональности



а



б

Рис. 7. Коксование смазки (а) и состояние смазочного материала через 4 года эксплуатации (б) при более частом смазывании



а



б



в

Рис. 8. Абразивный износ беговой дорожки опорного кольца (а, в), деформации сепаратора и роликов (б)



между распределением сил на тела качения и диаграммой распределения износа верхнего поворотного кольца, в случае преобладания абразивного износа. Нагрузка распределена между роликами в секторе износа верхнего кольца, и зависимость должна иметь линейный характер.

Площадь диаграммы износа, должна быть пропорциональна площади диаграммы распределения сил между телами качения. Силы, действующие на подшипник и ролик, складываются из вертикальной силы  $Q = m_0 \times g$ , где  $m_0$  – суммарная масса поворачивающихся элементов механизма, и опрокидывающего момента  $M_0$ . Реакция от опрокидывающего момента по опорным кольцам подшипника при диаметре подшипника  $D_n$ :

$$R_M = M_0 / D_n, \quad (5)$$

Реакция от веса конструкции распределяется равномерно между  $n$  роликами верхнего опорного ряда. На один ролик приходится часть вертикальной силы:

$$R_{B1} = Q/n \quad (6)$$

Площадь, под кривой износа:

$$Y = \int_a^b y_i dx, \quad (7)$$

где  $y_i$  – текущее значение износа;  
 $a, b$  – угловые координаты зоны износа верхнего кольца подшипника.

Площадь под эпюрой сил –  $R_B \times \alpha_{a-b}$ . Это позволяет определить коэффициент пропорциональности:

$$k = R/Y \quad (8)$$

Нагрузка в наиболее нагруженном секторе  $15^\circ$ :  $R_{max} = k \cdot y_{max}$ , распределяется между  $n/24$  роликами. Предполагая равномерность распределения нагрузки в выбранном секторе, определяем нагрузку на ролик от опрокидывающего момента:

$$R_{M1} = 24R_{max} / n \quad (9)$$

Суммарная нагрузка на наиболее нагруженный ролик составит:

$$R_l = R_B + R_M \quad (10)$$

По известной методике, находим сумму кривизны поверхностей контакта подшипника:

$$\sum \rho_e = \frac{2}{D_w} \quad (11)$$

где  $D_w$  – диаметр тел качения;

малую полуось площадки контакта:

$$b_B = \frac{6,68 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \left( \frac{R_l}{\sum \rho \cdot l} \right)^{1/2}, \quad (12)$$

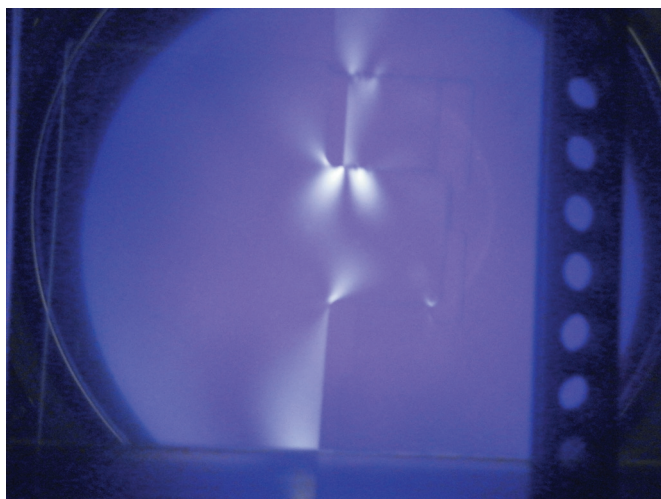
где  $l$  – длина ролика, мм;

и максимальное нормальное напряжение:

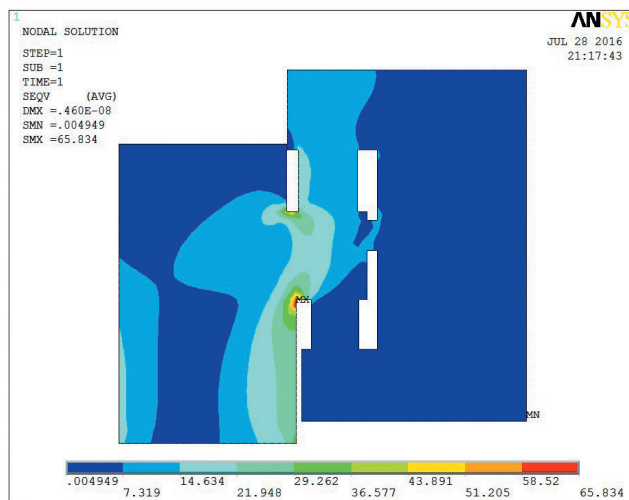
$$\sigma_{max} = \frac{2 \cdot R_l}{\pi \cdot l \cdot b_A}. \quad (13)$$

Исходя из данного предположения, проведен расчёт фактических напряжений в зоне контакта. Полученные значения 1300...1500 МПа в 2,5...3,1 раза меньше предельного значения 4000 МПа указанного в стандарте [16]. Следовательно, статическая нагрузка не может служить причиной возникновения осповидного выкрашивания.

Напряжения, действующие на площадках контакта, зависят от степени прилегания, затяжки, выверки колец. Моделирование напряжённого состояния предполагается осуществить с использованием математических методов, включая метод конечных элементов и оптико-поляризационный метод на плоских моделях (рис. 9). Качественный характер полученных данных следует уточнить по результатам комплекса предложенных исследований, включая завершающий этап – визуальный осмотр.



а



б

Рис. 9. Моделирование напряжённого состояния в элементах опорного кольца: а) оптико-поляризационный метод; б) метод конечных элементов



## ВЫВОДЫ

1. Определены следующие причины ускоренного износа опорно-поворотного устройства башенных кранов — абразивный износ, возникающий в результате осповидного выкрашивания и коксования смазочного материала.

2. Дополнительными факторами, влияющими на состояние опорно-поворотного устройства, являются периодические статические и динамические нагрузки, ослабление резьбовых соединений, суточные колебания температуры, нарушения режима смазывания, накопление продуктов износа в смазочном материале.

3. Планируемый объём последующих исследований включает:

- определение рациональных режимов и последовательности подачи смазочного материала в трёхрядный роликовый подшипник;
- анализ стабильности токовых характеристик приводных двигателей и определения эталонного поля значений КПД исправного опорного кольца;
- определение причин, возникающих дополнительных динамических нагрузок путём измерения и анализа вибрационных характеристик опорного кольца.

---

## Список литературы

1. *Slewing bearings. SKF Group. PUB BU/P2 06115/2 EN - January 2015.* [http://www.precise-rotation.ru/\\_ld/1/145\\_slewing\\_bearing.pdf](http://www.precise-rotation.ru/_ld/1/145_slewing_bearing.pdf).
2. *Slewing bearings. Rothe Erde.* [https://www.promsnab.info/catalogues/rotheerde/rothe\\_erde\\_gwl\\_en\\_13.08\\_v05w.pdf](https://www.promsnab.info/catalogues/rotheerde/rothe_erde_gwl_en_13.08_v05w.pdf).
3. *Slewing bearings with diameter ranging between 200 mm and 5000 mm. Rotis d.o.o.* <https://www.rotis-lj.si/en/slewing-bearings/types-of-slewing-bearings>.
4. *Оптимизированные, надежные и долговечные Опорно-поворотные устройства Либхерр. Liebherr-Russland ООО. Printed in Russia BK COB-GWL-PLB-0.3-12.17\_ru.*
5. *Coronas rotativas slewing bearings. IRAUNDI, S.A. TC.16.01. E1.* [https://www.iraundi.com/archivos/201903/iraundi\\_coronas\\_rotativas.pdf](https://www.iraundi.com/archivos/201903/iraundi_coronas_rotativas.pdf).
6. *КРАН-МАСТЕР — продажа дорожно-строительной техники, запчасти, сервисный центр в Челябинске, Москве. Восстановление, ремонт и замена опорно-поворотного устройства подшипника (ОПУ) башенного крана.* <https://74kran.ru/p336812884-vosstanovle-nie-remont-zamena.html>.
7. *«УзличКранСервис». Ремонт опорного поворотного круга (ОПУ) башенных кранов.* [https://www.ukс76.ru/remont/remont\\_OPU\\_5](https://www.ukс76.ru/remont/remont_OPU_5).
8. *Авто-новости. Ремонт опорно-поворотного устройства.* <http://ukrmap.kiev.ua/category/2011766135-remont-oporno-povorotnogo-ustroystva.html>.
9. *Рябцев, И. А. Восстановление колец опорно-поворотного устройства крана МКТ-250 / И. А. Рябцев, Ю. М. Кусков, Я. П. Черняк, И. Г. Острик, В. Л. Бондарчук // Сварщик №4 (38) 2004 г. с. 35-37.*
10. *Черняк, Я. П. Опыт наплавки деталей и узлов строительной и дорожной техники / Я. П. Черняк // Автоматическая сварка. № 3, 2013 г. с. 56-59.*
11. *ГОСТ 13556-91. Краны башенные строительные общие технические условия. Издание официальное. Комитет стандартизации и метрологии СССР. Москва.*
12. *Диагностирование опорно-поворотных устройств.* <https://lektisia.com/9x6944.html>.
13. *Основные средства. Д. Абдюшев. Чтобы проверить, не обязательно разбирать. Безразборные методы диагностики.* <https://os1.ru/article/7224-chtoby-proverit-neobyazatelno-razbirat-bezrazbornye-metody-dagnostiki>.
14. *Белецкий, Б. Ф. Строительные машины и оборудование: Спр-е пособие / Б. Ф. Белецкий, И. Г. Булгакова // Ростов-на-Дону: Феникс, — 2005, 608 с.*
15. *Сидоров, В. А. Ускоренный износ опорного кольца свода электродуговой печи / В. А. Сидоров // «Сталь». 2015 г. № 5. — С. 71-75.*
16. *ГОСТ 18854-94. Подшипники качения. Статическая грузоподъемность. Введ. с 01.09. 1996. — М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. — 18 с.*