

**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 практических занятий 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 практических занятий 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**

УДК 53.083

Методические указания к проведению практических занятий 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. – 42 с.

Отражены цели и задачи практических занятий по дисциплине «Триботехника» для студентов всех форм обучения по направлению подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование». Описаны структура занятий, порядок подготовки к ним, последовательность операций и действий, направленных на выполнение поставленных задач, 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

© В. А. Сидоров

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПОДШИПНИКОВ

Подшипники качения являются основными опорными узлами механического оборудования. Безотказность данного узла может быть достаточно высокой. Правильно смонтированный подшипник, работающий в пределах расчетных нагрузок, может работать 10...20 лет. Часто это превышает срок службы механизма. Однако неправильный монтаж, недостаточная защита от попадания влаги и пыли, несоблюдение режимов эксплуатации, особенно смазывания, и ряд других причин приводят к преждевременному разрушению деталей подшипника. Период между заменами в этом случае сокращается до 1...6 месяцев. В процессе эксплуатации подшипник качения подвергается комплексному воздействию ряда факторов. Один из них является доминирующим с максимальной скоростью развития. Определив причину разрушения, износа подшипника, специалисты ремонтной службы получают возможность правильно выбрать вид ремонтного воздействия и осуществить мероприятия повышающие долговечность подшипника.

Вопросы решения задачи генезиса – определения причин разрушения по следам износа рассматривались в работах [1, 2]. Вначале решение представлялось в виде справочника дефектов, содержащего сведения о поведении подшипника при эксплуатации, определения возможной причины возникновения дефекта, описания проявления и способа устранения дефекта. Дополнительно, такой справочник дефектов, иллюстрируется схематическими изображениями повреждений [3, 4] либо фотографиями [5]. Эффективность визуального восприятия информации неоспорима. Поэтому, в каталогах фирм-производителей подшипников появились материалы по характерным повреждениям подшипников качения с черно-белыми [6, 7] или цветными фотографиями [8].

В тоже время разнообразие повреждений подшипников качения, связанное с разнообразием причин их вызывающих, значительно усложняет подготовку персонала для использования данной информации в производственных условиях. Актуальной задачей становится систематизация и классификация повреждений с интуитивно понятными причинами повреждений и мерами по предотвращению ускоренного износа или поломки.

Внешние признаки разрушения деталей всегда оставляют характерные следы, по которым можно определить причину повреждения. Знание причины позволяет установить необходимые воздействия для предотвращения аналогичных отказов или повышению безотказности работы узла. Осмотр деталей после поломки базируется в основном на визуальном осмотре. По следам изнашивания определяется вид изнашивания, вид нагружения, характер контакта поверхностей подшипника.

Первым уровнем данной классификации могут быть виды механического износа. Современные представления о видах механического изнашивания, базируются на исследованиях Б.И. Костецкого [9], достаточно полно сформированы в работах [10, 11, 12]. Согласно данной теории возможны виды механического износа: адгезионный (схватывание I-го и II-го рода), окислительный, осповидный, абразивный.

Виды механического изнашивания

Контактируемые поверхности деталей машин характеризуются микрорельефом и волнистостью, которыми в начальный момент работы узлов трения определяется площадь фактического контакта, давления. В процессе эксплуатации под действием рабочих нагрузок и деформаций образуется рабочий рельеф, состоящий из впадин и выступов. Их размеры зависят от внутреннего строения материалов деталей и процессов пластической деформации. При относительном движении в поверхностных слоях контактируемых деталей возникают упругопластические деформации, вызывающие появление вторичных (физических, химических, механических) процессов [12].

Износ схватыванием первого рода наблюдается при трении скольжении. Характеризуется возникновением адгезионных связей между деталями (рисунок 1). Условия возникновения: малая скорость относительного движения (до 1 м/с для узла состоящего из двух стальных деталей); высокое давление, превышающее предел текучести на площадках фактических контактов; отсутствие смазки или защитной пленки окислов между трущимися деталями; низкая температура нагрева поверхностных слоев - до 100⁰С. Для подшипников качения данный вид износа появляется на начальной стадии проворачивания внутреннего кольца подшипника на валу.

Проявление. На контактной поверхности детали из менее прочного материала образуются хаотически расположенные вырывы, а на детали из более прочного материала - налипания. Налипшие частицы высокой твердости способствуют развитию вторичных процессов местной пластической деформации и микрорезанию поверхностей трения. Силы трения определяются геометрическими характеристиками рабочих рельефов, площадью контактных поверхностей и прочностью металлических связей. Коэффициент трения чрезвычайно высок 4 - 6 единиц.



Рисунок 1 - Износ схватыванием первого рода
двух стальных деталей

Разрывы металлических связей приводят к увеличению площади фактических контактов и уменьшению давления на поверхность трения. Интенсивность пластических деформаций снижается, на деталях появятся устойчивые пленки окислов и износ схватыванием I рода переходит в окислительный.

Окислительный износ развивается в условиях трения качения и трения скольжения со скоростями относительного движения деталей 1,5...7,0 м/с (без смазки). При граничной смазке интервал скоростей увеличивается до 20 м/с. Механизм разрушения – образование и разрушение твердых пленок окислов, возникающих на поверхностях контактирующих деталей. Эти процессы характерны для узлов трения, детали которых изготовлены из материалов с высокой твердостью и повышенным пределом текучести.

Проявление. Вид деталей, характеризуется появлением матовых поверхностей, состоящих из пленок химических соединений металла с кислородом (рисунок 2). Это наиболее благоприятный вид изнашивания. Скорость изнашивания минимальна по сравнению с другими видами механического износа. Коэффициент трения зависит от формы трущихся поверхностей и составляет порядка 0,3...0,7 при отсутствии смазывания.



Рисунок 2 - Окислительный износ на беговой дорожке наружного кольца радиально-упорного конического двухрядного роликоподшипника

Износ схватыванием второго рода. Условия образования: трение скольжения, высокие давление и скорость относительного перемещения (свыше 4 м/с), сочетание которых обуславливает большие потери на трение, высокий градиент и интенсивное возрастание температуры в поверхностных слоях (до 1600⁰С).

Проявление. Внешний вид поверхности - вырывы частиц на детали из менее прочного материала, чередующиеся через примерно одинаковые промежутки. Температура поверхности 600...1400⁰С. Такая температура заметно снижает механические свойства сталей, и металл размягчается, приводя к налипанию металла на поверхности более прочной детали (рисунок 3). Для подшипников качения износ схватыванием второго рода проявляется в виде заеданий, часто предшествующих полному разрушению.



Рисунок 3 - Вид поверхности подшипника скольжения при износе схватыванием второго рода

Осповидный износ возникает при трении качения, переменных или знакопеременных нагрузках и высоких давлениях, достигающих предела выносливости. Многократные нагружения вызывают усталость материала. На плоскостях максимальных напряжений внутри детали зарождаются трещины. Их развитие приводит к разрыву контактной поверхности, что принципиально изменяет характер взаимодействия деталей.

Проявление. В местах образования сколов на контактных поверхностях появляются осповидные углубления (рисунок 4). Наиболее характерный вид изнашивания для деталей подшипников качения, который должен проявляться через 5...7 лет работы.



Рисунок 4 – Осповидное выкрашивание на теле качения шарикоподшипника

Обнаружить осповидное выкрашивание во время осмотра механического оборудования, чрезвычайно трудно. Элементы подшипника практически недоступны для визуального осмотра. Поворот шарика (рисунок 4) на угол 60^0 не позволил бы обнаружить повреждение. Осмотр должен предварять результаты технического диагностирования.

Абразивный износ развивается при трении скольжения. Условия возникновения: наличие на поверхностях трения абразивных частиц, деформирующих микрообъемы поверхностных слоев и вызывающих процессы микрорезания.

Проявление. На поверхностях трения появляются однозначно ориентированные по отношению к направлению движения риски (рисунок 5). Скорость изнашивания зависит от размеров, формы, количества, свойств абразива и материалов деталей, от относительной скорости и давлений на контактирующих поверхностях.



Рисунок 5 - Абразивный износ на беговой дорожке наружного кольца радиально-упорного конического двухрядного роликоподшипника

Дополнительные виды износа.

При прохождении электрического тока через шарикоподшипник на беговых дорожках появляются точки, расположенные цепочкой. При прохождении электрического тока через роликоподшипник на беговых дорожках появляются риски, полосы параллельные оси вращения (рисунок 6). Повреждения от прохождения электрического тока присутствуют лишь на одной беговой дорожке – это результат неравномерного распределения нагрузки по рядам тел качения двухрядного подшипника.



Рисунок 6 - Следы прохождения электрического тока на наружном кольце двухрядного сферического радиального роликоподшипника

Коррозионный износ – результат конденсации влаги в корпусе подшипника при отсутствии смазочного материала (рисунок 7) или попадания воды в подшипник. Коррозионные разрушения всегда начинаются с поверхности металла. Коррозия на деталях подшипников бывает двух видов - сплошная и местная. Сплошная коррозия покрывает ровным слоем и изменяет шероховатость поверхности деталей, не образуя отдельных очагов. Местная коррозия наблюдается в виде пятен, глубина которых может быть от незначительного точечного углубления до язвин.



Рисунок 7 - Следы местной коррозии наружного кольца подшипника

Второй уровень необходим для определения сил, действующих на подшипник [13]:

- радиальная сила, приложенная в одной точке, от веса деталей механизма или от технологической нагрузки, постоянная по направлению (местное нагружение);
- радиальная сила, приложенная в двух точках, деформирующая наружное кольцо подшипника, возникает в результате отклонений формы посадочного места подшипника;
- радиальная сила, приложенная в одной точке, совершающая периодическое колебательное движение в ограниченном секторе;
- радиальная сила, вращающаяся вместе с валом, возникает при неуравновешенности ротора, при изгибе вала (циркуляционное нагружение);
- осевая сила, действующая в продольном направлении на все тела качения, в результате изгиба вала, несоосности валов, воздействия продольной технологической нагрузки.

Воздействие указанных сил приводит к появлению на беговых дорожках подшипника характерных повреждений [14]. Следы радиальной силы, приложенной в одной точке, постоянной по направлению, при вращающемся внутреннем и неподвижном наружном кольце проявляются в виде непрерывного следа на внутреннем кольце и местном изнашивании наружного кольца (рисунок 8).



а)



б)

Рисунок 8 – Следы радиальной силы, постоянной по направлению: а) непрерывный след износа на внутреннем кольце; б) местное изнашивание наружного кольца

Если неподвижным является внутреннее кольцо, а подвижным наружное, тогда воздействие постоянной радиальной силы проявится в виде непрерывного следа износа на наружном кольце и местном изнашивании внутреннего кольца.

При деформации наружного кольца подшипника в результате отклонений формы посадочного места на наружном неподвижном кольце появится осповидное выкрашивание в двух точках (рисунок 9).

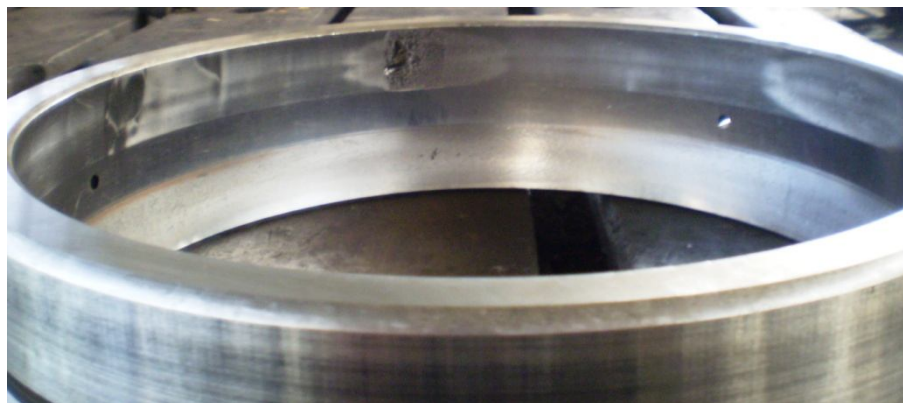


Рисунок 9 – Осповидное выкрашивание в двух местах на беговой дорожке наружного кольца двухрядного сферического радиального роликоподшипника при отклонении формы посадочного места крышки подшипника

Радиальная сила, приложенная в одной точке, совершающая периодическое колебательное движение в ограниченном секторе приводит к местному изнашиванию наружного и внутреннего колец подшипника (рисунок 10). Такой вид изнашивания характерен для шарнирных механизмов, в которых вал совершает колебательные движения.

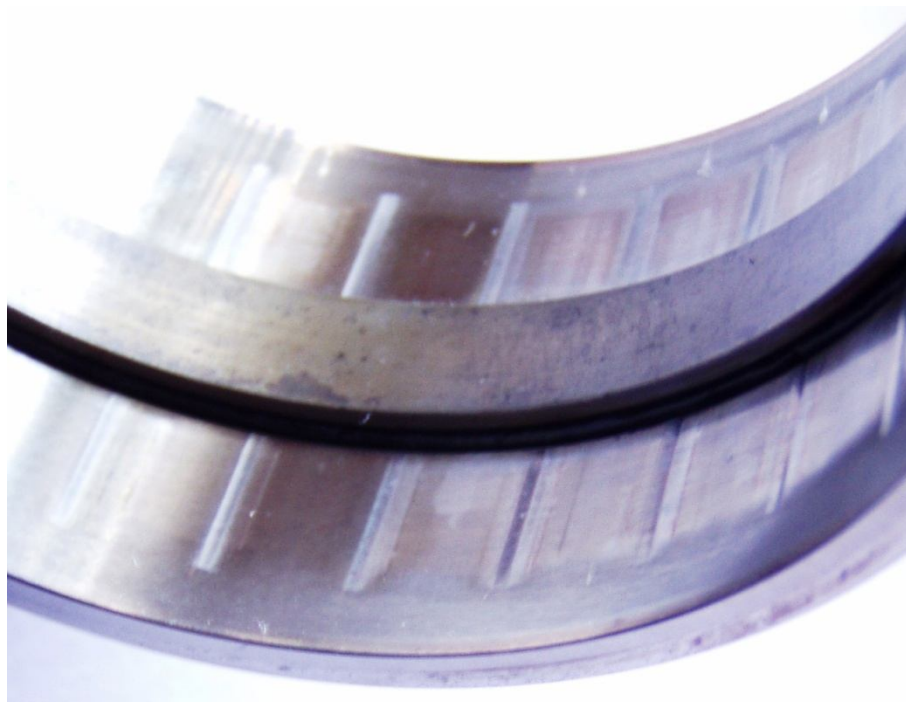


Рисунок 10 – Местное изнашивание беговой дорожки наружного кольца двухрядного радиального роликоподшипника при колебательном движении

Радиальная сила, вращающаяся вместе с валом, приведет к появлению постоянного следа износа на неподвижном наружном кольце и местного выкрашивания на внутреннем кольце (рисунок 11).

Осевая сила, действующая в продольном направлении, вызывает смещение следов износа на кольцах подшипника (рисунок 11). Дополнительно, о воздействии осевой силы можно судить по наличию засветлений на торцах роликов (рисунок 12).



Рисунок 11 – Местное выкрашивание внутреннего кольца шарикоподшипника при вращающейся радиальной силе и неподвижном наружном кольце при одновременном воздействии осевой силы



Рисунок 12 – Засветления на торцах роликов одной из беговых дорожек двухрядного радиального роликоподшипника при воздействии осевой силы

Третий уровень определяет характер взаимодействия контактирующих поверхностей. В подшипниковом узле имеются как неподвижные, так и подвижные контактирующие поверхности деталей. Осмотр подшипника качения проводится последовательно от посадочной поверхности подшипника в корпусе механизма к посадочной поверхности внутреннего кольца на вал.

Если поверхности внутреннего кольца и вала неподвижны, то посадочная поверхность внутреннего кольца подшипника имеет матовую поверхность (рисунок 13).

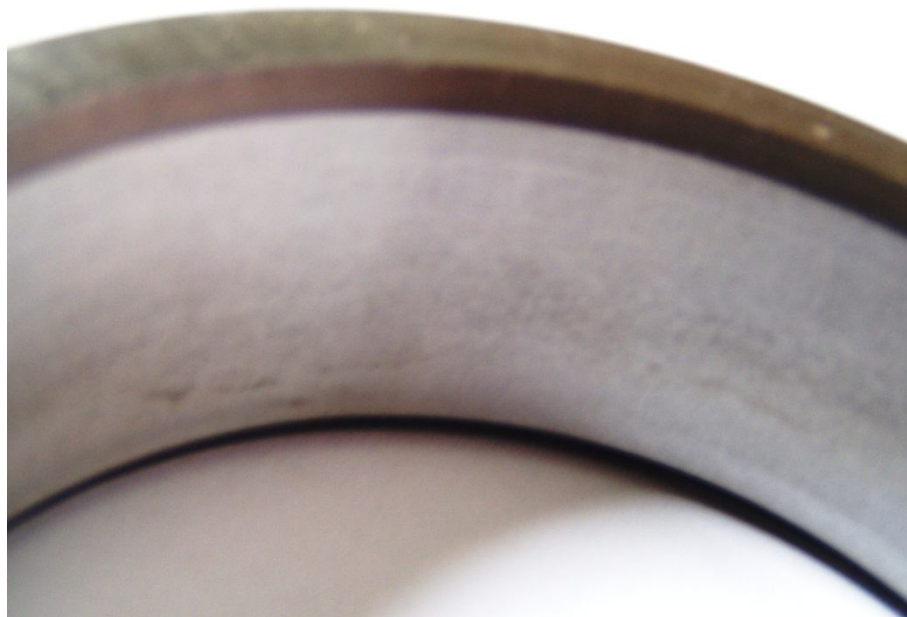


Рисунок 13 – Матовая поверхность внутреннего кольца подшипника при неподвижной посадке на вал

Ослабление посадки подшипника в результате ошибок монтажа, эксплуатации часто приводит к проворачиванию подшипника на валу и в корпусе (рисунок 14). Проворот подшипника сопровождается увеличением температуры узла, изменением характера шума и вибрации и приводит к недопустимому износу корпусных деталей.



Рисунок 14 – Следы проворачивания колец подшипника

Фреттинг-коррозия возникает при перемещении контактирующих поверхностей под воздействием переменных сил или вибраций. Проявляется в виде интенсивного окисления поверхностей, темных пятен на посадочных поверхностях колец подшипников (рисунок 15). Приводит к стуку, ударам при работе подшипника. При дальнейшем развитии может служить причиной зарождения

усталостных трещин.



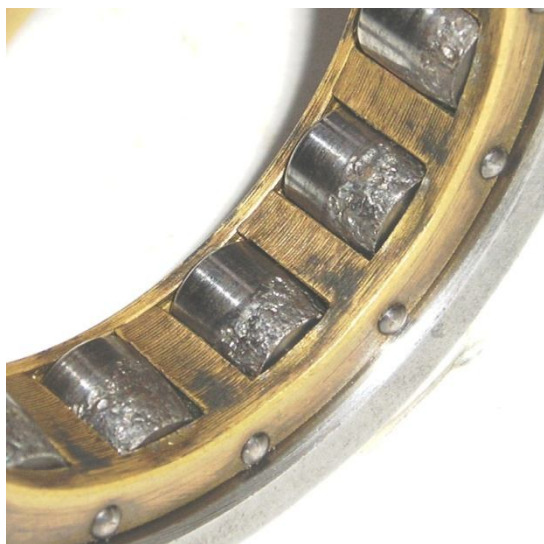
а)



б)

Рисунок 15 – Следы фреттинг-коррозии на посадочной поверхности наружного (а) и внутреннего (б) колец шарикоподшипника

Если нагрузка неравномерно распределяется по длине ролика или между рядами тел качения двухрядного подшипника (рисунок 16), то долговечность подшипника значительно снижается. Причина - перекос корпуса подшипника.



а)



б)

Рисунок 16 – Неравномерное выкрашивание по длине роликов (а) радиального роликоподшипника и беговым дорожкам (б) двухрядного радиального сферического шарикоподшипника при изгибе вала

Осмотр внешних торцевых поверхностей колец подшипника позволяет подтвердить проворачивание колец или определить наличие контакта подшипника с рядом расположенной деталью (рисунок 17).



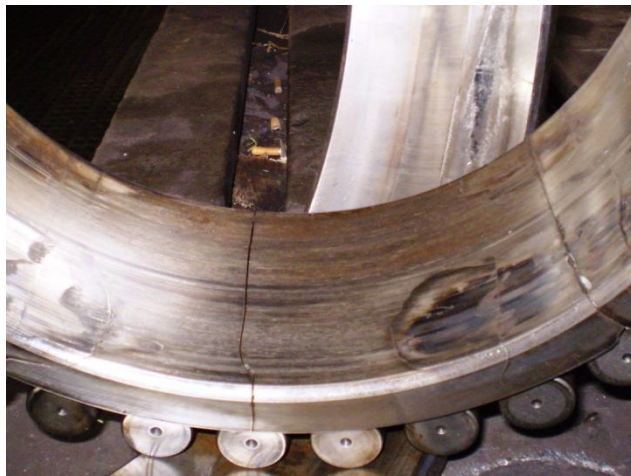
Рисунок 17 – Кольцевые риски на торцевой поверхности внутреннего кольца – результат контакта кольца подшипника с неподвижной деталью

Осмотр беговых дорожек внешнего и внутреннего колец позволяет установить характер контакта тел качения и беговой дорожки. Перекос вала относительно корпуса подшипника может быть зафиксирован по треугольному следу при колебательном характере нагружения подшипника (рисунок 18).



Рисунок 18 – Треугольная форма контакта кольца с роликом при перекосе вала относительно корпуса двухрядного роликового радиального подшипника

Трещины поперек беговых дорожек – результат воздействия динамических нагрузок, ударов или ошибок монтажа (рисунок 19а). Сколы бортов колец - результат динамических воздействий осевой силы (рисунок 19б).



а)



б)

Рисунок 19 – Поперечная трещина на кольце подшипника (а) и сколы бортов кольца (б) при воздействии ударной нагрузки

Трещины, расположенные вдоль кольца подшипника – результат отсутствия тепловых зазоров при нагреве механизма. Возникающая, при тепловом расширении осевая сила приводит к исчезновению радиального зазора и возникновению значительных радиальных сил определяемых геометрией подшипника (рисунок 20).

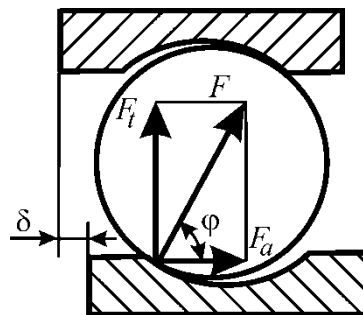


Рисунок 20 – Схема распределения сил в шарикоподшипнике при отсутствии теплового зазора

Значение радиальной составляющей:

$$F_t = F_a \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

где φ – угол между силами F и F_a ; F – результирующая реакция, направленная перпендикулярно к контактирующей поверхности. Угол φ определяется допустимой осевой игрой δ и диаметром тел качения d_w :

$$\varphi = \arccos(\delta/d_w).$$

Так как угол φ близок к 90^0 радиальные силы могут увеличиться до такой степени, что это приведет к разрушению наружного кольца (рисунок 21).



Рисунок 21 – Разрушение наружного кольца шарикоподшипника при отсутствии теплового зазора

Увеличенная осевая игра пары радиально-упорных шариковых подшипников, приводит при возникновении осевой силы к появлению гранности или к осповидному выкрашиванию на нерабочей части беговой дорожки (рисунок 22).



а)



б)

Рисунок 22 – Гранность (а), осповидное выкрашивание (б) на нерабочей части беговой дорожки радиально-упорного шарикового подшипника при увеличенной осевой игре при возникновении осевой силы

Бринеллирование проявляется в появлении вмятин на беговых дорожках с шагом равным шагу тел качения, является следствием ударных воздействий во время монтажа (рисунок 23).



Рисунок 23 - Бринеллирование на беговых дорожках упорного шарикоподшипника - вмятины с шагом равным шагу тел качения

Ложное бринеллирование возникает при оттоке смазки с поверхностей качения подшипников неработающей машины в результате механических колебаний, передающихся от работающих механизмов. Проявляется в виде повреждений рабочей поверхности подшипника расположенных с шагом равным шагу тел качения (рисунок 24).

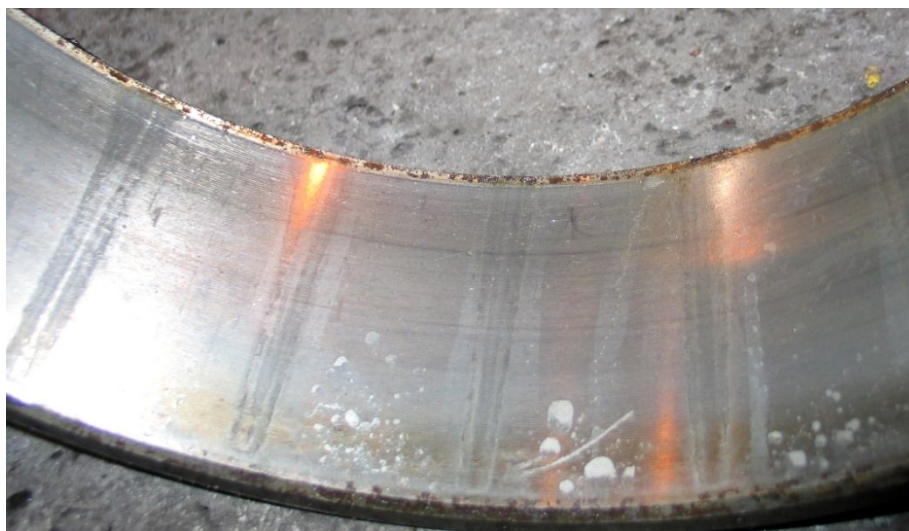


Рисунок 24 – Следы ложного бринеллирования на рабочей поверхности наружного кольца роликового радиально-упорного конического однорядного подшипника

Повреждения сепаратора наиболее серьезный вид повреждений. При повреждениях сепаратора возможны повреждения других деталей вследствие вибрации, износа, заклинивания и перекосов (рисунок 25). Наиболее распространенная причина разрушения сепаратора – проблемы смазывания (рисунок 26) и деформации наружных колец. Это приводит к возникновению неравномерных сил по телам качения и воздействию разрушающих сил на сепаратор.



а)



б)

Рисунок 25 – Разрушение сепаратора



а)





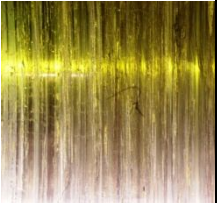
б)










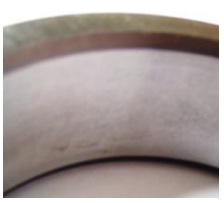





Рисунок 26 – Смазка подшипниковых узлов: а) недопустимая; б) удовлетворительная



Подшипники качения подлежат замене при наличии одного из повреждений: усталостные раковины на дорожках и телах качения; коррозионные раковины на дорожках и телах качения; трещины, сколы бортов, колец; трещины колец, роликов, шариков; трещины, излом сепаратора; задиры на рабочих поверхностях колец и тел качения; износ и обрыв заклепок сепаратора; забоины на сепараторе; рифление на рабочих поверхностях колец и тел качения; выработка на рабочих поверхностях колец и тел качения; вмятины на рабочих поверхностях; поверхностная коррозия на рабочих поверхностях подшипника; цвета побежалости на рабочих поверхностях; увеличение радиального зазора.

Большинство рассмотренных факторов, не поддается математическому расчету, однако требует учета при эксплуатации узла. Направление дальнейших исследований состоит в построении причинно-следственных связей при разрушении подшипников. Это позволит обоснованно выбирать вид ремонтного воздействия и определять причины повреждений. На первом этапе можно предложить использовать причинные связи, между классификационными признаками повреждений, приведенные в таблице.

Таблица – Классификация причин разрушения подшипников качения

Повреждения, определяемые видом механического износа					
Износ схватывание м первого рода (рис.1)		Окислитель ный износ (рис.2)		Износ схватывани ем второго рода (рис.3)	

Осповидный износ (рис.4)		Абразивный износ (рис.5)		Прохождение электрического тока (рис.6)	
		Коррозионный износ (рис.7)			
Повреждения, определяемые силами, действующими на подшипник					
Местное нагружение (рис.8)		Отклонения формы посадочного места подшипника (рис.9)		Колебательное движение (рис.10)	
	Циркуляционное нагружение (рис.11)		Осевая сила (рис.12)		
Повреждения, определяемые характером взаимодействия контактирующих поверхностей					
Неподвижная посадка (рис.13)		Проворачивание подшипника (рис.14, 17)		Фреттинг-коррозия (рис.15)	
Неравномерное распределение нагрузки (рис.16, 18)		Трещины (рис.19, 21)		Увеличенная осевая игра (рис.22)	

Бринеллирование истинное и ложное (рис.23, 24)		Повреждения сепаратора (рис.25)		Проблемы смазки (рис.26)	
--	---	---------------------------------	--	--------------------------	---

Список литературы.

1. Е.Ф. Чуб Реконструкция и эксплуатация опор с подшипниками качения: Справочник: - М.: Машиностроение, 1981, - 365 с.
2. Инструкция по содержанию и ремонту узлов с подшипниками качения локомотивов и моторвагонного подвижного состава // М.: «Транспорт», 1980, - 28 с.
3. Материалы сайта <http://www.snr.com.ru/> Ильченко А. Следы качения при повреждении подшипников и их значение
4. Материалы сайта <http://www.vibration.ru/> Обнаружение дефектов подшипников качения (перевод материалов фирмы IRD)
5. Черменский О.Н., Федотов Н.Н. Подшипники качения: Справочник-каталог. - М: Машиностроение, 2003. - 576 с.
6. Монтаж и демонтаж подшипников качения / FAG Kugelfischer AG. Publ.-Nr/ WL 80 100/3 RU – 113 с.
7. Повреждения подшипников качения и их причины. SKF AB, 2002 г. – 43 с.
8. Подшипники для горнодобывающего оборудования. Motion & control. NSK. CAT No. E 1265 2005 E-8 – 35 с.
9. Костецкий Б.И., Носовский И.Г. Износостойкость и антифрикционность деталей машин: Киев, Техника, 1965. – 206 с.
10. Ловчиновский Э.В., Вагин В.С. Эксплуатационные свойства металлургических машин. М., «Металлургия», 1986. - 160 с.
11. Гребеник В.М., Гордиенко А.В., Цапко В.К. Повышение надёжности металлургического оборудования: Справочник.- М.: Металлургия, 1988. - 688 с.
12. Седуш В.Я. Надійність, ремонт і монтаж металургійних машин: Підручник. – 4-е вид., перераб. і доп. - Донецьк: ТОВ «Юго-Восток, Лтд», 2008. – 379 с.
13. Бейзельман Р.Д., Цыпкин Б.В. Подшипники качения. Справочник.- М.: Машиностроение, 1975. - 362с.
14. Комиссар А.Г. Опоры качения в тяжелых режимах эксплуатации: Справочник. - М.: Машиностроение, 1987. - 384 с.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Зубчатые передачи широко используются в механическом оборудовании для преобразования параметров вращательного движения. Срок службы данного элемента определяет показатели безотказности работы механизма, являясь одним из критических звеньев дерева отказов. Отказы механического оборудования из-за износа или разрушения зубчатых колес приводят к наиболее длительным простоям и требуют больших затрат для восстановления работоспособного состояния. Предупредить аварийное разрушение зубьев, увеличить срок службы передачи позволяют своевременные ремонтные воздействия обоснованные результатами визуального износа.

Контролировать физические процессы, происходящие в зоне контакта зубчатого зацепления невозможно в процессе эксплуатации. В тоже время вид износа, характер разрушения, распределение действующих сил позволяет получить информацию о параметрах эксплуатации и характере старения.

В работах [1...7] рассмотрены виды повреждений зубчатых передач и требования, обеспечивающие длительную работу зубчатого зацепления. Классификации повреждений зубчатых передач, приведенные в работах [1, 4, 6, 7] показывают, что отсутствует единая классификация повреждений зубьев, а при определении причин и характера разрушения используется различная терминология. Практика решения практических задач генезиса по определению причин повреждений и разрушений требует разработки классификации повреждений зубчатых передач на единой методологической основе.

В работе изложены основные положения и приведены примеры классификации повреждений зубчатых передач для определения причин разрушения или износа и предупреждения их развития на стадии эксплуатации.

В работе зубчатой передачи возможны следующие варианты:

- срок службы зубчатой передачи превышает сроки службы опорных подшипников и вала, что наиболее приемлемо для длительной эксплуатации;
- срок службы зубчатой передачи соизмерим со сроком службы опорных подшипников и вала, что приводит к увеличению объема ремонтных работ и снижению наработки на отказ;
- срок службы зубчатой передачи меньше срока службы опорных подшипников и вала, что требует изменения качества изготовления, монтажа или условий эксплуатации.

Реализация первого варианта приводит к тому, что о существовании зубчатой передачи «забывают» и поломка происходит неожиданно, через значительный промежуток времени (5...10...15 лет) с начала эксплуатации. Второй вариант требует постоянного контроля за состоянием зубчатых передач, для исключения внезапных отказов. Задача решается предупредительной заменой зубчатых колес.

Если причины ускоренного износа не установлены и принятые меры не эффективны, происходит переход к третьему варианту, когда ежеквартальные замены становятся обыденным явлением. Определение причины повреждения позволяет разработать рациональные методы воздействия для повышения долговечности зубчатой передачи.

В практике работы ремонтных служб промышленных предприятий основным методом оценки степени работоспособности и состояния зубчатых передач является визуальный осмотр. Вибрационный контроль в данном случае является индикаторным методом, позволяющим зафиксировать отклонения в работе зубчатого зацепления. Оценка степени повреждения и обоснование необходимости замены зубчатых колес более эффективно осуществлять путем непосредственного осмотра зубьев (рисунок 1). При этом большее внимание уделяют характеру повреждений и расположению пятна контакта на рабочих поверхностях зубьев [5].

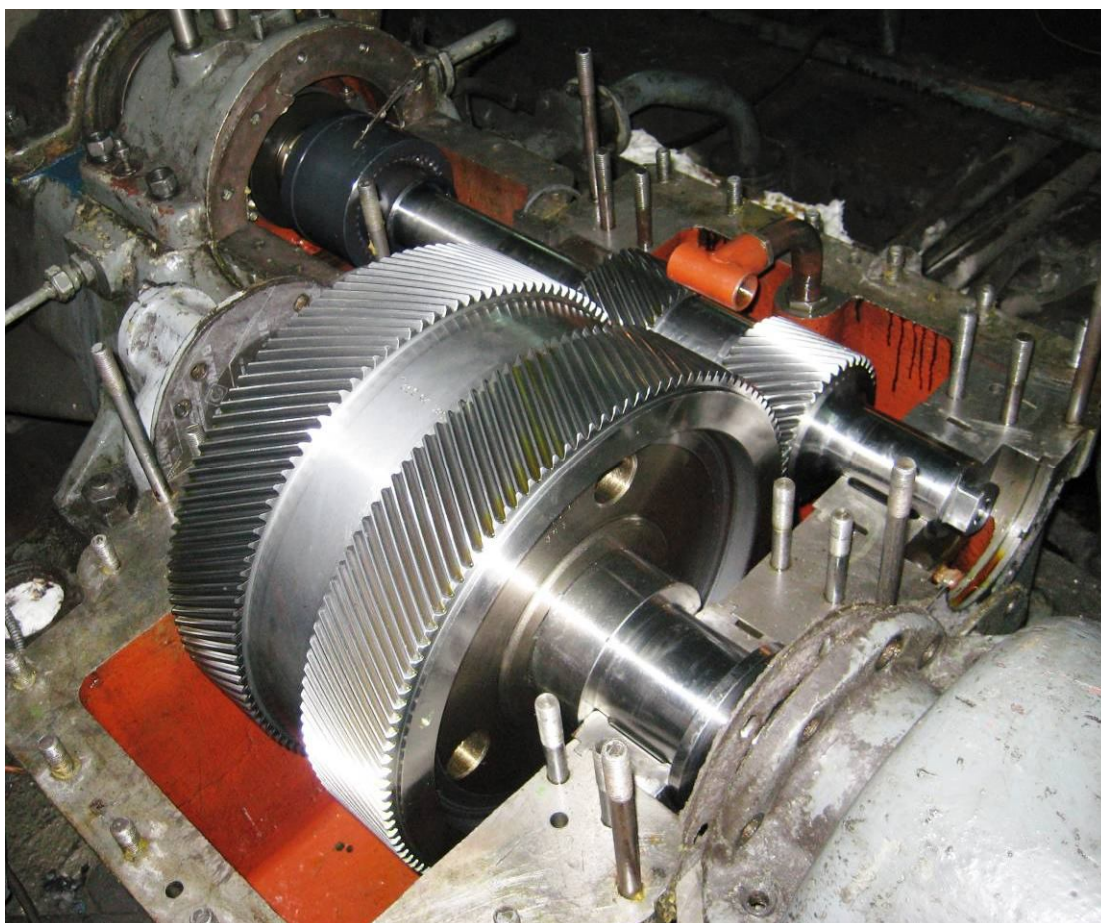


Рисунок 1 – Общий вид мультипликатора, подготовленного к визуальному осмотру

На работоспособное состояние зубчатых передач оказывают влияние как внешние факторы, определяющие передаваемые крутящие моменты и характер вращения зубчатых колес и внутренние факторы, определяемые техническим

состоянием механизма. Взаимодействие внешних и внутренних факторов и создает многообразие возможных повреждений зубчатых передач. Несмотря на неизменность передаточного отношения зубчатой передачи в процессе эксплуатации данные факторы изменяются, приводя к преобладанию определенного вида износа или повреждения. При определении причин повреждения необходимо рассматривать зубчатое колесо как деталь, имеющую посадочную поверхность, несущие элементы и контактирующую взаимодействующую поверхность. Последовательность осмотра – посадочная поверхность, торцевая поверхность и рабочая поверхность зубьев, затем осмотр противоположной стороны зубчатого колеса.

Внешние факторы, влияющие на работоспособность зубчатого зацепления:

1. Значение прикладываемой силовой нагрузки определяется характером повреждений на рабочей поверхности:

- номинальная нагрузка не приводит к изменению формы зуба и не оставляет значительных следов деформации на рабочей поверхности зубчатой передачи (рисунок 2);



а)



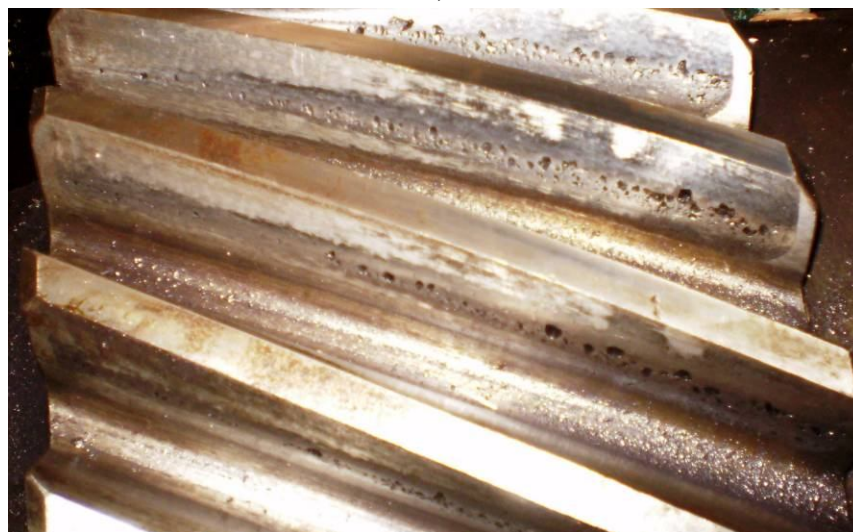
б)

Рисунок 2 – Отсутствие деформаций на рабочей поверхности (а) и торцевой поверхности (б) зубьев – признак воздействия номинальной нагрузки

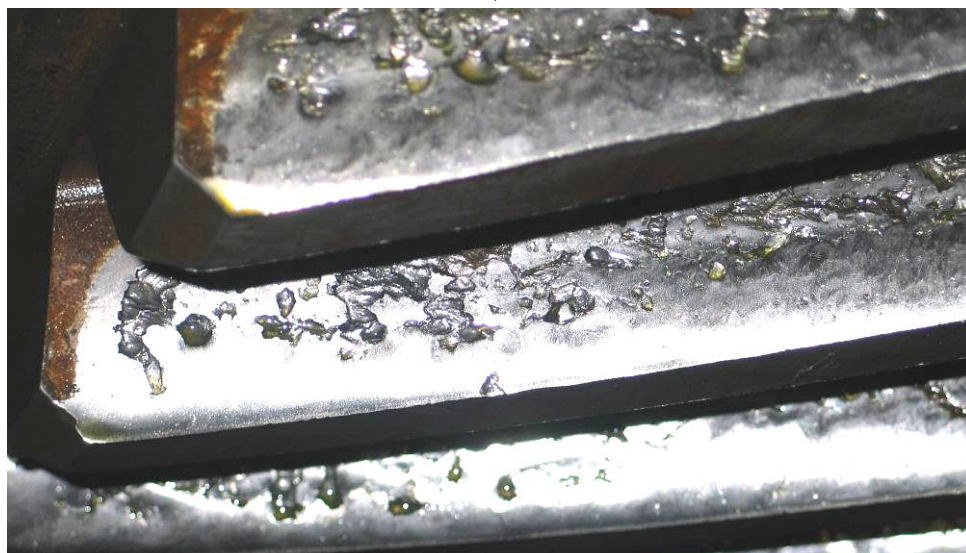
- переменные или знакопеременные силы, приводящие к появлению на площадках контакта напряжений превышающих предел выносливости материала, оставляют на рабочей поверхности осповидные углубления вызываемые усталостью материала (рисунок 3);



а)



б)



в)

Рисунок 3 - Превышение предела выносливости материала приводит к осповидному выкрашиванию рабочей поверхности:
а) начальная стадия; б) развитая стадия; в) предельное состояние

- пластические сдвиги на рабочей поверхности зубчатой передачи происходят при превышении напряжений действующих на площадках контактов предела текучести (рисунок 4), поверхностный слой металла перемещается от делительного диаметра к вершине зуба, образуя выступ;



Рисунок 4 - Пластические сдвиги на рабочей поверхности зубчатой передачи - напряжения на площадках контактов превысили предел текучести

Промежуточными проявлениями действующих сил являются: отслаивание частиц металла с рабочей поверхности зубьев; наклеп из-за сильных ударов при наличии зазора в зацеплении.

2. Характер прикладываемой силовой нагрузки, связан с постоянством или непостоянством частоты вращения, изменением направления вращения, значением динамической составляющей. Динамические удары часто приводят к изломам зубьев (рисунок 5). При увеличении частоты вращения увеличиваются требования к точности изготовления и установки зубчатых передач, в противном случае – увеличивается износ зубьев.



Рисунок 5 – Излом зубьев из-за воздействия динамических ударов

В нереверсивных передачах в обязательном порядке следует осматривать обратную (нерабочую) поверхность зуба, на ней могут содержаться сведения об ошибках изготовления или монтажа. Например, из-за малого бокового зазора на обратной поверхности зуба могут появиться следы контакта (рисунок 6).



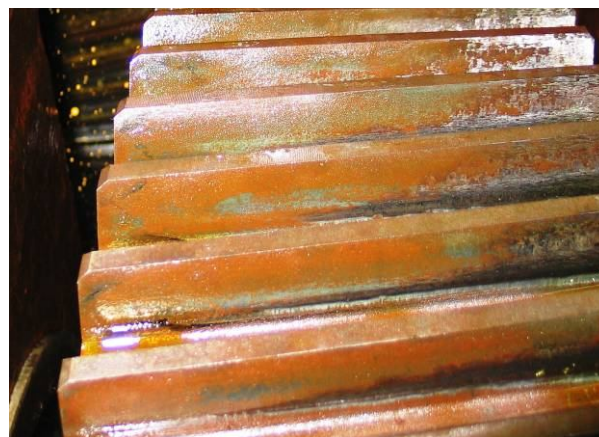
Рисунок 6 – Пятно контакта на нерабочей поверхности
зуба колеса

3. Наличие абразивных частиц, веществ вызывающих коррозию приводит к абразивному износу, коррозии поверхности зубьев, способствует возникновению газовой или жидкостной эрозии.

Основная причина коррозии – наличие воды в смазочном материале, проявляется в виде равномерного (рисунок 7а) или неравномерного слоя (рисунок 7б) ржавчины на поверхности зубьев. Степень коррозии может быть различной и легко оценивается визуально.



а)



б)

Рисунок 7 – Следы коррозии на поверхности зубьев:

а) равномерный слой; б) неравномерный слой

Первоначальное проявление абразивного износа – появление царапин или рисок на рабочей поверхности в направлении движения абразивного материала (рисунок 8). В данном случае поверхность рабочего колеса шестеренного маслонасоса, поврежденная продуктами износа присутствующими в смазочном материале.



Рисунок 8 – Начальная стадия абразивного износа колеса

шестеренного насоса – появление рисок на рабочей поверхности зубьев

Развитию абразивного износа способствует использование пластичной или загрязненной смазки являющейся аккумулятором абразивных частиц. В дальнейшем у изношенных передач повышаются зазоры в зацеплении, усиливаются шум, вибрация, динамические перегрузки; искажается форма зуба; уменьшаются размеры поперечного сечения, прочность зуба. Основные меры предупреждения – защита от загрязнения, применение магнитных фильтров и повышение качества фильтрации масла. Несвоевременно обнаруженный абразивный износ ликвидируется заменой колеса (рисунок 9).



Рисунок 9 – Предельная стадия абразивного износа
кремальерной шестерни

Внутренние факторы, влияющие на работоспособность зубчатого зацепления

1. Неподвижность посадочных поверхностей зубчатого колеса и вала – этот фактор следует оценить как удовлетворяющий проектным требованиям, в том случае, если сопрягаемые детали неподвижны при приложении нагрузки (рисунок 10 а). Если данное требование не выполняется, это приводит к появлению малых перемещений сопрягаемых деталей - фреттинг-коррозии, проявляющейся в виде темных пятен на посадочной поверхности детали (рисунок 10 б).



а)



б)

Рисунок 10 – Состояние посадочных поверхностей зубчатого колеса и вала:
а) неподвижная посадка; б) малые перемещения сопрягаемых деталей
приводят к фреттинг-коррозии – темные пятна на посадочной поверхности

В дальнейшем появляются следы взаимного перемещения сопрягаемых поверхностей в виде блестящих полированных участков поверхности. Это увеличивает скорость развития процессов износа, создавая предпосылки для возникновения ударов на последней стадии развития повреждения. При раскрытии стыка сопрягаемых деталей жесткость соединения уменьшается, возникают динамические удары, приводящие к наклепу и разрушению.

2. Характер взаимодействия контактирующих поверхностей определяется видом трения на контактирующих поверхностях. Если преобладает жидкостное трение, обеспечивающее минимальный коэффициент трения и происходит полное разделение контактирующих поверхностей слоем масла, то состояние оценивается как хорошее. В этом случае преобладающим является окислительный износ (рисунок 11)



Рисунок 11 – Окислительный износ поверхности зубчатой передачи при жидкостном трении

Возникновение граничного трения приводит к контакту двух деталей, проявляясь в виде полирования рабочей поверхности зубчатых передач (рисунок 12). Наиболее часто граничное трение проявляется на начальной стадии приработки новых зубчатых колес.

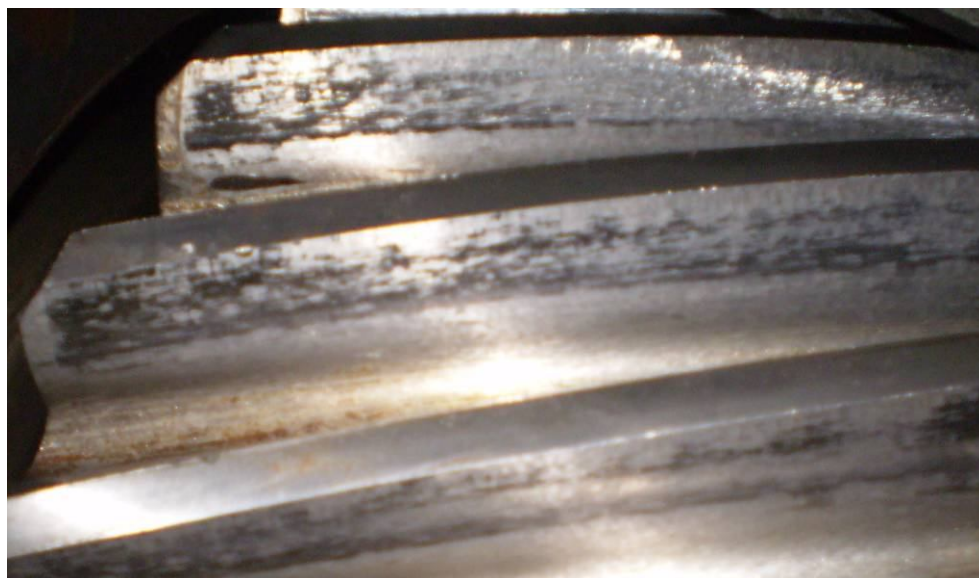


Рисунок 12 – Полированная поверхность зуба – признак граничного трения

Отсутствие смазки между контактирующими поверхностями приводит к повышению температуры, разрушению поверхностных твердых пленок окислов и возникновению адгезионных связей между контактирующими зубьями. Силы на площадках контактов должны быть достаточными для разрушения твердых пленок

окислов. Для тяжело нагруженных высокоскоростных зубчатых передач наиболее характерное проявление – вырывы металла на вершинах зубьев (рисунок 13). Рекомендации по предотвращению – обеспечить постоянное смазывание контактирующих поверхностей, в том числе, путем правильного выбора смазочного материала. Данный вид повреждения нарушает характер зацепления зубьев, увеличивает скорость износа и создает концентраторы напряжений на поверхности зубьев способствующие развитию усталостных трещин, сколам зубьев.

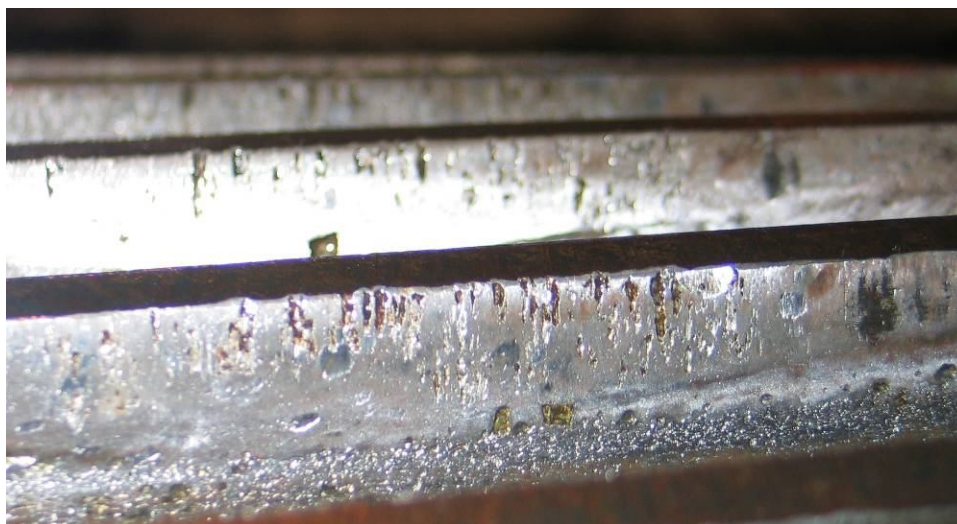


Рисунок 13 – Вырывы металла на вершинах зубьев – схватывание поверхности при отсутствии разделительной масляной пленки

5. Взаимное расположение деталей – в данном случае зубчатых колес оценивается по пятну контакта. Этот вопрос хорошо изучен и наиболее часто упоминается в правилах технической эксплуатации, учебниках и пособиях [5]. Необходимо отметить, что повлиять на расположение пятна контакта в редукторе (при нерегулируемых валах) невозможно. Пятно контакта является одним из критериев качества изготовления и сборки зубчатой передачи.

Правильное расположение пятна контакта показано на рисунке 14 - пятно контакта равномерно расположено по высоте и длине зуба.

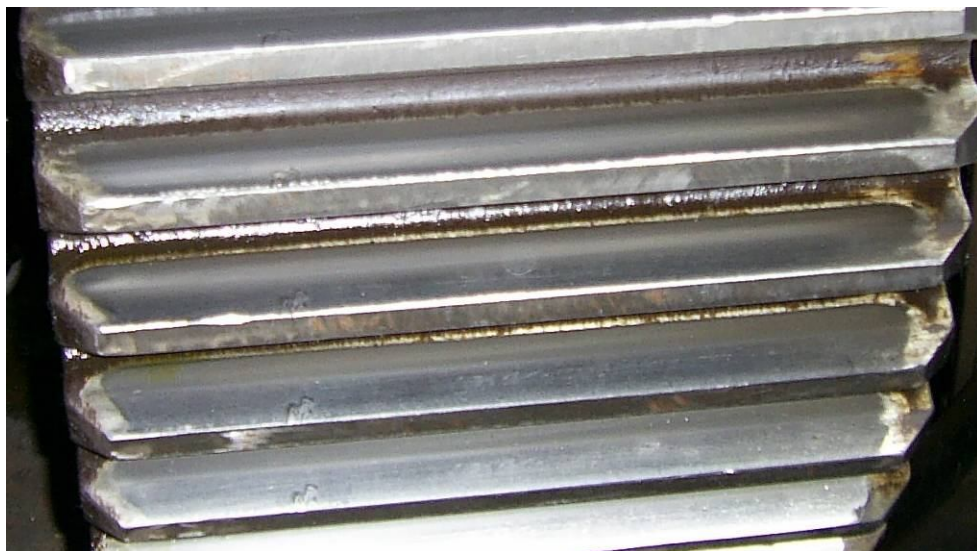


Рисунок 14 – Равномерное расположение пятна контакта по длине и высоте зуба

Непараллельное расположение осей зацепления при уменьшенном расстоянии между осями зубчатых колес, произошедшее из-за износа посадочных мест подшипников валов зубчатых передач, привело к сокращению пятна контакта до недопустимых размеров (рисунок 15).

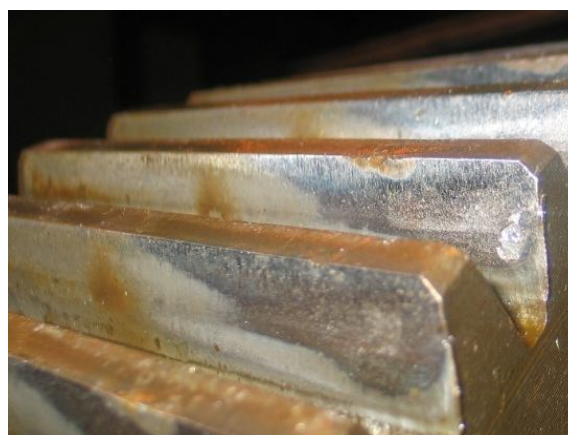


Рисунок 15 – Сокращение пятна контакта из-за непараллельного расположения осей зацепления при уменьшенном расстоянии между осями зубчатых колес

Несоосность валов можно зафиксировать по характеру износа элементов зубчатой муфты (рисунок 16).



Рисунок 16 – Неравномерный износ зубьев зубчатой муфты
при несоосности валов

Отклонения в расположении валов и зубчатых колес приводит к нарушению **равномерности воздействия прикладываемых сил**, которая может проявляться не только в неравномерном распределении сил по длине зуба (рисунок 17) и равномерном по окружности зубчатого колеса. Возможно неравномерное распределение сил по окружности зубчатого колеса из-за эксцентричного расположения. Отклонения могут быть столь велики, что это приводит к нарушению контакта зубчатого зацепления (рисунок 18). Данный фактор приводит к образованию локальных сколов зубьев в ограниченном секторе (рисунок 5).

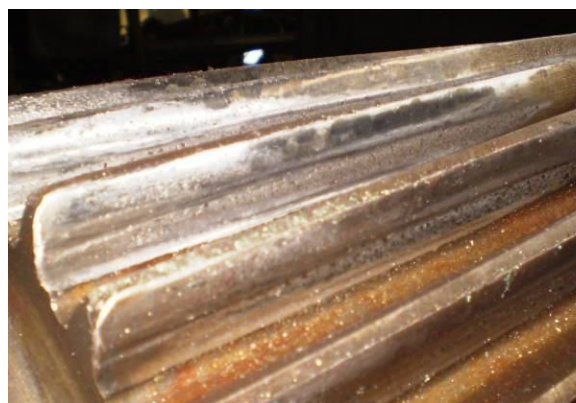
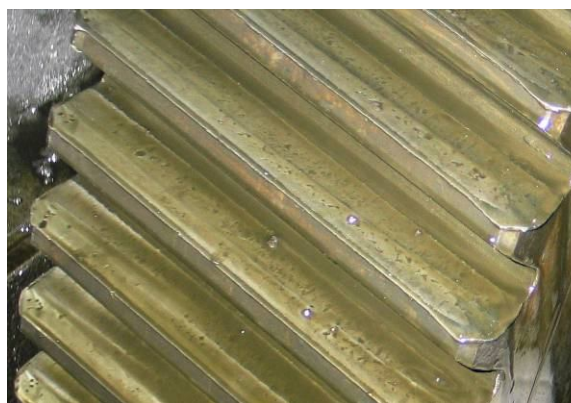


Рисунок 17 – Неравномерное распределение действующих сил
по длине зуба и равномерное распределение по окружности зубчатого колеса



Рисунок 18 – Повреждения конического колеса при выходе зубьев из зацепления

Подрезание ножки зуба из-за уменьшения межцентрового расстояния (рисунок 19) между валами шестеренных валков при износе подшипников скольжения.

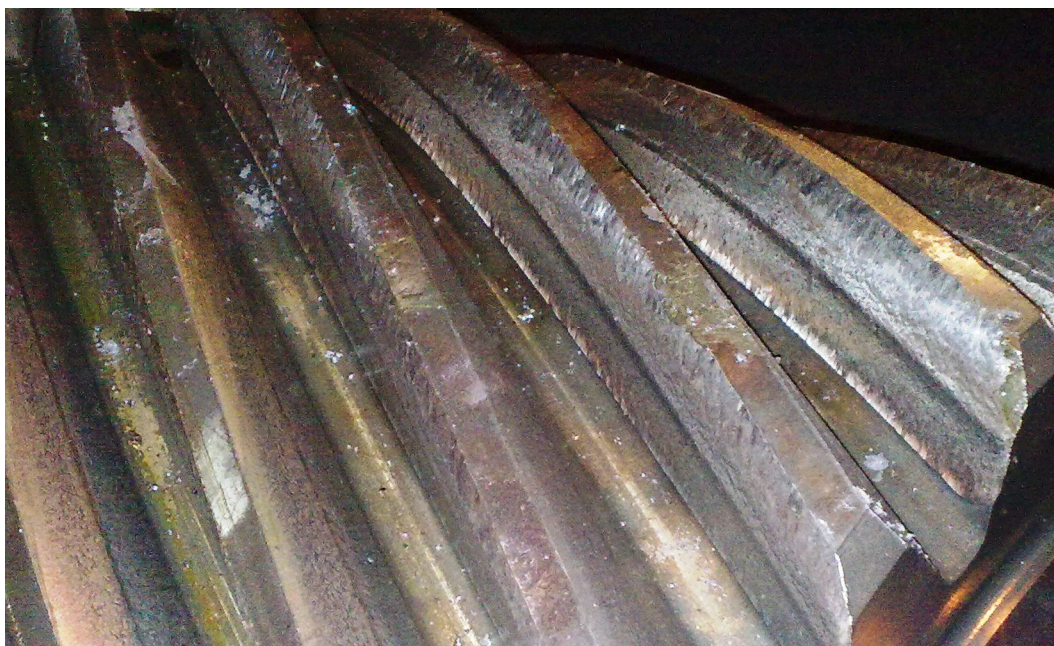


Рисунок 19 – Подрезание ножки зуба из-за уменьшения межцентрового расстояния между валами шестеренных валков

4. Накопление усталостных повреждений проявляется в зарождении, развитии и реализации трещин, что проявляется в виде разрушений зубьев (рисунок 20).

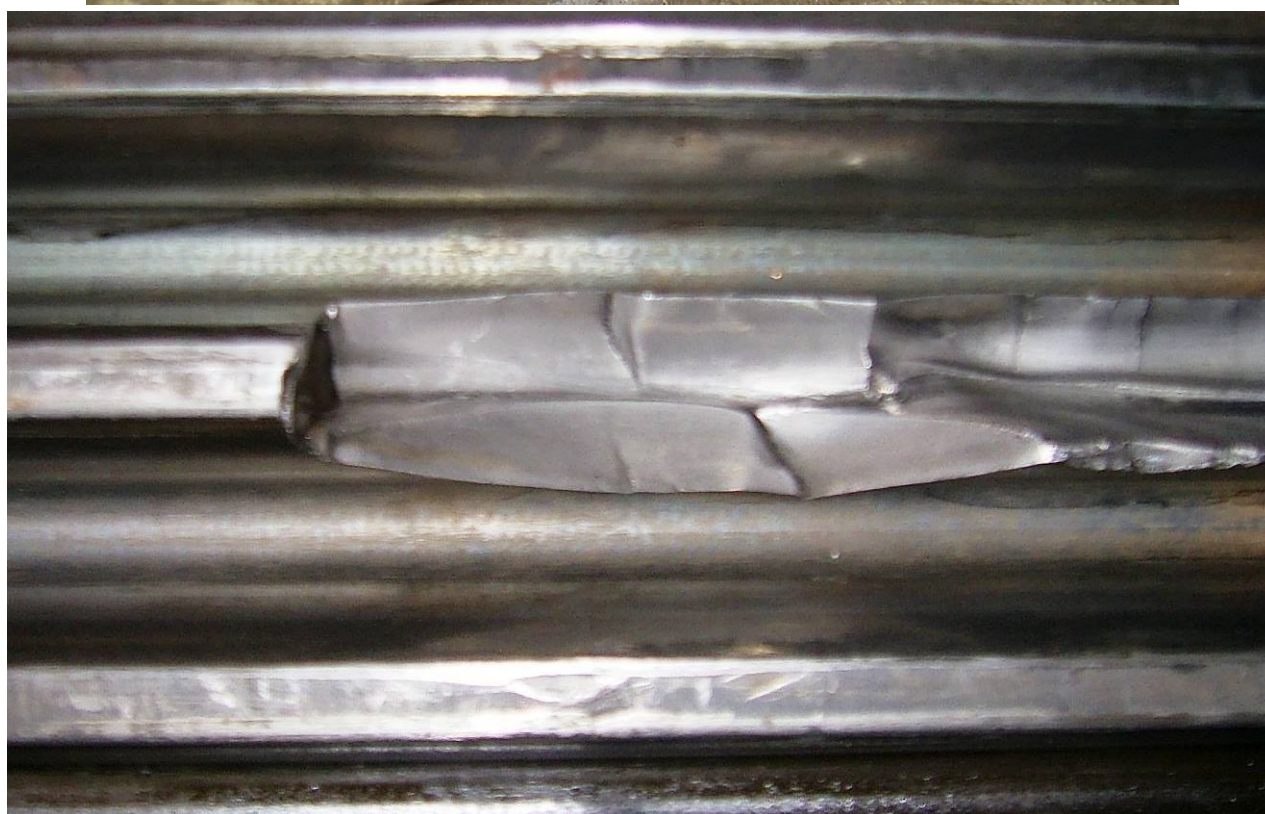


Рисунок 20 – Локальные разрушения
зубьев из-за реализации усталостных трещин

Часто зубчатые зацепления испытывают комбинированное воздействие нескольких факторов, один из которых становится доминирующим. Например, вид рабочей поверхности зубчатой передачи (рисунок 21) редуктора бесцентрового токарного станка позволил установить следующее:

- в масле, применяемом для смазки присутствует вода, используемая в качестве СОЖ при резании, о чем свидетельствуют следы коррозии;
- напряжения, возникающие на площадках контакта при трении качения, превышают предел выносливости, чему способствует снижение несущей способности масляной пленки из-за наличия воды в масле, в результате на рабочей поверхности зубьев возникло осповидное выкрашивание;
- напряжения, возникающие на площадках контакта, не превышают предел текучести – отсутствуют следы пластической деформации;
- при работе зубчатой передачи возникает трение скольжения из-за возможности относительного смещения контактирующих поверхностей в процессе взаимодействия, на что указывает полированная поверхность;
- при изготовлении зубчатой передачи были отклонения с технологии изготовления – волнистые линии на рабочей поверхности.



Рисунок 21 – Общий вид рабочей поверхности зубчатой передачи редуктора бесцентрового токарного станка

Пределы использования зубчатых передач при различных видах износа:

- при изломе зуба, наличии трещин возле основания зуба, пластической деформации материала зуба - зубчатое колесо необходимо заменить;

- при осповидном выкрашивании замена необходима при повреждении рабочей поверхности зубьев более чем на 20%, при глубине ямок выкрашивания более 5% толщины зуба;
- при абразивном износе – износ зуба на 10...20% от толщины зуба;
- при наклепе, задирах на рабочей поверхности зуба – при повреждениях более 20% площади рабочей поверхности;
- наличие цветов побежалости на рабочей поверхности зубьев не допускается;
- по расположению пятна контакта - пятно контакта должно быть не менее 25...60% по высоте и 30...80% по ширине зуба.

Предложенная классификация повреждений позволяет последовательно исследовать отклонения в работе зубчатых передач и принимать своевременные решения по увеличению срока службы зубчатых передач.

Список литературы.

1. Межгосударственный стандарт (проект, первая редакция) Колеса зубчатые виды повреждений. Классификация и описание. 87с.
2. Международный стандарт ISO 10825–1995 Зубчатые передачи. Износ и повреждение зубьев. Терминология. (Gears – Wear and damage to gear teeth – Terminology).
3. Национальный стандарт США ANSI/AGMA 1010–E95 Внешний вид зубьев зубчатых колес. Терминология износа и отказа. Appearance of Gear Teeth – Terminology of Wear and Failure
4. И.А. Титенок Концепция повышения эффективности эвольвентного зубчатого зацепления / Вестник Брянского государственного технического университета. 2008. № 3(19) – С. 38 – 45.
5. Прудиус Б.В., Огурцов Ю.М. Ремонт и монтаж оборудования. Монтаж; Альбом. – М.: Машиностроение, 1990. – 104 с.
6. Кравченко В.М., Сидоров В.А., Седуш В.Я. Техническое диагностирование механического оборудования / Учебник. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2009. – 459 с.
7. Толстоногов А.А. Детали машин и основы конструирования: Конспект лекций. - Самара, СамГАПС, 2003.- 100 с.