

45.02.02

705

Министерство высшего и среднего специального образования СССР  
ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

БЛОХИН Леонид Гаврилович

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ И КОНТАКТНЫХ НАГРУЗОК  
РОЛИКОВЫХ ОПОРНО-ПОВОРОТНЫХ КРУГОВ

специальность 05.02.02 - "Машиноведение и детали машин"

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск - 1973

ЧПИ

Работа выполнена на кафедре "Детали машин и подъемно-транспортные машины" Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола и Челябинском механическом заводе.

Научный консультант - кандидат технических наук, доцент ЛОПАТКИН М.Г.

Официальные оппоненты:

заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор ДОМБРОВСКИЙ Н.Г.; кандидат технических наук, старший научный сотрудник КАЗАНСКИЙ А.И.

Ведущее предприятие - Ивановский завод автомобильных кранов.

Автореферат разослан "15 сентября 1973 года.

Защита состоится "17 октября 1973 г., в 15 часов, (ауд. 244) в Совете по присуждению ученых степеней машиностроительных факультетов Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

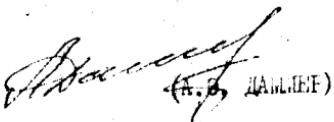
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета или прислать отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью.

Отзывы просим направлять по адресу:

454044, г. Челябинск-44, проспект им. В.И. Ленина, 76, секретарю Совета.

Ученый секретарь Совета -  
доцент, кандидат технических наук

  
(A.B. ДАЛМАТОВ)

Ускорение темпов научно-технического прогресса, намеченное Директивами ХХІІ съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971-75 г.г., ставит перед машиностроением большие задачи по созданию новых и повышению технического уровня выпускаемых машин.

Выполнение широкой программы строительства промышленных, энергетических и гражданских объектов в нашей стране немыслимо без широкой механизации. Десятки тысяч экокаваторов, подъемных кранов и других строительных машин заняты на сооружении жилых и промышленных зданий, электростанций и монтаже оборудования.

В этих условиях особенно актуальным является повышение надежности основных узлов и механизмов строительных и дорожных машин, в том числе и крупногабаритных опор качения.

Дальнейшее совершенствование стрелового гусеничного крана ДЭК-25I, серийно выпускаемого Челябинским механическим заводом и удостоенного в 1971 году Государственного Знака Качества, предусматривает, наряду с другими мероприятиями, повышение долговечности роликовых опорно-поворотных кругов (ОПК). Положительный опыт, накопленный в процессе улучшения основных параметров ОПК строительных машин, безусловно, может быть использован при конструировании аналогичных устройств и будет способствовать более широкому их распространению в различных отраслях машиностроения.

Настоящая работа посвящена изучению ряда вопросов, связанных с расчетом, конструированием и повышением несущей способности крупногабаритных роликовых опор, применяемых в машиностроении и прежде всего в конструкции стрелового гусеничного крана ДЭК-25I.

Работа состоит из введения и пяти глав. В первой главе проводится анализ конструкций опорно-поворотных устройств. Показано преимущества роликовых ОПК, впервые в нашей стране разработанных и примененных в строительных кранах Челябинского механического завода в 1959-62 г., перед многокатковыми, многоколесными и шариковыми ОПК.

Более, чем 10-летний период эксплуатации роликовых ОПК показал, что основным видом их повреждения является усталостное выкрашивание дорожек качения, помимо этого на дорожках качения могут возникать заидры, контактная коррозия, серповидные риски вследствие трения торцев роликов. Повреждение роликов заключается в откальвании кромок.

На основании длительных наблюдений проведена вероятностная оценка долговечности роликовых ОПК кранов ДЭК-25 по усталостному выкрашиванию дорожек качения. Рассечение долговечности ОПК описывается нормальным законом распределения величин отклонения. На основании этого срок службы ОПК кранов ДЭК-25 составил  $64,6 \pm 6,25$  месяца, т.е. примерно половину срока службы кранов до капитального ремонта. По следнее обстоятельство позволяет считать работу по повышению долговечности ОПК весьма актуальной.

Как показывает анализ конструкций роликовых ОПК, ОПК кранов ДЭК-25 и ДЭК-25I аналогичны кругам отечественных заводов и зарубежных фирм по общему устройству, технологии изготовления, материалам, применяемым смазкам. Положительным является размещение опорных поверхностей ОПК крана ДЭК-25I на массивных стальных кольцах, приваренных к металлоконструкциям ходовой рамы и поворотной платформы и обработанных после приварки до чистоты  $\nabla 5 + \nabla 6$ . Кроме того, эти кольца опираются на рамные конструкции, имеющие в плане вид восемиугольника. Вышеупомянутые особенности сопряженных с ОПК опорных участков металлоконструкций рамы и платформы обеспечивают их практически одинаковую жесткость по всему периметру ОПК и весьма благоприятно влияют на распределение нагрузок между роликами.

Обзор литературного материала и изучение конструкций роликовых ОПК показал также, что в настоящее время способы повышения их долговечности весьма ограничены и как правило требуют значительного изменения экономически оправданных и сложившихся конструкций элементов ОПК.

Во второй главе рассматриваются теоретические вопросы кинематики роликовых ОПК и их основные параметры: момент сопротивления вращению от сил трения (МСВ), потери.

Несмотря на широкое распространение роликовых ОПК в настоящее время методика определения их МСВ от сил трения разработана недостаточно. Как показывает литературный обзор, существующие расчетные формулы, а также приводимые в литературе величины коэффициентов трения дают значительные расхождения при подсчете МСВ. Состояние этого вопроса характеризовано проф. Д.П. ВОЛКОВЫМ в монографии "Динамика и прочность одноколесовых экскаваторов": "Для закрытых шариковых или роликовых опорно-поворотных устройств, которые начали находить применение в экскаваторах в последнее время, достаточно точных аналити-

ческих зависимостей для определения момента трения еще не разработано". Действительно, в известных формулах не нашло отражения соотношение сил трения качения и скольжения элементов ОИК, не учитывается распределение нагрузки вдоль контакта роликов с дорожками качения, хотя известно, что под действием опрокидывающего момента происходит перекашивание дорожек ОИК. Наконец, не представляется возможным оценить максимальные значения приведенного коэффициента трения, например, при ухудшении условий смазки.

Кинематика ОИК рассмотрена при следующих предположениях:

- 1) сила трения и коэффициенты трения в контакте постоянны;
- 2) контакт роликов с дорожками качения осуществляется по линии, а не по площадке. Известно, что такое допущение оправдано при  $\frac{b}{a} = 0,25$ , где  $b$  - половина ширины,  $a$  - половина длины полосы контакта;
- 3) удельная нагрузка на роликах изменяется по трапециoidalному закону от  $q_1$  до  $q_2$ ;
- 4) ролики каждой группы катятся по одинаковым радиусам;
- 5) оси роликов занимают радиальное положение по отношению к оси вращения ОИК, что обеспечивается малыми торцевыми зазорами и сборкой роликов с некоторым окружным натягом.

При качении верхнего конусного кольца (рис.1) по роликам скорость по длине линии контакта  $CN$  изменяется на кольце от  $V_c$  до  $V_h$ , а на роликах от  $V_c$  до  $V_h$ . Чистое качение имеет место лишь в полюсе качения 0, где окружные скорости конусного кольца и ролика равны. Момент сопротивления вращению (МСВ)  $M_s$  каждого из роликов уравновешивается разностью моментов сил трения  $F_t$  и  $F_{t0}$ .

$$M_s = F_t \cdot 2r - F_{t0} \cdot 2 = \left( \int_{q_1}^{q_2} q_x f dx - \int_{q_1}^{q_2} q_{x0} f dx \right) \cdot 2, \quad (1)$$

где  $2r$  и  $2a$  - диаметр и длина ролика,  $m$  - смещение полюса качения,  $f$  - коэффициент трения скольжения между кольцом и роликами,

$q_x$  - текущее значение удельных нагрузок:

$$q_x = q_1 + (q_2 - q_1) \frac{x}{2a} \quad (2)$$

С другой стороны, МСВ ролика определяется суммой моментов сил трения качения и верчения торца ролика о дорожки противоположной группе роликов:

$$M_s = M_{kay} + M_b, \quad (3)$$

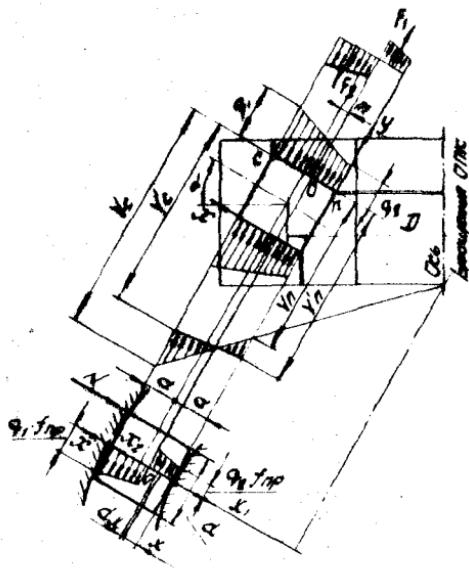


Рис. 1. Распределение скоростей и сил трения в роликовом ОИК

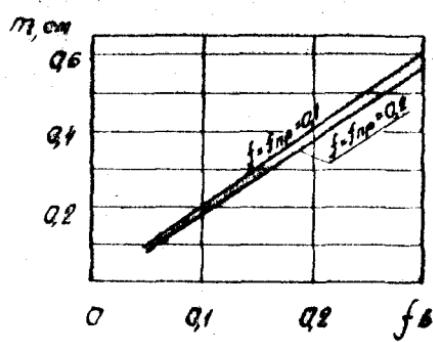


Рис. 2. Влияние величины коэффициентов трения скольжения на смещение полюса качения

$$\text{Причем } M_{\text{как}} = \frac{2Q_1 f^{\mu}}{\cos \alpha} = 2(q_1 + q_2) \cdot a \mu \quad (4)$$

$$M_B = N \cdot e f_B = 2f_B \left( \int_{x_1}^{x_2} q_{x_1} f_{\text{тр}} \cdot x_1 dx_1 + \int_{x_1}^{x_2} q_{x_2} f_{\text{тр}} \cdot x_2 dx_2 \right). \quad (5)$$

В уравнениях (4,5)  $Q_i$  - вертикальная нагрузка на один ролик,  $\mu$  - коэффициент трения качения,  $\alpha$  - угол наклона оси ролика к плоскости вращения ОПК,  $N$  - сила нормального давления на дорожку качения со стороны ролика,  $f_B$  и  $f_{\text{тр}}$  - коэффициенты трения верхней торца ролика и проскальзывания относительно дорожки качения,  $q_{x_1}$  и  $q_{x_2}$  - текущие значения удельной нагрузки по обе стороны от т.о., совпадающей с началом координат для осей  $x_1$  и  $x_2$ .

$$q_{x_1} = q' - (q_1 - q_2) \frac{x_1}{a \cdot m} \quad (6)$$

$$q_{x_2} = q' + (q_1 - q_2) \frac{x_2}{a \cdot m} \quad (7)$$

$$q' = \frac{a(q_1 + q_2) - m(q_1 - q_2)}{2a}.$$

Приравнивая (1) и (3) с учетом (4,5), получаем уравнение для подсчета  $m$ :

$$\begin{aligned} m^2 \cdot m \frac{f \cdot e (q_1 + q_2) - f_B f_{\text{тр}} \cdot a (q_1 - q_2)}{\frac{f \cdot e}{2a} (q_1 - q_2) + f_B f_{\text{тр}} (q_1 + q_2)} - \\ - \frac{f \cdot e}{2a} (q_1 - q_2) - 2a \mu (q_1 + q_2) - f_B f_{\text{тр}} \cdot a^2 (q_1 + q_2) = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Приведенные уравнения получены для наиболее общего случая распределения удельной нагрузки. Соответствующие уравнения для других видов нагружения роликов по их длине можно получить, задаваясь соотношениями  $q_1$  и  $q_2$ . Так при  $q_1 = q_2 = q$  получаем постоянное давление вдоль роликов, при  $q_2 = 0$  и  $q_1 = 2q$  - распределение удельной нагрузки по закону треугольника и т.д.

На рис.2 представлены значения смещений полюса качения в зависимости от коэффициентов трения скольжения  $f$ ,  $f_B$  и  $f_{\text{тр}}$  при  $Q = 2 = 1,8$  см (применительно к ОПК крана ДЭК-251). Во всех случаях наблюдается смещение т.о в сторону уменьшения передаточного числа, т.е. к оси вращения ОПК.

Вышеприведенные рассуждения справедливы для ОПК с равными углами наклона осей роликов обеих групп к плоскости вращения. Практически, с целью выравнивания нагрузок на ролики опорной и подхватывающей

Групп, углы наклона осей роликов выбираются разными. Так в ОПК края ДЭК-251 принято  $\alpha_1 = 30^\circ$  для роликов опорной группы и  $\alpha_2 = 60^\circ$  для роликов подхватывающей. Разные углы наклона осей роликов приводят к тому, что ролики в разных группах катятся по разным радиусам (рис.3). Так как ролики опорной группы катятся по большему радиусу, то они должны обгонять ролики подхватывающей группы. Величина разности радиусов может изменяться из-за смещения полюсов качения роликов под нагрузкой. Так при постоянном давлении вдоль роликов разность радиусов

$$m_s = \frac{m' - m}{\cos \alpha_1} (\cos \alpha_1 - \sin \alpha_1) \quad (9)$$

где  $m' = \frac{d}{2} (\cos \alpha_1 - \sin \alpha_1)$  – геометрическая разность радиусов качения роликов в обеих группах.

Наиболее неблагоприятный случай имеем при сочетании эшор контактных давлений с расположением максимумов по разные стороны от полюса качения для роликов опорной и подхватывающей групп. Это приводит к повышению нагрузок на сепарирующие прокладки и увеличению ИСВ. В общем случае, при трапециoidalном законе изменения контактных давлений и числе роликов  $n$

$$M = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{2d} \left\{ (q_i + q_{i+1}) / 2 \sin(\alpha_i + \alpha_{i+1}) \sqrt{R_i R_{i+1}} \tan(\alpha_i - \alpha_{i+1}) \mu_{tr} \right\}. \quad (10)$$

С учетом конкретного закона распределения контактных давлений

$$M = \frac{\Phi_e D}{2d} M_{tr}, \quad (11)$$

где  $\Phi_e$  – суммарные нагрузки на ролики опорной и подхватывающей групп,  $d$  и  $D$  – диаметр роликов и ОПК по центрам роликов,

$M_{tr}$  – приведенный коэффициент трения.

Для ОПК с  $\alpha_1 \neq \alpha_2$

$$M = M_{tr}, \frac{Q_0 D}{2d} + M_{tr} \frac{Q_1 D_1}{2d}, \quad (12)$$

где  $Q_0$  и  $Q_1$  – суммарные нагрузки, а  $M_{tr}$ ,  $M_{tr2}$  – приведенные коэффициенты трения для роликов опорной и подхватывающей групп. Значения  $M_{tr}$  для различных законов распределения контактных давлений, подсчитанные при  $a = 0,0015 \text{ см}$  и  $f = f_B = f_{tr} = 0,1$ , приведены в таблице I. В случае  $\alpha_1 < \alpha_2$   $M_{tr}$  определяется при  $m = m_s$ , где  $m_s$  находим согласно (9), т.е. в данном случае учитывается трение роликов о сепарирующие прокладки.

Как следует из таблицы I, максимальные значения  $M_{tr}$  при  $\alpha_1 = \alpha_2$

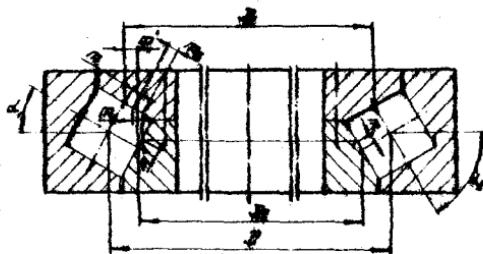


Рис.3. К определению полюса качения в ОПК с равными углами наклона осей роликов опорной и подхватывающей групп

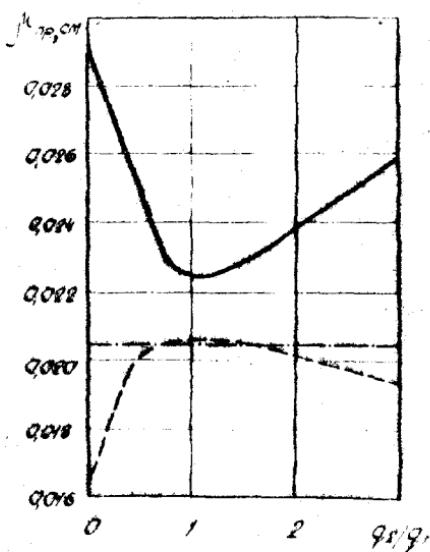


Рис.4. Изменение приведенного коэффициента трения  $\mu_r$  в зависимости от распределения контактных давлений вдоль роликов:

- без учета смещения полюса качения  $\mu_r$ ;
- — — без учета трения роликов о сепарирующие прокладки;
- · — с учетом трения роликов о сепарирующие прокладки

Таблица 1

Закон изменения давления вдоль линии контакта	Приведенный коэффициент трения	Смещение полюса качения, см	$M_{\text{тр}} \text{, кг}$	$\Delta M \text{, кг}$	$M_{\text{тр}} \text{ без учета, } m, \text{ см}$
Постоянный $q_1 = q_2 = q$	$2M_{\text{тр}} \frac{K_p}{a} \frac{(a^2 + m^2)}{a}$	0,2	0,02065	14,5	0,0205
Треугольный $q_1 = 2q; q_2 = 0$	$2M_{\text{тр}} \frac{K_p}{a} \frac{(a^2 + m^2)}{a}$	-0,61	0,0166	18,1	0,0205
Треугольный $q_1 = 0; q_2 = 2q$	$2M_{\text{тр}} \frac{K_p}{a} \frac{(a^2 + m^2 - m)}{a}$	0,82	0,0161	18,6	0,0205
Трапециoidalный $q_1 = 1,5q; q_2 = 0,5q$	$2M_{\text{тр}} \frac{K_p}{a} \frac{(a^2 + m^2 - \frac{m}{2})}{a}$	-0,26	0,0195	15,4	0,0205
Трапециoidalный $q_1 = 0,5q; q_2 = 1,5q$	$2M_{\text{тр}} \frac{K_p}{a} \frac{(a^2 + m^2 - \frac{m}{2})}{a}$	0,595	0,0195	15,4	0,0205

Таблица 2

Установка для плазменной резки горячих труб	Диаметр круга по центрам роликов, мм	Скорость вращения, об/мин		Число роликов	Диаметр роликов	Радиальная нагрузка на грузка на кругах, кгс	Максимальная нагрузка на ролик, кгс	Максимальные контактные напряжения по ГОСТу, кгс/см <sup>2</sup>
		круга	роликов					
Установка для плазменной резки горячих труб	1320	0,6+1,8	II-33	III0	$36 + 0,003$	4000	260	650
Установка для плазменной резки холодных труб	1600	0,42+1,26	9+27	III2		4500	240	630

соответствуют постоянному давлению вдоль роликов, несколько меньше при трапецидальном законе и значительно меньше при треугольном законе, т.е.  $\mu_{\text{тр}}$  уменьшается при смещении центра тяжести зигуры кон-tактных давлений к кромкам дорожек качения, что равноценно уменьшению длины ролика. В предельном случае, когда  $a=0$  и ролик превращается в бесконечно тонкий диск, сопротивление перекатыванию ролика будет определяться только трением качения:

$$\mu_{\text{тр}} = 2 \mu$$

Доля трения качения в  $\mu_{\text{тр}}$  сравнительно мала и может снижаться до 14,5% в случае постоянного давления вдоль роликов.

Трение роликов о сепарирующие прокладки при неравных углах на-клона осей роликов в обеих группах значительно повышает  $\mu_{\text{тр}}$ .

На рис.4 показана зависимость  $\mu_{\text{тр}}$  от вида распределения кон-tактных давлений. Минимальные значения  $\mu_{\text{тр}}$  с учетом трения о сепарирующие прокладки соответствуют постоянному давлению вдоль роликов и составляют 0,023 см. Предельное значение  $\mu_{\text{тр}}$  получено для наиболее неблагоприятного сочетания контактных давлений - по закону треугольника с максимумами, расположеннымами снаружи для опорной группы и внутри - подхватывающей группы роликов. При этом гео-mетрическая разность радиусов качения роликов в группах максималь-

на.

Для ОПК крана ДЭК-25I при  $\alpha_1=30^\circ$  и  $\alpha_2=60^\circ$  получаем

$$\mu_{\text{тр}_{\text{пред}}} = 0,0643 \text{ см}$$

Таким образом, величина приведенного коэффициента трения и, следовательно, МСВ зависят от их составляющих: коэффициентов трения качения и скольжения, длины роликов, соотношения углов наклона осей роликов и сочетания законов распределения контактных давлений для роликов опорной и подхватывающей групп.

Экспериментальные исследования момента сил трения для натурного ОПК крана ДЭК-25I были выполнены на специальном стенде. Стенд пред-назначен для испытания и обкатки ОПК и позволяет воспроизводить основные виды нагрузок, свойственных стреловым кранам:

Опрокидывающий момент	$\%$	до 100 тс.м
Вертикальная (осевая) нагрузка		до 98 тс
Радиальная нагрузка		до 10 тс
Угловая скорость вращения ОПК		1 об/мин
Наибольший диаметр испытываемого ОПК		2290 мм

На стенде проводятся исследования контактных нагрузок на тела качения в зависимости от профиля и перекосов дорожек качения, оцениваются упругие деформации колец и металлоконструкций крана, а также эффективность различных мероприятий по повышению долговечности дорожек и тел качения.

МСВ замеряли методом тензометрирования. Тензодатчики были размещены на валу ведущей шестерни, зацепляющейся с зубчатым венцом ОПК. Кроме того, МСВ определяли по усилию сопротивления вращению, которое в свою очередь замеряли посредством тензоглента, встроенного в канат, один конец которого обертивали вокруг промежуточного кольца ОПК, а другой - наматывали на барабан тяговой лебедки. В качестве измерительной аппаратуры использовали тензоусилитель ВАНЧ-7М и осциллограф Н-102.

На рис.5 сопоставляются экспериментальные и расчетные значения МСВ ОПК крана ДЭК-25I, причем в последнем случае  $\mu_{\text{эксп}}$  вычисляли по значениям коэффициентов трения, определенным экспериментальным путем. Так  $\mu$  вычисляли по усилию сопротивления перемещению ползуна, сжимаемого через ролики между двумя массивными стальными плитами. Коэффициент  $\lambda_B$  определяли на машине трения МИ-1М, а  $\lambda_H$  - по моменту сопротивления повороту ролика, помещенного между двумя стальными плитами, относительно оси, перпендикулярной площадке контакта. При смазке ЦИАТИМ-203 в диапазоне нагрузкой на ролики 500 + 4000 кг для роликов диаметром 36 мм и длиной 35 мм получено  $\mu = 0,0013 + 0,0016 \text{ см}$ ,  $\lambda_B = 0,1 + 0,11$ ,  $\lambda_H = 0,1 + 0,12$ . Контактные давления вдоль роликов определяли при помощи составных месдоз (см. ниже). Для исследуемых ОПК давления в контакте распределились по трапециoidalному закону. Получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений МСВ.

Оценивалось также влияние смазки на МСВ. Так для ОПК, поверхности качения которого были обезжирены, отмечено повышение МСВ в 2,5 + 3 раза по сравнению со смазкой ЦИАТИМ-203.

Третья глава диссертации посвящена оценке фактического уровня контактных нагрузок в роликовом ОПК. Как показал анализ кинематики, ОПК характеризуются относительным скольжением в контакте. Работами профессора М.М.САВЕРИНА установлено, что процесс усталостного выкрашивания протекает особенно интенсивно в случае совместного действия нормальных и касательных нагрузок в контакте катящихся тел.

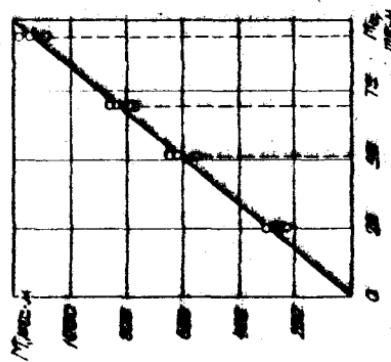


Рис. 5. Зависимость момента сопротивления вращения роликового ОПК от величины опрокидывающего момента  
 ● — эксперимент, — — расчет

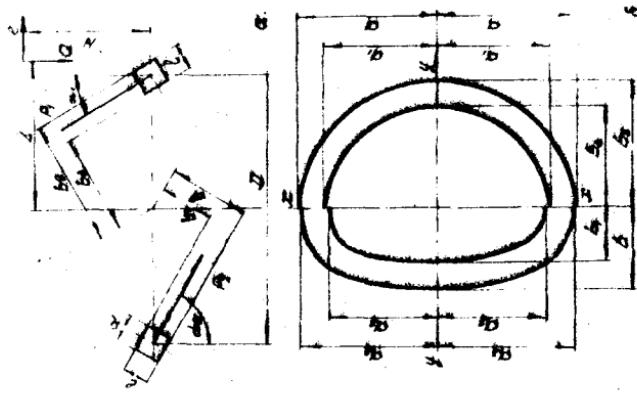


Рис. 6. Расчетная схема ОПК с учетом разных углов наклона осей роликов опорной и подхватывающей групп. а - геометрические размеры и схема нагрузки; б - условная площадь контакта

Поскольку в ОПК величина касательных нагрузок определяется непосредственно величиной нормальных контактных давлений, то определение последних позволит во многом объяснить усталостное выкрашивание дорожек качения.

Расчеты контактных нагрузок и напряжений, выполненные по общепринятой методике, показывают, что максимальные контактные напряжения в ОПК крана ДЭК-251 составляют  $I2500 + I3000 \text{ кгс}/\text{см}^2$  при допускаемых  $[G]_k = I7000 \text{ кгс}/\text{см}^2$ , таким образом, не объясняют причин усталостного выкрашивания дорожек.

Для расчетного определения нагрузок на наиболее нагруженный ролик рассмотрим расчетную схему ОПК, составленную с учетом разных углов наклона осей роликов в разных группах (рис.6). Удельные давления от опрокидывающего момента  $M_o$  и осевой силы  $Q$  записываем в виде

$$q_{1,2} = \frac{Q}{F \cos \alpha_{1,2}} \pm \frac{M_o}{W}, \quad (13)$$

где  $F$  - условная площадь контакта,  $W$  - момент сопротивления площади эллипсоидального колыца шириной  $l_{2d}$ ,  $l_{2d}$  - длина и диаметр роликов. Индексы "1" и знак (+) соответствуют опорной группе роликов, "2" и знак (-) - подхватывающей.

Параметры  $F$  и  $W$  зависят от углов наклона осей роликов, воспринимающих опорные и отрывющие усилия, к плоскости вращения. Так как для ОПК крана ДЭК-251  $\alpha_1 = 30^\circ$  и  $\alpha_2 = 60^\circ$ , то при подсчете удельных нагрузок необходимо рассматривать площадь и момент сопротивления площади эллипсоидального колыца с неравными малыми полуосями. В этом случае

$$W = \frac{J_{X_{47}}}{B_2 - y_0}, \quad (14)$$

где  $J_{X_{47}}$  - момент инерции эллипсоидального колыца относительно оси, проходящей через центр тяжести колыца и параллельной оси XX;

$y_0$  - координата центра тяжести колыца. Находим

$$J_{X_{47}} = \frac{\pi}{8} (a_3 b^3 - a_1 b_1^3 + a_2 b_2^3 - a_4 b_4^3) - \frac{8(a_3 b^2 + a_1 b_1^2 + a_2 b_2^2 + a_4 b_4^2)^2}{a_3 b^2 - a_1 b_1^2 - a_2 b_2^2 - a_4 b_4^2} \quad (15)$$

$$y_0 = \frac{S_{47}}{F} = \frac{4}{3\pi} \frac{a_3 b^2 - a_1 b_1^2 - a_2 b_2^2 - a_4 b_4^2}{a_3 b^2 - a_1 b_1^2 - a_2 b_2^2 - a_4 b_4^2} \quad (16)$$

Здесь  $S_{47}$  - статический момент площади эллипсоидального колыца относительно оси XX.

$$\begin{aligned} \text{Размеры полусей: } & a = 0,5(D + d \cdot \cos\alpha_1), \quad a_1 = 0,5(D - d \cdot \cos\alpha_1) \\ & a_2 = 0,5(D + d \cdot \cos\alpha_2), \quad a_3 = 0,5(D - d \cdot \cos\alpha_2), \quad b = 0,5(D \cdot \sin\alpha_1 + d), \\ & b_1 = 0,5(D \cdot \cos\alpha_1 - d), \quad b_2 = 0,5(D \cdot \cos\alpha_2 + d), \quad b_3 = 0,5(D \cdot \cos\alpha_2 - d). \end{aligned}$$

Учитывая, что в ОИК ДЭК-251  $\frac{d}{D} = 0,0173$ , получаем  
 $W = 0,0056 D^3$  и  $F = 0,0424 D^2$ .

Нагрузку на наиболее нагруженный ролик находим

$$P = q \cdot t \cdot d, \quad (17)$$

где  $t$  - шаг расположения роликов одной группы.

С учетом (14 - 16)

$$P_{1,2} = \frac{148 \alpha}{\pi \cdot D} \left( \frac{Q}{\cos\alpha_{1,2}} + \frac{5,54 M_0}{D} \right) + \frac{3R}{B \sin\alpha_{1,2}}. \quad (18)$$

Обычно суммарные нагрузки на ролики опорной группы примерно в 2 раза превышают нагрузки на ролики подхватывающей. Поэтому при определении наибольшей нагрузки на ролик подхватывающей группы необходимо учитывать соотношение радиальных составляющих нагрузок на ролики обеих групп. Суммарная нормальная нагрузка на ролики подхватывающей группы

$$q_{ee}(l_2 + 2y_b) = q_e(l_2 + 2y_b) + \frac{q_1(l_1 - 2y_b) \sin\alpha_1 - q_2(l_2 + 2y_b) \sin\alpha_2}{cos\alpha}, \quad (19)$$

где  $q_{ee}$  - удельная нагрузка на ролики подхватывающей группы с учетом радиальных составляющих удельных нагрузок  $q_1$  и  $q_2$ ;  
 $l_1$  и  $l_2$  - периметры, соответственно, правой и левой половин эллипсоидального кольца по середине его ширины

$$\begin{aligned} l_1 &= 0,5\pi[1,5(a+b) - \sqrt{ab}], \\ l_2 &= 0,5\pi[1,5(a''+b'') - \sqrt{a''b''}], \end{aligned} \quad (20)$$

$$\text{где } a' = 0,5(a+a_1), \quad b' = 0,5(b_2+b_3), \quad a'' = 0,5(a_2+a_3), \quad b'' = 0,5(b_1+b_2).$$

После преобразований, учитывая (17), получаем нагрузку на наиболее нагруженный ролик подхватывающей группы

$$P_{ee} = P_1 \cdot \frac{l_1 - 2y_b}{l_2 + 2y_b} \cdot t \cdot d, \quad (21)$$

При  $\alpha_1 = 30^\circ$   $A_1 = 0,625 A$  (Здесь  $A$  без учета радиальной нагрузки  $R$ ).

Кроме этого, нагрузки на ролики определяли экспериментальным путем как на стенде, так и непосредственно на кране ДЭК-25I. Из существующих методов экспериментального определения нагрузок на тела качения в многороликовых опорах наиболее приемлемым оказался тензометрический, основанный на использовании деформации роликов. Сравнительно большие размеры роликов позволили применить стандартные тензодатчики сопротивления. Проволочные тензодатчики с базой 10 мм и сопротивлением 100 ом наклеивали на дно канавок, прошлифованных на торцах, и на боковую цилиндрическую поверхность роликов. Тензодатчики соединяли по схеме полумоста, причем торцевые датчики составляли одно плечо, а боковые - другое плечо полумоста. Для исключения поворота роликов - месдоз в процессе испытаний к их боковым поверхностям были приклеены эпоксидным kleem сепарирующие прокладки. Таким образом, положение месдоз фиксировалось в собранном ОПК за счет соседних роликов, воспринимающих нагрузки противоположного направления. В качестве измерительной аппаратуры были использованы стандартные тензоусилители ВАНЧ-7М (2 шт) и ТА-5, а также стрелочный прибор М266И. Измерения проводили по автономной схеме, когда каждая из месдоз была постоянно соединена с определенным каналом тензоусилителя. Характеристика месдоз в интервале нагрузок до 6000 кг получена строго линейной. Месдозы устанавливали попарно в обеих группах роликов. На пример, для измерения опорных нагрузок на дуге  $180^\circ$  размещали 18 месдоз, а две месдозы для измерения максимальных подхватывающих нагрузок - в плоскости опрокидывающего момента диаметрально противоположно. Нагружение осуществлялось при испытании на стенде усилием гидроцилиндров, а на кране ДЭК-25I - грузами на разных вылетах стрелы.

На рис. 7, 8 показано распределение опорных нагрузок по роликам и изменение нагрузок на наиболее нагруженные ролики обеих групп при испытании на кране ДЭК-25I, производится сопоставление расчетных и экспериментальных значений максимальных нагрузок на ролики.

Как показали исследования, максимальные нагрузки и соответствующие им контактные напряжения находятся на уровне допускаемых (нагрузка на ролик в 4800 кгс соответствуют контактные напряжения 17000 кгс/см<sup>2</sup>).

Специальными опытами установлено, что изменение осевого зазора от нормального ( $0,35 \pm 0,4$  мм) до отрицательного (вытяг 150-200 кг

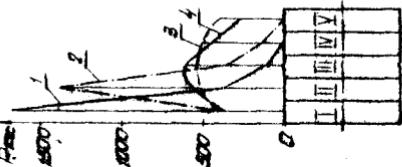


Рис. 9  
Распределение нагрузки по длине контакта роликов с дорожками качения.  
1 - ОИК крана ДЭК-251;  
2 - ОИК со скосами на дорожках качения;  
3 - дорожки качения подвернуты окоске;  
4 - ОИК с выпуклыми дорожками качения

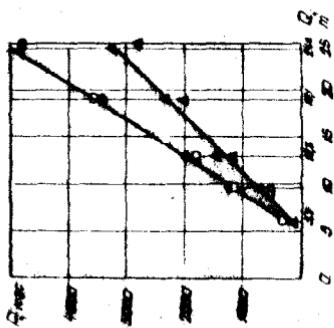


Рис. 8  
Нагрузка  $P$  на наиболее нагруженные ролики № 2 и № 15 в зависимости от груза на крюке  $Q$  при вылете  $L = 4,75$  м;  
○ ● - опорные на-  
грузки (эксперимент и расчет);  
▲ ▲ - подхватыва-  
емые нагрузки (экспе-  
римент и расчет)

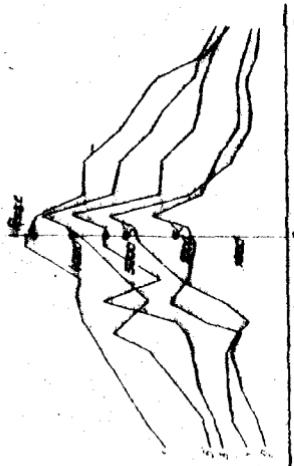


Рис. 7  
Распределение нагрузок по роликам опорной группы на кране ДЭК-251.  
Параметры нагружения —  
груз на крюке, т и  
вылет, м:  
1 - 25 и 4,75  
2 - 5,9 и 4,75  
3 - 9,7 и 8  
4 - 12,8 и 4,75  
5 - 19,1 и 4,75  
— эксперимент;  
— расчет

на ролик) несколько уменьшает максимальные нагрузки. Выполненные исследования позволили установить усредненные контактные напряжения, соответствующие нагрузкам на ролик при условии равномерного их распределения вдоль линии контакта. Между тем в условиях линейного теоретического контакта неизбежные перекосы воледствие погрешностей изготовления дорожек качения, упругие деформации колец ОПК и металлоконструкций поворотной платформы и ходовой рамы приводят к неравномерному распределению давлений вдоль контакта роликов с дорожками качения.

Для оценки фактических контактных нагрузок в ОПК были разработаны составные месдозы. Каждая месдоза представляет собой ролик диаметром 36 мм и длиной 35 мм, состоящий из пяти дисков. Диски плотно соединяются стержнями с расклеранными концами. В таком виде месдозу прошлифовывается на размер  $36^{+0,003}$  мм, что обеспечивает одинаковые диаметры дисков и роликов при установке в ОПК. После шлифования месдоза разбирается и на дно канавок, выполненных на торцах дисков, и на боковые поверхности дисков наклеиваются проволочные тензодатчики. Два тензодатчика, наклеенные на торцы дисков, соединяли в одно плечо полумоста, а два другие - в другое. После этого месдозу вновь собирали и тарировали в собранном виде каждый диск отдельно. Для измерения нагрузок использовали стандартную тензометрическую аппаратуру.

При испытании серийного ОПК с относительно небольшим углом перекоса дорожек качения  $15'$ , что соответствует 7 степени точности по ГОСТ 8908-59, нагрузка вдоль роликов резко неравномерна (рис. 9). Нагрузка воспринимается в основном крайним диском, и ролик нагружен на части длины линии контакта. При больших перекосах дорожек качения распределение контактных нагрузок будет еще более неблагоприятным. При нагрузки располагается с внешней стороны дорожек качения. Отпечатки, оставшиеся на смазанных густой смазкой поверхностях дорожек качения после испытаний, имеют форму треугольника на части ширины дорожек качения с вершиной, направленной к внутренней кромке дорожек. Контактные напряжения, соответствующие максимальной нагрузке на диски при действии  $\frac{F}{A} = 90$  тс.м., составляют для крайнего диска  $\sim 30000 \text{ кгс}/\text{см}^2$ , что существенно больше допускаемых. Безусловно, значительные кромочные контактные давления являются одной из основных причин выкрашивания дорожек качения.

В главах четвертой и пятой изучаются причины неравномерного нагружения роликов вдоль контакта с дорожками качения, разрабатываются мероприятия по снижению кромочных контактных давлений.

Величина фактических перекосов дорожек качения определялась как сумма перекосов вследствие погрешностей при изготовлении (отклонение углов наклона дорожек качения) и перекосов, обусловленных зазорами и упругими деформациями колец ОПК под нагрузкой.

В первом случае были выполнены замеры отклонений углов наклона дорожек качения 40 комплектов ОПК, составляющих месячную программу завода. На основе вероятностной оценки результатов измерений установлено, что рассеяние величин перекосов дорожек качения описывается нормальным законом распределения. Для 75% комплектов ОПК перекосы ограничиваются  $22'$  и  $25'$  соответственно для дорожек качения роликов опорной и подхватывающей группы.

Величина перекосов дорожек качения вследствие зазоров и упругих деформаций колец оценивалась как на стенде, так и непосредственно на кране ДЭК-25I. В обоих случаях максимальные значения перекосов дорожек качения получены в плохости действия опрокидывающего момента и составляют  $0,075 \pm 0,08$  мин/тм. Осевые зазоры в ОПК соответствовали нормальным эксплуатационным и равнялись  $0,35 \pm 0,4$  мм.

Таким образом, угол перекоса дорожек качения при максимальных нагрузках для 75% ОПК ограничивается углом  $-30'$ , а предельный перекос составляет  $55' - 60'$ .

Более равномерное распределение контактных нагрузок может быть достигнуто за счет изменения формы образующей контактирующих тел – роликов и дорожек качения колец. Поскольку в ОПК крана ДЭК-25I используются ролики от стандартных подшипников качения, поставляемые подшипниковой промышленностью, оказалось целесообразным осуществить оптимизацию контакта за счет образующей дорожек качения.

Наиболее просто, с точки зрения технологии, снижение кромочных давлений может быть достигнуто за счет скосов на кромках дорожек. Эффективность этого мероприятия оценивалась на том же ОПК, для которого получено неблагоприятное распределение контактных нагрузок (рис.9). На дорожках качения были выполнены скосы – фаски шириной 8 мм и глубиной  $0,025 : 0,035$  мм. Испытания показали, что в этом случае контактные нагрузки снижаются незначительно.

Весьма эффективной оказалась обкатка дорожек ОПК специальными роликами. Цель обкатки заключается в том, чтобы устранить возможные погрешности изготовления, следствием которых является ненапаралль-

ность дорожек качения, придать дорожкам качения так называемую естественную бочкообразность, когда каждой ступени нагрузки соответствует, вследствие упругих деформаций колец и металлоконструкций, определенный участок образующей дорожки качения. Обкатка производилась на ОПК, собранном из сырых, незакаленных колец с полным комплектом роликов и сепарирующих прокладок. Во избежание повреждения дорожек качения и заклинивания ОПК вследствие врезания кромок роликов в мягкую поверхность колец были применены ролики специальной конструкции. Торцы роликов облицованы материалом с малым модулем упругости и высокими антифрикционными свойствами — капролитом Б. Пластмассовые шайбы с цилиндрическим выступом приклеивали к торцам роликов эпоксидным kleем. Ролики были изготовлены из стали ШХ-15 и после закалки имели твердость  $HRC = 60 + 62$ . Размеры роликов по диаметру послешлифования соответствовали  $36^{+0,003}$  мм. Обкатка производилась на стенде. Нагрузка на ОПК прикладывалась ступенчато. После обкатки ОПК был разобран, и дорожки качения подвергнуты поверхностной закалке. Затем ОПК был вновь установлен на стенде. Последующие испытания показали, что после обкатки контактные напряжения распределяются весьма благоприятно. Нагрузку воспринимают все диски мебодавы (рис. 9).

Способ выравнивания контактных напряжений за счет обкатки, несмотря на его очевидную эффективность, является весьма трудоемким, что связано с дополнительной сборкой и разборкой ОПК. Поэтому обкатка может быть рекомендована для особо ответственных ОПК. Для серийных кранов целесообразно дорожки качения выполнять выпуклыми заранее, как завершающую операцию механической обработки колец. Радиус выпуклости дорожек качения  $R$  выбирали с учетом вероятностной оценки углов перекоса дорожек качения вследствие погрешностей при изготовлении и упругих деформаций колец как  $R = \ell/\psi$ , где  $\ell$  и  $\psi$  — соответственно, ширина и угол перекоса дорожек качения. Для ОПК крана ДЭК-25I радиус выпуклости  $R = 2000$  мм при стреле выпуклости  $0,0577$  мм. После обработки фасонным резцом с режущей кромкой, выполненной по радиусу  $R$ , кольца в соответствии с принятой на заводе технологией прошли поверхностную закалку дорожек. Распределение контактных нагрузок в ОПК с выпуклыми дорожками качения показано на рис. 9. Нагрузка воспринимается всеми дисками, причем положение максимума эпоры зависит от общей нагрузки на ОПК. В случае выпуклых

дорожек качения ролик самоустанавливается между ними, и давление вдоль контакта выравнивается.

В процессе испытаний фиксировалась форма пятен контакта, получаемых за счет обмывания микронеровностей на дорожках качения в зоне контакта. Для обычного ОПК пятна контакта имели форму треугольника на половине ширины дорожки качения с основанием, расположенным на наружной кромке. В случае обкатанных и выпуклых дорожек качения пятно контакта получено в виде вытянутого эллипса, расположенного по всей ширине дорожек качения.

Кромочные давления могут быть снижены также за счет поднутрения кромок дорожек, когда под кромками дорожек качения выполняются колыцевые канавки. Эффективность использования поднутрения кромок оценивалась поляризационно-оптическим методом и при помощи составных мессиз на специальной установке. Глубина канавок и толщина кромки в направлении, перпендикулярном поверхности дорожки качения, составляли четверть диаметра ролика.

Проведенные испытания показали, что контактные кромочные давления уменьшатся на  $30 \pm 35\%$ .

Усталостное выкрашивание дорожек качения ОПК может быть устранено за счет применения роликов, изготовленных из материалов с малым, сравнительно со сталью, модулем упругости.

В качестве материала для изготовления роликов использован каиролит. Ролики получали механической обработкой из блочных заготовок. Механические свойства материала, определенные в соответствии со стандартной методикой, были следующими: предел прочности при растяжении и сжатии  $\sigma_p = 810 - 830$  кгс/см<sup>2</sup> и  $\sigma_{sc} = 900 + 920$  кгс/см<sup>2</sup>, модуль упругости при растяжении  $E = 18500 + 19000$  кгс/см<sup>2</sup>, относительное удлинение  $\delta = 5 + 6\%$ . Полиамидные ролики по размерам соответствовали стальным.

При изучении возможности использования пластмассовых роликов предполагалось применение ОПК при сравнительно редких нагрузлениях и малых скоростях вращения, что позволило считать не основными такие важные для пластмассовых тел качения показатели, как тепловой режим, контактная выносливость поверхностных слоев и оценивать работоспособность ОПК по статическому моменту сопротивления вращению.

В связи с этим на стенде были проведены сравнительные испытания

по определению моментов сопротивления вращению промышленных образцов ОПК с пластмассовыми и стальными роликами.

На рис. 10а, б сопоставляются моменты сопротивления вращению ОПК крана ДЭК-25I при действии осевых нагрузок и опрокидывающего момента. В первом случае при нагрузках до 60-70тс моменты сопротивления вра-щению ОПК со стальными и пластмассовыми роликами при установившемся движении соизмеримы. При трогании момент сопротивления вращению для пластмассовых роликов несколько выше по сравнению с МСВ при устано-вившемся движении. Дальнейшее повышение нагрузки приводит к сущест-венному увеличению момента сопротивления вращению как при трогании, так и при установившемся движении.

При действии опрокидывающего момента также отмечается превышение величины момента сопротивления вращению при трогании для пластмассо-вых роликов по сравнению со стальными, тогда как при установившемся движении моменты сопротивления вращению соизмеримы. Для больших зна-чений опрокидывающего момента (около 70тс·м) наблюдается значительное повышение момента сопротивления вращению для пластмассовых роликов и при установившемся движении - примерно в 1,6 + 1,7 раза по сравнению со стальными. Следует отметить, что величина опрокидывающего момента в 60тс является предельной для крана ДЭК-25 с 14-метровой стрелой и 45 тс·м с 20-метровой стрелой.

Опыты показали целесообразность применения роликов с торцами, об-лицованными пластмассой. В этом случае наблюдалось значительное сни-жение МСВ за счет уменьшения трения торцев роликов о дорожками каче-ния.

Как показали исследования кинематики, износ двух соседних роли-ков разных групп неизбежен вследствие разных углов наклона их осей. Произведены замеры усилий взаимодействия соседних роликов. Сепари-рующие прокладки из полиамида - вторичной капроновой смолы - устра-няют непосредственный контакт роликов и их износ и более долговечны, чем применявшиеся ранее текстолитовые.

С целью оценки эффективности мероприятий по повышению долговеч-ности ОПК были проведены стендовые и производственные испытания.

В качестве объектов стендовых испытаний были взяты серийный ОПК и ОПК с выпуклыми дорожками качения. Твердость дорожек качения обоих ОПК составила  $HRC = 52 + 56$ . Испытания проводили в обычном

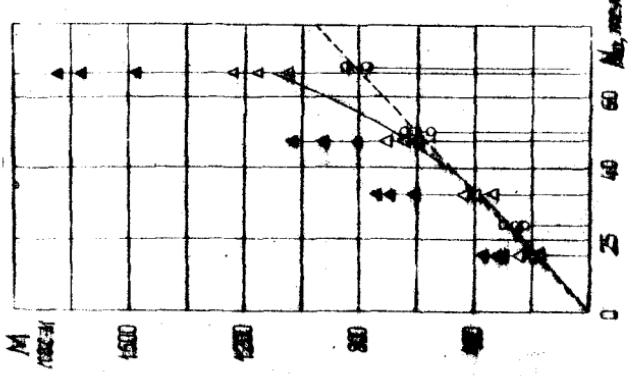
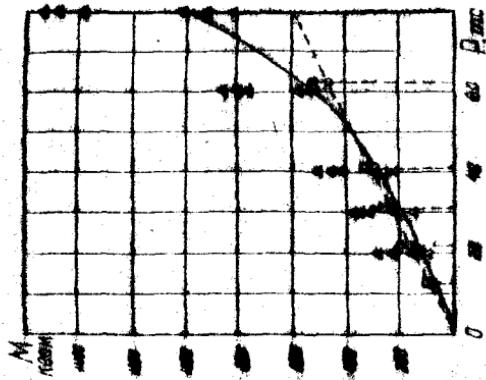


Рис. 10. Изменение момента  $M$  сопротивления вращению роликового ОЦК колеса ДЗК-25 в зависимости от осевой силы  $P$ :  $\delta$  — угол отклонения момента  $M$ ;  $\circ$  — ролики стальные;  $\Delta$  — ролики пластмассовые (уставновка);  $\blacktriangle$  — ролики пластмассовые (изменение);  $\blacksquare$  — ролики пластмассовые (расчет);  $- - -$  — ролики сталь-щелевые (расчет)



режиме, т.е. скорость вращения составляла 1 об/мин, как на кране ДЭК-25Г. Нагрузка 70 и 90 тс·м. ОПК перед установкой на стенд были собраны с осевыми зазорами  $0,4 \pm 0,45$  мм и допускали легкое вращение вручную. В качестве смазки использовали ЦИАТИМ-203. После первых 2500 оборотов были произведены разборка и осмотр деталей ОПК. На дорожках качения обнаружены характерные полированные полосы, причем для серийного ОПК эти полосы смещены к одной из кромок, что свидетельствует о неравномерном распределении давлений вдоль роликов. По ширине полосы составляют  $40 \pm 50\%$  ширины дорожки качения. На выпуклых дорожках качения полосы разодлагаются в средней части и занимают  $85 \pm 90\%$  дорожек. После  $2 \cdot 10^6$  циклов на кромках дорожек серийного ОПК появились раковины размером 1-3 мм. Раковины располагались отдельными небольшими участками по  $100 \pm 150$  мм длиной. В дальнейшем раковины завалывались и выкрашивание прекратилось. Однако в смазке появилось большое количество чешуек отслоившегося металла. В данном случае имело место ограниченное выкрашивание дорожек качения, которое прекратилось после приработки дорожек. После  $5 \cdot 10^5$  циклов осевой зазор в серийном ОПК увеличился до  $1,2 \pm 1,5$  мм и испытания были прекращены. ОПК с выпуклыми дорожками качения после  $6 \cdot 10^6$  циклов оставался полностью работоспособным без признаков выкрашивания.

ОПК с пластмассовыми роликами был установлен на стреловом гусеничном кране ДЭК-25Г грузоподъемностью 25 т. В течение 2-х лет кран находился в эксплуатации на складе Челябинского механического завода и на строительстве 5-ти этажного крупнопанельного жилого дома. Максимальные грузы, поднимаемые краном при стреле длиной 14 м, составляли 25 т и при стреле в 20 м - 14,75 т. Учет фактической наработка производился специально разработанным счетчиком машинного времени. Относительная грузоподъемность (загрузка) крана на складе равнялась  $0,1 \pm 0,3$  и на строительстве жилого дома  $0,4 \pm 0,45$ . После двух лет эксплуатации износ дорожек и повреждение роликов не были обнаружены.

ОПК с пластмассовыми роликами были использованы в конструкциях установок плазменной резки труб на Челябинском трубопрокатном заводе. Размеры ОПК приведены в таблице 2.

Поскольку установки плазменной резки труб размещены в технологическом потоке, загрузка их практически непрерывна, если не считать

коротких пауз, необходимых для установки и зажима труб, а также удаления ее после обрезки. После одного года эксплуатации износ роликов и дорожек качения не обнаружен.

Были проведены также стендовые испытания ОПК с комбинированными роликами, облицованными по торцам пластмассой и выпуклыми дорожками качения. После  $10^6$  циклов нагружения ролики и дорожки качения оставались работоспособными.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования роликовых опорно-поворотных кругов проводились в следующих направлениях:

1. Разработка методов аналитического определения основных параметров - момента сопротивления вращению, коэффициентов трения и потерь с учетом фактического распределения нагрузок вдоль линии контакта, вызванного перекосами дорожек качения вследствие погрешностей изготовления и упругих деформаций.

2. Оценка уровня контактных нагрузок в роликовом ОПК стрелового гусеничного края ДЭК-251.

3. Разработка мероприятия по снижению максимальных контактных нагрузок с целью повышения долговечности дорожек качения.

4. Изучение возможности применения неметаллических материалов для нагруженных элементов ОПК.

На основании анализа кинематики движения единичного ролика по жолобу и ОПК в целом установлено следующее:

1. Роликовые ОПК характеризуются значительным скольжением вследствие неодинакового изменения скоростей по длине линии контакта и трения торцев роликов одной группы о дорожки качения другой.

2. Сопротивление вращению роликовых ОПК складывается на 80-85% из сил трения скольжения торцев роликов и проскальзывания в кон- такте, доля сил трения качения менее значительная ( $15 \pm 20\%$ ). Такое соотношение сил трения скольжения и качения объясняет резкое увеличение момента сопротивления вращению при ухудшении условий смазки.

3. Сопротивление вращению роликового ОПК характеризуется приведенным коэффициентом трения, величина которого определяется соот-

напряжением его составляющих, соответствующих трению качения роликов по плоскости и трению скольжения на торцах и проскальзывания в контакте роликов с дорожками качения. Величина приведенного коэффициента трения составляет  $0,016 + 0,022$  при хорошо смазанных дорожках качения и роликах и может возрастать до  $0,06$  при полном отсутствии смазки.

4. В процессе работы ОПК происходит смещение полюса качения в контакте роликов с конусными поверхностями дорожек. Это вызвано со-противлением перекатыванию роликов воледование моментов от сил трения скольжения и качения. Смещение полюса качения способствует увеличению приведенного коэффициента трения, причем это увеличение существенно при расположении центра тяжести эпюры контактных давлений вблизи торцов роликов и незначительно при постоянном давлении вдоль роликов.

5. Приведенный коэффициент трения увеличивается с возрастанием длины роликов, коэффициентов трения скольжения на торцах и проокальзываания в контакте. В частности повышенное трение на торцах, возникающее при врезании кромок роликов в незакаленные дорожки качения, приводит к резкому увеличению приведенного коэффициента трения и объясняет заклинивание ОПК в этом случае.

6. Влияние перекосов дорожек качения (воледствие погрешностей изготовления и упругих деформаций колец) на величину приведенного коэффициента трения незначительно при расположении максимумов эпюры контактных давлений для каждой группы роликов по одну сторону от полюсов качения и может быть существенным при расположении их по обе стороны от полюсов.

7. В ОПК с разными углами наклона осей роликов опорной и подхватывающей групп возникают повышенные нагрузки на сепарирующие промежутки и происходит увеличение приведенного коэффициента трения. Это объясняется тем, что ролики опорной и подхватывающей групп катятся по дорожкам качения разных радиусов.

8. Полученные расчетные зависимости для определения момента со-противления вращению от сил трения и приведенного коэффициента трения достаточно хорошо подтверждают результаты экспериментальных ис-следований натурных ОПК крана ДЭК-251.

Долговечность ОПК, ограничиваемая усталостным выкрашиванием дорожек качения, во многом определяется величиной контактных напряжений

между роликами и дорожками качения. Экспериментальное исследование контактных нагрузок, выполненное с помощью специально разработанных методов, позволило оценить фактические нагрузки на ролики как по периметру дорожек качения, так и вдоль роликов. В процессе исследования установлено:

1. В ОПК, смонтированном на кране ДЭК-25I, при максимальных нагрузках на крюке средние контактные напряжения (в предположении равномерного распределения нагрузки вдоль линии контакта) для наиболее нагруженных роликов опорной группы находятся на уровне допускаемых. Нагрузки на ролики подхватывающей группы существенно ниже по сравнению с роликами опорной.

2. Стендовые испытания показали, что осевые зазоры в ОПК крана ДЭК-25I, соответствующие нормальнм рабочим и обеспечивающие легкое вращение, практически не влияют на распределение нагрузок на ролики по периметру дорожек качения.

3. Нагрузки вдоль контакта роликов с дорожками качения резко неравномерны и при максимальных нагрузках на ОПК превышают допустимые, причем контакт осуществляется на части длины ролика. Повышенные кромочные давления приводят к усталостному выкрашиванию дорожек и выходу ОПК из строя. Необходимы специальные мероприятия, обеспечивающие более равномерное распределение нагрузок вдоль роликов.

4. Нагрузки на наиболее нагруженные ролики, определяемые в соответствии с общепринятой методикой как сумма погонных нагрузок от осевой вертикальной силы и опрокидывающего момента, следует рассчитывать исходя из геометрических параметров площади сечения ОПК как эллипсоидального колыца с разными длинами полуосей в плоскости опрокидывающего момента.

Методика экспериментального исследования контактных нагрузок вдоль роликов с помощью составных методов была использована для оценки эффективности мероприятий по выравниванию контактных напряжений. Исследования условий контакта роликов с дорожками качения позволили сделать следующие выводы:

1. Роликовые ОПК характеризуются значительными перекосами, что приводит к неизменному распределению контактных нагрузок между роликами и кольцами. Перекосы обусловлены погрешностями изготовления и упругими деформациями колец и металлоконструкций, причем

преобладающими являются перекосы вследствие погрешностей изготовления дорожек качения. Для 75% обследованных ОПК суммарные перекосы дорожек качения ограничиваются  $30' + 35'$ .

2. Обкатка дорожек качения перед закалкой роликами с уменьшенным трением на торцах в полностью собранных ОПК способствует выравниванию контактных давлений. Обкатка сопровождается пластическим деформированием дорожек качения в местах их наибольшего сближения. Дорожки качения приобретают естественную бочкообразность, когда из-за упругих деформаций колец и металлоконструкций каждой ступени нагрузки соответствует определенный участок образующей дорожек качения. При равных нагрузках на ролик максимальные контактные нагрузки в случае обкатанных дорожек качения уменьшаются в 2 раза по сравнению с обычными дорожками, а соответствующие контактные напряжения в 1,4 раза.

3. Обкатка производится с помощью роликов специальной конструкции, торцы которых, во избежание врезания кромок роликов в незакаленную поверхность дорожек качения, облицованы накладками из антифрикционного материала с малым модулем упругости (полиамиды, алюминий, бронза и т.д.).

4. Выпуклые дорожки качения, выполненные по радиусам с учетом вероятностной оценки их углов перекоса, обеспечивают возможность самоустановки роликов между перекошенными поверхностями колец и благоприятное распределение контактных нагрузок. Площадка контакта роликов с дорожками качения имеет вид витинутого эллипса и распространяется на всю ширину дорожек.

5. Снижение кромочных контактных давлений в условиях перекоса роликов и колец может быть достигнуто увеличением податливости участка колец непосредственно под дорожкой качения (дорожка качения выступает над поверхностью колыша) или увеличением податливости колыша только в зоне повышенных кромочных давлений - за счет канавок под кромками дорожек качения или поднутрений колец. Максимальные контактные нагрузки и контактные напряжения в случае дорожек с поднутрениями кромок уменьшаются, соответственно, в 1,6 и 1,25 раза по сравнению с обычными дорожками качения.

6. Стендовые ресурсные испытания промышленных образцов ОПК края ДЭК-261 показали, что долговечность кругов, ограниченная выкраши-

ванием дорожек качения, в случае выпуклых дорожек увеличивается в 4,5 + 5 раз по сравнению с обычными дорожками.

Стендовые и производственные испытания показали возможность использования полиамидов для изготовления нагруженных элементов ОПК. При этом было установлено следующее:

1. Применение неметаллических роликов обеспечивает незначительное по величине сопротивление вращению, соизмеримое в диапазоне рабочих нагрузок при установленном движении с сопротивлением вращению ОПК со стальными роликами. Для ОПК крана ДЭК-251 величину опрокидывающего момента следует ограничивать 60 тс·м, а вертикальную осевую нагрузку 60 + 65 тс при периодическом нагружении со значительными паузами разгрузки.

2. При непрерывном вращении ОПК под нагрузкой достаточно высокая долговечность в производственных условиях была достигнута при нагрузках на наиболее нагруженный ролик Ø 36, ограниченных 280-300 кгс.

3. ОПК с пластмассовыми роликами характеризуются плавностью вращения и отсутствием заклинивания.

4. Контакт стальных колец ОПК с роликами, изготовленными из материала с матым модулем упругости, обеспечивает длительную эксплуатацию дорожек качения, обычно подверженных выкрашиванию и задирам.

5. Применение пластмассовых роликов существенно упрощает технологию изготовления и стоимость ОПК за счет использования для колец сталей обычного качества без термообработки и меньших требований к точности изготовления деталей качения - роликов и колец.

6. ОПК с роликами, торцы которых облицованы антифрикционным материалом, например, капролитом Б, характеризуются пониженным сопротивлением вращению и уменьшенным износом дорожек качения, что объясняется малым коэффициентом трения торцев роликов.

7. Применение полиамидов для изготовления сепарирующих прокладок исключает их хрупкое разрушение и повышает надежность ОПК.

Исследования были выполнены на промышленных образцах ОПК с помощью ряда стендов, приспособлений и специально разработанных мес-доз - роликов, показавших достаточно высокую надежность в работе. На всех этапах работы широко применялось измерение нагрузок и деформаций с помощью тензометрирования.

По результатам работы осуществлено внедрение опорно-поворотных

кругов с выпуклыми дорожками качения и сепарирующими прокладками из полиамидов на стреловых гусеничных кранах ДЭК-161 и ДЭК-251 Челябинского механического завода, опорно-поворотных кругов с пластмассовыми роликами в установках плазменной резки труб Челябинского Ордена Ленина трубопрокатного завода. Методика расчета момента сопротивления вращению роликовых ОПК и максимальных нагрузок на ролики используется отделом главного конструктора при разработке новых образцов аналогичных устройств. Акты внедрения прилагаются к диссертации.

Диссертация содержит 149 страниц текста, 161 иллюстрацию, 20 таблиц.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. О долговечности роликового опорно-поворотного устройства крана ДЭК-25, - "Строительные и дорожные машины", 1971, № 1.

2. Стендовые испытания роликовых опорно-поворотных устройств стрелового крана ДЭК-251, ЦНИИТЭСстроймаш, серия I, "Строительные и дорожные машины", раздел "Экскаваторы и стреловые краны", вып. 1, М. 1972.

3. О точности сопряжения элементов качения в роликовом опорно-поворотном круге, ЦНИИТЭСстроймаш, серия I, "Строительные и дорожные машины", раздел "Экскаваторы и стреловые краны", вып. 4, М. 1972.

4. Опорно-поворотные круги с пластмассовыми роликами, - "Вестник машиностроения", 1973, № 4.

5. Оптимизация контакта в роликовых опорно-поворотных кругах, - "Механизация строительства", 1973, № 5.

6. К оценке момента сил трения. Крупногабаритных опор с пластмассовыми роликами. Тезисы Всесоюзной научно технической конференции "Новые полимерные материалы, их переработка и применение в машиностроении", Запорожье, 1972.

7. Снижение кромочных контактных давлений в роликовых опорно-поворотных кругах. Тезисы совещания "Повышение надежности изделий машиностроения", Пермь, 1972.

8. Стенд для испытания роликовых опорно-поворотных устройств. "Экспрессо-информация Информэнерго", Минэнерго СССР, М., 1971, № 8.

9. Авторское свидетельство № 343942 на изобретение "Опорно-поворотное устройство для подъемно-транспортных машин". Бюллетень изобретений № 21, 1972, кн. 866 с 23/84.

10. Прибор для регистрации наработки механизмов крана, - "Экспресс-информация Информэнерго", Минэнерго СССР, М., 1971, № 12.

11. Опорно-поворотные круги с пластмассовыми роликами, - КУДНТИ, инф.листок № 52, 1971.

12. Исследование роликовых опорно-поворотных устройств с пластмассовыми роликами, - сб. трудов ЧИИ № 99, 1971.

13. К расчету роликовых опорно-поворотных устройств стреловых самоходных кранов ДЭК-25, - Материалы XXIII научно-технической конференции ЧИИ, Челябинск, 1970.

14. К расчету ресурса опорно-поворотного устройства крана ДЭК-25Г на основе статистических данных, - Материалы XXIII научно-технической конференции ЧИИ, Челябинск, 1970.

15. Оценка эффективности мероприятий по снижению кромочных контактных давлений в роликовых опорно-поворотных кругах, - сб. трудов ЧИИ № 125, 1973.

16. Исследование надежности опорно-поворотных устройств стреловых гусеничных кранов, Экспресс-информация, ВНИИКИ, "Качество.Стандарты.Метрология", М., 1973, вып. № 49.

17. Решение Комитета по делам изобретений и открытий при СМ СССР от 10.01.73 о выдаче авторского свидетельства по заявке № 1740989/27-11.

Результаты работы докладывались:

1. На XXII-XXIV научно-технических конференциях Челябинского политехнического института в 1970, 1971, 1972.

2. На совещании "Повышение надежности изделий машиностроения", Пермь, 1972.

3. На Всесоюзной научно-технической конференции "Новые полимерные материалы, их переработка и применение в машиностроении", Запорожье, 1972.