

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ, КОНСТРУКТОРСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЗУБЧАТЫХ МУФТ

Польченко В.В., Богуславский В.А., Феник Л.Н.

(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Тел./Факс: +38 (062)3050104; E-mail: tm@mech.dgtu.donetsk.ua

Abstract: *The results of the study that influence the durability of the toothed couplings, depending on the conditions of operation of the coupling. Installed leading types of wear teeth. Based on the identified main physico-chemical phenomena on the working surface aspects of the teeth studied engineering technological and operational methods of increasing the durability of the toothed couplings. Provides recommendations for improving the durability couplings.*

Keywords: *clutch gear, wear, adhesion, design, technology, operation, longevity*

Необходимость повышения производительности машин обусловила их качественные изменения, сопровождающиеся ростом энерговооруженности привода исполнительных органов. Большая часть энергии затрачивается на трение в машинах. Трение обычно сопровождается износом деталей и инструмента. Значительная часть (80-90%) деталей машин выбраковываются по износу и основная часть затрат на восстановление работоспособности машин связана с этим явлением.

Не лишены этих недостатков и зубчатые муфты.

Высокая жесткость зубьев и элементов зубчатых муфт, накопленная погрешность окружных шагов, несовпадение осей соединяемых валов приводит к неравномерному распределению нагрузки между зубьями. Эксплуатация зубчатых муфт требует непрерывного подвода смазки, долговечность их не обеспечивает требований практики.

В настоящее время накоплен определенный опыт конструирования, изготовления и эксплуатации зубчатых муфт [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Однако этого опыта недостаточно для существенного повышения работоспособности и долговечности зубчатых муфт.

Одной из причин отсутствия проверенных и обоснованных методов повышения работоспособности зубчатых муфт является представление зубчатых муфт как аналогов зубчатых передач, однако по нагрузочным, скоростным, смазочным и геометрическим параметрам зубчатые муфты резко отличаются от зубчатых передач. Поэтому прогнозирование сроков службы зубчатых муфт является актуальной задачей.

Целью работы является разработка конструкторских, технологических и эксплуатационных мероприятий, обеспечивающих повышение долговечности зубчатых муфт.

Большинство отказов зубчатых муфт происходит в результате интенсивного износа зубчатых венцов обоймы и втулки (рис.1) и, как следствие, поломки изношенных зубьев или увеличение выше допустимого предела вибраций машины, вызванных увеличенными зазорами в зацеплении муфты.

Имеющиеся исследования нарушений нормальной работы зубчатых муфт касаются в основном расчетов на прочность. Изучению физико-химических явлений на поверхностях трения зубчатых муфт уделено недостаточное внимание. Поэтому до сих пор нет единого мнения о ведущем виде износа зубьев зубчатых муфт, что является важнейшим в вопросе повышения долговечности муфт. Предпосылкой таких

исследований являются достижения науки в области трения и изнашивания деталей машин.

Б.И. Костецким в результате исследований процессов трения и износа деталей машин были сформулированы основные положения теории износа и разработана классификация видов износа по процессам, вызывающим износ. Основными видами износа, согласно этой классификации, являются: схватывание I рода, окислительный, схватывание II рода, абразивный, фреттинг-коррозия, усталостный. Важное место при исследовании видов износа и изнашивания деталей машин занимают вопросы изучения структурных превращений в металлах, влияние нагрузки и среды.

Фундаментальные исследования в области трения и изнашивания деталей машин создали необходимые предпосылки изучения физической сущности повреждаемости и методов оценки долговечности зубчатых муфт. Однако, без дополнительных исследований причин повреждения поверхностей зубьев зубчатых муфт и некоторых вопросов работоспособности их, не удастся применить существующие теории трения и изнашивания. И одним из таких вопросов является вопрос о ведущем виде износа зубьев муфты, зависящим от условий работы зубчатых муфт.

Исходя из назначения, зубчатые муфты работают в условиях относительного перекоса и смещения соединяемых валов. Это обстоятельство приводит к тому, что фрикционные явления в зоне контакта зубьев сложны и разнообразны. Основные особенности их состоят в следующем.

При передаче номинальных крутящих моментов по ГОСТ 5006-85 в зубьях муфты возникают значительные знакопеременные изгибающие напряжения. Контактные напряжения достигают 900-1000 МПа, что превышает предел текучести стали 45, из которой изготавливают стандартные муфты.

Скорости относительного перемещения зубьев также имеют знакопеременный характер и, в зависимости от угла перекоса соединяемых валов и максимально допустимой частоты вращения муфты по ГОСТ 5006-85, лежат в пределах 0,2...1,0 м/с. В реальных же механизмах скорости относительного перемещения не превышают 0,3...0,4 м/с.

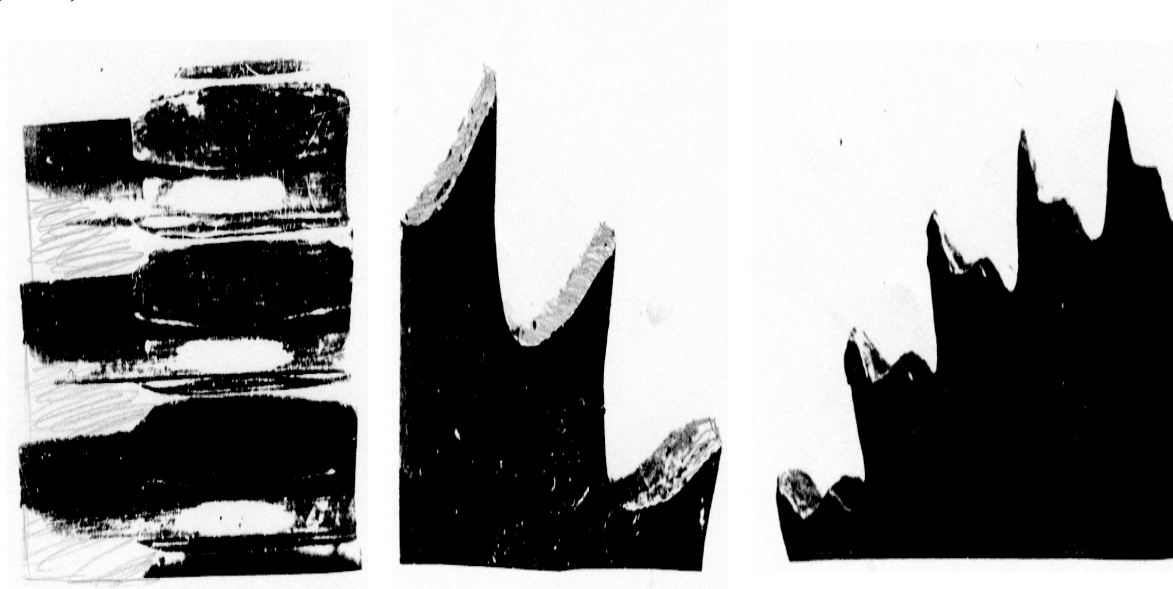


Рис. 1. Изношенные зубья зубчатой муфты

Величина относительного перемещения зубьев (возвратно-поступательного) зависит от размеров муфты, точности изготовления зубьев и угла перекоса соединяемых валов и изменяется от 0 (при отсутствии погрешностей изготовления и монтажа) до 3 мм (для углов перекоса до 1°).

Внутренний (обращенный в полость муфты) и наружный торцы зубчатой муфты подвергаются воздействиям различных по величине нагрузок. Внутренний торец испытывает нагрузки примерно в 1,3...1,6 раза выше, чем наружный.

Малая относительная скорость скольжения контактирующих зубьев не обеспечивает постоянного масляного клина, защищающего контакт зубьев при трении.

Зубчатые муфты применяют для передачи крутящего момента в широких диапазонах нагрузок (от 1000 Нм до 6300 Нм), частот вращения и относительного положения валов. Это обстоятельство приводит к возникновению при трении контактирующих зубьев различных видов разрушения.

Исследованию видов разрушения зубчатых муфт предшествовал сбор информации о долговечности зубчатых муфт, причинах выхода из строя, применяемый вид смазки, термическая обработка при изготовлении. В результате сбора информации удалось выявить основные недостатки в работе муфт. К ним следует отнести низкую долговечность зубчатого зацепления. Она составляет от 400 до 6000 часов в зависимости от конструкции и условий эксплуатации. Основной причиной низкой долговечности является интенсивный износ зубьев.

Методика исследования видов разрушения зубьев зубчатых муфт разработана на основе изучения состояния поверхностного слоя, подвергавшегося трению. С этой целью исследовались характеристики поверхностного слоя новой муфты, условия эксплуатации муфты и характеристики поверхностного слоя изношенных зубьев.

Для известных условий работы (частота вращения, величина относительного смещения соединяемых муфтой валов, передаваемый крутящий момент) по имеющимся в технической литературе зависимостям рассчитывались для каждой муфты скорости относительного скольжения зубьев, величина относительного перемещения зубьев, давление на рабочих поверхностях.

Определение вида разрушения зубьев производилось по состоянию рабочих поверхностей зубьев после работы муфты в производственных или лабораторных условиях. Качество поверхности до работы муфты определяется технологическим процессом изготовления. В результате работы трения поверхность контакта претерпевает изменения. Изменяются характер и величина шероховатости, механические и физические свойства трущихся поверхностей. Для определения шероховатости поверхности использовался профилограф-профилометр «Калибр-252», структура и рельеф поверхностей изучались на металлографическом микроскопе МИМ-7.

С целью исследования процессов упрочнения и разупрочнения, возникающих в поверхностных слоях при трении, изучалось изменение микротвердости поверхностного слоя зубьев. Измерение микротвердости производилось на микрошлифах, прошедших микроструктурный анализ. При этом применялся прибор ПМТ-3. По данным замеров строились графики изменения микротвердости в поверхностном слое.

Профиль изношенных зубьев исследовался при помощи записи профилограмм на профилографе-профилометре «Калибр-252» со специальной приставкой, которая позволяет запись профилограмм поверхностей с перепадом до 5 мм и вертикальным увеличением от 50 до 1000.

Изучение макро-геометрии изношенных зубьев установлено, что они в процессе изнашивания приобретают по высоте ярко выраженный профиль. Большому износу подвергается головка зуба втулки, так как она первой вступает в работу. При дальнейшей работе износ распространяется на остальную поверхность зуба и в итоге он приобретает треугольный профиль. Это явление хорошо согласуется с распределением усилий по зубьям зубчатой муфты.

Износ зубьев по длине асимметричен и неравномерный. Торцы зубьев, обращенные внутрь камеры муфты, изнашиваются в большей степени, чем противоположные. По длине зуба прямолинейная образующая превращается в криволинейную образующую. Это объясняется изменением величины нагрузки по длине зуба за время прохождения его в контактной зоне и перемещением пятна контакта к середине зуба при изменении угла положения относительно оси наибольших перекосов.

На исследованных зубьях наблюдалась значительная волнистость поверхности, которая образуется в результате изменения режимов работы агрегатов, соединяемых зубчатой муфтой, что приводит к изменению деформаций валов, корпусов, контактных и изгибных деформаций зубьев, изменению фактического контакта и перемещению контакта, как по длине зуба, так и по высоте.

Изучением условий работы зубчатых муфт и исследованиями поверхностей трения зубьев установлены почти все известные виды разрушения (по классификации Костецкого Б.И.): механо-химический (окислительный) износ, схватывание I рода, абразивный износ, фреттинг-коррозия, поломка зубьев. При этом установлена зависимость вида и величины износа от условий работы муфты.

Кроме этого на зубьях муфт повышенной твердости наблюдался усталостный износ. Проявлением этого вида разрушения является объемное выкрашивание частиц металла. Смятие зубьев наблюдалось чаще всего в конце срока службы муфты, когда изнашивается твердый закаленный слой, и в работу вступают нижние мягкие слои металла. При уменьшении толщины зуба возникают напряжения выше предела текучести и происходит объемное деформирование.

Излом зубьев вызывается, как правило, резким увеличением нагрузки при аварийных режимах работы. При нормальных режимах работы излом зубьев не наблюдался даже при износе на величину 0,5 толщины зуба.

На основании исследований видов разрушения и условий их возникновения, разработана классификация основных видов износа зубьев зубчатых муфт, которая позволяет на стадии проектирования (после установления основных параметров эксплуатации муфты) определить ведущий вид износа рабочих поверхностей зубьев.

Наиболее часто встречающиеся условия эксплуатации (величина возвратно-поступательного скольжения более 0,3 мм, давление в пределах 550-660 Мпа для закаленных и 300-350 Мпа для незакаленных зубьев и выше) приводят к неблагоприятному виду износа – схватыванию I рода.

Поэтому, разрабатывая эксплуатационные, конструкторские и технологические методы повышения долговечности зубчатых муфт, необходимо изменением основных параметров муфты устранять возможность возникновения схватывания I рода. Расчет долговечности зубчатых муфт необходимо вести с учетом наиболее часто встречающегося и опасного вида разрушения – схватывания I рода.

Известно, что повышение долговечности машин даже в небольшой степени ведет к большой экономии металла, уменьшению затрат на производство запасных деталей, сокращению объема числа ремонтов, а следовательно, увеличению фактически работающих машин.

Конструкторские методы повышения долговечности основываются на выборе материалов и сочетании твердости деталей в парах трения, замене в узлах трения скольжения трением качения и их сочетанием, изменением жесткости, податливости сопрягаемых деталей и т.п. Конструкторские методы повышения долговечности зубчатых муфт основываются на уточнении расчетов усилий и напряжений, действующих в деталях, и применении деталей, обладающих большой работоспособностью.

В практике эксплуатации зубчатых муфт имеются случаи, когда зубчатая муфта выходит из строя в результате разрыва винтов, крепящих крышки уплотнений. Наблюдения за работой зубчатых муфт, передающих крутящий момент в условиях наличия несоосности соединяемых валов, показали, что в процессе работы подвижный элемент муфты (обойма или промежуточный вал) смещается в осевом направлении. Выявлено, что смещение подвижных элементов всегда наблюдается в сторону ведущего вала и не зависит от направления вращения муфты.

В результате смещения подвижного элемента последний воздействует на торец зубчатой втулки через крышку с уплотнениями и нагружает винты, крепящие крышки. При определенном значении осевого усилия может наступить разрыв винтов.

Эксплуатация и расчет зубчатых муфт показала, что диаметр винтов, крепящих крышки с уплотнениями, явно не соответствует величине возникающего осевого усилия, а конструкция зубчатой обоймы не позволяет в местах крепления уплотнений установить винты большего диаметра и тем самым предотвратить их разрыв.

Необходимо отметить, что требования ГОСТ 5006-85 не учитывают возможности возникновения осевых усилий, и диаметр винтов принят без соответствующего учета осевых усилий.

Отсутствие рекомендаций по определению осевых усилий приводит к тому, что некоторые предприятия, эксплуатирующие зубчатые муфты, вынуждены приваривать крышки с уплотнениями к зубчатой обойме или удерживать обоймы от смещения прихватами и скобами различной конструкции.

Желание удержать зубчатую обойму от осевого смещения при помощи сварного соединения обоймы и крышки приводит к тому, что в результате прогрева металла в местах наложения сварных швов появляются пространственные погрешности в зубчатом зацеплении полумуфт, выражающиеся в ухудшении исходной точности зубчатого зацепления.

С другой стороны, дополнительный прогрев металла приводит к снижению исходной твердости зубьев полумуфт.

Наличие сварных швов, а также всевозможных прихватов и скоб на подвижных элементах муфты приводит к тому, что зубчатая обойма или промежуточный вал вынуждены вращаться вокруг осей, не являющихся для них главными центральными осями инерции. Неуравновешенность подвижных элементов муфты приводит к возникновению вибраций в звеньях машин, преждевременному износу или разрушению подшипников, со всеми вытекающими вредными последствиями.

Конструкторские методы повышения долговечности основываются на уточнении расчетов усилий и напряжений, действующих в деталях, и применении деталей и узлов, обладающих большой работоспособностью.

Применение зубчатых муфт без центрирования окружности выступов втулки по окружности впадин обоймы благоприятно сказывается на распределении нагрузки между зубьями. При увеличенном радиальном зазоре оси втулок и обоймы самоустанавливаются, компенсируя погрешности изготовления и монтажа, диаметрально расположенные зубья равномерно вступают в работу и число пар зубьев, передающих нагрузку, увеличивается. Эксперименты по сравнению нагрузочной

способности муфт с центрированием и без центрирования показывают, что число пар зубьев передающих нагрузку во втором случае увеличивается примерно на 20...25 %.

Существенное значение на равномерность распределения нагрузки между зубьями оказывает конструкция обода втулки, обеспечивающая податливость зубьев.

Зубья муфты имеют определенную податливость. При приложении нагрузки первая пара или первые пары зубьев деформируются, что приводит к перераспределению зазоров между всеми зубьями (зазоры уменьшаются). Если деформация первой пары зубьев больше или равна зазору во второй паре, то она вступит в контакт. При дальнейшем росте нагрузки все большее число пар зубьев контакт. Последней парой зубьев, вступившей в контакт, будет та, у которой зазор равен или меньше деформации пары зубьев, первой вступившей в работу.

Увеличение числа пар зубьев при приложении нагрузки происходит симметрично относительно пары, вступившей в контакт первой, так как зазоры также распределяются симметрично относительно оси наибольших перекосов. Угол взаимного контактирования зубьев втулки и обоймы изменяется с изменением угла положения зуба. С изменением угла взаимного контактирования изменяется жесткость зуба. В пределах контактной зоны площадка контакта перемещается между торцом и серединой зуба. Поэтому при прохождении пары зубьев через контактную зону ее жесткость непрерывно изменяется. Таким образом, в данный момент времени в передаче мощности участвуют зубья с различной жесткостью.

Полное перемещение зуба δ складывается из частных перемещений изгиба $\delta_{и}$, контактного сжатия $\delta_{к}$ и перемещения $\delta_{о}$ обусловленного упругой деформацией прилегающей к зубу части обода – $\delta = \delta_{и} + \delta_{к} + \delta_{о}$.

На составляющие суммарного перемещения, обусловленные деформациями изгиба и контактного сжатия, воздействовать, в смысле их увеличения, не представляется возможным без снижения изгибной и контактной прочности зуба. Перемещениями $\delta_{о}$, вызванными упругой деформацией прилегающей к зубу части обода, можно управлять оптимальной конструкцией обода зубчатого венца втулки.

В процессах изнашивания важную роль играют состояние и свойства тонкого поверхностного слоя деталей машин, от которых зависит характер образования и разрушения вторичных структур. Поверхностный слой формируется при окончательной механической обработке деталей машин. В настоящее время в машиностроении применяется большое число способов формирования поверхностного слоя деталей.

К основным методам, обеспечивающим повышение надежности и долговечности деталей машин, относятся: упрочнение пластическим деформированием, термообработка, наплавка и напыление износостойкого материала на рабочие поверхности деталей, электротехнические покрытия полимерными материалами и т. д. Эти методы дают возможность получать поверхностные слои с нужными эксплуатационными свойствами.

Из перечисленных методов наиболее технологичным для зубчатых муфт может быть дробеструйный наклеп. Для реализации технологического процесса могут быть использованы механические и пневматические установки. Они просты по устройству, обеспечивают концентрированный поток дроби и позволяют вести обработку внутренних и фасонных поверхностей, что важно при обработке зубьев.

Упрочнение поверхностного слоя зубьев муфты дробеструйным наклепом способствует повышению износостойкости рабочих поверхностей главным образом за счет наклепа. Повышение твердости, прочности и активизация поверхностного слоя при наклепе способствует установлению динамического равновесия разрушения и восстановления вторичных структур. А это оказывает существенное влияние на

расширение диапазона нагрузок, при которых происходит нормальный окислительный износ. На образцах зубчатых втулок, предварительно обработанных дробью, при трении в среде смазки Индустриальное 30, даже при высоких давлениях (до 890 МПа) не развивается схватывание I рода и стабильно сохраняется нормальный окислительный износ.

Существенное влияние на процессы изнашивания оказывает специфическая микрогеометрия поверхностного слоя. В результате ударного воздействия дроби поверхность образца покрывается многочисленными лунками, которые являются своего рода «карманами» для смазки. Это способствует более надежному удержанию смазки в зоне трения и выполнению основных функций ее – физическое разделение трущихся поверхностей, деконцентрация напряжений и химическое экранирование.

Одним из распространенных методов повышения долговечности зубчатых муфт является термическая обработка. Интенсивность изнашивания J при сухом и граничном трении в условиях пластического контакта с позиций молекулярно-механической теории трения обратно пропорциональна твердости HB в степени γ [1]

$$J \approx \frac{1}{HB^\gamma}, \quad \gamma = 1 + \frac{t+1}{2\nu},$$

где t - показатель кривой усталости, ν - константа кривой опорной поверхности.

Следовательно, для увеличения долговечности зубчатых муфт необходимо подвергать их упрочняющей термообработке, что не всегда предусматривается технологическими процессами машиностроительных предприятий, изготавливающих зубчатые муфты.

Одним из основных факторов, влияющих на износостойкость пар трения, является давление на контактирующих поверхностях. Давление зависит от нормального усилия и реальной площади контакта. Значительное влияние на реальную площадь контакта оказывает шероховатость поверхности, конфигурация микронеровностей. Различные способы обработки обеспечивают различные параметры шероховатости в различных направлениях. При одинаковой величине R_a могут быть различными максимальная и минимальная высота микронеровностей, параметры кривой опорной поверхности, что приводит к различным условиям трения.

Определение оптимальной высоты шероховатости, направления микронеровностей относительно вектора относительного перемещения контактирующих тел можно достичь увеличения износостойкости, по крайней мере, на периоде приработки. А технологическая наследственность обработанной поверхности проявится в период эксплуатации зубчатых муфт.

Повышение долговечности деталей машин достигается также применением смазочных материалов по физическим и химическим свойствам соответствующих условиям работы пар трения.

Параметры трения между зубьями муфты не обеспечивают создание устойчивого масляного клина. Поэтому для снижения износа в процессе трения должны непрерывно создаваться разделительные вторичные структуры, экранирующие непосредственное взаимодействие твердых тел.

Существует несколько видов вторичных структур. Первым видом вторичных структур являются граничные слои смазки, адсорбированной трением. Другие виды вторичных структур связаны с превращением металла. Основными факторами, влияющими на образование вторичных структур, являются: степень активизации

тонких поверхностных слоев металла в процессе деформирования, адсорбционная и химическая активность смазки и состав газовой среды.

Максимальный эффект функционального назначения смазочной среды достигается при применении масел с присадками. При этом возникает возможность управления процессами трения и износа, создание устойчивого протекания процесса.

Основным моментом для зубчатых муфт в повышении долговечности является устранение схватывания I рода. Устранение этого крайне нежелательного вида износа достигается на основе одновременного использования поверхностно-активных свойств смазок и их способности к химическому взаимодействию с металлами.

При устранении схватывания особое значение приобретает химически активные вещества, содержащие серу, фосфор, хлор и др. Главным фактором, влияющим на образование такими присадками вторичных структур, является температура трущихся поверхностей в месте контакта. Кроме этого существенное значение имеет прочность связи серы, фосфора и хлора в соединении. Чем слабее элементы серы, фосфора и хлора связаны в соединении, тем сильнее проявляются их антизадирные свойства.

Выше отмечалось, что износ зубчатых муфт обусловлен наличием в зоне контактирования реверсивного проскальзывания зубьев с различными амплитудами и частотами, определяемыми смещением валов и скоростями вращения муфты. За время одного оборота муфты на зубьях реализуется период реверсивного скольжения, возникают значительные переменные контактные и изгибные напряжения. При этом возникают процессы интенсивной пластической деформации тонких поверхностных слоев сопряженных тел их интенсивное взаимодействие со средой или между собой. При определенных условиях это приводит к возникновению разрушительных процессов на поверхностях зубьев – схватыванию.

Большое количество возможных конструктивных и эксплуатационных факторов, а также вариантов их сочетания, затрудняет выбор и рекомендации оптимального вида смазки для зубчатых муфт. Для каждой конкретной конструкции муфты и условий работы существует определенный вид смазки. При высоких скоростях относительного скольжения контактирующих зубьев, значительной вязкости масла и благоприятных геометрических параметрах зубьев возможен гидродинамический режим трения. Для тяжело нагруженных муфт имеет место условия граничного смазочного режима. При этом ведущую роль играют физическое и химическое воздействие смазки на поверхность трения.

Кроме этого, условия граничной смазки имеют место во всех зубчатых муфтах при пуске и остановке агрегатов независимо от режима смазки, установившегося при нормальной работе. Режим граничной смазки сопровождается повышенным износом поверхностей зубьев. Однако, интенсивность износа при этом в несколько раз меньше, чем при трении без смазки.

При высоких скоростях относительного перемещения контактирующих зубьев, значительной вязкости масла и благоприятных геометрических параметрах зубьев возможен гидродинамический режим трения. Для тяжело нагруженных муфт имеет место условия граничного смазочного режима. При таком режиме большую роль играют свойства граничной пленки, сопровождающиеся взаимодействием смазки с металлическими поверхностями.

При выбранных режимах работы общие требования к эксплуатационным свойствам масел следующие.

Масла должны способствовать минимизации нормального механохимического износа, обладать хорошей проникающей способностью в зону трения и устранять процессы схватывания контактирующих поверхностей.

В лучшей мере этому способствуют жидкие смазки. Но во многих случаях работа зубчатых муфт происходит в специфических условиях, например, на подъёмных кранах, установленных на открытом воздухе. Иногда в конструкции муфты применяют войлочные уплотнения. В этих условиях применение жидких смазочных материалов вызывает определенные конструктивные и эксплуатационные трудности и возникает необходимость в применении консистентных смазок.

Наибольшее применение находят консистентные смазки солидол Усс-1 ГОСТ 4366-80 и смазка графитовая ГОСТ 333-80. Характерной особенностью солидола является то, что он не растворяется в воде и не смачивается ею.

Смазка графитовая ГОСТ 333-80 представляет собой масло, приготовленное из жирных синтетических кислот и содержащее в своем составе 10% графита.

Изучение поверхностей зубьев муфт, работающих в среде графитовой смазки, при увеличении 50^x показало следующее. При малых нагрузках поверхности смазанные графитовой смазкой имеют большее количество царапин и следов повреждаемости абразивного характера. При больших нагрузках износ увеличивается, но поверхность трения почти не имеет царапин, что указывает на реализацию механохимического износа. При смазке трущихся поверхностей солидолом характер износа иной, чем при графитовой смазке. На поверхности трения сохраняются следы технологической обработки. При увеличении нагрузки на поверхности трения появляются риски, характерные для процесса схватывания и износ резко увеличивается.

Полученные различия в величине и характере износа можно объяснить тем, что графит, входящий в состав смазки имеет большое количество механических примесей с абразивными свойствами. Эти абразивные частицы вызывают резкое увеличение износа трущихся поверхностей при малых и средних нагрузках. При высоких нагрузках графитовые частицы смазки разрушаются и лучше проявляют свои смазочные свойства.

Наибольший противоизносный эффект проявляют масла с присадками серы, хлора и фосфора. Но каждая из названных присадок хорошо работает при определенной температуре в зоне трения, управлять которой при работе зубчатой муфтой невозможно. Поэтому эти присадки могут применяться ограниченно только для тех механизмов, которые работают в стабильном режиме.

Список литературы: 1. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин. М.: Машиностроение, 1984. 280 с. 2. Филиппов В.М. Теоретические и экспериментальные исследования зубчатых муфт. – Труды ДПИ «Горные машины и автоматика». Донецк, 1964, вып. 49, с.59-62. 3. Айрапетов Э.Л., Косарев О.И. Зубчатые муфты. М., Наука, 1982. 4. Попов А.П. Зубчатые муфты в судовых агрегатах.- Л.: Судостроение, 1985.- 240с., ил – (Качество и надежность). 5. Польшченко В.В., Богуславский В.А. Способы повышения долговечности зубчатых муфт// «Донбасс 2020: наука и техника производству» Сб. трудов IV научно-технической конференции. Донецк: ДонНТУ, 2008. С. 216-220. 6. Польшченко В.В., Сапаров Ф.А. Долговечность зубчатых муфт//Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. трудов международной научно-технической конференции в г. Севастополе, 14-19 сентября 2009г. в 4-х т.- Донецк: ДонНТУ, 2009.- Т.2.- С. 240-244.