

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

ФАКУЛЬТЕТ ИНЖЕНЕРНОЙ МЕХАНИКИ И МАШИНОСТРОЕНИЯ

**КАФЕДРА «МЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЗАВОДОВ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ»
ИМ. ПРОФ. СЕДУША В.Я.**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к проведению лабораторных работ по дисциплине вариативной части

по выбору студента профессионального цикла

ТРИБОТЕХНИКА

для студентов всех форм обучения

направления подготовки 15.03.02

«Технологические машины и оборудование»

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

ФАКУЛЬТЕТ ИНЖЕНЕРНОЙ МЕХАНИКИ И МАШИНОСТРОЕНИЯ

**КАФЕДРА «МЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ЗАВОДОВ ЧЕРНОЙ
МЕТАЛЛУРГИИ» ИМ. ПРОФ. СЕДУША В.Я.**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к проведению лабораторных работ по дисциплине вариативной части

по выбору студента профессионального цикла

ТРИБОТЕХНИКА

для студентов всех форм обучения

направления подготовки 15.03.02

«Технологические машины и оборудование»

Рассмотрены на заседании
кафедры «Механическое оборудование
заводов черной металлургии»
им. проф. Седуша В.Я.
Протокол № 11 от 03.04.2017 г.

Утверждены на заседании
учебно-издательского совета ДОННТУ
Протокол № __ от __.__. 20__ г.

**Донецк
ДОННТУ
2017**

Методические указания к проведению лабораторных работ по дисциплине вариативной части по выбору студента профессионального цикла «Триботехника» для студентов всех форм обучения направления подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» / сост.: В. А. Сидоров. – Донецк: ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», 2017. – 46 с.

Отражены цели и задачи лабораторного практикума по дисциплине «Триботехника» для студентов всех форм обучения по направлению подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование». Описаны структура лабораторных работ, порядок подготовки к ним, последовательность операций и действий, направленных на выполнение поставленных задач, указаны форма представления результатов работы и порядок защиты отчетов по выполненным заданиям, даны рекомендации по использованию теоретического материала.

Составители: Сидоров В.А., д.т.н., доцент, профессор кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии» им. проф. Седуша В.Я.

Рецензенты: д.т.н., профессор А.П. Кононенко
к.т.н., доцент Е.В. Ошовская

Ответственный за выпуск:

д. т. н., профессор А. Л. Сотников

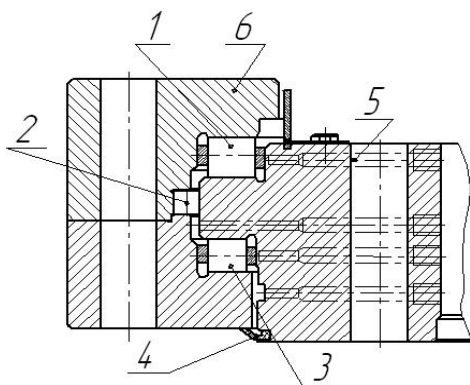
НАРУШЕНИЕ СМАЗЫВАНИЯ КАК ПРИЧИНА ОТКАЗОВ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

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 является причиной отказов механического 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 решения задач генезиса повреждений подшипников качения, определены 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. Закономерности движения обладают индивидуальностью даже для однотипных узлов, что выражается в различном режиме смазывания и долговечности подшипников.

Накопление продуктов износа в смазочном материале.

Для поворота свода электродуговой печи используется трехрядное роlikоподшипниковое поворотное кольцо (рисунок 1). Работа трехрядного роlikоподшипникового 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 современной электродуговой печи: угол поворота свода – 95° ; скорость поворота свода - $5^{\circ}/\text{сек}$; масса свода – 50 т.



а)

б)

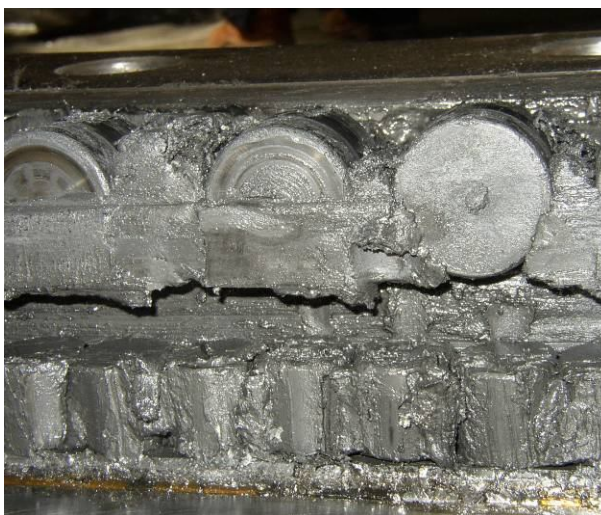
Рисунок 1 – Конструкция (а) и общий вид (б) трехрядного роликоподшипникового поворотного кольца: 1 - опорные ролики; 2 - радиальные ролики; 3 - контрпорные ролики; 4 – пыльник; 5 - неподвижное кольцо; 6 - подвижное кольцо.

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



Рисунок 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 (рисунок 3а). Установлено преобладание абразивного износа из-за окисления (коксования) смазочного материала и накопления продуктов износа в застойной зоне верхнего ряда роликов (рисунок 3а). На поверхности роликов зафиксирована пленка продуктов коксования смазочного материала (рисунок 3б).



а)



б)

Рисунок 3 – Элементы изношенного подшипника:

- а) продукты окисления и износа в смазочном материале;
- б) продукты коксования на поверхности роликов

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

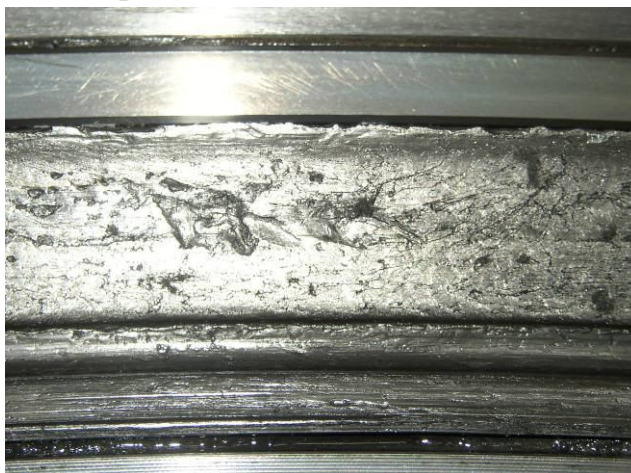


Рисунок 4 – Усталостные трещины поверхностного слоя беговой дорожки подшипника

Следствием стал ускоренный износ роликов и беговых дорожек верхнего ряда роликподшипникового кольца, неравномерное распределение сил между телами качения. Это вызвало перекося роликов, прекращение перекачивания тел качения, деформацию роликов верхнего ряда и повреждения сепаратора (рисунок 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.

Для смазки подшипника в неподвижном внутреннем кольце выполнены каналы на 4-х уровнях, в 8-ти 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 принудительного 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 (рисунок 5).



а)



б)

Рисунок 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 (рисунок 6), возникающее при переменных нагрузках и высоких давлениях, превышающих предел выносливости. Характерный вид изнашивания для деталей подшипников качения. 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 (рисунок 7).

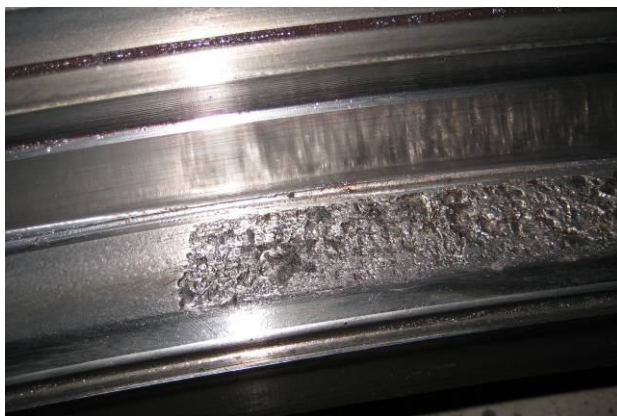


Рисунок 6 – Усталостное выкрашивание на беговых дорожках подшипника



Рисунок 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 проведена 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 (рисунок 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.

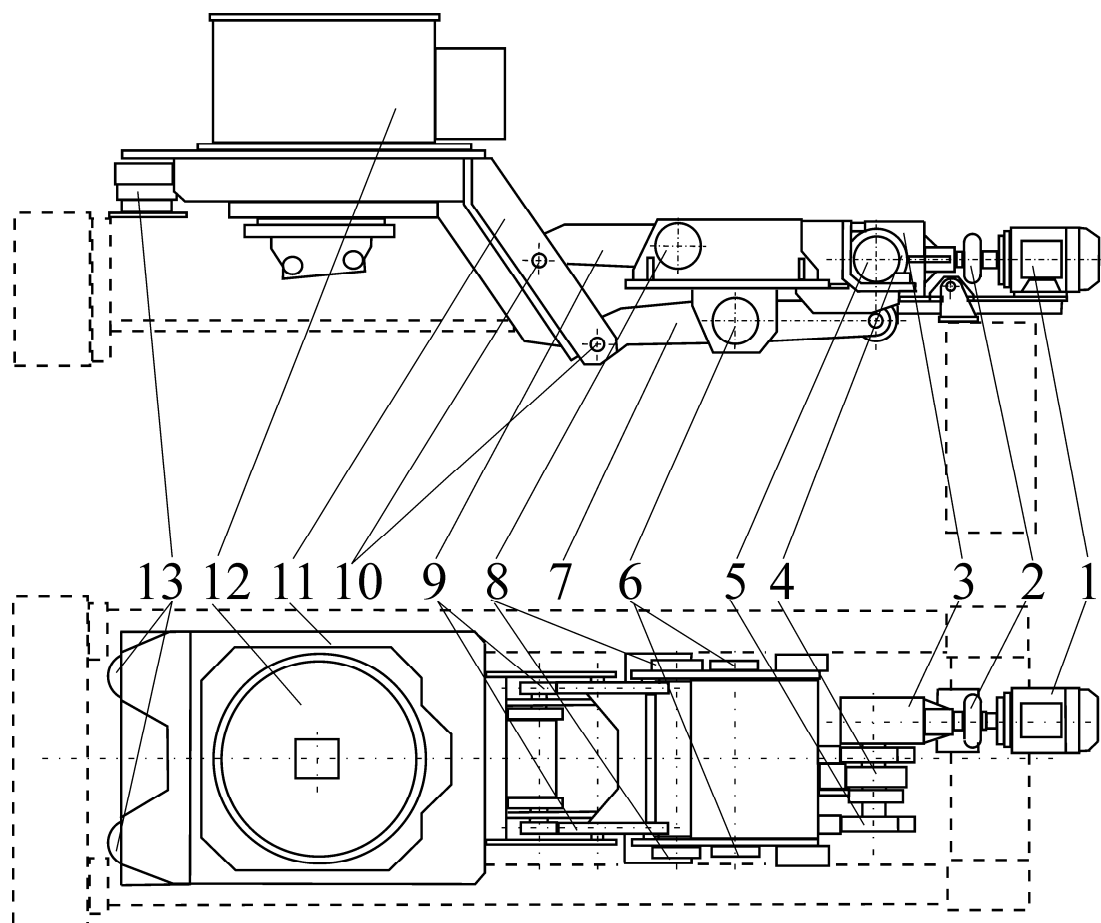


Рисунок 8 – Общий вид кристаллизатора и стола качания с электромеханическим приводом

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 разлива. 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 (рисунок 9) МНЛЗ наблюдается нарушение режима смазывания подшипников шарниров, заключающееся в накоплении продуктов износа и отсутствии движения пластичной смазки из-за малых углов качания шарниров, приводит к абразивному износу. 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 равном шагу тел качения. На начальном этапе 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].





Рисунок 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 простоя 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 (рисунок 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.



Рисунок 10 – Сползание ходового колеса с оси

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

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



Рисунок 10 – Полное разрушение одного из подшипников ходового колеса



Рисунок 11 – Следы коксования смазочного материала на деталях целого подшипника



Рисунок 12 – 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°C . Поэтому, максимальная вероятность отказов подшипников ходовых колес – осень.

Развитие повреждения приводит к неравномерному движению тел качения в нагруженной зоне, расположенной сверху при местном характере нагрузки. Это приводит к оттоку смазки из зоны трения. Для смазывания роликов в зоне контакта колесо должно совершить половину оборота, а кран проехать порядка 1,0 метра. В результате появляется неравномерная нагрузка на перемиčky 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 роликов 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 (рисунок 13).

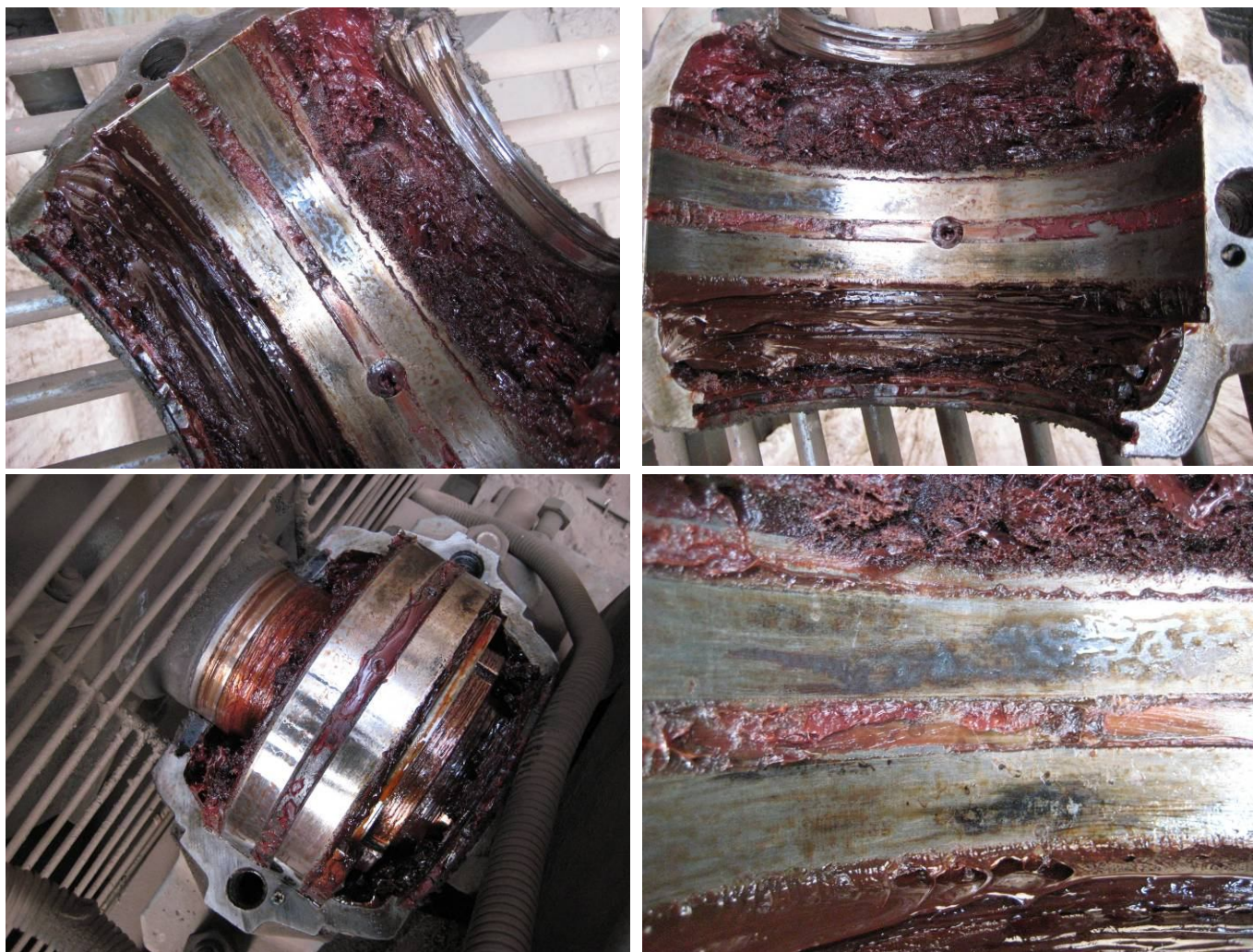


Рисунок 13 - Различная структура смазочного материала
приводной и холостой стороны корпуса подшипника

Торцевой односторонний подвод смазочного материала для двухрядного роликподшипника 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 (рисунок 14).



а)



б)

Рисунок 14 – 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 является конструкторской ошибкой. Конструкция подшипникового узла ведомого вала бустерного насоса предполагает смазывание путем разбрызгивания масла при помощи диска (рисунок 15а). 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. Рекомендованное конструкторское решение узла смазывания подшипникового узла приведено на рисунке 15б.

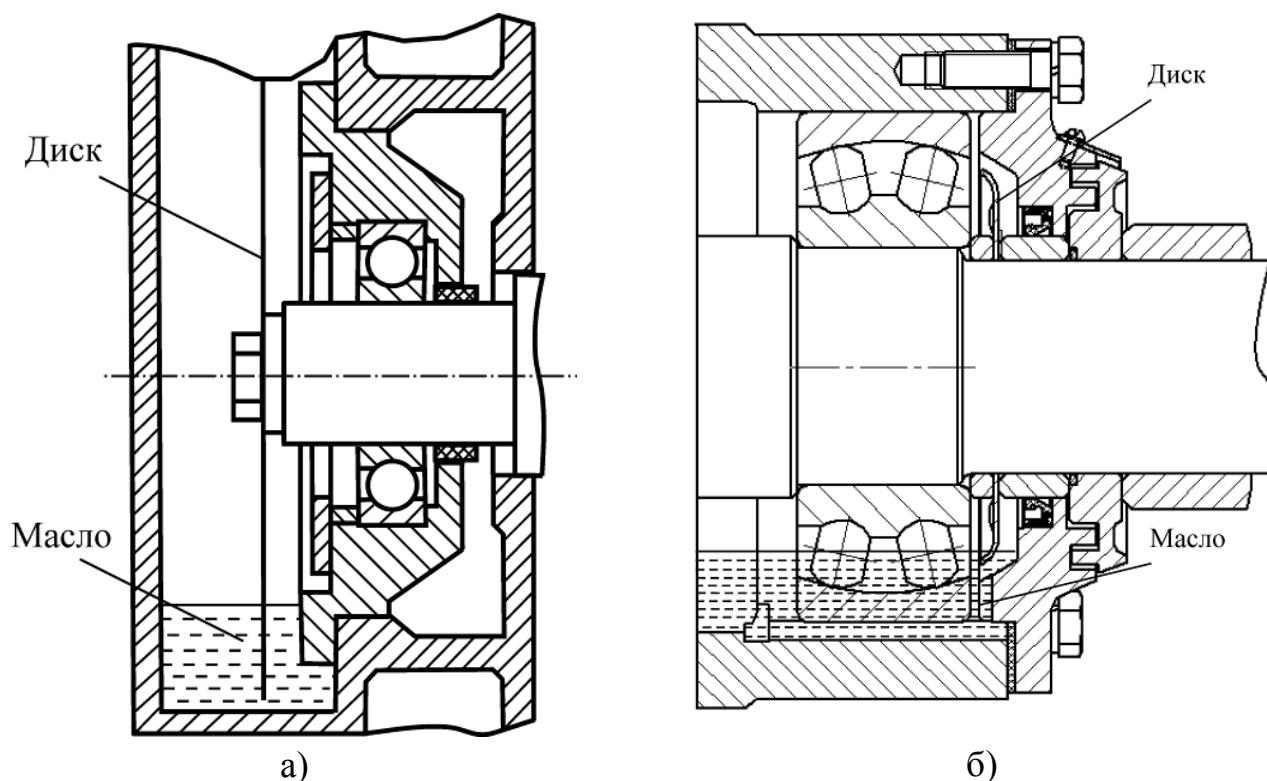


Рисунок 15 – Конструкция смазки подшипникового узла ведомого вала:

- а) существующая, со стороны двигателя насоса НВ;
- б) рекомендуемая, используемая на насосе ШН-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 (рисунок 16). 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.



Рисунок 16 – Цвета побегалости 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 значений 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 (рисунок 17). 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.



Рисунок 17 – 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 (рисунок 18).



Рисунок 18 – 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 установленный на электродвигателе мощностью 250 кВт и 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 начинала опять начинала возрастать, одновременно увеличивалась температура корпуса подшипника до 70...90⁰С. 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 принято решение о замене подшипника. Причину неисправности удалось установить при осмотре тел качения (рисунок 19).

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.

Как упомянуто выше, высокие величины радиальных зазоров в подшипнике приводят к высоким значениям угла контакта. При вращении подшипника, полный комплект тел качения вращается по окружности подшипника, и каждое тело качения вращается вокруг собственной оси, и на него воздействует кроме центробежных сил еще и гироскопический момент. Величина гироскопического момента связана с углом контакта. При увеличении скорости вращения подшипника, крутящие силы, действующие на тела качения, тоже увеличиваются, и возникает проскальзывание между шарами и дорожками качения. Это проскальзывание приводит к уменьшению смазочной пленки или ее исчезновению, в результате чего возникает сильный нагрев подшипника, который может привести к преждевременному выходу подшипника из строя. Важно найти баланс между преимуществом угла контакта, уменьшающего напряжения в компонентах подшипника, и потенциально возможным выходом из строя подшипника из-за проскальзывания шаров.



Рисунок 19 – 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, имеющий 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 (рисунок 20).

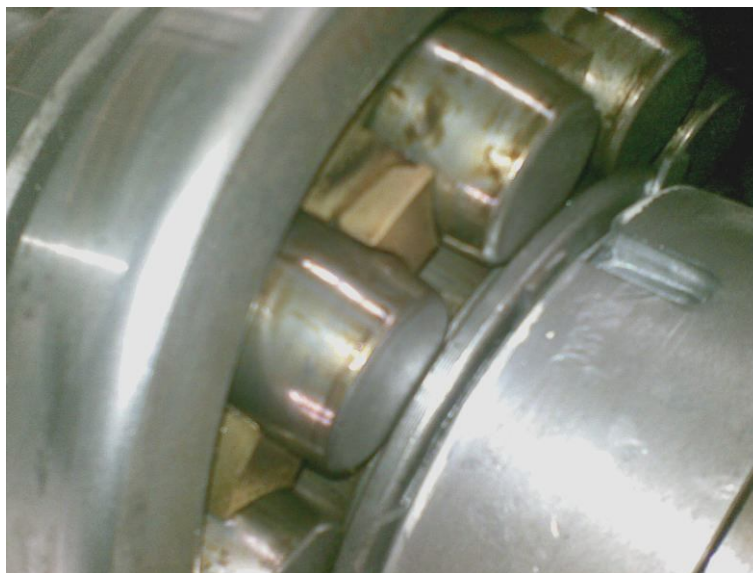


Рисунок 20 – Удовлетворительное состояние подшипника 3536

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 (рисунок 21). Следы окисления не пропитаны маслом.



Рисунок 21 – 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 (рисунок 22). Это свидетельствует о значительном моменте сопротивления между телами качения и беговой дорожкой, превышающем момент сопротивления в посадке внутреннего кольца на вал.



Рисунок 22 – Следы схватывания второго рода при проворачивании внутреннего кольца подшипника на валу при отсутствии смазки

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 (рисунок 23). Этому способствовало повторения диагностических признаков – вмятины от тел качения на беговой дорожке внутреннего кольца и следы схватывания второго рода при провороте внутреннего кольца.



Рисунок 23 – 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]. Направление дальнейших исследований может быть направлено на управление движением смазочного материала в подшипниковом узле для повышения долговечности подшипников.

Литература.

1. Аввакумов С.И., Сидоров В.А., Шепель В.М., Золкин И.Г. Определение характера распределения нагрузок в элементах металлургических машин по износу деталей / Научно-технический и производственный журнал «Металлургическая и горнорудная промышленность», №1, 2006 г. С. 99 – 102
2. Сидоров В.А., Ошовская Е.В., Бабенко В.С., Солошенко А.В. Характерные повреждения механизмов электродуговых печей с гидроприводом (Часть 1) / Металлургические процессы и оборудование. – 2010. – №1. – С. 11-18.

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

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

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

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

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

ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Современное механическое оборудование, работающее в составе технологических линий промышленных предприятий, должно удовлетворять высоким требованиям надежности, в первую очередь показателям безотказности. Отказ одного из элементов приводит к остановке или нарушению технологического процесса. Поэтому, возникновение повреждения, предвещающее ускоренный износ элементов оборудования должно быть обнаружено и остановлено на самых ранних стадиях.

Решение данной задачи возможно при субъективном восприятии информации о техническом состоянии механического оборудования, или путем анализа объективной информации (значений диагностических параметров), полученных приборными методами. Оптимальным является рациональное сочетание субъективного мнения и объективных данных о состоянии оборудования. И в том и в другом случае необходима высокая квалификация специалиста, принимающего решение о необходимости проведения ремонта.

Практический опыт показывает, что невозможно заменить механика с его субъективизмом, основанном на знании особенностей эксплуатации и ремонта оборудования. Субъективное восприятие информации о техническом состоянии механического оборудования, базируется на использовании органолептического метода. Этот метод является первым уровнем решения задач диагностирования и позволяет повысить точность диагноза в случае использования приборных методов.

Органолептический (органо- + греч. leptikos - способный взять, воспринять) **метод** – основан на анализе информации, воспринимаемой органами чувств (зрения, обоняния, осязания, слуха, вкуса) без применения технических измерительных или регистрационных средств. Эта информация не может быть представлена в численном выражении, а основывается на ощущениях генерируемых органами чувств человека. Решение относительно объекта контроля принимается по результатам анализа чувственных восприятий. Поэтому точность метода зависит от квалификации, опыта и способностей лиц, проводящих диагностирование. При органолептическом контроле могут использоваться технические средства, повышающие разрешающие способности или восприимчивость органов чувств (лупа, микроскоп, слуховая трубка и т.п.), не являющиеся измерительными.

Принятие решения имеет характер «соответствует – не соответствует» и определяется диагностическими правилами типа «если – то», имеющими конкретную реализацию для узлов механизма. Практически, происходит оценка состояния оборудования по двухуровневой шкале – продолжать эксплуатацию или необходим ремонт. Объем информации о техническом состоянии – минимально необходимый.

Основная цель - обнаружение отклонений от работоспособного состояния механизма. Решение о техническом состоянии механизма принимает технологический или ремонтный персонал, обслуживающий оборудование на основании опыта и производственной ситуации. Принимается решение об остановке оборудования для визуального осмотра и последующего ремонта или продолжения эксплуатации.

Основные органолептические методы, используемые при оценке технического состояния механического оборудования.

1. Анализ шумов механизмов, происходит по двум направлениям:

1.1 Акустическое восприятие, позволяющее оценивать наиболее значимые повреждения, меняющие акустическую картину механизма. Весьма эффективно при различении повреждений муфт, определении дисбаланса или ослабления посадки деталей, обрыве стержней ротора, ударах деталей. Диагностические признаки – изменение тональности, ритма и громкости звука.

1.2 Анализ колебаний механизмов. В этом методе механические колебания корпусных деталей преобразуются в звуковые колебания при помощи технических или электронных стетоскопов. Предпринимаются попытки расширить возможности человеческого восприятия, используя электронные средства.

2. Контроль температуры позволяет оценить степень нагрева корпусных деталей по уровням «холодно», «тепло», «горячо». «Холодно» - температура менее $+20^{\circ}\text{C}$, «тепло» - температура $+30...40^{\circ}\text{C}$, «горячо» - температура свыше $+50^{\circ}\text{C}$. Возможно расширение диапазонов воспринимаемых температур.

3. Восприятие вибрации основано на тактильном анализе, как и контроль температуры. Значения параметров вибрации субъективно оценить затруднительно. При возможности сравнительного анализа точность оценки амплитуды вибрации не превышает 20%. Абсолютная оценка практически всегда содержит грубые ошибки из-за нераспознанного спектрального состава вибрации. В высокочастотном диапазоне возможности человека по восприятию вибрации ограничены. Надежным виброметром человек служить не может.

4. Визуальный осмотр механизма предоставляет большую часть информации о техническом состоянии. Осмотр, может проводиться в динамическом режиме (при работающем механизме) и в статическом режиме (при остановленном механизме).

5. Методы осязания используются при оценке вязкости, пластичности, наличия посторонних включений в смазочном материале, для оценки шероховатости поверхности поврежденных деталей.

1. Анализ шумов механизмов

В механических устройствах, степень повреждения определяется по характеру взаимодействия контактирующих деталей. Физическое проявление соударения деталей во время работы реализуется в виде распространения упругих волн акустического диапазона, возникновения механических колебаний (вибраций) и ударных импульсов. Несмотря на единую физическую природу, каждое из этих проявлений имеет свои особенности и различным образом отображает происходящие процессы.

Упругие волны, порождающие акустические колебания имеют частотный диапазон $20...16000$ Гц и прослушиваются специалистом, находящимся рядом с оборудованием. Все слышимые звуки разделяются на шумы и музыкальные звуки. Первые представляют собой непериодические колебания с переменной частотой и амплитудой, вторые — периодические колебания. Между музыкальными звуками и шумами нет четкой границы. Акустическая составная часть шума часто носит ярко выраженный музыкальный характер и содержит разнообразные частоты (тоны), которые легко улавливаются опытным ухом.

Основными свойствами звука являются: громкость, высота и тембр.

1. Громкость зависит от амплитуды колебаний звуковой волны. Сила звука и громкость – неравнозначные понятия. Сила звука объективно характеризует физический процесс, а громкость определяет качество воспринимаемого звука. Сила звука может меняться от слухового порога (порога слышимости) до болевого порога. Для низких частот, громкость воспринимается в большей степени, чем для высоких, при одинаковой амплитуде колебаний звуковой волны. Можно оценивать изменения громкости в 2, 3, 4 раза, оценить увеличение громкости более чем в 4 раза точно не удастся.

2. Высота звука отражает частоту колебаний звуковой волны. Нижняя граница слуха у человека составляет 15...19 Гц; верхняя – 15000...20000 Гц. Чувствительность уха имеет индивидуальные отклонения. Частоты 200...3500 Гц соответствуют спектру человеческой речи. Минимальная длительность звука, при которой можно оценить спектральный состав акустических колебаний - 20...50 мс. При меньшей длительности звук воспринимается как щелчок.

При воздействии частот выше 15000 Гц ухо становится менее чувствительным, теряется способность различать высоту тона. При 19000 Гц предельно слышимыми оказываются звуки, более интенсивные, чем при 14000 Гц. При повышении интенсивности высоких звуков возникает осязание звука, а затем чувство боли. Область слухового восприятия ограничена сверху порогом осязания, снизу порогом слышимости. Наиболее воспринимаемы звуки в диапазоне 1000 до 3000 Гц. В этой области ухо является наиболее чувствительным. Повышенная чувствительность в области 2000...3000 Гц объясняется собственными частотами барабанной перепонки.

3. Под тембром понимают характер или окраску звука, зависящую от взаимоотношения составляющих частот. Тембр отражает акустический состав звука - число, порядок и силу составляющих (гармонических и негармонических). Тембр зависит от того, какие гармонические частоты складываются с основной частотой, и от амплитуды составляющих частот. В слуховых ощущениях тембр сложного звука играет значительную роль.

Скорость распространения звуковых волн зависит от плотности среды-проводника. Скорость звука в воздушной среде составляет 340 м/с; в воде - 1500 м/с; в стали - 5000 м/с.

Основные наблюдаемые отклонения акустических шумов.

Глухие толчки при изменении направления вращения валов механизма соответствуют износу: шпоночных или шлицевых соединений, элементов муфт, повышенному зазору в зубчатой передаче.

Слабые стуки низкого тона соответствуют сколам шлицов, ослаблению шпоночного соединения, несоосности соединительных муфт.

Резкий металлический звук сопровождает повреждения соединительных муфт.

Свистящий звук возникает при проскальзывании ремней ременной передачи.

Частые резкие удары соответствуют биениям муфт, неправильной сборке карданных валов.

Прослушивание механических колебаний, возникающих при работе механизма, самый распространенный метод определения состояния работающего оборудования. Механические колебания низкой и средней частоты легко распространяются по корпусным деталям механизма. Для прослушивания механических колебаний используется технический стетоскоп, состоящий из металлической трубки и деревянного (а лучше текстолитового) наушника (рисунок 1). Металлическая трубка, установленная на корпусе механизма, позволяет преобразовать механические колебания в акустические, распространяемые внутри трубки к наушнику по акустическому каналу – воздуху, находящемуся в трубке. Этот метод настолько доказал свою надежность, что требования по прослушиванию шумов механизмов включены во все правила технического обслуживания и инструкции по эксплуатации оборудования.



Рисунок 1 – Технический стетоскоп
а) схема; б) общий вид

Появление технического стетоскопа последовало после изобретения медицинского стетоскопа – инструмента для выслушивания звуковых явлений, сопровождающих функции органов тела человека. Первым стетоскоп ввел во врачебную практику французский врач Рене Лаэннек (1819 г.). Простой твердый стетоскоп - это трубка с двумя воронками на концах, изготовленная из дерева, пластмассы, или металла. Меньшая воронка (рисунок 2 верхняя часть устройства) прикладывается к определенным точкам поверхности тела обследуемого человека. К большей (плоской) воронке (рисунок 2 нижняя часть устройства) исследователь прикладывает ухо. При этом колебания упругих сред, обусловленные функцией органа, передаются к уху исследователя столбом воздуха, твердой частью стетоскопа и височной костью исследователя (костная проводимость).



Рисунок 2 – Медицинский стетоскоп

Как всякий инструмент, преобразующий механические колебания в звуковые, технический стетоскоп имеет свои индивидуальные звуковые особенности. Характер преобразования звука техническим стетоскопом зависит от длины, диаметра трубки, толщины стенки, материала, формы наушника. Все это влияет на частоту собственных колебаний стетоскопа. Прослушиваемые шумы, имея свои отличия, в тоже время едины в отображении звуковых картин повреждений механизма. Возможные реализации технических стетоскопов весьма разнообразны (рисунок 3). Это оборудование часто используется для прослушивания двигателей внутреннего сгорания автомобилей.



а)



б)

Рисунок 3 – Примеры исполнения технических стетоскопов:

а) технический стетоскоп GA111C для прослушивания машинных шумов и стуков, имеет диафрагму звукового усиления; б) технический стетоскоп КА-6323 для прослушивания шумов в механической части двигателя, трансмиссии.

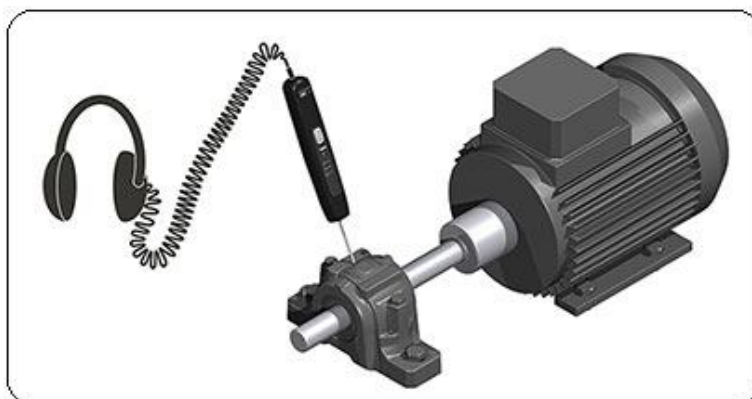
Сейчас, при прослушивании шумов, используют электронные стетоскопы (рисунок 4). Щуп прибора устанавливается на корпусе механизма. Электрический сигнал, снимаемый с пьезоэлектрического датчика, подаётся на усилитель звуковой частоты, а затем в звукозащитные наушники. По частоте и силе звука судят о наличии повреждений в контролируемом механизме и об их характере. Электронные стетоскопы выпускаются многими фирмами, в качестве примера используется продукция фирмы SKF.



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Электронные стетоскопы выпускаемые фирмой SKF:
а) TMST2; б) TMST3; в) применение TMST3

К преимуществам электронных стетоскопов следует отнести: высокое качество звука и возможность сосредоточиться на распознавании повреждения благодаря звукозащитным наушникам. Недостатки: регулировка громкости лишает оператора основного преимущества – оценки степени повреждения, высококачественные наушники не позволяют услышать предупреждение об опасности в производственном цехе.

Утверждение о возможности использования стетоскопа без подготовки необоснованно. Наиболее сложной задачей является процесс распознавания шумов и определения видов повреждений. Этот процесс трудно формализовать. Много зависит от квалификации и опыта человека, использующего этот метод. Очень трудно заменить квалифицированного механика с его субъективным мнением.

Предпринимаются попытки расширить возможности человеческого восприятия, используя электронные средства. Например, ультразвуковые стетоскопы позволяют прослушивать не воспринимаемый слухом диапазон ультразвуковых колебаний, связанный с повреждениями подшипников качения, искровыми разрядами, утечками газа (рисунок 5).



а)



б)

Рисунок 5 – Ультразвуковые стетоскопы производства фирмы SKF:

а) ультразвуковой детектор утечек TMSU 1; б) CMIN 400-K Inspector 400

Любой газ, просачиваясь из области высокого давления в область низкого давления, создает турбулентность. Турбулентность создает высокочастотный звук, который можно определить с помощью электронного стетоскопа преобразующего неслышимый ультразвук (20...100 кГц) в акустический. Аналогичным образом можно услышать электрические разряды, кавитацию в трубопроводах, повреждения подшипников и зубчатых передач, избежать случаев избыточного смазывания. Однако следует помнить, что данный метод в большей степени индикаторный и не позволяет получить точной количественной оценки степени повреждения.

Шумы механизма

Сигналы, возбуждаемые колебаниями работающих механизмов, носят импульсный характер. Увеличение зазора между сопрягаемыми деталями приводит к перераспределению энергии по частотным диапазонам, повышению уровня сигнала на более высоких частотах. Амплитуда колебаний характеризует динамику работы кинематической пары, степень повреждения, а частота – источник колебаний. Значительные повреждения сопровождаются нарушением стабильности звучания, появлением высоких частот и возрастанием силы звука. Следует помнить, легче заменить поврежденный подшипник, чем восстанавливать разбитые посадочные места корпусных деталей.

Решение задачи распознавания шумов и видов повреждений основывается на знании характерных шумов элементов механизма.

Характерные шумы подшипников качения.

1. Незначительный ровный шум низкого тона свидетельствует о нормальном состоянии подшипника качения.
2. Глухой прерывистый шум - загрязнённость смазки.

3. Звонящий (металлический) шум - недостаточная смазка, возникает также при повышенном радиальном зазоре.

4. Свистящий шум указывает на взаимное трение скольжения деталей подшипникового узла.

5. Скрежет, резкое частое постукивание возникает при повреждениях сепаратора или тел качения.

6. Глухие периодические удары - результат ослабления посадки подшипника, дисбаланса ротора.

7. Воющий звук, скрежетание, гремющий шум, интенсивный стук указывают на повреждение элементов подшипника.

Шумы зубчатых передач

1. Ровный жужжащий шум низкого тона характерен для нормальной работы зубчатой передачи. Косозубая передача в этом случае имеет ровный воющий шум низкого тона.

2. Шум высокого тона, переходящий с увеличением частоты вращения в свист и вой, и непрерывный стук в зацеплении происходит при искажении формы работающих поверхностей зубьев или при наличии на них местных дефектов.

3. Дребезжащий металлический шум, сопровождающийся вибрацией корпуса, возможен вследствие малого бокового зазора или несоосности, непараллельности колёс.

4. Циклический (периодический) шум, появляющийся с каждым оборотом колеса, то ослабевающий, то усиливающийся, указывает на эксцентричное расположение зубьев относительно оси вращения. Устранить такой шум в редукторе практически невозможно.

5. Циклические удары, грохот, глухой стук – излом зуба.

Шумы, характерные для подшипников скольжения:

1) нормальной работе соответствует монотонный и шелестящий шум;

2) отсутствию смазки соответствует свист высокого тона, скрежет;

3) задирам на поверхности подшипников скольжения, несоосности валов и выкрашиванию соответствуют периодические удары, резкое металлическое постукивание.

При смазке кольцом: отсутствию смазки соответствует звонящий металлический шум; повышенной вязкости масла соответствуют циклические удары низкого тона.

Дополнительные рекомендации

Звон металлических деталей при ударе, например, молотком, используется для определения наличия дефектов. Звук, издаваемый стальной деталью, содержащей дефект, дребезжащий, более низкий и глухой по сравнению со звуком бездефектной детали, имеющий чистый, высокий звук. Данный метод достаточно эффективен применительно к контролю затяжки резьбовых соединений, целостности деталей простой формы. В более сложных случаях его использование ограничено.

Каждый механизм содержит две причины шумов: механического и электрического характера. Воющий звук, исчезающий при отключении питания электродвигателя, указывает на повреждения в электрической части мотора.

Степень повреждения определяется интенсивностью шума. Шум, вызывающий болевые ощущения при прослушивании техническим стетоскопом, является пределом эксплуатации деталей. Использование электронного стетоскопа предполагает сравнение интенсивности шума однотипных элементов.

Указанные виды шумов в истинном виде проявляются редко. Акустическая картина механизма составляется из совокупности шумов всех элементов, определяется размерами, характером смазывания, нагрузками, температурой и другими факторами. Поэтому, приведенная классификация служит исходной информацией при расшифровке конкретной акустической картины механизма. Качество расшифровки и правильность постановки диагноза зависит от квалификации, подготовленности и опыта механика.

2. Контроль температуры является важным аспектом оценки технического состояния механического оборудования. До 95% всех форм энергии, создаваемой и передаваемой машинами прямо или частично, превращается в тепловую энергию. Параметром теплового диагностирования является температура, отражающая протекание рабочего процесса и развитие целого ряда неисправностей.

Температура нагрева корпусов механизмов, как диагностический параметр, имеет две особенности: появление некоторых видов неисправностей вызывает повышение температуры корпуса механизма; инерционность нагрева металлических деталей, корпусов и опор не позволяет использовать данный параметр для определения внезапных отказов и зарождающихся повреждений. Правила технической эксплуатации регламентируют предельную температуру корпусов подшипников, которая не должна превышать температуру окружающей среды более чем на 40°C и быть не выше $60^{\circ}\dots 80^{\circ}\text{C}$. Для некоторых механизмов, имеющих циркуляционную систему смазки или охлаждения, оценивают разницу температур масла или воды на выходе и входе. Это позволяет контролировать тепловые процессы, общее состояние оборудования, а также степень его

ухудшения. Обычно разница температур на выходе и входе не должна превышать $5...10^{\circ}\text{C}$.

Пределом для непосредственного восприятия является температура 60°C – выдерживаемая тыльной стороной ладони без болевых ощущений в течение 5 с. Использование дополнительных средств – брызг воды позволяет контролировать значения 70°C – видимое испарение пятен воды и 100°C – кипение воды внутри капли на поверхности корпусной детали.

Основные причины, вызывающие повышение температуры:

1) дефекты системы смазывания: недостаточное или избыточное количество смазки; загрязнение смазки; неверно выбран смазочный материал;

2) повреждения подшипников качения: износ или повреждение колец или тел качения; разрушение сепаратора; проворачивание подшипника на валу или в корпусе;

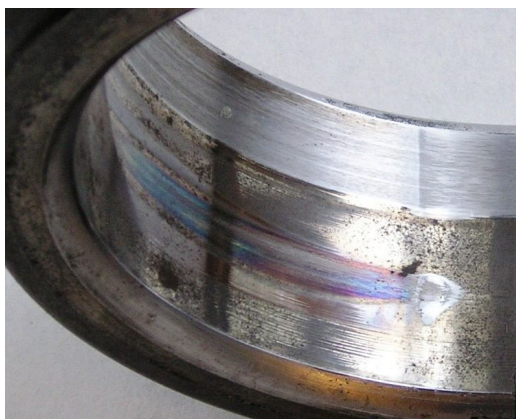
3) дефекты изготовления и сборки: отсутствие осевых зазоров; малый радиальный зазор; дефекты корпусных деталей; защемление наружного кольца подшипника;

4) дефекты регулировки: подшипник сильно зажат; перекося подшипника или вала; неправильное центрирование электродвигателя с приводом;

5) повреждения уплотнительных устройств;

6) повреждения системы охлаждения: недостаточная подача охлаждающей воды; высокая температура воды на входе.

Расширить диапазон субъективно воспринимаемых температур возможно при помощи зрительного восприятия используя цвета каления и цвета побежалости (рисунок 6).



а)



б)

Рисунок 6 – Цвета побежалости на посадочной поверхности внутреннего кольца

подшипника при схватывании и провороте (а); изменение цветов каления при охлаждении непрерывно-литой заготовки на холодильнике МНЛЗ (б)

Степень нагрева детали или заготовки при термической обработке, например во время закалки, может быть определена по цвету каления. **Цвета каления** и соответствующие температуры ($^{\circ}\text{C}$) для стальных изделий: темно-коричневый, слабое свечение в темноте – 530...580; коричнево-красный – 580...650; темно-красный – 650...730; темно-вишневый-красный – 730...770; вишнево-красный – 770...800; светло-вишнево-красный – 800...830; светло-красный – 830...900; оранжевый – 900...1050; темно-желтый – 1050...1150; светло-желтый – 1150...1250; ярко-желтый – 1250...1300. Указанные цвета могут несколько изменяться по отношению к конкретным маркам сталей, однако характер изменения цветности остается неизменным.

Цвета побежалости предоставляют информацию о степени нагрева детали во время поломки, перед отпуском или о перегреве детали во время сборки. Цвета побежалости углеродистой стали, не совпадают с цветами побежалости коррозионностойких и жаропрочных сталей. Это следует учитывать при различении температуры (см. таблицу).

Таблица – Цвета побежалостей сталей

Температура, $^{\circ}\text{C}$	Цвет побежалости			
	Углеродистая сталь	12X18H9T	XH75MBTЮ	XH77TЮP
220	Светло-желтый			
240	Темно-желтый			
255	Коричнево-желтый			

265	Коричнево-красный			
275	Пурпурно-красный			
285	Фиолетовый			
295	Васильково-синий			
300		Светло-соломенный		
315	Светло-синий			
330	Серый			
400		Соломенный	Светло-желтый	
500		Красно-коричневый	Желтый	Светло-соломенный
600		Фиолетово-синий	Коричневый	Фиолетовый
700		Синий	Синий	Синий
800			Голубой	Голубой

Оборудованием, позволяющим повысить точность определения температуры контролируемого объекта при субъективном восприятии являются термоиндикаторы (жидкокристаллические и плавящиеся) и термосвидетели.

Жидкокристаллические термоиндикаторы - органические соединения, обладающие свойствами жидкости (текучесть) и твердого кристаллического тела (анизотропия, двойное лучепреломление). При изменении температуры жидкий кристалл меняет цвет. Выпускаются в виде пленок или жидких растворов.

Плавящиеся термоиндикаторы выпускают в виде термокарандашей, термолаков, термopopoшкoв. Изготавливаются на основе воска, стеарина, парафина или соединений серы, цинка, свинца (для высоких температур). На поверхности изделия термокарандашом наносят риску, которая плавится и меняет цвет при достижении заданной температуры. Действие термолаков аналогично.

Термосвидетели - комплект пластинок из металлов, плавящихся при различных температурах.

3. Восприятие и визуализация механических колебаний.

Наибольшая чувствительность при воздействии вибрации на человека наблюдается при частоте 100...300 Гц. Распознать частоту колебаний практически невозможно, если это колебания происходят с частотой свыше 5 Гц. Однако, человек ощущает дискомфорт, находясь рядом с машиной генерирующей частоты, совпадающие с резонансными частотами частей человеческого тела. При

повреждениях, из-за нарушения гармоничности колебаний, появления диссонанса эта чувствительность усиливается.

Каждая часть тела человека имеет диапазоны резонансных частот: глаза – 12...27 Гц, грудная клетка – 2...12 Гц, горло – 6...27 Гц, ноги и руки – 4...27 Гц, поясничная часть позвоночника – 4...14 Гц, живот – 4...12 Гц. Кожа имеет наибольшую чувствительность при частоте вибрации 100...300 Гц. Эти резонансные зоны меняют свои диапазоны при изменении положения тела человека.

Если колебания настолько редки, что глаз различает каждое из них в отдельности, то частота определяется подсчетом полных колебаний за некоторый промежуток времени. С уменьшением размаха колебаний точность глазомерного восприятия уменьшается. Частота колебаний в диапазоне 25...100 Гц позволяет различить малые амплитуды до 0,1 мм.

Часто используются различные **методы визуализации механических колебаний**.

Практически можно определить размах больших колебаний (5 мм и выше) по отбрасываемой объектом тени на экран в пучке параллельных либо расходящихся лучей.

Характер прямой линии, проведенной по бумаге, лежащей на корпусе механизма, позволяет качественно оценить частоту и интенсивность колебаний (рисунок 7). При этом регистрируются колебания в направлении перпендикулярном направлению движения карандаша. Скорость перемещения карандаша должна быть как можно более постоянной.

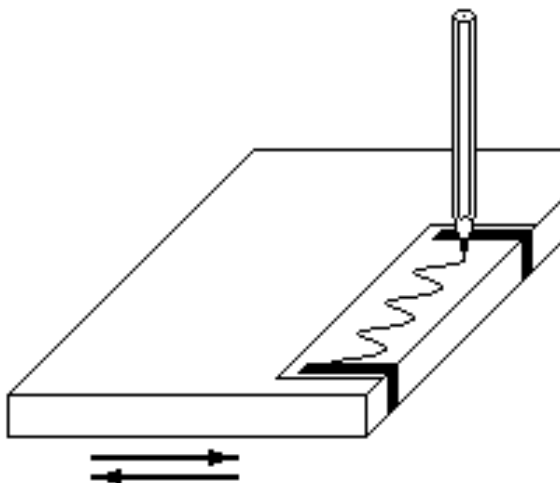


Рисунок 7 - Пример «ручной» записи механических колебаний

Для сравнения размаха колебаний различных узлов механизма, колеблющихся в вертикальной плоскости возможно использование мелких вспомогательных предметов. Различное поведение монет, гаек, шайб, песка в различных местах механизма поможет выявить узлы с наибольшей вибрацией. Характерный пример – установка монет на ребро. Однако данный индикатор нечувствителен к высокочастотным колебаниям.

В случае необходимости регистрации относительно больших амплитуд колебаний (0,5...10 мм) с точностью до 0,5 мм при малой частоте (10...20 Гц) возможно применение мерного клина. При вибрации, происходящей с частотой 8 Гц и выше в направлении перпендикулярном колебаниям (рисунок 8), глаз сохраняет способность зрительного восприятия всех положений клина и четко видит точку пересечения крайних положений клина на расстоянии l от начала треугольника. Если размах колебаний s , высота клина h и основание L , то из подобия треугольников:

$$l = s \cdot L / h.$$

Основание клина должно быть отградуировано и оцифровано в миллиметрах размаха или амплитуды механических колебаний, (размах колебаний соответствует двойной амплитуде колебаний). Чем больше высота h , тем большие амплитуды можно измерять клином. Наименьшие амплитуды (около 0,1 мм) можно измерять мерным клином с высотой $h = 5$ мм и основанием $L = 100$ мм. Выбирать h еще меньше нецелесообразно.

Мерный клин (рисунок 9) наклеивается на исследуемый объект. Наличие пространственных компонентов вибрации, действующих перпендикулярно к измеряемой плоскости, может исказить результат. Поэтому мерный клин применяется главным образом для измерения прямолинейной вибрации, в частности колебаний: сит, грохотов, вибростендов.

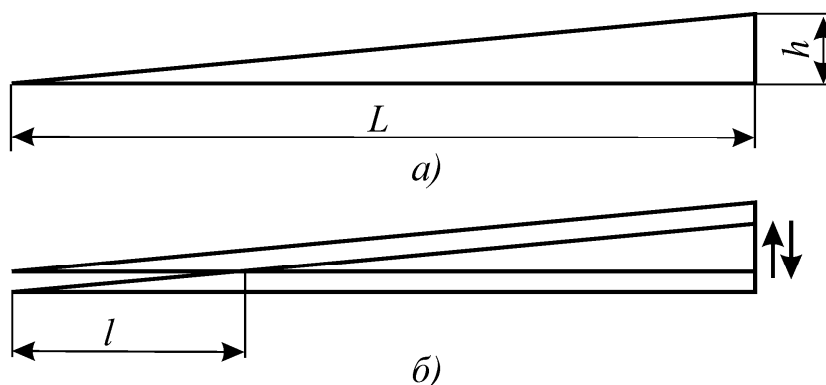
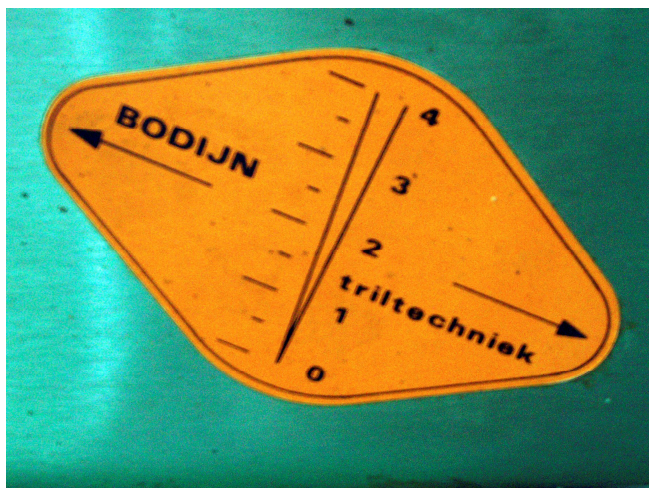
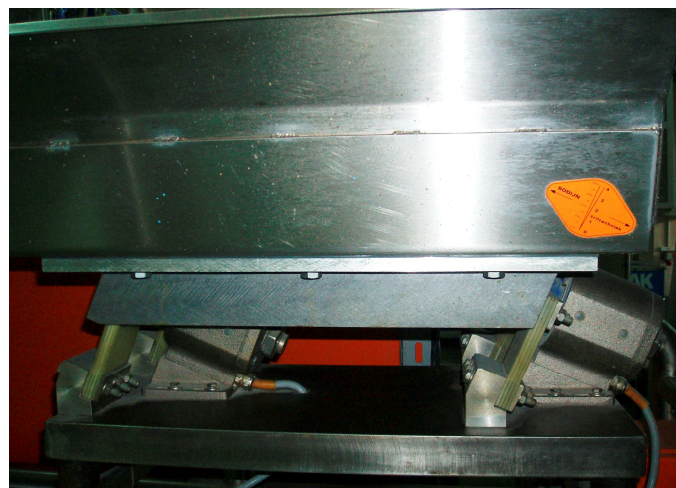


Рисунок 8 - Измерение амплитуды колебаний мерным клином



а)



б)

Рисунок 9 – Установка мерного клина (а) для измерения амплитуды колебания вибрационного дозатора (б)

Жидкостные виброскопы. Поверхность жидкости, в резервуаре, установленном или соединенном с вибрирующим объектом, приобретает заметную волнистость. Характер волн определяется частотой колебаний, а высота волны зависит от амплитуды колебаний. Иногда такие наблюдения позволяют сделать предварительные выводы о параметрах вибрации. Например, при боковом освещении поверхности воды можно обнаружить наличие вибрации при амплитудах менее 10 мкм без дополнительного увеличения.

4. Визуальный осмотр как метод контроля состояния оборудования широко используется при проведении осмотров и ревизий машин и механизмов. Этот метод позволяет, как прямым путем обнаружить неисправность, так и косвенным подтвердить наличие повреждения или дефекта. Необходимо отметить отсутствие приборов и средств, способных реализовать функции выполняемые человеком при визуальном осмотре. Отличительной особенностью визуального осмотра являются трудности при формализации процесса и решения задачи распознавания.

Визуальный осмотр проводится исходя из возможностей человеческого зрения. Основным недостатком человеческого глаза является то, что при малой освещенности ему не помогают лучшие оптические приборы. Чаще всего осмотр проводится в условиях худшей освещенности, чем при дневном свете. Значения освещенности для выполнения визуального осмотра – 1000...2000 лк. Человеческий глаз эффективно приспосабливается к различной освещенности, глазу требуется от 10 до 15 минут для адаптации к изменению освещенности. Зрение позволяет воспринимать форму, цвет, яркость и движение предметов. Человек около 90% информации получает благодаря зрению.

На расстоянии наилучшего зрения (25 см) нормальный человеческий глаз

способен различить две точки, отстоящие одна от другой на 0,07 мм. В условиях оптимального освещения при хорошей контрастности человек способен оценить размер порядка 40 мкм. Порог остроты зрения при нормальной яркости объекта соответствует примерно 1'. Оптимальное условие различения объекта происходит при 30...40'. Наибольшую чувствительность глаз имеет по отношению к волнам, лежащим к волнам в середине спектра видимого света – 500...600 нм. Этот диапазон соответствует излучению желто-зеленного цвета.

Необходимо отметить субъективность восприятия зрительной информации. Человек видит то, что знает. Незнакомые, неопознанные мозгом предметы остаются вне поля зрения. Поэтому важнейшим вопросом является определение диагностических, различаемых особенностей осматриваемой поверхности. По отношению к металлическим деталям таким диагностическим признакам соответствуют: цвет, форма, сплошность, шероховатость поверхности.

Трещины – это разрывы, преимущественно двухмерного характера. Ограничивающие поверхности трещин часто располагаются перпендикулярно к поверхности детали. **Абразивный износ** - участки с повышенной шероховатостью вдоль направления действия абразива. **Цвета побежалости** - дефект поверхности в виде пятнистой (от жёлтого до синевато-серого цвета) окисной плёнки. **Пятна ржавчины** - дефект поверхности в виде пятен или полос с рыхлой структурой окисной плёнки. **Вмятины** - дефект поверхности в виде произвольно расположенных углублений различной формы, образовавшихся вследствие повреждений и ударов поверхности. **Риска** - дефект поверхности в виде канавки без выступа кромок с закругленным или плоским дном, образовавшийся от царапания поверхности металла. Могут быть тонкими и широкими.

При трении и изнашивании возникает ряд явлений и процессов, повреждающих и разрушающих поверхности деталей. **Схватывание при трении** - явление местного соединения материалов сопряженных поверхностей вследствие взаимодействия молекулярных сил. **Перенос металла** - явление, состоящее в местном соединении материалов сопряженных поверхностей, последующем его отрыве и переходе материала на другую поверхность. **Заедание** - процесс возникновения и развития повреждений поверхностей трения вследствие схватывания и переноса материала. **Задир** - повреждение поверхности в виде широких и глубоких борозд в направлении скольжения. **Царапание** - образование углублений на поверхности трения в направлении скольжения при воздействии выступов твердого тела или твердых частиц с рабочей поверхностью детали. **Отслаивание** – отделение с поверхности трения материала в форме чешуек. **Выкрашивание** - отделение с поверхности трения материала, приводящее к образованию углублений на поверхности трения. Сложным является не только

распознавание характера повреждения, но и построение логических причинно-следственных цепочек появления повреждений.

Основные задачи, решаемые при визуальном осмотре: определение причин и характера разрушения и износа деталей по виду поверхности износа или излома; обнаружение трещин корпусных деталей, опор или основания; контроль поступления смазочного материала либо отсутствие подтеканий масла; контроль биений валов, муфт, затяжки резьбовых соединений.

Операции по контролю поступления смазки зависят от способа подачи смазочного материала к узлам механизма. При этом контролируется и отсутствие подтеканий масла - признака определяющего избыток смазки, неисправность уплотнений или ослабление резьбовых соединений. Биения вала возникают при повреждениях подшипников, а биения муфт свидетельствуют либо об их повреждениях или о неправильной центровке валов.

Колебания масляной или водной пленки, появление пузырей в местах соединений деталей - результат ослабления резьбовых соединений. На это указывает и появление порошка красного цвета (окиси железа), появляющегося в местах относительного перемещения деталей из-за насыщения поверхностных слоев металла кислородом, при воздействии растягивающих напряжений. Наличие четкой разделительной линии между корпусом механизма и фундаментом, определяет необходимость затяжки резьбовых соединений.

К визуальным методам может быть отнесен и метод диагностирования редукторов по значению мертвого хода. При неподвижном выходном вале проворачивают входной до выбора зазоров в зубчатых передачах и по значению угла поворота входного вала судят о степени износа зубьев.

К недостаткам визуальных методов можно отнести: малую вероятность обнаружения мелких поверхностных дефектов, зависимость результатов осмотра от субъективных факторов и условий контроля. Тем не менее, простота методов контроля, малая трудоемкость, возможность осмотра больших площадей и достаточная информативность делает их незаменимыми при контроле технического состояния оборудования. Данные методы предваряют оценку технического состояния, использование методов неразрушающего контроля, являясь основным аргументом наличия повреждений либо дефектов.

Визуальный контроль с использованием оптических приборов называют визуально-оптическим. Эти методы наиболее доступны и просты при обнаружении поверхностных дефектов и осмотра внутренних поверхностей. Разборка механизмов для осмотра требует значительных затрат средств и ресурсов. Для обнаружения повреждений в труднодоступных местах применяют специальные оптические приборы - технические эндоскопы.

Использование эндоскопов позволяет повысить эффективность ремонтных воздействий при общем снижении затрат на ремонт. Данный прибор поможет избежать излишней разборки и замены узлов и деталей, позволяя определить участки, где это необходимо. С помощью эндоскопа возможно получение предварительных сведений о времени и объеме требуемых работ. Эндоскоп в переводе с греческого: endon - внутри и skopeo – рассматривать. Эндоскопы разделяются на гибкие и жесткие. Бороскоп (borescope) в иностранной литературе это жесткие эндоскопы. Фиброскоп, флексоскоп – англоязычные названия гибких эндоскопов от fiber - волокно, flexible – гибкий.

Основа эндоскопа - оптическая система, состоящая из рабочей части с оптическими волокнами или линзами, с помощью которых изображение передается от объекта к окуляру прибора. Чтобы сделать изображение видимым, изучаемый объект необходимо осветить. Для этого применяют осветительную систему - осветитель с источником света и световодный кабель для передачи света от осветителя к объекту (рисунок 10). Диапазон возможных исполнений эндоскопов весьма широк. Рассмотрение технических характеристик этого оборудования может составить тему отдельной статьи.



а)



б)

Рисунок 10 – Технические эндоскопы: а) бороскоп; б) фиброскоп

Основной областью применения эндоскопов является осмотр внутренних полостей механизмов: редукторов, трубопроводов, гидро- и пневмоцилиндров, двигателей внутреннего сгорания, турбин, компрессоров, газотурбинных, электрических двигателей, турбогенераторов, котлов, теплообменников. Диагностическими признаками деталей данных механизмов являются: трещины, задиры, следы схватывания поверхности, коррозия. Количество выявляемых с помощью эндоскопов дефектов и повреждений увеличивается в несколько раз по сравнению с традиционными методами.

Для осмотра в динамическом режиме используется, стробоскопический эффект для «остановки» вращающейся осматриваемой поверхности. Известны механические и электронные стробоскопы.

Человеческий глаз сохраняет зрительное восприятие в течение приблизительно 0,1 секунды. Поэтому, при наблюдении быстровращающихся или колеблющихся тел глаз не может уловить последовательность изменения фаз процесса. Наблюдатель в этом случае «видит» как одно целое всю область пространства, ограниченную крайними положениями тела. Если колеблющееся или вращающееся тело освещать очень короткими (по сравнению с периодом обращения тела) вспышками так, чтобы зрительное восприятие за промежутки между вспышками не успевало пропадать, то глаз будет воспринимать процесс не в реальной последовательности фаз, а в той последовательности, в которой он наблюдает процесс в моменты времени, «остановленные» светом.

Например, при освещении периодическими вспышками вращающегося предмета точно через промежутки времени, равные периоду вращения, глаз будет фиксировать предмет всегда в одном и том же положении, и наблюдателю предмет покажется остановившимся. Это явление используется для осмотра быстровращающихся деталей, определения истинной частоты вращения, для различения биений муфт, валов.

Аппарат, создающий периодические вспышки, называется стробоскопом. Конструкция стробоскопа представляет собой газосветную лампу, помещенную в центре светоотражательного рефлектора. Включение лампы происходит от генератора электрических импульсов с регулируемой частотой (рисунок 11). Стробоскоп позволяет проводить измерения сдвига фаз колебаний относительно отметки на вращающемся неуравновешенном роторе. Такое использование стробоскопа находит широкое применение при балансировке роторов на балансировочных станках и в собственных подшипниках.



Рисунок 11 - Стробоскоп TMRS 1 производства фирмы SKF

Электронные стробоскопы (рисунок 12) выполняют яркие вспышки дающие возможность освещать inspected устройство на расстоянии, обеспечивая широкую видимую область. Диапазон до 12500 вспышек в минуту обеспечивает широкий диапазон использования. Частота вспышек настраивается оператором. Наличие функции сдвига фазы позволяет «замораживать» движение в положении, рекомендованном для инспектирования оборудования, совершающего возвратно-поступательное или вращательное движение, без остановки машины.



Рисунок 12 – Электронные стробоскопы

В качестве стробоскопа может использоваться вращающийся диск с секториальной прорезью (рисунок 13). Стробоскопический эффект достигается за счет совпадения скорости вращения изучаемого объекта и скорости вращения диска, позволяющего осматривать объект через равные промежутки времени.

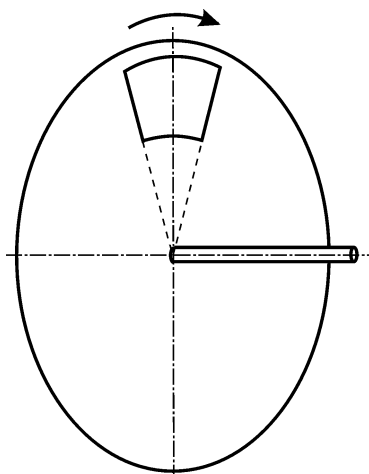


Рисунок 13 - Диск стробоскопа

Увеличители и вспомогательное оборудование. Визуальный осмотр можно производить при небольшом увеличении ($\times 2$, $\times 4$, $\times 6$, $\times 10$) с использованием широко распространенных приборов - измерительных луп с фиксированным фокусным расстоянием и осветителем, переносных измерительных микроскопов с увеличением $\times 20$, $\times 40$, $\times 80$, $\times 100$.

В статье приведены основные направления и диагностические признаки органолептических методов распознавания технического состояния. Действительный арсенал возможностей человека как диагностического «прибора» гораздо шире. К сожалению, данный опыт, накопленный поколениями механиков, может исчезнуть. Сейчас прерывается преемственность в передаче знаний, что должно быть восполнено обобщением ранее используемых методов контроля технического состояния в статьях, наставлениях, инструкциях, учебниках. Эффективность органолептических методов сравнима с эффективностью приборных методов диагностирования и определяется степенью использования полученной информации о техническом состоянии.