



Рис. 1. Общий вид мультипликатора, подготовленного к визуальному осмотру

### Английская аннотация

## ПОВРЕЖДЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ. Классификация

**Безотказность зубчатых передач — определяющий фактор надежности работы механического оборудования. Для определения причин их повреждения необходимо соблюдать последовательность осмотра, определять возможность использования при различных видах износа. Зубчатое колесо необходимо заменять в случае обнаружения классифицированного дефекта, характеристики которого выходят за пределы установленных значений.**

Сидоров В.А., Донецкий национальный технический университет

Зубчатые передачи широко используют в механическом оборудовании для преобразования параметров вращательного движения. Срок их службы определяет показатели безотказности работы механизма и является 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 работоспособности. Предупредить аварийное разрушение зубьев и увеличить срок службы передачи позволяют своевременные ремонтные мероприятия, обоснованные результатами визуального износа.

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

В научной литературе и стандартах различного уровня описаны виды повреждений зубчатых передач и требования, обеспечивающие длительную работу зубчатого зацепления. Известная классификация повреждений зубчатых передач не является единой, а при определении причин и характера разрушения используют различную терминологию. Опыт решения практических задач определения причин повреждений и разрушений требует разработки классификации повреждений зубчатых передач на единой методической основе.

Классификация повреждений зубчатых передач с целью определения причин разрушения или износа и предупреждения их развития на стадии эксплуатации должна учитывать следующие варианты соотношения сроков службы самих передач и узлов, в которые они входят:

1) срок службы зубчатой передачи превышает сроки службы опорных подшипников и вала, что наиболее приемлемо для длительной эксплуатации. При этом о существовании зубчатой передачи «забывают» и поломка происходит неожиданно, через значительный промежуток времени (5-15 лет с начала эксплуатации);

2) срок службы зубчатой передачи соизмерим со сроком службы опорных подшипников и вала, что приводит к увеличению объема ремонтных работ и снижению наработки на отказ. Этот вариант требует

постоянного контроля за состоянием зубчатых передач, для исключения внезапных отказов и предупредительной замены зубчатых колес;

3) срок службы зубчатой передачи меньше срока службы опорных подшипников и вала, что требует изменения качества изготовления, монтажа или условий эксплуатации. Если причины ускоренного износа не установлены и принятые меры не эффективны, тогда ежеквартальные замены становятся постоянными.

Определение причины повреждения позволяет разработать рациональные методы воздействия на зубчатые передачи для повышения их долговечности. 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. Более эффективно оценивать степень повреждения и обосновывать необходимость замены зубчатых колес путем непосредственного осмотра зубьев (рис. 1 в начале статьи). При этом большее внимание уделяют характеру повреждений и расположению пятна контакта на рабочих поверхностях зубьев.

На работоспособность зубчатых передач влияют как внешние факторы, определяющие передаваемые крутящие моменты и характер вращения зубчатых колес, так и внутренние, зависящие от технического состояния механизма. Взаимодействие внешних и внутренних факторов создает многообразие возможных повреждений зубчатых передач. Несмотря на неизменность в процессе эксплуатации передаточного отношения зубчатой передачи, 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 контактную взаимодействующую поверхность. Необходимо соблюдать следующую последовательность осмотра: посадочная поверхность, торцевая и рабочая поверхность зубьев, осмотр противоположной стороны зубчатого колеса.

## НАСОСЫ

### Насосные станции промышленные и бытовые



www.tmpkgroup.com

## СИСТЕМЫ

### Вентиляции Кондиционирования



## СИСТЕМЫ

### ОТОПЛЕНИЯ

#### Котлы и котельные Газовые инфракрасные обогреватели

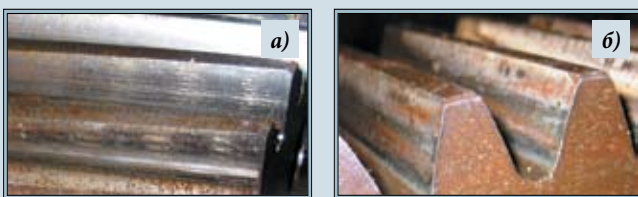


Украина, г. Харьков, ул. Котлова, 68  
тел./факс (057) 715-35-31, 715-35-32, 715-35-34

НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЗУБЧАТОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ ВЛИЯЮТ ТАКИЕ ВНЕШНИЕ ФАКТОРЫ:

**1. Значение прилагаемой силовой нагрузки.** Определяет следующий характер повреждений на рабочей поверхности:

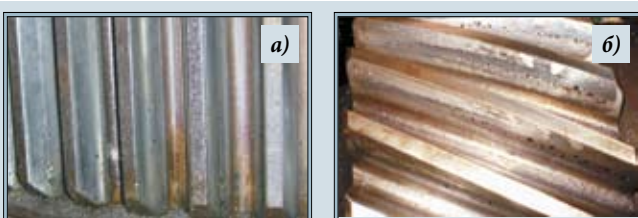
- ♦ номинальная нагрузка не приводит к изменению формы зуба и не оставляет значительных следов деформации на рабочей поверхности зубчатой передачи (рис. 2);



**Рис. 2.** Отсутствие деформаций — признак воздействия номинальной нагрузки

а) рабочая поверхность; б) торцевая поверхность зубьев

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



**Рис. 3.** Превышение предела выносливости материала приводит к осповидному выкрашиванию рабочей поверхности

а) начальная стадия;  
б) дальнейшее развитие;  
в) предельное состояние

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



**Рис. 4.** Пластические сдвиги на рабочей поверхности зубчатой передачи — напряжения на площадках контактов превысили предел текучести

а) начальная стадия; б) дальнейшее развитие

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

**2. Характер прилагаемой силовой нагрузки.** Связан с постоянством или непостоянством частоты вращения, изменением направления вращения, значением динамической составляющей. Динамические удары часто приводят к изломам зубьев (рис. 5). При увеличении частоты вращения увеличиваются требования к точности изготовления и установки зубчатых передач, в противном случае — увеличивается износ зубьев. В неререверсивных передачах в обязательном поряд-



**Рис. 5.** Излом зубьев из-за воздействия динамических ударов

ке следует осматривать обратную (нерабочую) поверхность зуба. На ней могут проявляться ошибки изготовления или монтажа. Например, из-за малого бокового зазора на обратной поверхности зуба могут появиться следы контакта (рис. 6).



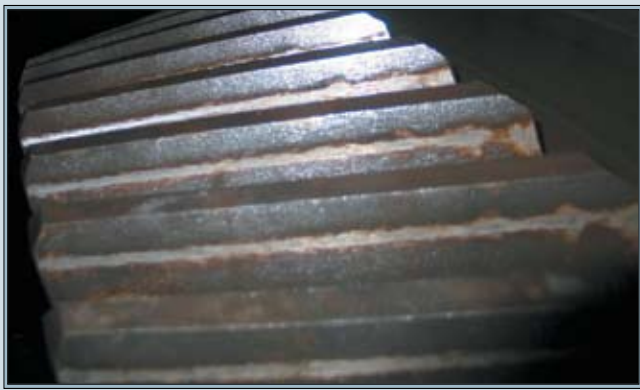


Рис. 6. Пятно контакта на нерабочей поверхности зуба колеса

**3. Наличие абразивных частиц или 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 (рис. 7,а) или неравномерного слоя (рис. 7,б) ржавчины на поверхности зубьев. Степень коррозии может быть различной. Ее легко оценивать визуально.

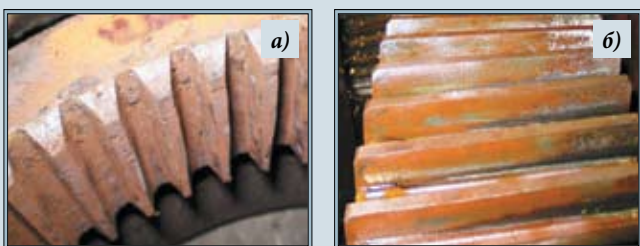


Рис. 7. Следы коррозии на поверхности зубьев  
а) равномерный слой; б) неравномерный слой

Первоначальное проявление абразивного износа — появление царапин или рисок на рабочей поверхности в направлении движения абразивного материала (рис. 8). В данном случае поверхность рабочего колеса шестеренного маслонасоса, повреждена продуктами износа, присутствующими в смазочном материале. 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 и динамические перегрузки; искажается форма зуба; уменьшаются размеры поперечного сечения и прочность зуба. Основные меры предупреждения — защита от загрязнения, применение магнитных фильтров и повышение качества фильтрации масла. Несвоевременно обнаруженный абразивный износ ликвидируют заменой колеса (рис. 9).



Рис. 8. Начальная стадия абразивного износа колеса шестеренного насоса — появление рисок на рабочей поверхности зубьев



Рис. 9. Предельная стадия абразивного износа кремальерной шестерни

**НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЗУБЧАТОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ ВЛИЯЮТ ТАКИЕ ВНУТРЕННИЕ ФАКТОРЫ:**

**1. Неподвижность посадочных поверхностей зубчатого колеса и вала.** Этот фактор удовлетворяет проектным требованиям в том случае, если сопрягаемые детали неподвижны при приложении нагрузки (рис. 10,а). Появление малых перемещений сопрягаемых деталей приводит к фреттинг-коррозии, проявляющейся в виде темных пятен на посадочной поверхности детали (рис. 10,б).

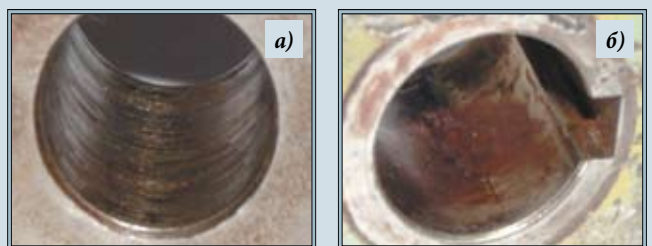


Рис.10. Состояние посадочных поверхностей зубчатого колеса и вала  
а) неподвижная посадка б) малые перемещения сопрягаемых деталей

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.

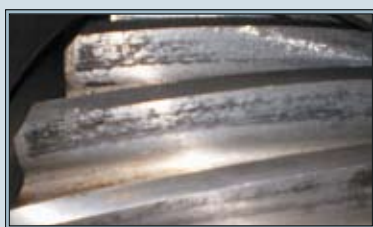
**2. Характер взаимодействия контактирующих поверхностей.** Определяется видом трения на контактирующих поверхностях. Если преобладает жидкостное трение, обеспечивающее минимальный коэффициент трения, и происходит полное разделение контактирующих поверхностей слоем масла, то состояние оценивают как хорошее. В этом случае преобладающим является окислительный износ (рис. 11). Возникновение граничного трения приводит к контакту двух деталей, проявляясь в полировании рабочей поверхности зубчатых передач (рис. 12). Наиболее часто граничное трение проявляется на начальной стадии приработки новых зубчатых колес.

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 (рис. 13).

Для их предотвращения рекомендуют обеспечить постоянное смазывание контактирующих поверхностей, в том числе, путем правиль-



**Рис. 11.** Окислительный износ поверхности зубчатой передачи при жидкостном трении



**Рис. 12.** Полированная поверхность зуба — признак граничного трения



**Рис. 13.** Вырывы металла на вершинах зубьев — схватывание поверхности при отсутствии разделительной масляной пленки



**Рис. 14.** Равномерное расположение пятна контакта по длине и высоте зуба



**Рис. 15.** Сокращение пятна контакта из-за непараллельного расположения осей зацепления при уменьшенном расстоянии между осями зубчатых колес

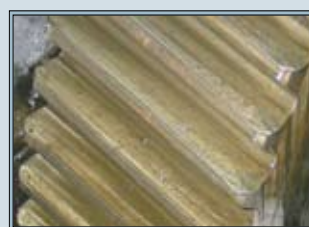


**Рис. 16.** Неравномерный износ зубьев зубчатой муфты при несоосности валов

ного выбора смазочного материала. Такие повреждения нарушают характер зацепления зубьев, увеличивают скорость износа и создают концентраторы напряжений на поверхности зубьев, способствующие развитию усталостных трещин и сколов.

**3. Взаимное расположение деталей.** Оценивают по пятну контакта, характеристики которого обычно приведены в правилах технической эксплуатации, учебниках и пособиях. 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, равномерно расположенное по высоте и длине зуба расположение пятна контакта показано на рис. 14. Непараллельное расположение осей зацепления при уменьшенном расстоянии между осями зубчатых колес происходит из-за износа посадочных мест подшипников валов зубчатых передач и приводит к сокращению пятна контакта до недопустимых размеров (рис. 15). Несоосность валов можно зафиксировать по характеру износа элементов зубчатой муфты (рис. 16).

Отклонения в расположении валов и зубчатых колес приводит к нарушению равномерности воздействия прилагаемых сил. Она может проявляться в неравномерном распределении сил по длине зуба (рис. 17) и равномерном по окружности зубчатого колеса. Неравномерное распределение сил по окружности зубчатого колеса возможно из-за его эксцентричного расположения. Отклонения могут быть настолько велики, что приведут к нарушению контакта зубчатого зацепления (рис. 18). Неравномерность распределения сил приводит к образованию локальных сколов зубьев в ограниченном секторе (рис. 5).



**Рис. 17.** Неравномерное распределение действующих сил по длине зуба и равномерное распределение по окружности зубчатого колеса



**Рис. 18.** Повреждения конического колеса при выходе зубьев из зацепления



## 4. Накопление усталостных повреждений.

Проявляется в зарождении, развитии и реализации трещин. Приводит к разрушению зубьев (рис. 19).

Часто зубчатые зацепления испытывают комбинированное воздействие нескольких факторов, один из которых становится доминирующим. Например, вид рабочей поверхности зубчатой передачи редуктора бесцентрового токарного станка (рис. 20) позволил установить следующее:

- ◆ в масле, применяемом для смазки, присутствует вода, используемая в качестве охлаждающей жидкости при резании, о чем свидетельствуют следы коррозии;
- ◆ напряжения, возникающие на площадках контакта при трении качения, превышают предел выносливости. Этому 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, о чем свидетельствует отсутствие следов пластической деформации;
- ◆ при работе зубчатой передачи возникало трение скольжения из-за возможности относительного смещения контактирующих поверхностей в процессе взаимодействия, на что указывает полированная поверхность;
- ◆ при изготовлении зубчатой передачи были отклонения в технологии изготовления, из-за чего появились волнистые линии на рабочей поверхности.

Результаты анализа влияния на работоспособность зубчатого зацепления внутренних и внешних факторов позволяют следующим образом классифицировать пределы использования зубчатых передач при различных видах износа.

Зубчатое колесо необходимо заменить:

- ◆ при изломе зуба, наличии трещин возле основания зуба, пластической деформации материала зуба;
- ◆ при осповидном выкрашивании с повреждением рабочей поверхности зубьев более чем на 20% и глубине ямок выкрашивания более 5% толщины зуба;
- ◆ при абразивном износе зуба на 10-20% от его толщины;



**Рис. 19.** Локальные разрушения зубьев из-за реализации усталостных трещин



**Рис. 20.** Общий вид рабочей поверхности зубчатой передачи редуктора бесцентрового токарного станка



- ◆ при наклепе, задирах на рабочей поверхности зуба и повреждении более 20% площади рабочей поверхности;
- ◆ при наличии цветов побежалости на рабочей поверхности зубьев;
- ◆ при размере пятна контакта 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. 