

### НАРУШЕНИЕ СМАЗЫВАНИЯ КАК ПРИЧИНА ОТКАЗОВ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Функциональное назначение подшипников качения – обеспечение вращения валов с минимальным коэффициентом трения - во многом определяется качеством смазывания. Нарушения в поступлении и движении смазочного материала в подшипниковых узлах часто являются причиной отказов и поломок металлургических машин и оборудования. Осмотр поврежденных подшипников иногда позволяет однозначно определить характер нарушений в поступлении смазки, в других случаях решение задачи определения причины отказа требует использования более сложных алгоритмов.

В статье, на основании полученного в производственных условиях опыта анализа повреждений подшипников качения, обобщены некоторые особенности отказов подшипников из-за нарушения смазывания. Несколько приведенных примеров не могут охватить всего многообразия случаев повреждений подшипников, однако, надеемся, позволят обратить внимание исследователей, специалистов служб эксплуатации и ремонта на нерешенность задачи о движении смазочного материала в подшипниковом узле.

#### Накопление продуктов износа в смазочном материале.

Для поворота свода электродуговой печи используется трехрядное роликоподшипниковое поворотное кольцо (рис. 1). Работа трехрядного роликоподшипникового поворотного кольца в условиях функционирования механизма связана: с частыми поворотами (100...160 циклов в сутки), односторонним воздействием высокой температуры раскаленного свода, значительной консольной и вертикальной нагрузками. Верхний ряд тел качения включает 244 ролика. Основные технические характеристики механизма поворота свода рассмотренной электродуговой печи: угол поворота свода –  $95^{\circ}$ ; скорость поворота свода -  $5^{\circ}/\text{сек}$ ; масса свода – 50 т.



**Рис.1.** Конструкция (а) и общий вид (б) трехрядного роликоподшипникового поворотного кольца: 1 - опорные ролики; 2 - радиальные ролики; 3 - контропорные ролики; 4 – пыльник; 5 - неподвижное кольцо; 6 - подвижное кольцо.

Через четыре года эксплуатации произошло заклинивание механизма поворота свода из-за повреждений элементов опорного кольца – сепаратора и роликов (рис. 2). Работа электродуговой печи была остановлена на длительное время [1].



**Рис.2.** Повреждения сепаратора и деформация опорных роликов трехрядного роликоподшипникового поворотного кольца

Проведенная ранее разборка отказавшего подшипника позволила установить, что полости всех рядов роликов были заполнены закоксовавшейся смазкой черного цвета. Особенно высокой плотностью отличалась смазка верхнего, разрушенного ряда роликов (рис. 3а). Установлено преобладание абразивного износа из-за окисления (коксования) смазочного материала и накопления продуктов износа в застойной зоне верхнего ряда роликов (рис. 3а). На поверхности роликов зафиксирована пленка продуктов коксования смазочного материала (рис. 3б).



**Рис.3.** Элементы изношенного подшипника: а) продукты окисления и износа в смазочном материале; б) продукты коксования на поверхности роликов.

На беговых дорожках присутствовали трещины усталости (рис. 4). Преобладающим являлся абразивный износ, что не позволило трещинам усталости развиваться до осповидного выкрашивания.

Следствием стал ускоренный износ роликов и беговых дорожек верхнего ряда роликоподшипникового кольца, неравномерное распределение сил между телами качения. Это вызвало перекос роликов, прекращение перекачивания тел качения, деформацию роликов верхнего ряда и повреждения сепаратора (рис. 2).

Практически, свежий смазочный материал не мог поступать в зону контакта роликов с беговой дорожкой из-за повышенного давления накопленной смеси. Источником абразива послужили продукты изнашивания, не отводимые смазочным материалом с верхнего ряда роликов. Износ локализовался в районе верхнего ряда роликов. Износ радиального и нижнего ряда роликов отсутствовал.

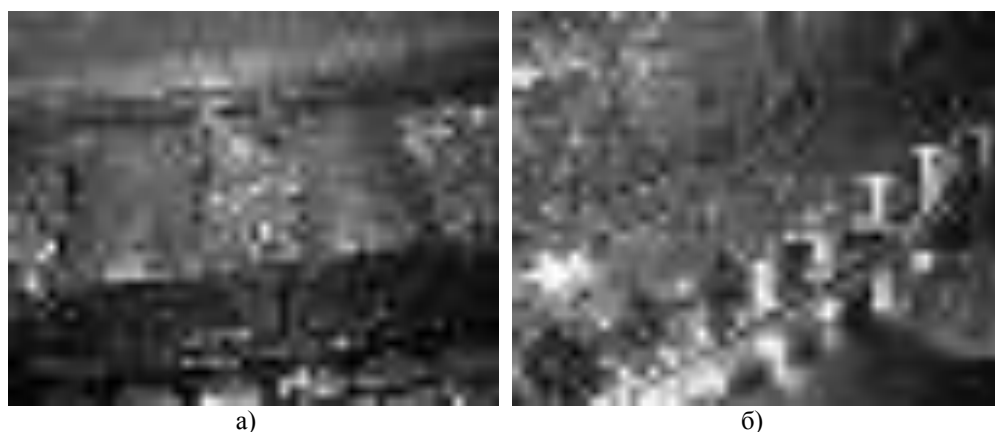


**Рис.4.** Усталостные трещины поверхностного слоя беговой дорожки подшипника

Для смазки подшипника в неподвижном внутреннем кольце выполнены каналы на 4-х уровнях, в 8-и точках по окружности кольца на каждом уровне. Смазывание осуществляется пластичной смазкой с использованием централизованной системы смазки. Конструкция подшипника не позволяла эффективно удалять продукты изнашивания подшипника и окисления смазки из верхнего ряда роликов, что и послужило причиной отказа - заклинивания свода в отвернутом положении.

Для повышения долговечности подшипника, исключения абразивного вида износа предложено изменить режим смазывания (подача смазочного материала в меньшем объеме стала осуществляться чаще). Одновременно проведены мероприятия по защите подшипника от теплового излучения путем установки защитных экранов. Это привело к изменению характера износа подшипника, что было зафиксировано при осмотре подшипника, принудительно замененного через 5 лет [2].

Разборка замененного подшипника показала, что условия смазывания всех рядов роликов были удовлетворительными. Только на верхнем ряду роликов присутствовали продукты износа (рис. 5).



**Рис.5.** Состояние смазки по рядам изношенного подшипника: а) продукты износа в смазочном материале опорного ряда; б) радиальный ряд роликов.

На беговых дорожках верхнего кольца преобладало осповидное выкрашивание (рис. 6), возникающее при переменных нагрузках и высоких давлениях, превы-

шающих предел выносливости. Причина преобладания осповидного выкрашивания – увеличение массы свода после установки дополнительных водоохлаждаемых секций и повышение динамических нагрузок на подшипник от воздействия электрической дуги после установки более мощного трансформатора. Следы осповидного износа зафиксированы на отдельных роликах верхнего опорного ряда (рис. 7).

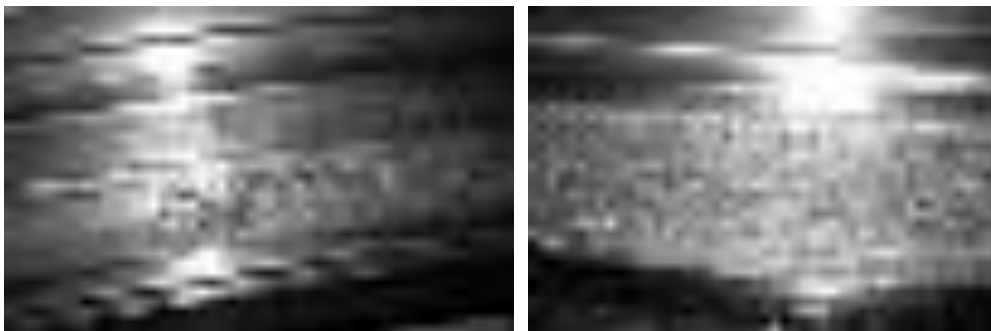


Рис.6. Усталостное выкрашивание на беговых дорожках подшипника



Рис.7. Следы осповидного износа на поверхности роликов верхнего ряда

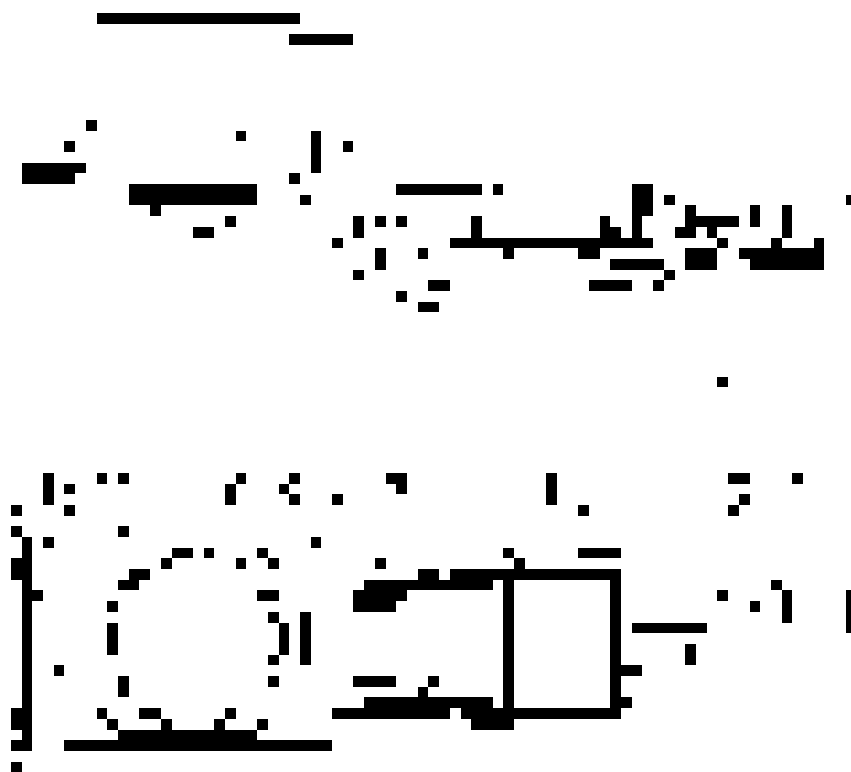
На роликах нижнего ряда отмечена начальная стадия осповидного износа – шелушение поверхностного слоя. Обнаружены фрагменты поврежденного сепаратора в полости подшипника. Все это позволяет утверждать, что замена подшипника проведен своевременно, дальнейшая эксплуатация привела бы к отказу и внеплановой остановке электродуговой печи. В тоже время изменение режима смазывания позволило практически исключить абразивный износ.

#### **Нарушение режима смазывания шарниров столов качания МНЛЗ.**

Широкое распространение в практике непрерывной разливки стали на сортовых МНЛЗ получили сдвоенные шарнирные четырехзвенные рычажные механизмы качания кристаллизатора (рис. 8). Крутящий момент от двигателя 1 через соединительную (чаще всего баллонную) муфту 2 передается на понижающий редуктор 3 коническо-цилиндрический или червячный. Электродвигатель и редуктор установлены на качающейся независимой общей платформе. Тихоходный вал редуктора, совершающий 100...400 об/мин, соединен через эксцентриковую муфту 4, установленную в подшипниковых опорах 5, с кривошипом, преобразующим вращательное движение вала редуктора в возвратно-поступательное. Кривошип соединен с коромыслами 7 и 9. В шарнирных опорах 6 закреплены коромысла 7, а в шарнирных опорах 8 – коромысла 9. Неподвижные шарнирные опоры 6 и 8 рычажного механизма расположены в едином основании механизма качания, установленном и закрепленном на несущих металлоконструкциях МНЛЗ.

В качестве шарнирных опор используются двухрядные роликовые подшипники, смазка которых осуществляется централизованно пластичной смазкой. При помощи шарнирных узлов 10 коромысла 7 и 9 связаны со столом качания 11, на котором установлен и закреплен кристаллизатор 12. Коромысла 7 и 9 установлены так, что прямые, проведенные через них, направлены в сторону центра кривизны технологической оси МНЛЗ, что обеспечивает плоскопараллельное движение точек стола качания 11 в продольной плоскости к технологической оси ручья по траектории в виде дуги окружности с установленным радиусом разливки. Стол качания с противоположной стороны от привода механизма качания опирается на пневматические устройства – амортизаторы 13, служащие для уравнивания силы тяжести стола качания и кристаллизатора.

Почти в половине случаев отказов механизмов качания МНЛЗ наблюдается нарушение режима смазывания подшипников шарниров, заключающееся в накоплении продуктов износа и отсутствии движения пластичной смазки из-за малых углов качания шарниров, что приводит к абразивному износу (рис. 9). Визуальные признаки абразивного износа различны и зависят от стадии повреждения. В рассматриваемом случае абразивный износ подшипников шарниров имеет проявление, сходное с бринеллированием – в виде повреждений поверхности беговой дорожки с шагом, равным шагу тел качения. На начальном этапе это не приводит к заметным изменениям эксплуатационных свойств механизма качания. Последующие этапы износа приводят к изменению размеров деталей узлов трения, появлению выработки во втулках, увеличению зазоров. Значительный износ трущихся поверхностей отражается на параметрах движения узлов и механизма - появляется неравномерность движения, нарушение радиуса и параметров качания [3].



**Рис.8.** Общий вид кристаллизатора и стола качания с электромеханическим приводом



**Рис.9.** Абразивный износ колец подшипников шарниров механизма качания МНЛЗ из-за нарушения отвода смазочного материала

**Неравномерное смазывание беговых дорожек двухрядных роликоподшипников.**

Механизмы передвижения разливочных кранов сталеплавильных цехов работают интенсивно, в условиях частых пусков, при существенных статических и динамических нагрузках, меняющихся в широком диапазоне. Одним из важнейших узлов механизма передвижения разливочных кранов являются подшипники качения, на которые опираются валы и оси ходовых колес. Их внезапный выход из строя приводит к длительному простоею крана в неподготовленном для проведения ремонта месте. Зафиксированные частые простои разливочных кранов по причине внеплановых ремонтов, связанных с заменой подшипников качения ходовых колес, потребовали определения причин отказов [4].

Наиболее характерным видом отказов подшипников ходовых колес было выдавливание торцевой крышки и сползание по оси ходового колеса (рис. 10). Продольная сила, необходимая для разборки поврежденного узла составляла порядка 6,0...8,0 кН. Это указывало на воздействие значительных осевых сил на ходовое колесо в процессе эксплуатации. Индивидуальность отказа позволила исключить причины, связанные с повреждениями подкрановых балок.



**Рис.10.** Сползание ходового колеса с оси

Данный вид отказов начал происходить после 20 лет эксплуатации. Визуальный осмотр поврежденного колеса позволил установить следующее:

1. Полное разрушение одного из подшипников (рис. 11).
2. Целый подшипник имеет следы коксования смазки (рис. 12).
4. Осевое смещение следов контакта роликов и наружного кольца на целом подшипнике (рис. 13).



**Рис.11.** Полное разрушение одного из подшипников ходового колеса



**Рис.12.** Следы коксования смазочного материала на деталях целого подшипника



**Рис.13.** Смещение следов осповидного выкрашивания на беговой дорожке внешнего кольца целого подшипника

Дополнительно во время ремонта осмотрены посадочные места подшипников на балансирах, оси и посадочные места осей балансиров. Установлен факт неравномерного распределения нагрузки между подшипниками ходового колеса, отсутствие смазки на контактирующих поверхностях оси балансира, неравномерный износ посадочных мест оси балансира. Расчетное время работы подшипника при неравномерном распределении нагрузки до 300 суток, при износе сепаратора 30 суток, что хорошо согласуется с данными о реальной долговечности. Анализ полученных данных позволяет определить причину возникновения осевой силы, которая привела к сползанию ходового колеса с оси - неравномерное распределение нагрузки между подшипниками ходового колеса и рядами тел качения из-за износа сепаратора при коксовании смазки.

Коксование смазочного материала происходит под воздействием повышенной температуры, особенно в летний период, когда температура окружающего воздуха в зоне работы ходовых колес достигает  $50^{\circ}\text{C}$ . Поэтому максимальная вероятность отказов подшипников ходовых колес – осень.

Развитие повреждения приводит к неравномерному движению тел качения в нагруженной зоне, расположенной вверху при местном характере нагрузки. Это приводит к оттоку смазки из зоны трения. Для смазывания роликов в зоне контакта колеса должно совершить половину оборота, а кран - проехать порядка 1,0 метра. В результате появляется неравномерная нагрузка на перемычки сепаратора, что приводит к износу и разрушению элементов сепаратора.

Коксование смазочного материала приводит к повышению момента сопротивления между телами качения и беговой дорожкой; момент сопротивления становится более, чем момент, фиксирующий неподвижную посадку наружного кольца в корпусе подшипника. На внешней поверхности наружного кольца разрушенного подшипника отмечены следы проворота подшипника в корпусе, что ускорило процесс износа сепаратора.

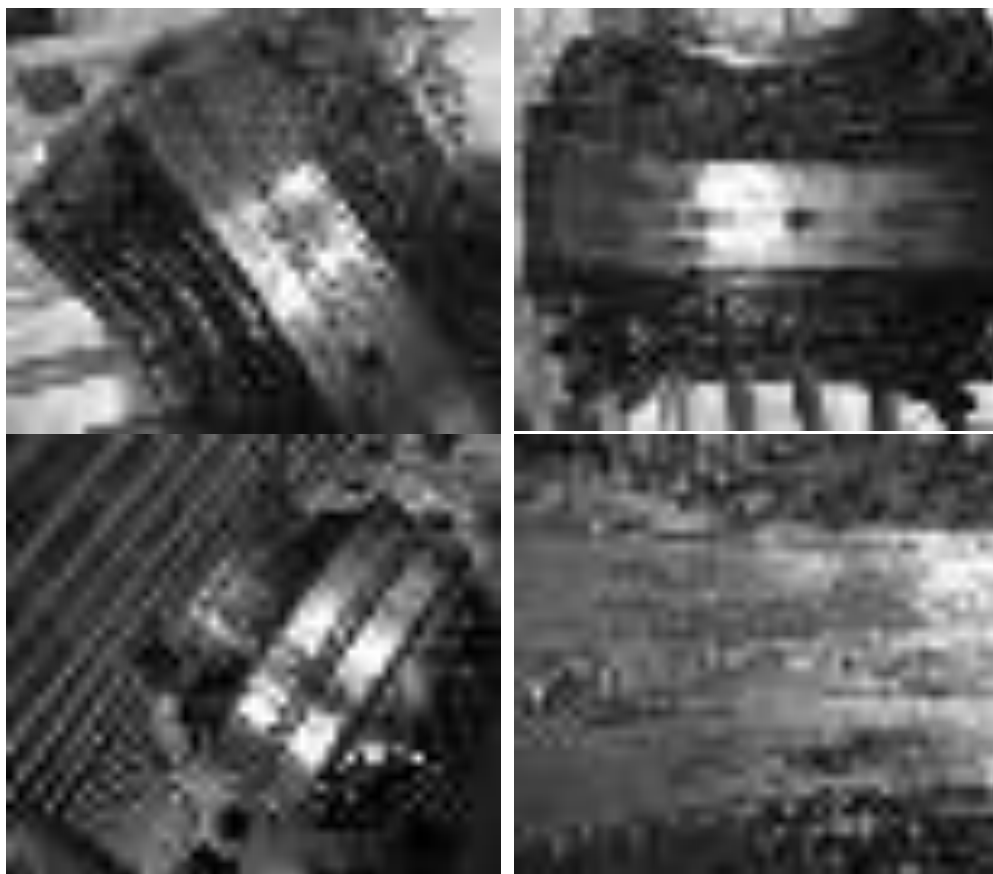
После разрушения сепаратора по одному ряду роликов происходит перераспределение нагрузки и появление осевой силы от взаимодействия ряда роликов, имеющих целый сепаратор с беговой дорожкой. Перемещение крана в данной ситуации приводит к перемещению оси в направлении внешней стороны крана. Об этом свидетельствуют следы осповидного выкрашивания, смещенные относительно средней линии подшипника. Воздействие односторонней осевой нагрузки подтверждается засветлением на торцах роликов одного ряда подшипника.

Последовательность разрушения: неравномерная нагрузка на подшипники ходового колеса; коксование смазочного материала; разрушение сепаратора по ряду от колеса разрушенного подшипника; возникновение осевой силы и сход колеса с оси. Рекомендации: изменить способ подачи смазочного материала в подшипники



ходового колеса – смазочный материал следует подавать посередине подшипника в верхней части подшипника (смазка подавалась с торца подшипника); обеспечить равномерное распределение нагрузки между подшипниками ходового колеса – восстановить посадочные места осей балансиров и торцевой балки крана.

Основная причина отказа в данном случае – нерационально выбранный боковой подвод смазочного материала. При неизменном направлении вращения и правильном подводе смазочного материала подшипник работает как насос, прокачивая через себя смазочный материал. Подтверждение – различная структура смазочного материала приводной и холостой стороны корпуса подшипника (рис. 14).



**Рис.14.** Различная структура смазочного материала приводной и холостой стороны корпуса подшипника

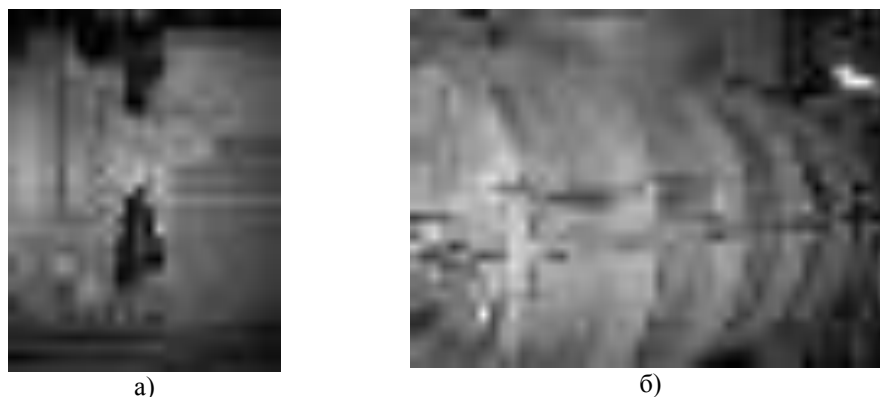
Торцевой односторонний подвод смазочного материала для двухрядного роликоподшипника определил лучшие условия смазывания роликов для одной беговой дорожки и худшие для другой. Изменение направление движения крана приводило и к изменению условий смазывания роликов по внутренней беговой дорожке. Результат – неравномерный износ сепараторов, нарушение равновесия осевых сил по роликам беговых дорожек, разрушение сепаратора и выдавливание торцевой крышки и ходового колеса с оси. Проведенные мероприятия по изменению точки подвода смазочного материала позволили резко сократить число отказов.

#### **Ошибки в конструкции систем смазки.**

В настоящее время часто используется компактное энергетическое оборудование с частотой вращения 3000 об/мин и выше для обеспечения технологических процессов энергетическими носителями – водой, паром, газом, а также для создания вакуума. Новое энергетическое оборудование промышленных предприятий требует

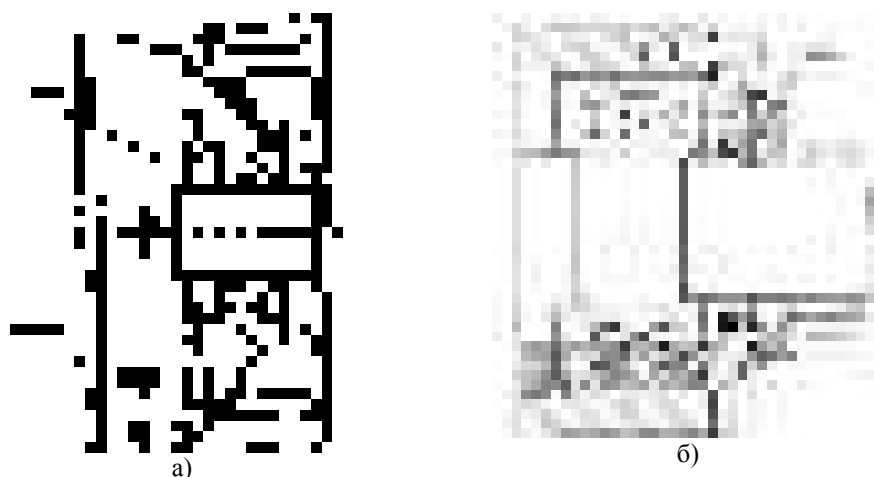
от ремонтных служб повышения качества технического обслуживания и ремонта. Поломки энергетического оборудования происходят внезапно и обычно связаны с разрушениями подшипников качения. Одна из причин – ошибки в конструкции систем смазывания подшипников механизма [5].

В процессе эксплуатации 5-ти бустерных насосов с частотой вращения 3600 об/мин проведено 2 предупредительные замены подшипников 6319 С3 ведомого вала насоса с приводной стороны за период - 10 месяцев. Диагностические признаки – локальное повышение шума и вибрации, зафиксированные органолептическими методами. В третий раз - зафиксирован внезапный отказ. Результат отказа – разрушение корпуса двигателя, корпуса насоса (рис. 15).



**Рис.15.** Разрушение корпуса двигателя (а) и корпуса (б) бустерного насоса

Анализ отказов показывает, что произошедшее однотипное разрушение подшипников ведомого вала с приводной стороны различных насосов за короткий срок вызвано конструкторской ошибкой. Конструкция подшипникового узла ведомого вала бустерного насоса предполагает смазывание путем разбрызгивания масла при помощи диска (рис. 16а). Со стороны насоса осуществляется подача инертного газа для уплотнения вала. Подшипник на высокой частоте вращения работает как насос, отбрасывая частицы смазочного материала от себя. Создаваемая взвесь масляных частиц не проникает к уплотнению вала, что приводит к интенсивному износу уплотнения. Рекомендуемое конструкторское решение узла смазывания подшипникового узла приведено на рис. 16б.



**Рис.16.** Конструкция подшипникового узла ведомого вала: а) существующая, со стороны двигателя насоса HV; б) рекомендуемая, используемая на насосе ПН-360.

При износе уплотнения из-за недостаточного смазывания возможно появление дополнительного потока газа, препятствующего попаданию масла в подшипник. В результате подшипник остается без смазки, и неравномерное распределение сил трения между телами качения приводит к разрушению сепаратора. Один из признаков – цвета побежалости на сепараторе (рис. 17). Это является наиболее вероятной причиной заклинивания вала и разрушения корпуса насоса и ротора.

Последовательность разрушения следующая:

- недостаток смазочного материала приводит к нагреву тел качения;
- уменьшается радиальный зазор с одновременным повышением температуры;
- повышение коэффициента трения создает условия для неравномерного распределения нагрузки между телами качения, заклиниванию тел качения;
- появляются продольные силы, приводящие к разрыву сепаратора.



**Рис.17.** Цвета побежалости на сепараторе разрушенного подшипника

#### **Накопление продуктов окисления смазочного материала в окнах сепараторов подшипников качения.**

Аналогичную аварию на этом участке удалось предотвратить благодаря контролю вибрационного состояния механического оборудования бустерных насосов и винтовых компрессоров. Превышение значениями вибрационных параметров допустимых значений послужило основанием для остановки и ремонта компрессора. Анализ характера разрушений позволил установить следующие диагностические признаки повреждений подшипников.

1. Износ беговой дорожки внутреннего кольца одного из шариковых радиально-упорных подшипников ведомого вала (рис. 18). Воздействие осевой нагрузки при работе подшипника, сочетающееся с разрушением элементов подшипника (сепаратора). На беговой дорожке присутствуют вкатанные частицы разрушенного сепаратора. Поверхность беговой дорожки имеет вид наклепанной поверхности.



**Рис.18.** Износ беговой дорожки внутреннего кольца шарикового радиально-упорного подшипника

2. На беговой дорожке внешнего кольца присутствуют частицы вкатанного мягкого металла.

3. Цвет сепаратора поврежденного подшипника более темный, чем у исправного подшипника.

4. На двух телах качения присутствуют следы износа, а на сепараторе присутствуют следы повреждения (рис. 19).



**Рис.19.** Следы износа на телах качения и следы повреждения на сепараторе

Указанные диагностические признаки позволяют предположить, что процесс накопления повреждений спровоцирован заклиниванием шарика в сепараторе (одна из возможных причин – накопление продуктов износа или окисления смазочного материала в зазоре шарик - окно сепаратора), что ограничило число степеней свободы при вращении шарика и ускорило износ сепаратора.

Данная причина оказалась характерной для подшипников, смазываемых не только жидким маслом, но и пластичной смазкой. Вибрационный контроль подшипника 6314 С3, установленного на электродвигателе мощностью 250 кВт с частотой вращения 3000 об/мин, позволил установить момент резкого увеличения виброскорости щита электродвигателя от 2,0 мм/с до 60...95 мм/с. После подачи свежей смазки виброскорость уменьшалась до 10...20 мм/с, затем опять начинала возрастать, одновременно увеличивалась температура корпуса подшипника до 70...90<sup>0</sup>С. Предпринятые меры позволили продолжить эксплуатацию до окончания смены. Разборка подшипникового узла и визуальный осмотр не выявили явных повреждений. После повторного включения начался резкий рост температуры и было принято решение о замене подшипника. Причину неисправности удалось установить при осмотре тел качения (рис. 20). Обнаруженные кольцевые следы на шариках явились следствием ограничения степеней подвижности двух шариков в окнах сепаратора, вращения шариков вдоль одной оси и возникновения автоколебаний. Причина – заклинивание шариков в окнах сепаратора при накоплении продуктов износа или окисления смазочного материала.



**Рис.20.** Ограничение подвижности шариков при накоплении продуктов износа в окнах сепаратора

### Недостаток смазочного материала.

Отказы дымососов и вентиляторов происходят редко, особенно после проведенного ремонта. Поэтому отказ дымососа ГД-20 через три часа работы после замены вала и подшипников, центрирования и балансировки рабочего колеса, имеющего низкий уровень вибрации (порядка 3,0 мм/с), был явной неожиданностью для эксплуатационного и ремонтного персонала. Подшипники смонтированы в одном корпусе и смазываются погружением из одного картера. Осмотр вала вентилятора показал следующее:

1. Подшипник 3536 находится в удовлетворительном состоянии (рис. 21).



**Рис.21.** Удовлетворительное состояние подшипника 3536

2. Подшипник 3530 имеет: разрушение сепаратора по одной из беговых дорожек; следы окисления в виде порошка окиси железа красного цвета; вмятины от роликов, возникшие после вдавливания роликов в размягченное при нагреве внутреннее кольцо (рис. 22). Следы окисления не пропитаны маслом.



**Рис.22.** Повреждения подшипника 3530

3. На посадочной поверхности внутреннего кольца присутствуют следы схватывания второго рода, образующиеся при высоких давлениях на площадках контакта, значительной скорости относительного движения 5...20 м/с и отсутствии смазки (рис. 23). Это свидетельствует о значительном моменте сопротивления между телами качения и беговой дорожкой, превышающем момент сопротивления в посадке внутреннего кольца на вал.

Проворачивание внутреннего кольца при наличии смазки проявляется в виде полированной поверхности. Это позволило сделать вывод о недостатке смазочного материала в корпусе вентилятора, несмотря на удовлетворительное состояние расположенного рядом подшипника 3536 – различия в размерах обеспечило смазывание данного подшипника.

Проведенные исследования позволили поставить правильный диагноз - недостаток подаваемого смазочного материала при определении причин повреждения радиально-упорных шарикоподшипников скоростных узлов прокатного оборудования (рис. 24). Этому способствовало повторение диагностических признаков – вмятины от тел качения на беговой дорожке внутреннего кольца и следы схватывания второго рода при провороте внутреннего кольца.



**Рис.23.** Следы схватывания второго рода при проворачивании внутреннего кольца подшипника на валу при отсутствии смазки



**Рис.24.** Повреждения радиально-упорного шарикоподшипника из-за недостатка смазочного материала

Проведенные исследования позволили сформулировать основные причины повреждений подшипников при нарушении смазывания:

- накопление продуктов износа в смазочном материале;
- неравномерное смазывание беговых дорожек двухрядных подшипников;
- ошибки в конструкции систем смазки;
- накопление продуктов окисления смазочного материала в окнах сепараторов;
- недостаток смазочного материала.

Определенные для каждого вида неисправностей визуальные диагностические признаки повреждений позволяют определить причину разрушения и мероприятия по предотвращению отказов [6, 7]. Дальнейшие исследования целесообразно направить на управление движением смазочного материала в подшипниковом узле для повышения долговечности подшипников.

#### *Перечень ссылок*

1. *Аввакумов С.И.* Определение характера распределения нагрузок в элементах металлургических машин по износу деталей / С.И. Аввакумов, В.А. Сидоров, В.М. Шепель, И.Г. Золкин - «Металлургическая и горнорудная промышленность», №1, 2006. - С. 99 – 102

2. *Сидоров В.А.* Характерные повреждения механизмов электродуговых печей с гидроприводом (Часть 1) / В.А. Сидоров, Е.В. Ошовская, В.С. Бабенко, А.В. Солошенко – «Металлургические процессы и оборудование» – 2010.–№1. – С. 11-18.

3. *Сидоров В.А.* Аналіз характеру і причин несправностей підшипникових вузлів механізму хитання кристалізатора / В.А. Сидоров, О.Л. Сотніков, В.П. Цокур - Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Вип. 6(154). – Донецьк: ДонНТУ, 2009. - С. 226-235.

4. *Седуш В.Я.* Снижение ресурса подшипников ходовых колес разливочных кранов при неравномерной нагрузке / В.Я. Седуш, В.М. Кравченко, В.А. Сидоров – Захист металургійних машин від поломок: Зб. наук. пр. – Вип.. 10. – Маріуполь, 2008. – 314 с. - С. 181 – 186.

5. *Седуш В.Я.* Разрушение подшипников энергетических машин металлургических предприятий / В.Я. Седуш, В.А. Сидоров - «Вибрация машин: измерение, снижение, защита», № 4 (15), декабрь 2008. - С. 26 – 31.

6. *Седуш В.Я.* Принципы построения обучающей системы распознавания повреждений подшипников качения / В.Я. Седуш, В.А. Сидоров, Е.В. Ошовская - «Металлы и литье Украины», 2001, №3-4. - С. 39 – 41.

7. *Сидоров В.А.* Классификация повреждений подшипников / В.А. Сидоров - «Оборудование и инструмент для профессионалов», серия «Металлообработка», №3 (113) 2009. - С. 76 – 79, №4 (115) 2009. - С. 70 – 73.

Рецензент: д. т. н., проф. В.В. Суглобов

*Статья поступила 11.11. 2013*