

ОТЗЫВ

Официального оппонента, кандидата технических наук Измерова Михаила Александровича на диссертационную работу Кулешовой Екатерины Михайловны на тему «Повышение износостойкости червячных передач посредством применения наномодифицированного смазочного материала», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.3 - «Трение и износ в машинах»

Актуальность работы. Червячные передачи широко применяются в промышленности и машиностроении. Они обладают рядом преимуществ перед другими редукторами: в одном устройстве можно реализовать передаточное отношение до 100 и более, червячные редуктора обладают высокой плавностью работы и кинематической точностью, а также при определённых параметрах реализуется самоторможение. Для многих машин и механизмов сложно подобрать им замену, поэтому их применение получило широкое распространение.

Повышение работоспособности червячных передач связано с определёнными трудностями, так как контактное взаимодействие зубчатого зацепления происходит при высоких нагрузках и скоростях, а скольжение сопряжённых поверхностей имеет неблагоприятный угол для их смазывания, что в итоге приводит к их интенсивному изнашиванию, схватыванию и заеданию. Основными мерами повышения их работоспособности является подбор материала зубчатого венца колеса, повышение твёрдости зубьев червяка с их полированием, повышение точности изготовления и сборки, охлаждение и т.д. Эти методы, действительно, требуют больших затрат при реализации, а увеличение долговечности при этом получается не существенным.

Применение эффективного смазочного материала на фоне прочих методов повышения работоспособности зубчатого зацепления, позволило бы с минимальными затратами и высокой эффективностью увеличить долговечность червячной передачи, в связи с чем считаю, что тема диссертационной работы Кулешовой Е.М. «Повышение износостойкости червячных передач посредством применения наномодифицированного смазочного материала» является актуальной.

Научная новизна исследований и полученных результатов.

1. Автором выявлена новая закономерность влияния наномодифицированного смазочного материала на износостойкость червячной передачи и представлено её математическое описание.

2. На основе экспериментальных исследований получена новая зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки при наличии наномодифицированного смазочного материала, которая имеет участок с уменьшением интенсивности изнашивания при росте нагрузки, что даёт положительный эффект при реализации рабочего режима в этой области.

3. Автором получено новое уравнение, позволяющее учесть изменение коэффициента динамичности и наличие смазочного материала при оценке динамики изнашивания червячной передачи.

4. Автором установлены параметрические границы триботехнической работоспособности червячных передач при наличии следующих факторов: - температура смазочного материала; - скорость относительного скольжения зубьев; - нагрузка; - наличие наномодифицированного смазочного материала. Критические значения работоспособности червячной передачи за счёт применения наномодифицированного смазочного материала удалось повысить примерно на 20%.

Научная и практическая значимость работы.

1. Автором были разработаны технические предложения, позволяющие снизить трение и износ в червячной паре и увеличить срок ее

службы за счёт применения наномодифицированных смазочных материалов.

2. Автором были даны рекомендации по ускоренному проведению триботехнических испытаний червячных передач на износостойкость и долговечность без потери точности, а также по их экспериментальной оценке параметрических границ триботехнической работоспособности.

Кроме того, результаты диссертационной работы используются в ООО «Купер» при оценке эффективности новых смазочных материалов, а также в учебном процессе кафедры РК-3 в дисциплине «Трение и изнашивание механизмов. Смазочные материалы».

Структура и содержание диссертационной работы. Работа выглядит законченным научным трудом и имеет логическую структуру. Диссертация изложена на 145 страницах и состоит из введения, четырёх глав и заключения. Список литературы содержит 104 источника, в диссертации имеется 57 рисунков и 13 таблиц. Работа соответствует следующим пунктам Паспорта научных специальностей Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации по специальности 2.5.3 – «Трение и износ в машинах»:

- п. 3. – «Закономерности различных видов изнашивания и поверхностного разрушения при трении»;
- п. 10. – «Физическое и математическое моделирование процессов трения и изнашивания. Расчет и оптимизация узлов трения и сложных трибосистем»;
- п. 12. – «Диагностика трибосистем».

Во **Введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель, задачи, обозначены объект и предмет исследования, а также представлена научная новизна, практическая значимость работы и положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** приводится обзор конструкции червячных редукторов и областей их применения, а также методов оценки интенсивности изнашивания

червячных передач, определение предельного износа и методы повышения их износостойкости. Установлено, что основной причиной отказа червячных передач является износ боковых поверхностей зубьев из-за трения-скольжения, так как основной режим работы зубьев – это смешанный режим трения. Для таких условий работы важным звеном является смазка сопряжённых поверхностей, поэтому применение наномодифицированных смазочных материалов, дающих значительную толщину смазочной плёнки, позволит уменьшить интенсивность изнашивания за счёт разделения поверхностей в контакте.

Глава 2 посвящена изучению закономерности изнашивания поверхностей скольжения «сталь-бронза» на лабораторной установке. Предварительный анализ факторов, оказывающих значительное влияние на интенсивность изнашивания зубьев червячных передач показал, что основными факторами является величина нагрузки и наличие наномодифицированного смазочного материала.

Критериальный анализ условий работы зубчатого червячного зацепления выявил возможность применения лабораторной машины трения МТ-8 для оценки изнашивания зубьев при моделировании возвратно-поступательного режима трения на плоских сопряжённых образцах как альтернатива реальным испытаниям с минимальными погрешностями. Для оценки величины износа использовался довольно точный метод профилографирования одной и той же трассы (до испытаний и после) с помощью базовых меток.

Эксперимент, проведённый на плоских образцах из Ст20Х и Бр05Ц505 показал, что введение в контакт наномодифицированного смазочного материала «Стрибойл» привело к снижению интенсивности изнашивания образцов в сравнении с базовым маслом И- 20А и образованию на поверхности трения модифицированной защитной плёнки.

Для выявления закономерностей полученных процессов, автором был проведён регрессионный анализ экспериментальных данных и выполнен

углубленный химико-кинетический анализ механизма образования защитной плёнки, на основании которого получено уравнение оценки интенсивности изнашивания.

Глава 3 посвящена экспериментальному исследованию интенсивности изнашивания червячного зацепления с целью подтверждения полученного в главе 2 уравнения изнашивания.

В качестве испытательного стенда используется червячный редуктор типа 5Ч-80, подключенный к электродвигателю, а нагрузка реализована в виде электромагнитного тормоза. Отличительной особенностью испытаний является постоянная запись графика крутящего момента на входном и выходном валу, что даёт возможность по разнице значений момента выявить внутреннюю динамику редуктора, которая возникает из-за погрешностей изготовления элементов передачи и изменения состояния поверхности бронз, что приводит к скачкообразному изменению мгновенного коэффициента трения и возникновению автоколебаний.

Регрессионный анализ экспериментальных данных по оценке интенсивности изнашивания лабораторных образцов и стендовых испытаний показал хорошую сходимость результатов, что также подтверждает предложенную в главе 2 уравнение изнашивания.

Анализ динамики передачи на основе испытаний выявил пик амплитуды колебаний на частоте 1,6 Гц для всех случаев нагружения, а анализ коэффициента динамичности показал, что для случая использования наномодифицированного смазочного материала «Стрибойл» величина предельной нагрузки, соответствующей предзадирному состоянию узла трения, выросла почти на 40%.

Глава 4 посвящена разработке уравнения динамики изнашивания и оценке параметрических границ триботехнической работоспособности червячной передачи с учетом установленных факторов.

Установлено, что отказ червячной передачи происходит при достижении коэффициента динамичности определённого предельного значения,

соответствующего началу схватывания, и для каждого такого случая это будет соответствовать некоторой величине износа. Введение в трибосистему наномодифицированного смазочного материала снижает коэффициент динамичности и позволяет работать передаче при большем износе, что расширяет параметрические границы работоспособности передачи.

Было установлено, что коэффициент динамичности, определяемый предельный износ, функционально связан с интенсивностью изнашивания, на основании чего удалось получить формулу оценки остаточного ресурса передачи с учётом текущей интенсивности изнашивания и коэффициента динамичности. При этом ресурс передачи с наномодифицированным смазочным материалом значительно вырос в сравнении с базовым маслом.

Кроме того, были проведены экспериментальные исследования влияния предельных значений нагрузки, скорости относительного скольжения зубьев и температуры на вероятность безотказной работы по критерию заедания. По всем критериям наличие наномодифицированного смазочного материала показало существенное повышение вероятности безотказной работы.

Обоснованность научных положений и выводов заключается в применении автором современных методов расчёта работоспособности червячных редукторов с учётом внутренней динамики передачи, теорий оценки интенсивности изнашивания и применения регрессионного анализа при построении моделей.

Достоверность результатов работы подтверждается проработкой достаточного количества литературы по теме исследований, хорошего согласования результатов экспериментов с расчётами, применения современных средств анализа данных, а также широкого освещения результатов работы на конференциях Российского и международного уровня и достаточного количества публикаций в рецензируемых научных журналах.

Замечания и рекомендации по диссертации. К настоящей работе имеется ряд замечаний.

1. Анализ таблицы 3 (стр. 65) показывает, что при наличии наномодифицированной добавки к маслу износ бронзы отсутствует, а стальная поверхность получает покрытие. Это значит, что плёнка гарантированно разделяет поверхности при данной нагрузке и не даёт фактического контакта поверхностей, а следовательно, и износа. Но при стендовых испытаниях износ зубьев всё же есть, т.е. плёнка разрушается. Возможно, лабораторные испытания проходили при очень малых нагрузках, или имели малую длительность?
 2. В главе 2 (стр. 78) было установлено, что наличие наномодифицированной добавки оказалось более главным фактором, чем нагрузка. Я предполагаю, что при больших нагрузках плёнка не сможет давать такой эффект, т.к. будет разрушена. Оценивалась ли предельная несущая способность плёнки?
 3. На стр. 90 говорится об обратной связи между величиной нагружающего момента и изменением момента на быстроходном валу. В чём заключается эта обратная связь?
 4. Почему процентное соотношение наномодифицированной добавки к маслу ограничивается величиной 0,5%? Может при большем её содержании эффект был бы лучше?
 5. Не совсем понятно, почему стендовые испытания ускоренные?
- Замечания не снижают общей научной и практической ценности работы и носят рекомендательный характер.

Основные публикации работы. Результаты работы опубликованы в 14 изданиях, из которых 8 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в индексируемых международных базах Scopus/WoS, а отдельные результаты диссертации докладывались на 9 международных и всероссийских конференциях.

Рекомендации по использованию результатов работы. Разработанные автором методики были бы полезны при оценке долговечности

червячных передач на основе их текущего состояния, а также при оценке эффективности применения наномодифицированных добавок в смазочный материал.

Заключение

Диссертационная работа Кулешовой Екатерины Михайловны на тему «Повышение износостойкости червячных передач посредством применения наномодифицированного смазочного материала», является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно и на высоком научном уровне, в которой решена задача повышения износостойкости червячных передач путём применения наномодифицированных добавок к смазочному материалу. Диссертационная работа Кулешовой Екатерины Михайловны соответствует требованиям пункта 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Кулешова Екатерина Михайловна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.3 - «Трение и износ в машинах».

Официальный оппонент

Кандидат технических наук (спец. 05.02.04),

доцент, доцент кафедры "Трубопроводные транспортные системы" ФГБОУ ВО

«Брянский государственный

технический университет» _____

_____ Измеров Михаил Александрович

«26» апреля 2024 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет" Адрес: 241035, Брянская область, город Брянск, бульвар 50 лет Октября, дом 7. Тел. +7 (961) 002-72-92. E-mail: m.izmerov@yandex.ru

