

УДК 629.3

DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-19-24

КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕФЕКТОВ ПЕРЕДАЧ МОБИЛЬНЫХ МАШИН**д-р техн. наук, доц. С.А. РЫНКЕВИЧ****(Полоцкий государственный университет имени Ефросинии Полоцкой)**

Рассмотрена классификация дефектов зубчатых передач мобильных машин. Отмечено, что основными процессами, способствующими возникновению дефектов и неисправностей в зубчатых передачах, являются такие, как трение, возникающее в зоне непосредственного контакта зубьев; постепенное разрушение поверхностей деталей при их относительном движении; наличие знакопеременных нагрузок; периодически возникающие динамические удары в трансмиссии; превышение напряжений, действующих на площадках контактов, предела текучести; неоднократные перегрузки передачи, вызванные сложными режимами нагружения. Проведен подробный анализ причин возникновения дефектов в передачах механических и гидромеханических трансмиссий мобильных машин. Классификация повреждений и дефектов зубчатых передач позволяет исследовать отклонения в их работе и принимать своевременные решения по увеличению срока службы зубчатых зацеплений, а также служит базой данных для создания алгоритмов бортовых систем диагностики при распознавании неисправностей коробок передач мобильных машин различного назначения.

Ключевые слова: зубчатая передача, дефект, мобильная машина, классификация.

Введение. Трансмиссии мобильных машин, включающие планетарные и вальные передачи, работают в сложных условиях. В процессе эксплуатации большинства мобильных и многих технологических машин элементы зубчатых передач подвергаются износу, коррозии и старению. Как следствие, при этом неизбежно возникают всевозможные дефекты и повреждения, носящие разнообразный физико-химический характер.

Зубчатые передачи широко используют в механическом оборудовании мобильных и технологических машин для преобразования параметров вращательного движения. Срок их службы определяет показатели безотказности работы механизма. При этом 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 и оперативные ремонтные мероприятия, обоснованные результатами визуального износа, а также активным мониторингом технического состояния трансмиссий [1].

Основная часть. В процессе эксплуатации невозможно контролировать физические процессы, происходящие в зоне контакта зубчатого зацепления. В то же время вид износа, характер разрушения и распределение действующих сил дают возможность получить информацию о параметрах эксплуатации и характере старения.

Под идентификацией дефектов и повреждений подразумевается отнесение неисправностей к определенному классу или виду (*усталость, износ, деформация, фреттинг-коррозия* и т.п.). Идентифицируя дефект или повреждение, зная его физическое происхождение, эксперт в дальнейшем может определить причины появления неисправности и степень ее влияния на техническое состояние (ТС) механизма. Идентификация выявленных дефектов и повреждений осуществляется путем сравнения их характерных признаков с известными образцами или описаниями, которые для удобства пользования могут собираться и систематизироваться в иллюстрированных каталогах.

Таблица 1 составлена для описания повреждений зубчатых зацеплений в коробках передач трансмиссий мобильных машин.

Типичные повреждения рабочих поверхностей зубчатых передач определяются конструкцией и особенностями эксплуатации. Силы, действующие на зубья, вызывают изгиб, сжатие и тангенциальные деформации за счет трения в зоне контакта. Циклическое изменение этих сил, а также изгибающие и контактные напряжения, вызванные этими силами, являются причиной поломки зубьев и усталостного выкрашивания их рабочей поверхности. Трение, возникающее в зоне контакта зубьев, вызывает износ и заедание.


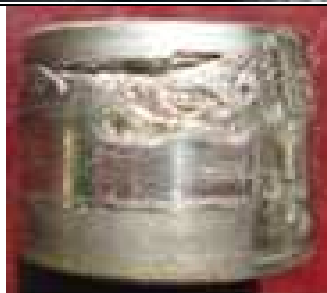
Виды повреждений зубчатых передач: изменение геометрии рабочих поверхностей в результате механического, абразивного, усталостного изнашивания и схватывания сопряженных поверхностей, вследствие чего развиваются повреждения. Это *поломка зубьев, абразивное изнашивание, усталостное выкрашивание, заедание, задиры, сколы, трещины*.

Появление ряда дефектов в зубчатых передачах связано с негативными явлениями и нештатными процессами в механических и гидромеханических трансмиссиях мобильных машин при их эксплуатации. Это плохое качество включения/выключения ступеней (передач) из-за спекания пар фрикционных муфт, обеспечивающих включение ступеней; нарушение режимов работы гидротрансформатора, особенно при его блокировании/разблокировании; ухудшение плавности хода при трогании груженого автомобиля и др.






Таблица 1. – Виды дефектов зубчатых передач

Наименование дефекта	Описание дефекта	Изображение дефекта
1	2	3
Поломка и накопленный излом зубьев	Поломка является следствием усталости материала зубьев от действующих повторно-переменных напряжений изгиба или от перегрузки ударного характера. Такое возможно при попадании между зубьев постороннего предмета или резкого переключения ступеней в коробке передач. Усталостные трещины образуются у основания зуба на той стороне, где от изгиба возникают наибольшие напряжения растяжения. Прямые короткие зубья выламываются полностью по сечению у основания зуба. При усталостном разрушении на теле колеса после излома остается вогнутая, а при подломке вследствие перегрузки – выпуклая поверхность	
Излом зубьев из-за воздействия динамических ударов	Динамические удары часто приводят к изломам зубьев, причем поломка зубьев может вызываться большими перегрузками ударного или статического действия или усталостью материала от многократно повторяющихся нагрузок. Поломки от перегрузок часто бывают связаны: а) с концентрацией нагрузки по длине зубьев из-за погрешностей изготовления или больших упругих деформаций валов; б) с износом зубьев, приводящим к их ослаблению и росту динамических нагрузок; в) с вводом в зацепление на ходу подвижных шестерен	
Абразивный износ зубьев	Механический износ возникает в процессе постепенного разрушения поверхностей деталей при относительном движении. Это явление возникает в результате попадания абразивных частиц (пыли, окалины, частиц нагара и т.д.) между трущимися поверхностями. Механическое изнашивание является результатом разрушения поверхностного слоя твердого тела за счет его многократного деформирования. Первоначальное проявление абразивного износа – появление царапин или рисок на рабочей поверхности в направлении движения абразивного материала	
Окислительный износ поверхности зубчатой передачи при жидкостном трении	Если преобладает жидкостное трение, обеспечивающее минимальный коэффициент трения, и происходит полное разделение контактирующих поверхностей слоем масла, то в этом случае преобладающим является окислительный износ. При этом трущиеся поверхности достаточно плотно разделены смазочным слоем большой толщины	
Полирование поверхности зуба при граничном трении	Возникновение граничного трения приводит к контакту двух деталей, проявляясь в полировании рабочей поверхности зубчатых передач. Этот процесс – обычный вид износа. Наиболее часто граничное трение проявляется на начальной стадии приработки новых зубчатых колес. При полировании поверхности зуба происходит медленное удаление металла с контактирующих поверхностей, скорость которого обычно не влияет на работу редуктора в пределах установленного для него срока службы	

Продолжение таблицы 1

1	2	3
<p>Возникновение сколов на шестернях</p>	<p>Сколы на шестернях образуются вследствие чрезмерного износа или когда зубья не выдерживают перегрузок, а также в случае возникновения кратковременных, но резких ударных нагрузок. Это может произойти и при перегреве коробки передач.</p> <p>Сколы образуются по краям зубьев шестерни, часто большая часть скола располагается на боковой (внутренней) стороне рабочего зуба, контактирующего с другим колесом. Обычно сколы имеют 2–3 мм в длину и 1 мм глубину.</p> <p>В результате наличия сколов происходит уменьшение общей площади пятна контакта</p>	
<p>Пластические сдвиги на рабочей поверхности зубчатой передачи</p>	<p>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.</p> <p>Промежуточными проявлениями таких процессов являются: отслаивание частиц металла с рабочей поверхности зубьев; наклеп из-за сильных ударов при наличии зазора в зацеплении</p>	
<p>Осповидное выкрашивание рабочей поверхности</p>	<p>Знакопеременные силы приводят к появлению на площадках контакта напряжений, превышающих предел выносливости материала. При этом нагрузка по длине зуба распространяется неравномерно. В результате на рабочей поверхности в зонах концентрации нагрузки появляются микротрещины и пятнообразные углубления, вызываемые усталостью материала. Как результат – осповидное выкрашивание рабочей поверхности.</p> <p>На нижнем рисунке показано предельное состояние осповидного выкрашивания</p>	
<p>Осповидное выкрашивание ролика подшипника</p>	<p>Возникает из-за воздействия знакопеременных нагрузок ввиду высокого давления при трении качения при напряжениях в материале, достигающих предела выносливости.</p> <p>Многочисленные нагружения вызывают усталость материала, при этом на плоскостях максимальных напряжений внутри ролика зарождаются трещины. Их развитие приводит к разрыву контактной поверхности, что принципиально изменяет характер взаимодействия деталей</p>	

Окончание таблицы 1

1	2	3
Угловое смещение пятна контакта зубчатой передачи	Возникает из-за перекоса валов редуктора, а также несовпадения углов наклона зубьев шестерни и колеса. Отклонения зубьев в процессе нарезания от заданного направления, перекосы осей гнезд подшипников, деформации под нагрузкой приводят к тому, что пятно контакта смещается к одному из торцов зубчатых колес. Эти факторы приводят к повышению нагрузок, концентрации напряжений, вызывают поломки и задиры зубьев	
Изнашивание или разбивание заходных кромок подвижной зубчатой полумуфты	Зубья муфт переключения передач с течением времени изнашиваются. Износу подвергаются как боковые поверхности зубьев, так и заходные кромки зубьев ведущих и ведомых зубчатых полумуфт. При изнашивании или разбивании заходных кромок зубьев изменяется их конфигурация, что затрудняет поворот запирающего звена после синхронизации угловых скоростей и перемещение подвижной полумуфты для ее включения	
Хрупкое разрушение металла втулки зубчатой муфты	Возникает вследствие перегрузки передачи, низкого качества поковки или неправильно выбранной марки стали. Происходит изменение физико-механических свойств металла при длительном действии циклически изменяющихся во времени напряжений и деформаций. Иногда поломка возникает из-за несоблюдения условий смазки	
Срезание шлицев первичного вала коробки передач	При длительной эксплуатации возможна выработка и срезание шлицев первичного вала коробки передач. Признаком этого дефекта является отсутствие движения при включении в коробке передач режима <i>D</i> или <i>R</i>	
Разрушение сепаратора подшипника качения вала	В основном это происходит, когда остаточный ресурс подшипника составляет 25–40%, а оставшийся срок службы редко превышает несколько недель или месяцев. Наблюдается также увеличение интенсивности вибрации в высокочастотной зоне	

Рассмотрим более подробно такие виды дефектов передач, как поломка зубьев, усталостное выкрашивание рабочих поверхностей зубьев и абразивный износ зубьев. Эти дефекты являются наиболее характерными и часто встречающимися.

Поломка зубьев – особенно опасный вид разрушения. Она происходит из-за возникающих в зубьях переменных напряжений при деформации изгиба. Поломка зубьев может происходить в результате больших перегрузок ударного и статического характера, а также усталостного разрушения от действия переменных напряжений в течение длительного времени. Трещины усталости возникают у основания зуба из-за неучтенных расчетом перегрузок. Перенапряжение зубьев может вызывать концентрацию нагрузки по длине зуба вследствие неправильного монтажа (непараллельности валов), а также из-за недостаточной обработки поверхности впадин зубьев, заклинивания зубьев при нагреве передачи и недостаточных боковых зазорах. Чаще всего наблюдаются отколы углов зубьев, связанные с концентрацией нагрузки.

Усталостное выкрашивание рабочих поверхностей зубьев – наиболее распространенный эксплуатационный вид повреждения закрытых передач. Возникает в результате действия переменных контактных напряжений в поверхностных слоях материала. В зубчатых передачах, работающих при высоких контактных напряжениях, главным образом, на ножках и у полюсной линии, появляются веерообразные микротрещины, которые, развиваясь вглубь по кругу, замыкаются, что и приводит к явлению выкрашивания. Стимулирует выкрашивание смазка,

попадающая в трещины. Вследствие клиновидности трещины давление смазки возрастает по глубине и достигает максимального значения у вершины трещины. Прогрессирующий износ вызывает искажение профиля и приводит к снижению ресурса.

Абразивный износ зубьев – основной вид разрушения открытых передач. Это разновидность механического износа, когда имеет место процесс постепенного разрушения поверхностей деталей при их относительном движении. Вид поверхности при абразивном износе – ряд мелких параллельных полос, перпендикулярных оси колеса. Износ поверхностного слоя, имеющего наибольшую твердость, приводит к увеличению скорости изнашивания. В процессе износа уменьшается размер зуба по толщине, увеличиваются зазоры в зацеплении, нарушается эвольвентность рабочего участка профиля зуба.

При исследовании дефектных валвных коробок передач гидромеханических трансмиссий автосамосвалов «БелАЗ» (поломки трансмиссий происходили в процессе их эксплуатации) установлено, что наиболее частые виды повреждений и дефектов следующие:

- изнашивание и излом зубьев;
- появление трещин на отдельных участках зубчатых колес;
- абразивный износ зубчатых зацеплений;
- деформация поверхностей и канавок;
- смятие и разбивание рабочих граней шлицев, торцов зубьев;
- осповидное выкрашивание поверхности под действием контактных напряжений.

Согласно рекомендациям завода «БелАЗ» для эксплуатирующихся автосамосвалы организаций, зубчатые колеса коробок передач необходимо заменять в случае обнаружения классифицированного дефекта, характеристики которого выходят за пределы установленных значений.

Назовем типичные причины, когда следует производить ремонт или замену зубчатого колеса:

- 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;
- 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.

В таблице 2 представлены основные дефекты зубчатых передач, проявляющиеся при эксплуатации карьерных автосамосвалов. Даны причины появления дефектов, а также приведены относительные частоты отказов коробок передач на 100 000 и 200 000 км пробега автосамосвала, вызванных тем или иным дефектом зубчатого зацепления.

Таблица 2. – Основные дефекты зубчатых передач, проявляющиеся при эксплуатации карьерных автосамосвалов

Вид дефекта	Причина возникновения дефекта и его характеристика	Относительная частота появления отказа	
		на 100 000 км пробега	на 200 000 км пробега
Износ	Недостаточное количество смазочного масла, масло загрязнено, зубья подвержены процессу изнашивания. Износ делает толщину зуба тоньше, а зазор между зубьями увеличивается, вызывая удары и в тяжелых случаях перегрузку, что может привести к поломке	0,075	0,25
Пластическая деформация	При перегрузке из-за пластической деформации материала поверхность зуба будет иметь пластическое течение, чаще всего это происходит на зубчатых колесах с низкой твердостью, а также при плохой приработке зубчатой пары	0,15	0,48
Сколы (царапины)	Из-за нагрева и нагрузки пленка масла будет разрушена, при этом сырые металлические поверхности зубьев находятся в прямом контакте, что приводит к прилипанию поверхностей зубьев	0,45	1,42
Пятна	При длительном контактом напряжении поверхность зуба образует усталостные трещины, которые продолжают расширяться, вызывая отслоение мелких металлических частичек и образование пятен. Когда коррозия является серьезной, возникают вибрация и аномальный звук	0,125	0,412
Облом зубьев	Проявление изгибной усталости. Если поверхность зуба нагружена и наибольшее изгибное напряжение сосредоточено у основания зуба, когда изгибное напряжение превышает предельное, то происходит перегрузочное, или усталостное, разрушение	0,05	0,165

Относительная частота появления отказов, вызванная опасными дефектами, определялась как отношение количества автосамосвалов, у которых возник опасный отказ, к суммарному количеству автосамосвалов в автохозяйстве, достигших определенного пробега (100 000 или 200 000 км).

Например, значение относительной частоты, равное 0,075, означает, что из 40 функционирующих в автохозяйстве автосамосвалов у 3 машин до достижения 100 000 км пробега проявится опасная поломка коробки передач из-за накопленного износа (см. вторую строку таблицы 2), т.е. $0,075 = 3/40$.

Заключение. Предложенная классификация повреждений и дефектов позволяет, во-первых, последовательно исследовать отклонения в работе зубчатых передач и принимать своевременные решения по увеличению срока службы зубчатых передач, во-вторых, типовые дефекты зубчатых зацеплений можно использовать в алгоритмах бортовых систем диагностики при распознавании неисправностей коробок передач мобильных машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рынкевич С.А. Активный мониторинг сложных элементов гидромеханических передач мобильных машин // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2024. – № 1. – С. 71–78. DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-71-78
2. Рынкевич С.А. Механические и гидромеханические передачи: анализ работоспособности и отказы // Актуальные проблемы транспорта и логистики: сб. науч. тр. БелГУТ. – 2023. – С. 137–142.
3. Рынкевич С.А. Система бортового диагностирования и мониторинга гидромеханической передачи автосамосвала // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2023. – № 4(81). – С. 53–60. DOI 10.24412/2077-8481-2023-4-53-60

REFERENCES

1. Rynkevich, S.A. (2024). Aktivnyi monitoring slozhnykh elementov gidromekhanicheskikh peredach mobil'nykh mashin [Active monitoring of complex elements of hydromechanical transmissions of mobile machines]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Herald of Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science], 1(49), 71–78. (In Russ., abstr. in Engl.) DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-71-78
2. Rynkevich, S.A. (2023). Mekhanicheskie i gidromekhanicheskie peredachi: analiz rabotosposobnosti i otказы. *Aktual'nye problemy transporta i logistiki: Sbornik nauchnykh trudov BelGUT*, (137–142). Gomel: BelGUT. (In Russ.)
3. Rynkevich, S.A. (2023). Sistema bortovogo diagnostirovaniya i monitoringa gidromekhanicheskoi peredachi avtosamosvala [System for On-board Diagnostics and Monitoring of dump truck hydromechanical transmission]. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta*, 4(81), 53–60. (In Russ., abstr. in Engl.) DOI 10.24412/2077-8481-2023-4-53-60

Поступила 09.07.2024

CLASSIFICATION OF DEFECTS IN MOBILE MACHINE TRANSMISSIONS

S. RYNKEVICH

(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The classification of defects in gears of mobile machines is considered. It is noted that the main processes that contribute to the occurrence of defects and malfunctions in gears are: friction that occurs in the zone of direct contact of the teeth, gradual destruction of the surfaces of parts during their relative movement, the presence of alternating loads, periodically occurring dynamic shocks in the transmission, excess stress, acting on the contact areas, yield strength, repeated transmission overloads caused by complex loading conditions. A detailed analysis of the causes of defects in the transmissions of mechanical and hydromechanical transmissions of mobile machines was carried out. The classification of damage and defects in gears makes it possible to study deviations in the operation of these gears and make timely decisions to increase the service life of gears, and also serves as a database for creating algorithms for on-board diagnostic systems for recognizing faults in gearboxes of mobile machines for various purposes.

Keywords: gear transmission, defect, mobile machine, classification.