

УДК 621. 002.5-19

М.Г. Каплина¹, С.Л. Иванов¹, В.А. Романов²

M.G. Kaplina¹, S.L. Ivanov¹, V.A. Romanov²

¹Санкт-Петербургский горный университет

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет

¹St. Petersburg Mining University

²Perm National Research Polytechnic University

РЕЗЕРВЫ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ТРАНСМИССИЙ

THE RESERVES OF WORKING CAPACITY OF TOOTH GEARINGS TRANSMISSIONS

Около 30 % отказов крупномодульных открытых зубчатых передач происходит из-за преждевременного износа рабочих поверхностей их зубьев. Выбор рациональных параметров зацепления будет способствовать увеличению энергоресурса наиболее слабого звена зубчатой передачи, лимитирующего ресурс системы в целом. Модификация профиля зуба также способствует повышению ресурса передачи, но конструкторско-технологическим методом. Для повышения ресурса зубчатых колес чаще всего необходимо повышение прочностных характеристик материала зубьев. Хорошие условия смазки способствуют повышению их нагрузочной способности. Резервом высокой долговечности зубчатой передачи является своевременное и качественное ее техническое обслуживание в рамках соответствующей системы техобслуживания и ремонта.

Ключевые слова: зубчатая передача, долговечность, долговечность зубчатой передачи, геометрия зубчатой передачи, технология изготовления зубчатой передачи, техническое обслуживание зубчатой передачи, трансмиссия, технологическая машина.

About 30 % of failures of coarse-grained open gears are due to premature wear of the working surfaces of their teeth. The choice of rational gearing parameters will help increase the energy resource of the weakest link in the gear train, which limits the resource of the system as a whole. Modification of the teeth profile also contributes to an increase in the transmission resource, but by a design and technological method. To increase the service life of gears, it is often necessary to increase the strength characteristics of the material of the teeth. Lubrication conditions reduce the wear rate of the teeth. The reserve of high durability of the gear train is timely and high-quality maintenance within the framework of the corresponding maintenance system.

Keywords: gearing, durability, the durability of the gear, gear geometry, gear manufacturing technology, maintenance gear, transmission, technology machine.

Большое разнообразие машин в металлургическом, горном и строительном производствах имеют механические трансмиссии, выполненные в виде редукторов или открытых зубчатых передач, объединенных с приводом – групповым, индивидуальным или многодвигательным.

Так, групповой привод имеют рольганги обжимных, балочных и толстолистовых станов. Такой привод позволяет уменьшить его установленную мощность. Здесь ролики приводятся в движение через многоопорный трансмиссионный вал с коническими передачами, а при малых расстояниях между роликами – посредством цилиндрических зубчатых колес. Большинство современных машин оборудованы индивидуальным приводом, что значительно повышает их надежность и сокращает металлоемкость. На многих уникальных тяжелых машинах металлургической и горнорудной промышленности применяют прогрессивные многодвигательные электроприводы с суммированием крутящих моментов на тихоходном валу, например привод наклона конвертера [1].

Типы и конструкция редукторов, применяемые в приводах, определяются назначением машины. Наибольшее распространение для мобильных машин получили специальные, а для стационарных машин – моноблочные редукторы промышленного типа, как правило, горизонтального исполнения, одно- или многоступенчатые, укомплектованные эвольвентными, как наиболее технологичными, цилиндрическими зубчатыми передачами наружного или внутреннего зацепления, реже коническими и червячными передачами. Одноступенчатые редукторы, как правило, встречается редко. Чаще это открытые и тихоходные передачи последней ступени механической трансмиссии, например открытые передачи шаровых, стержневых, конических мельниц, вращающихся и трубчатых печей, барабанных сушилок, поворотных механизмов экскаваторов, кранов, лебедок подъема, вагонопрокидывателей и другого оборудования.

Зубчатые передачи, как правило, лимитируют ресурс системы трансмиссии технологических машин [2, 3]. Повышение безотказности зубчатой передачи ведет к повышению надежности машины в целом. Для открытых зубчатых передач характерным критерием их выхода из строя является износ рабочих поверхностей зубьев. При этом одновременно с контактным взаимодействием рабочих поверхностей зубьев происходит их наклеп, сопровождающийся накоплением дислокаций в поверхностном слое материала зуба, а также накоплением усталостных повреждений в основании зуба от действия переменных изгибных напряжений при передаче крутящего момента от шестерни колесу. Аналогичные процессы протекают и в закрытых зубчатых передачах редукторов машин, с разницей лишь в интенсивности процессов изнашивания и выкрашивания рабочих поверхностей зубьев. Из-за высокой поверхностной твердости зубьев закрытых зубчатых передач процесс изнашивания протекает медленно, а основным критерием отказов этих передач является усталостное выкрашивание рабочих поверхностей их зубьев. При неправильной эксплуатации зубчатых передач, использовании смазочных

масел, не соответствующих условиям эксплуатации, возможно заедание. При заедании зубьев происходит приваривание частиц материала зуба одного колеса к другому (микросварка) в результате разрушения масляной пленки и местного нагрева из-за высоких давлений и скоростей скольжения в контакте. Образовавшиеся высокопрочные наросты оставляют задиры на рабочих поверхностях, способствуют интенсивному их изнашиванию.

Повысить долговечность зубчатых передач возможно рядом способов:

- оптимизацией геометрических параметров зацепления передачи;
- изменением свойств и параметров материала зубчатых колес;
- совершенствованием технологии изготовления, упрочнения, ремонта, монтажа и сборки;
- обеспечением номинальных условий эксплуатации передачи, не допускающих перегрузок в работе и формирующих рациональные параметры состояния искусственной среды функционирования передачи. Такие условия легче создать для закрытых передач, обеспечивая условия смазки, не допускающая запыленности, обводненности и перегрева;
- совершенствованием системы технического обслуживания и ремонта.

Выбор рациональной конструкции зубчатых колес определяет высокий ресурс зубчатой передачи. Оптимизация параметров зацепления, таких как: смещение производящего реечного контура, радиальные зазоры в зацеплении, модуль и число зубьев, величина заданного коэффициента перекрытия в передаче, – позволяет повысить ресурс зацепления зубчатого колеса без замены материала. При нарезании зубьев колес эвольвентного профиля производящий реечный контур можно смещать тангенциально или радиально относительно нарезаемой заготовки. Радиальное смещение оказывает влияние на геометро-кинематические и прочностные свойства зубчатых пар [2, 4]. Но более широкие возможности влияния на изменение прочности и долговечности как самих эвольвентных зубчатых колес, так и зацепления в передаче путем изменения его геометрии возможно получить при комбинированном способе смещения (сочетание радиального и тангенциального смещения), в том числе с использованием производящего режущего контура со стандартными исходными параметрами [4].

Например, если рассмотреть влияние геометрических параметров зацепления на ресурс передачи, межосевое расстояние которой остается неизменным, можно прийти к следующему выводу: с уменьшением коэффициента перекрытия в зацеплении ресурс передачи, как правило, увеличивается [2]. Влияние на прочностные характеристики зубчатого зацепления оказывает значение модуля, при увеличении которого снижается контактная выносливость и противозадирная стойкость, что приводит к уменьшению ресурса передачи в целом.

Еще одним из способов, повышающим эксплуатационные характеристики, является модификация профиля зуба. Модификация профиля зуба бывает двух видов: естественная и профильная. Второй вид модификации позволяет снизить неравномерность распределения нагрузки по ширине зуба и в некоторой степени компенсирует влияние ошибок изготовления и упругих деформаций, тем самым повышая плавность работы передачи [3].

Прочность зуба также зависит от радиуса галтели и от шероховатости галтельной поверхности. Влияние шероховатости галтели и дефектов на ее поверхности может оказаться гораздо сильнее, чем наличие самой галтели, особенно для твердых материалов [5].

Для повышения ресурса зубчатых колес чаще всего необходимо повышение прочностных характеристик материалов зубчатых колес. Наиболее распространенный путь решения такой проблемы – это выбор материала зубчатого колеса с улучшенными свойствами и последующим применением различных видов термической и химико-термической обработки.

Существует метод поверхностного пластического деформирования с образованием регулярных микрорельефов, который не требует предварительного нагрева материала, вследствие чего повышается прочность, снижается пластичность, плотность и коррозионная стойкость. В поверхностном слое материала зуба при использовании поверхностного пластического деформирования создаются сжимающие напряжения, тормозящие зарождение и развитие трещин, увеличивается плотность дефектов кристаллической решетки, может изменяться форма и ориентация зерен [4]. Этим способом можно создавать специальный микрорельеф на поверхности зубьев.

Создание микрорельефов обладает рядом дополнительных преимуществ:

- снижение потерь на трение, исключение появления надиров, задиров и схватывания;
- уменьшение материалоемкости;
- повышение надежности и долговечности;
- сокращение или вовсе исключение периода приработки;
- исключение ручных работ при изготовлении (абразивное полирование; шабрение);
- осуществление перехода на расчетные методы нормирования и технологического обеспечения микрогеометрии.

В современном машиностроении для упрочнения зубчатых колес применяется метод наклепа дробью. Сущность данного метода заключается в том, что поверхность окончательно изготовленной детали подвергается холодной пластической деформации посредством ударного импульса чугунной или стальной дробью диаметром 0,3–2,5 мм. При использовании наклепа дробью происходит повышение предела выносливости, долговечности и ударно-усталостной прочности зубчатых колес.

На практике в основном рекомендуют применение следующих вариантов термической и химико-термической обработки: улучшение, закалка ТВЧ, цементация с последующей закалкой, объемная закалка, электромеханическая обработка, цианирование и ультразвуковая обработка. Также возможно применение нитроцементации и азотирования с образованием тонкого поверхностного упрочненного слоя [2, 3].

Благодаря нитроцементации и азотированию с последующей термической обработкой материала значительно увеличиваются износостойкость и долговечность материалов, однако применение этих способов происходит в средах с большим содержанием водорода, который вредно влияет на прочностные показатели сталей.

Перспективной технологией упрочнения поверхности зубчатых колес является ионное азотирование в безводородных насыщающих средах (смесях азота с аргоном), применение которой исключает вредное влияние водорода на металл [3]. Процесс ионного азотирования способствует повышению прочностных характеристик сталей и снижению их пластических свойств, повышению предела выносливости.

Для повышения прочности и долговечности зубьев наиболее рациональным является получение зуба с высокой поверхностной твердостью и вязкой сердцевиной. Высокой поверхностной твердости можно достичь путем:

- нанесения упрочняющих покрытий с высоким модулем упругости и плавным градиентом изменения свойств по глубине от поверхности до основания;
- уменьшения градиента свойств по глубине при увеличении толщины покрытия и повышении жесткости основания;
- нанесения на поверхность покрытия тонких низкомодульных пленок, обеспечивающих увеличение площади контакта и антифрикционных свойств [3].

Однако приведенные выше способы термической и химической обработки имеют один общий недостаток – образование на поверхности вследствие термических или других видов воздействия хаотичных, случайно расположенных неровностей, такие участки в период приработки изнашиваются наиболее интенсивно, с формированием абразивных частиц, снижая поверхностную прочность материалов [6].

В случае когда число контактов ведущего и ведомого колес в зацеплении различно (передаточное число отлично от единицы), требуется сочетание различных способов упрочнения ведущего и ведомого колес, обеспечивающих их одинаковый срок службы, равный сроку службы передачи при ресурсности шестерни (большая) и колеса (меньшая), пропорциональных числу их зубьев. Так, для крупномодульной открытой передачи на ведомое зубчатое колесо равномерным слоем наносится износостойкий материал по всей поверхности. На ведущем колесе выполняются канавки глубиной

до 2 мм по всей ширине колеса, которые заполняются износостойким материалом, выступающим над рабочей поверхностью. Изнашивание выступающего материала происходит с меньшей интенсивностью, так как он обладает высокой сопротивляемостью к разрушению абразивными частицами. Происходит выравнивание скоростей изнашивания износостойкого покрытия зубчатого колеса и основного его материала [7].

Другим способом снижения интенсивности изнашивания зубьев без изменения конструкции передачи выступает улучшение процесса смазки. Во время работы зубчатой передачи возможно попадание в зацепление грязи, абразивной и металлической пыли. В этом случае, при отсутствии или недостаточном количестве смазки, зубья колес быстро изнашиваются, резко возрастает вероятность заедания передачи.

Основные методы смазывания зубчатых передач – это метод погружения поверхности трения полностью или частично постоянно или периодически в ванну с жидким смазочным материалом или циркуляционный метод смазывания, при котором смазочный материал после прохождения по поверхностям трения вновь подводится к ним механическим способом. Циркуляционная смазка, как правило, осуществляется специальными автоматизированными системами смазки.

Первый метод получил широкое распространение для всех типов зубчатых передач, но ограничен предельными окружными скоростями на периферии зуба, где центробежный эффект настолько велик, что из-за разбрызгивания масла оно в недостаточном количестве попадает непосредственно в зацепление. Циркуляционное смазывание зубчатых редукторов применяют при окружных скоростях свыше 10–12 м/с, в многоступенчатых редукторах при скоростях менее 10 м/с, т.е. когда зубчатое колесо последней пары намного больше по диаметру остальных передач и для обеспечения смазывания погружением требуется поддерживать высокий уровень масла, что по условиям, изложенным выше, недопустимо.

Наиболее эффективным способом автоматической системы смазки, например для открытых зубчатых передач, является распыление густой смазки. При работе автоматической централизованной системе распыления смазки смазочный материал под давление подается в эжектор и дозированно распределяется между форсунками распыления, которые выставлены под определенным углом и, в свою очередь, наносят заданный тонкий слой смазки на всю рабочую поверхность зуба шестерни. Периодичность включения и длительность работы системы задается блоком управления в зависимости от потребности передачи в смазке [8].

Резервом высокой долговечности зубчатой передачи является своевременное качественное их техническое обслуживание и ремонт в рамках соответствующей системы техобслуживания и ремонта. Система технического

обслуживания и ремонта (ТО и Р) – это комплекс организационных и технологических мероприятий по обслуживанию и ремонту оборудования. Она включает планирование, подготовку, реализацию технического обслуживания и ремонта с заданной последовательностью и периодичностью. Для этих целей в системе приведены нормативы продолжительности межремонтных периодов, ремонтных циклов, простоев и трудоемкости в ремонте оборудования и технологических агрегатов, примерное содержание ремонтных работ отдельных видов оборудования, даны указания по организации его ремонта и технического обслуживания.

Система ТО и Р призвана обеспечить: поддержание оборудования в работоспособном состоянии и предотвращение неожиданного его выхода из строя; правильную организацию технического обслуживания и ремонта оборудования; увеличение коэффициента технического использования оборудования за счет повышения качества технического обслуживания и ремонта и уменьшения простоя в ремонте; возможность выполнения ремонтных работ по графику, согласованному с планом производства; своевременную подготовку необходимых запасных частей и материалов.

Главная задача обслуживания – профилактика поломок. В ходе эксплуатации зубья передач периодически осматривают на предмет обнаружения износа: если износ зубьев превышает допустимый, значит, колеса подлежат замене.

Все важные события, связанные с редукторами, заносятся в технологическую карту профилактического обслуживания. Технологическую карту профилактического обслуживания редуктора начинают вести уже на этапе монтажа. Основные вопросы, которые отражаются в технологической карте обслуживания: дата завершения монтажа и замеренные значения точности; дата первой заливки масла, качество и количество масла; даты начала и завершения приработки и все замечания, выявленные во время приработки; дата начала производственной эксплуатации и данные по замерам мощности; дата первой замены масла, все проверки и выявленные замечания (например, контроль состояния поверхностей контакта зубьев); выполненные замены масла и следующая планируемая дата замены масла; все работы по ремонту и обслуживанию, а также замена деталей.

Большое значение для заказчика и изготовителя зубчатых механизмов промышленного назначения имеет тщательная проверка оборудования в конце гарантийного срока [9].

Обслуживание и осмотры можно разделить на две категории – осмотры в ходе эксплуатации и осмотры и обслуживание, выполняемые во время останова оборудования.

В процессе эксплуатации обращается внимание на следующее: нагрев, шумы во время работы и вибрации (замеры вибраций), давление и расход

масла, пиковые значения эксплуатационной мощности и нагрузок, выявленные утечки масла.

Рабочие температуры редуктора должны находиться в пределах от +40 до +80 °С при замере в маслосборнике. Для синтетических масел допускается температура до +90 °С, однако в этих случаях на отдельных участках поверхности кожуха температура может быть и выше. Отслеживание значений мощности помогает оценить полезный ресурс редуктора в составе оборудования.

Большое значение во время осмотров придается также контролю состояния зубчатых колес и, если возможно, подшипников; результаты регистрируются в технологической карте профилактического обслуживания. Если выявлен прогрессирующий износ или повреждения боковых поверхностей зубьев (забоины), следует немедленно установить причину. Чрезвычайно малый ресурс может явиться результатом перекоса основания, перегрузок, применения смазочного материала нерекомендованной марки, наличия воды в смазке, засорения масляного трубопровода или неправильной оценки нагрузки на этапе подготовки технических условий для редуктора.

Таким образом, обеспечение долговечности зубчатых передач возможно разумным сочетанием конструкции зубчатых колес с материалом и технологией их изготовления, рациональными параметрами зацепления, условий смазки и системы ТО и Р при эксплуатационных нагрузках, не превышающих номинальные. Наибольшее влияние на долговечность зубчатых передач, и в первую очередь открытых крупномодульных, имеют технология изготовления зубчатых колес, условия функционирования. Одним из действенных технологических способов повышения долговечности является наклеп дробью при их изготовлении. Данный способ сочетает в себе как поверхностное деформационное упрочнение зубьев, так и создание микро рельефа на поверхности зубьев, что способствует повышению их износостойкости. Создание рациональных условий смазки применением централизованных смазочных систем позволяет добиться увеличения износостойкости зубчатых передач до 30 %.

Список литературы

1. Оценка остаточного ресурса крупномодульных зубчатых колес карьерных экскаваторов / С.Л. Иванов, И.Е. Звонарев, Д.И. Шишлянников, А.Я. Бурак, В.М. Николаев // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 11. – С. 28–33.
2. Иванов С.Л. Повышение ресурса трансмиссий горных машин на основе оценки энергонагруженности их элементов / Санкт-Петербург. гос. горн. ин-т (техн. ун-т). – СПб., 1999. – 92 с.

3. Каплун П.В. Способы повышения износостойкости и контактной выносливости зубчатых колес // Вісник НТУ «ХП». – 2015. – № 35. – С. 67–75.

4. Обоснование технологических способов повышения долговечности зубчатых колес / В.В. Поветкин [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2015. – № 1 (51). – С. 165–171.

5. Максаров В.В., Михайлов А.В., Иванов С.Л. Машины и оборудование [Электронный ресурс]: учебник / Нац. минер.-сырьевой ун-т «Горный». – СПб., 2015.

6. Исследования поверхностной твердости металла в областях повышенного износа и разрушения деталей горных машин / И.Е. Звонарев, С.Л. Иванов, Д.И. Шишлянников, А.С. Фокин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – Т. 13. – № 11. – С. 67–76.

7. Повышение ресурса открытых крупномодульных зубчатых передач улучшением условий смазки. / С.Л. Иванов [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. – № 9. – С. 10–13.

8. Приводные технологии [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.dtmov.ru/moventas/moventas.html> (дата обращения: 10.10.2018).

9. Ivanov S.L., Shishkin P.V. Manufacturing and design technology of Combined corrected gearing and nonstandard Radial clearance // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 194. – 2018. – 022013.

Получено 15.02.2019

Каплина Мария Геннадьевна – магистрант кафедры машиностроения, электромеханический факультет, Санкт-Петербургский горный университет.

Научный руководитель – **Иванов Сергей Леонидович** – Санкт-Петербургский горный университет, электромеханический факультет, профессор кафедры машиностроения, доктор технических наук, e-mail: kmash@spmi.ru.

Романов Вячеслав Александрович – аспирант кафедры горной электромеханики, горно-нефтяной факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет.