

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.833:620.191

МАШИН Юрий Викторович

**ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ПИТТИНГА КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ПЕРЕДАЧ
ПУТЕМ КОРРЕКТИРОВКИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ В
УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**по специальности 05.02.02
«Машиноведение, системы приводов и детали машин»**

Могилев 2008

Работа выполнена в Государственном учреждении высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет»

Научный руководитель **Игнатищев Руслан Михайлович**
заслуженный деятель науки Республики Беларусь,
доктор технических наук, профессор,
ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»,
кафедра «Теоретическая механика», г. Могилев

Официальные оппоненты **Басинюк Владимир Леонидович**
доктор технических наук, доцент,
заведующий лабораторией «Трибодиагностика»
ГНУ «Объединенный институт машиностроения
НАН Республики Беларусь», г. Минск;

Гобралев Николай Николаевич
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Начертательная геометрия
и черчение» ГУ ВПО «Белорусско-Российский
университет», г. Могилев

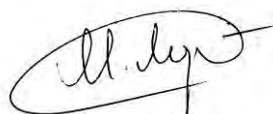
Оппонирующая организация ЗАО «Солигорский институт проблем
ресурсосбережения с опытным производством»,
г. Солигорск

Защита состоится «3» декабря 2008 г. в 15⁰⁰ часов на заседании Совета по защите диссертаций К 02.18.02 при ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» по адресу: 212000, г. Могилев, пр. Мира, 43, корп. 1, ауд. 325, lustenkov@yandex.ru, телефон ученого секретаря совета: +37529 687 51 21.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусско-Российского университета.

Автореферат разослан 31 октября 2008 г.

Ученый секретарь Совета по защите диссертаций, кандидат технических наук, доцент



М.Е. Лустенков

Электронная библиотека
Белорусско-Российского университета

Электронная библиотека
Белорусско-Российского университета

ВВЕДЕНИЕ

Более половины вырабатываемой человечеством энергии преобразуется через зубчатые передачи. Большинство из них работает в условиях смазки. При этом наиболее распространенной причиной потери работоспособности зубчатых передач является контактное выкрашивание рабочих поверхностей зубьев (питтинг). Проблема его предупреждения в зубчатых передачах до сих пор не решена, причем, как показал анализ результатов ряда исследований, преимущественно крупномодульных зубчатых передач технологического оборудования, существенное влияние на контактную усталостную прочность оказывает неравномерный износ по высоте рабочих поверхностей зубьев, что не учитывается существующими методиками расчета.

Одним из эффективных способов снижения контактных напряжений в зубчатых передачах, с целью предупреждения питтинга, является восстановление первоначальных (близких к теоретическим) значений радиусов кривизны в опасных зонах. Однако до настоящего времени отсутствуют методики технически обоснованных рекомендаций по использованию этого подхода применительно к крупногабаритным зубчатым передачам, позволяющие установить рациональные параметры корректировки рабочих профилей зубьев и сроки проведения этих работ, что подтверждает актуальность исследований настоящей работы.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Научные исследования по теме диссертации проводились в рамках выполнения государственной программы ориентированно-фундаментальных исследований: ГПОФИ «Надежность и безопасность – 07» по разделу «Исследование задач механики контактного взаимодействия и механики трещин в передачах зацеплением» (2004 – 2005 гг.), а также по заданию Министерства образования Республики Беларусь в рамках выполнения научно-исследовательской работы «Разработка методов предупреждения питтинга в эвольвентных цилиндрических зубчатых передачах», 2003 – 2005 гг., №ГР 2003417.

Цель и задачи исследования

Цель: разработать метод предупреждения питтинга крупномодульных передач закрытого типа путем корректировки рабочих поверхностей зубьев в условиях эксплуатации.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Обосновать актуальность и рациональную область проведения работ по предупреждению питтинга в зубчатых передачах.

2. На основе анализа результатов моделирования и экспериментальных исследований установить закономерности влияния неравномерности износа по высоте зубьев зубчатых колес на значения действительных радиусов кривизны в околополюсных зонах при различных габаритных размерах зубчатых передач,

разработать методику количественной оценки этого влияния на их остаточный ресурс, позволяющую установить рациональные параметры корректировки профилей зубьев и сроки проведения этих работ.

3. Оценить возможности улучшения виброакустических характеристик редукторов при технически обоснованной корректировке изношенных профилей зубьев, возможности ее многократного применения с сохранением качественных показателей зубчатых передач.

4. Провести исследования влияния твердости рабочих поверхностей зубьев на скорость возрастания кривизны, обусловленную их износом, разработать методику учета числа циклов нагружений до начала зарождения усталостных трещин в опасных по питтингу зонах.

5. Разработать устройства для контроля и корректировки рабочих профилей частично изношенных зубьев, позволяющих реализовать разработанные методические подходы и минимизировать отрицательное влияние корректировки на ресурс восстанавливаемого оборудования.

Объект исследования: крупномодульные ($m \geq 4$ мм) закрытые эвольвентные зубчатые передачи, преимущественно технологического оборудования.

Предмет исследований: ресурс зубчатых передач и пути его увеличения.

Обоснование выбора объекта исследования. Важность увеличения ресурса зубчатых передач можно иллюстрировать следующими тремя примерами: затраты по замене зубчатых колёс одного мультипликатора компрессора «Demag» Vк-25 С (установлены на Заводе органического синтеза ОАО «Могилёвхимволокно») составляют порядка \$100 000. Отпускная цена для зубчатого колеса колесомоторного блока локомотива ЧМЭЗ составляет порядка \$2000, а для зубчатой пары кривошипного листогибочного пресса ИГ 1334А – \$6000.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся результаты моделирования, теоретических и экспериментальных исследований, направленные на предупреждение питтинга зубьев крупномодульных передач, позволяющие снизить вероятность образования питтинга путем корректировки рабочих поверхностей зубьев без ухудшения виброакустической активности зацепления, включающие:

– установленные в результате теоретических и экспериментальных исследований закономерности влияния износов зубьев и твердости их рабочих поверхностей, а также радиусов основных окружностей зубчатых колес на увеличение контактных напряжений и на остаточный ресурс зубчатых передач;

– методику, учитывающую габариты зубчатых колес, количественной и качественной оценки и учета влияния максимальных по профилю зубьев износов на значения радиусов кривизны;

– результаты исследований изменения уровня виброактивности зубчатого зацепления в зависимости от величины эксплуатационных износов рабочих поверхностей зубьев, позволяющие использовать параметры виброактивности при определении целесообразности корректирующих операций и оценке их эффективности;

– результаты исследований и методику определения числа циклов нагружений до начала зарождения в опасных по питтингу зонах усталостных трещин в зависимости от коэффициента возрастания кривизны, учитывающего отношение действительного радиуса кривизны к теоретическому, что позволяет спрогнозировать скорость возрастания кривизн на рабочих поверхностях зубьев в опасных по питтингу зонах в зависимости от твердости материала и габаритных размеров зубчатых колес;

– разработанные и изготовленные конструкции устройств, позволяющие определять действительные значения радиусов кривизны в опасных по питтингу зонах и осуществлять корректировку рабочих поверхностей зубьев крупномодульных передач при минимизации ее отрицательного влияния на ресурс восстанавливаемого оборудования.

Личный вклад соискателя

Основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно. Автор самостоятельно обосновывал актуальность исследований, разработал методику обмеров радиусов кривизны, разработал методику корректировки профилей зубьев и провел апробацию на местах эксплуатации зубчатых передач. Цель и задачи исследований сформулированы совместно с научным руководителем д-ром техн. наук, проф. Р.М. Игнатищевым. Совместно с научным руководителем и аспирантом В.А. Кемовой (В.А. Логвиновой) проведен анализ влияния неравномерных по высоте зубьев износов на радиусы кривизны и динамические характеристики зубчатого зацепления. Автор участвовал в создании приборно-технического обеспечения разработанного метода. В процессе исследований соискатель являлся ответственным исполнителем НИР. Отдельные теоретические исследования проводились совместно с Г.А. Колосовым, М.Э. Подымако, Д.С. Галюжиным, П.В. Другаченко, а экспериментальные – с В.В. Кулешовым и О.Н. Кутасом, что отражено в совместных публикациях.

Апробация результатов диссертации

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались: на МНТК «Современные технологии, машины и материалы для зимнего содержания автомобильных дорог», Могилев 2003 г.; РНТК «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности», Могилев 2004 г.; МНТК «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии», Могилев 2004 г.; МНТК «Современные методы проектирования машин», Минск 2004 г.; МНТК «Машиноведение-2004», Гомель 2004 г.; РНТК «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности», Могилев 2005 г.; МНПК «Содружество наук. Барановичи-2005», Барановичи 2005 г.; МНТК «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии», Могилев 2005 г.; РНМС «Научно-методические основы применения информационных технологий в преподавании механики и научных исследованиях», Минск 2005 г.; РНТК «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности», Могилев 2006 г.; МНТК «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии», Могилев 2006 г.; МНТК «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности», Могилев 2007 г.

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 33 печатных работах, в том числе в одной брошюре, 12 статьях, семь из которых включены в перечень ВАКа (7,2 а.л.), 15 материалах конференций, а также в одной депонированной рукописи статьи. Общий объем опубликованных работ составляет 130 страниц. Кроме этого, основные результаты диссертации включены в два отчета по госбюджетным финансируемым НИР. Получено четыре патента, в том числе один на полезную модель.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из титульного листа, оглавления, введения, общей характеристики работы, основной части, включающей 4 главы, заключения, библиографического списка, включающего список использованных источников из 129 наименований, в том числе 4 иностранных и 125 отечественных источников и списка публикаций соискателя из 33 наименований, приложений. Общий объем работы – 196 страниц, содержащих 81 страницу основного текста, 101 иллюстрацию на 40 страницах, 8 таблиц на 8 страницах, список литературы на 14 страницах, 12 приложений на 53 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении и общей характеристике работы обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации дан анализ развития представлений по проблеме питтинга.

Первый этап развития представлений по проблеме питтинга возглавил Генрих Герц, который опубликовал результаты своих исследований упругого взаимодействия стального шара с плоскостью и с шаром. Сходимость теоретически предсказываемых формулой Г. Герца результатов и получаемых в эксперименте подтвердили также R. Stribeck, А.Н. Динник, В.Н. Трейер, G. Orpel, S. Wey, A. Fepfel, K. Lafleure, М.М. Саверин, Н.М. Беляев, А.С. Кравчук и ряд других исследователей.

На втором этапе развития представлений по проблеме питтинга усилия учёных были направлены на создание базы данных по пределам контактной выносливости и увязке их с действующими контактными напряжениями. Большой вклад внесли: А.И. Петрусевич, А.В. Осипян, Г.К. Трубин, Б.Д. Грозин, С.В. Пинегин, М.М. Хрущов, Б.И. Костецкий, Н.Ф. Кузьмин, Л.Б. Эрлих, З.П. Павлов, Я.Г. Кистьян, Л.С. Борович, М.М. Саверин, Р.Р. Гальпер, Б.С. Ковальский, Д.Н. Решетов, В.Н. Кудрявцев, К.И. Заблонский, А.И. Кораблёв, Г.И. Скундин, Е.Г. Гинзбург, Е.И. Тескер, О.В. Берестнев, В.Л. Басинюк, И.В. Жук, и многих др. Среди зарубежных ученых заслуживают внимания работы S. Way, G. Niemann, M. Ulrich, H. Merritt.

Появившаяся база данных по пределам контактной выносливости материалов для зубчатых передач позволила создать большое количество

методик их расчёта на контактную усталостную прочность – Петрусевича, Кудрявцева, ЦНИИТМАШ, НКМЗ и др. Большинство исследователей приняло формулу Г. Герца в качестве критерия, позволяющего решить проблему предупреждения питтинга путём сопоставления действующих напряжений с их предельно допускаемыми значениями.

Однако в связи с неравномерным по высоте рабочих поверхностей зубьев износом в процессе эксплуатации радиусы кривизны контактирующих поверхностей уменьшаются, что приводит к соответствующему увеличению контактных напряжений и сокращению ресурса передач, не учитываемому существующими методиками расчетов зубчатых передач на контактную прочность.

На имеющее место явление существенного возрастания контактных напряжений в зонах перехода начальных ножек зубьев в головки, в результате неравномерного по высоте рабочих профилей зубьев износа, приводящего к уменьшению радиусов кривизны в опасных по питтингу зонах, первым обратил внимание Р.М. Игнатищев. Широко известны работы в этой области В.П. Онищенко, В.И. Егорова, С.Н. Кима, Г.Д. Малышева, В.Л. Дорофеева, А.Г. Журавлева, которые также пришли к выводу о существенности влияния на действительный радиус кривизны рабочих поверхностей зубьев погрешностей изготовления и различных видов изнашивания.

В ходе собственных эксплуатационных обследований зубчатых передач, проведенных на РУПП «БелАЗ – МоАЗ», РУПП «Гранит», газокompрессорной станции «Минская», «Белвтормет», управления механизации УМ – 120; Локомотивном хозяйстве БелЖД; ОАО «Могилевхимволокно» и др., установлено, что исследования, направляемые на предупреждение питтинга в зубчатых передачах, и в настоящее время являются актуальными.

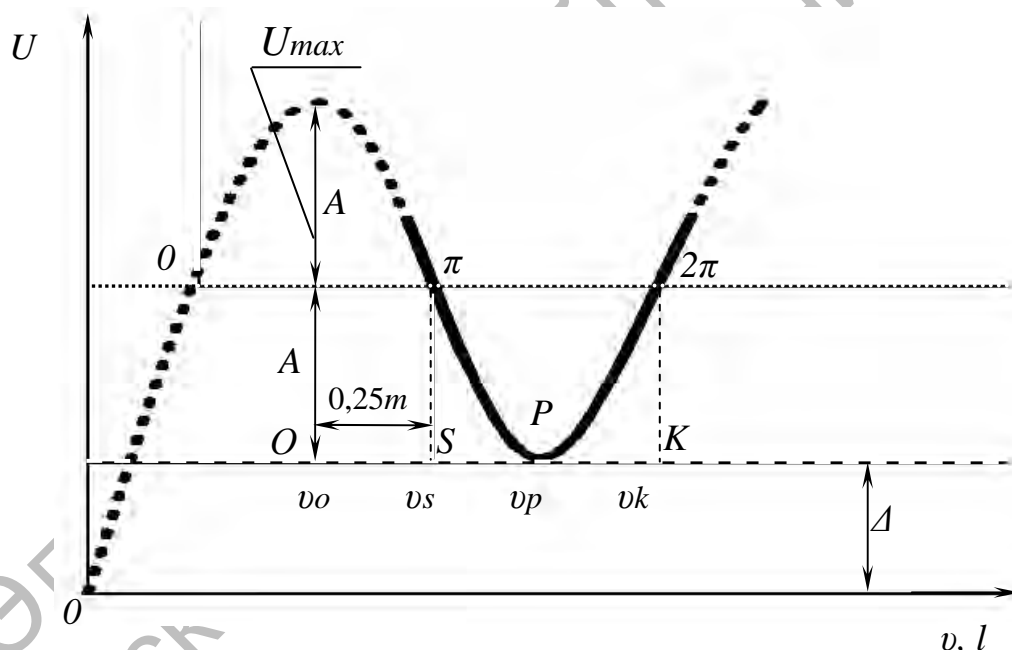
Исходя из вышесказанного следует, что разработка метода предупреждения питтинга крупномодульных зубчатых передач на основе повышения достоверности прогнозирования остаточного ресурса и технически обоснованного выбора сроков проведения корректирующих операций, позволит повысить экономическую эффективность эксплуатации редуцирующих агрегатов.

Вторая глава посвящена теоретическим исследованиям.

Для оценки контактных напряжений в зубчатых передачах, как правило, используют формулу Г. Герца. Но на величины контактных напряжений оказывает влияние большее число факторов, чем те, которые учитывал Г. Герц. Поэтому в ряде случаев более совершенным для прочностных расчетов является метод конечно-элементного моделирования (МКЭ). В связи с этим нами была проверена сходимость результатов, получаемых по формуле Г. Герца и метода конечно-элементного моделирования. В качестве объекта исследования была выбрана зубчатая передача колесомоторного блока (КМБ) локомотива ЧМЭЗ. Сопоставлением среднеарифметических значений подсчитанных величин установлено, что контактные напряжения, вычисленные с использованием МКЭ, оказались в 1,16 – 1,21 раза меньшими, чем вычисленные по ГОСТ 21354 – 87, основанного на формуле Г. Герца.

В существующих теориях зацеплений всякое отклонение рабочих профилей зубьев от эвольвент рассматривается как недопустимый факт, приводящий к потере качества передачи, однако реальные профили поверхностей зубьев отличаются от эвольвент. Уже на стадии изготовления зубчатых колес ГОСТ 1643–81 допускает отклонение рабочих профилей зубьев от эвольвент. Анализ профилей зубьев бывших в эксплуатации зубчатых колес позволил установить: для зубчатых колес с модулем $m = 10$ мм в результате износа рабочего профиля зуба, равного 0,1 мм, отклонение действительных профилей от теоретических эвольвент превышает допуск даже для 8-й степени точности (по ГОСТ 1643–81) более чем в 3 раза.

Нами также исследовалось влияние неравномерного по высоте рабочих профилей зубьев износа на кривизну в опасных по питтингу зонах с акцентом на крупногабаритные зубчатые передачи. На основе анализа результатов исследования характера износа рабочих профилей зубьев крупномодульных зубчатых передач было установлено, что в ряде случаев экспериментальная обобщенная кривая износов может быть представлена в виде периодической функции типа \sin с амплитудой износа, равной A (см. рисунок 1).



U – износ боковой поверхности зуба, мкм; P – полюс зацепления (зона перехода ножек зубьев в головки); v – угол развернутости эвольвенты, град; l – длина выпрямленной эвольвенты; Δ – износ в полюсе; U_{max} – износ боковой поверхности зубьев по середине ножки; v_o, v_s, v_p, v_k – значения угла развернутости эвольвенты в расчетных точках;
участки $v_o v_s = v_s v_p = v_p v_k = 0,25 m$

Рисунок 1 – К аппроксимации околополюсной зоны активного профиля зуба

Используя зависимость кривизны профиля от величины износа, нами была получено выражение для определения действительной кривизны профилей зубьев K , отражающее влияние величины износа рабочих поверхностей зубьев на кривизну в опасных по питтингу зонах, аппроксимирующихся функцией \sin :

$$K = \frac{1}{\rho} = \frac{1 + \left(\frac{d(\Delta + A + A \sin(k \cdot v + \mu))}{dv} \cdot \frac{1}{r_b \cdot v} \right)^2 + \frac{d}{dv} \left(\frac{d(\Delta + A + A \sin(k \cdot v + \mu))}{dv} \cdot \frac{1}{r_b \cdot v} \right)}{\left[1 + \left(\frac{d(\Delta + A + A \sin(k \cdot v + \mu))}{dv} \cdot \frac{1}{r_b \cdot v} \right)^2 \right] \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{d(\Delta + A + A \sin(k \cdot v + \mu))}{dv} \right)^2 + (r_b \cdot v - (\Delta + A + A \sin(k \cdot v + \mu)))^2} \right]}, \quad (1)$$

где ρ – радиус кривизны, мм;

A – амплитуда износа, мм;

Δ – износ в полюсе, мм;

k, μ – масштабные коэффициенты, связывающие угол развернутости эвольвенты и ее длину;

v – угол развернутости эвольвенты, град ;

r_b – радиус основной окружности, мм.

Анализ зависимости (1) с использованием ЭВМ позволил исследовать влияние величины износов зубьев на радиусы кривизны в опасных по питтингу зонах в зависимости от значения радиуса основной окружности. В частности, на примере зубчатых колес КМБ локомотива ЧМЭЗ, имеющих величину радиуса основной окружности, равную $r_b = 357,08$ мм ($m = 10$ мм, $z = 76$, $x_{\Sigma} = 0$), было показано, что допустимый по профилю износ зубьев величиною 0,1 мм приводит к уменьшению радиуса кривизны в 3 раза и к возрастанию контактных напряжений в 1,7 раз, а для зубчатого колеса мультипликатора компрессора «Demag» Vк-25 С, имеющего радиус основной окружности $r_b = 602,57$ мм ($m = 4,5$ мм, $z = 285$, $x_{\Sigma} = 0$), уменьшение радиуса кривизны в 3 раза наблюдается уже при износе в 0,01 мм. Также было установлено, что радиусы кривизны в околополюсной зоне (на длине, равной 0,3 модуля зацепления) мало отличаются друг от друга, т.е. определение кривизн путем аппроксимации участков действительных профилей дугами окружностей, с одной стороны, и синусоидами, с другой стороны, дают практически одинаковые результаты.

Также в ходе теоретических исследований был получен коэффициент возрастания кривизн (Θ_0), равный отношению действительной кривизны рабочих профилей зубьев K к исходной (эвольвентной) $K_{\text{э}}$ в зависимости от амплитуды A максимальных по профилю износов, модуля и чисел зубьев:

$$\Theta_0 = \frac{K}{K_{\text{э}}} = 1 + \frac{A \cdot k^2}{r_b \cdot \text{tg}(\alpha)}. \quad (2)$$

Графики возрастания кривизн в зависимости от максимальных по профилю износов, модулей и чисел зубьев зубчатых колес построены с использованием ЭВМ (см. рисунок 2), амплитуда износа задается в долях от модуля зацепления.

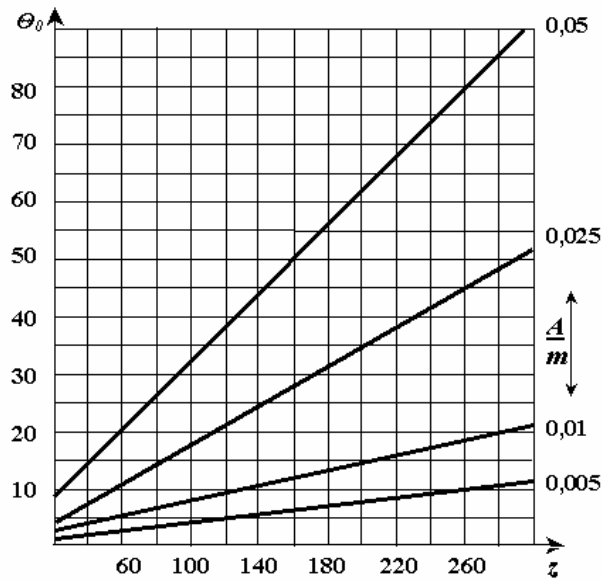


Рисунок 2 – Графики значений коэффициента возрастания кривизн

Анализ данных по пределам контактной выносливости и учет действительных кривизн рабочих поверхностей зубьев позволили получить математическую зависимость (3) и построить графики (см. рисунок 3) для определения числа циклов напряжений (N_o) до начала зарождения в опасных по питтингу зонах усталостных трещин в зависимости от коэффициента возрастания кривизн (Θ_o) и твёрдости поверхности, что позволяет повысить точность прогнозирования остаточного ресурса трансмиссий на основе оценки скорости возрастания кривизны рабочих поверхностей зубьев.

$$N_o = \frac{\Theta_o}{25 \cdot \text{HB}^{2,4} + 0,3 \cdot 10^{-7}} \quad (3)$$

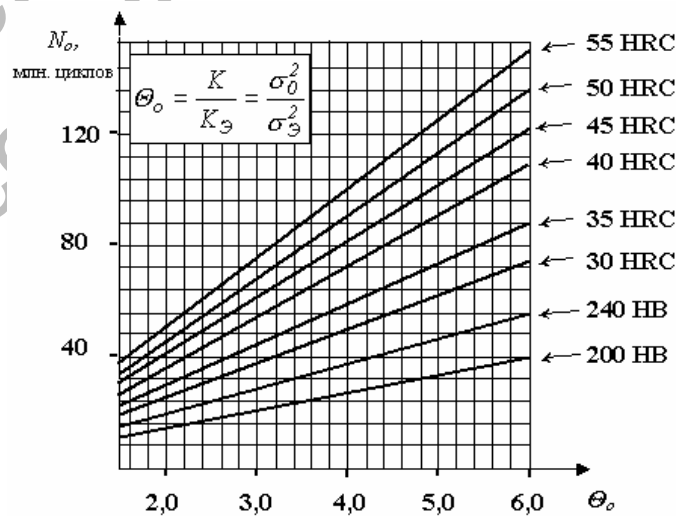
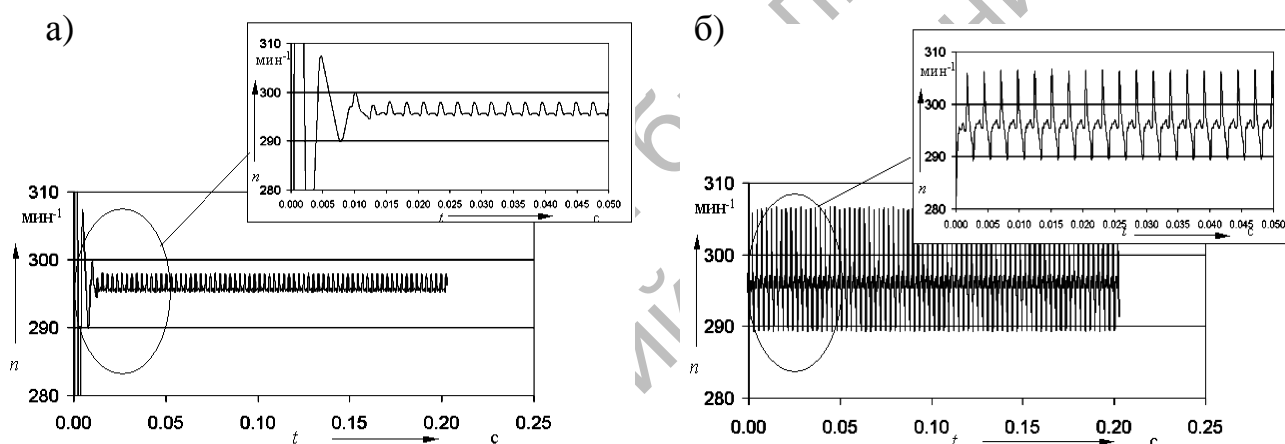


Рисунок 3 – Графики для определения числа циклов напряжений (N_o) до начала зарождения усталостных трещин в зависимости от коэффициента возрастания кривизн (Θ_o) и твёрдости поверхности

Также исследовалось влияние износа и корректировок рабочих поверхностей зубьев бывших в эксплуатации зубчатых передач на плавность вращения выходного вала. Для этого были использованы методы компьютерного моделирования. Объектом исследования выступало зубчатое зацепление КМБ локомотива ЧМЭЗ. Для сопоставительного анализа было создано три модели зубчатой передачи: с теоретическим эвольвентным профилем зубьев; модель с износом зубьев ведомого зубчатого колеса и модель с откорректированными профилями зубьев ведомого зубчатого колеса.

Полученные в ходе моделирования результаты оценки зависимости частоты вращения выходного вала от времени свидетельствовали, что в модели с изношенным профилем зубьев (см. рисунок 4, б) наблюдается почти десятикратное увеличение размаха колебаний частоты вращения выходного вала ($\Delta n=16 \text{ мин}^{-1}$) по сравнению с эвольвентной моделью ($\Delta n=1,67 \text{ мин}^{-1}$) зубчатого зацепления (см. рисунок 4, а). В модели с откорректированными профилями зубьев (см. рисунок 5) размах колебаний частоты вращения выходного вала составляет $\Delta n=6,3 \text{ мин}^{-1}$, что в 2,5 раза ниже, чем в модели с изношенными профилями зубьев.



а – модель с эвольвентным профилем зубьев; б – модель с изношенным профилем зубьев

Рисунок 4 – Зависимость частоты вращения выходного вала от времени

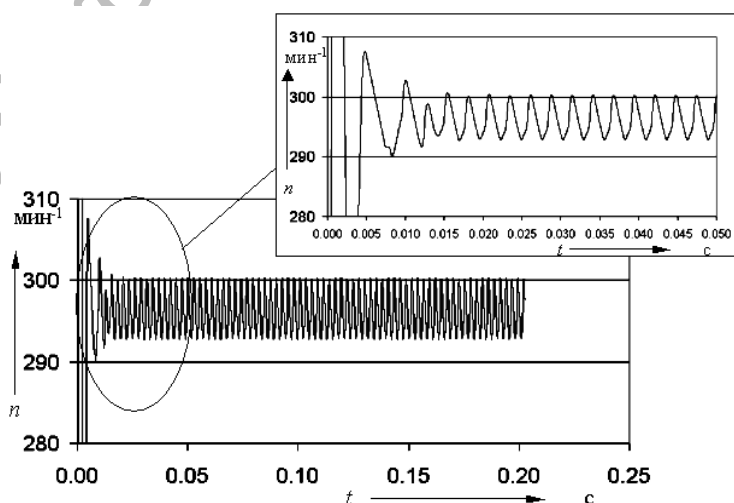


Рисунок 5 – Зависимость частоты вращения выходного вала от времени для модели с откорректированными профилями зубьев

В результате анализа углового ускорения выходного вала было установлено, что в модели с изношенными профилями зубьев размах углового ускорения может увеличиваться до 20 раз по сравнению с угловым ускорением для исходной эвольвентной модели. При анализе модели с откорректированными профилями зубьев ведомого зубчатого колеса было отмечено снижение размаха углового ускорения выходного вала более чем в восемь раз по сравнению с изношенной моделью зубчатого зацепления. Также в ходе моделирования было исследовано колебание угла поворота выходного вала. На основе полученных значений колебаний угла поворота выходного зубчатого колеса была установлена угловая, а затем и линейная кинематические погрешности моделей зубчатых передач. Установлено, что для эвольвентной зубчатой передачи суммарная кинематическая погрешность передачи равна $F_{y_{\Sigma}}=34$ мкм, а для изношенной и откорректированной моделей – $F_{y_{\Sigma}}=113,4$ мкм, что на 53,5 % меньше допускаемого значения суммарной кинематической погрешности, равной $F'_{\Sigma}=174$ мкм. Таким образом, установлено, что корректировка изношенных профилей зубьев позволит снизить размах и амплитуду угловой скорости и углового ускорения без существенного ухудшения кинематической погрешности передач.

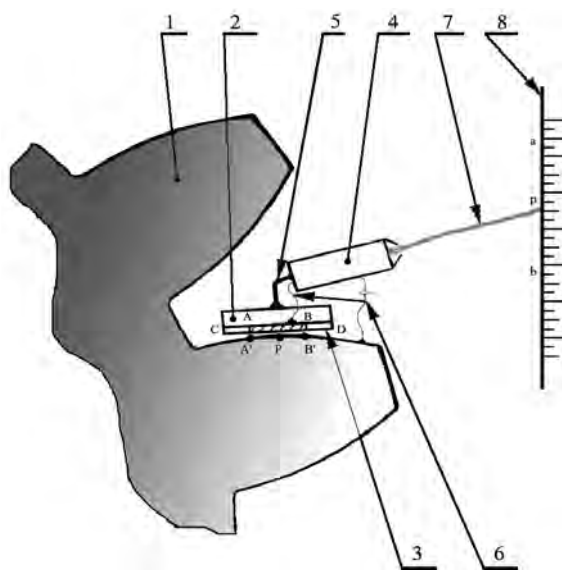
Сущность метода предупреждения контактного выкрашивания рабочих поверхностей зубьев заключается в осуществлении контроля за контактными напряжениями в опасных по питтингу зонах путем определения действительных значений радиусов кривизны контактирующих поверхностей, и, при достижении ими критических значений, осуществлении корректирующих операций, направленных на увеличение радиусов кривизны.

В третьей главе представлены результаты исследований по разработке комплекса методического и технического обеспечения технически обоснованной корректировки профилей зубьев в условиях эксплуатации. Приборно-техническое обеспечение включает в себя следующие основные составляющие: устройства и методику оценки действительных значений радиусов кривизны; устройства, позволяющие осуществлять корректировку рабочих профилей зубьев с целью увеличения радиусов кривизны в опасных по питтингу зонах.

Разработанный «Радиусомер для активной поверхности зуба эвольвентной передачи» (см. рисунок б), позволяет оценивать уровень изменения контактных напряжений в зубчатой передаче через контроль за действительными радиусами кривизны, что повышает точность прогнозирования остаточного ресурса зубчатой передачи до начала контактного выкрашивания рабочих поверхностей зубьев.

Второй важной составляющей приборно-технического обеспечения являются устройства, позволяющие осуществлять корректировку профилей зубьев непосредственно на местах эксплуатации зубчатых передач. Было разработано два варианта механизированного инструмента для корректировки искажившихся в процессе эксплуатации профилей зубьев крупномодульных зубчатых колес. Основным условием применения механизированного инструмента для корректировки рабочих профилей зубьев является

использование специальной оснастки для его базирования по неизношенным поверхностям, а также осуществление прикатки зубьев после их корректировки. На рисунке 7 представлено «Устройство для корректировки активных профилей зубьев» на основе шлифмашинки с гибким валом.



1 – зубчатое колесо; 2 – магнит; 3 – контактное ребро; 4 – лазерная указка; 5 – ребро жесткости; 6 – оригинальный участок электрической цепи; 7 – лазерный луч; 8 – экран

Рисунок 6 – Принцип устройства «Радиусомер для активной поверхности зуба эвольвентной передачи»



1 – шлифовальная головка; 2 – хвостовик; 3 – зажим; 4 – втулка; 5 – хомут;
6 – броня; 7 – гибкий вал; 8 – звено базирования; 9 – винт

Рисунок 7 – Устройство для корректировки профилей зубьев на основе шлифмашинки с гибким валом

Как показал анализ результатов исследований, в процессе одной операции корректировки профилей зубьев, как правило, снимается припуск не более 0,1 мм, что для зубчатых колес с модулем зубьев 6 – 10мм составляет не более четверти допуска на их толщину. Вследствие этого влияние корректирующих операций на боковой зазор оказывается незначительным.

Положительные результаты лабораторных испытаний устройств для определения действительных значений радиусов кривизны рабочих

поверхностей зубьев и устройств для корректировки активных профилей зубьев послужили предпосылкой для проведения апробации приборно-технического обеспечения в условиях эксплуатации зубчатых передач.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальной апробации метода и его приборно-технического обеспечения в условиях непосредственной эксплуатации передач.

В качестве объектов промышленной апробации метода были выбраны две зубчатые передачи – редуктор КМБ локомотива ЧМЭЗ и мультипликатор компрессора «Demag» Vк-25 С.

Для определения возможности использования защищаемого метода применительно к зубчатым передачам, принятым в настоящих исследованиях в качестве объектов эксплуатационной апробации, был проведен комплекс исследований структуры, фазового состава, свойств упрочненного слоя и параметров износа рабочих поверхностей зубьев. Установлено, что применение разработанной методики позволяет осуществить ряд повторных корректирующих операций без потери качественных показателей зубчатых передач в количестве трех (мультипликатор компрессора «Demag» Vк-25 С) – восьми (зубчатая передача КМБ локомотива ЧМЭЗ) раз.

Целями экспериментальной проверки защищаемого метода применительно к зубчатой передаче КМБ локомотива ЧМЭЗ являлись: апробация в условиях эксплуатации разработанного приборно-технического обеспечения и проверка гипотезы о снижении виброакустических характеристик зубчатых передач после корректировки рабочих поверхностей зубьев бывших в эксплуатации зубчатых колес. Исследования проводилась в Локомотивном депо г. Могилев и носили сравнительный характер. В качестве параметров, характеризующих состояние зубчатой передачи, были выбраны уровни звукового давления в октавных полосах, виброскорость и виброускорение. Измерения осуществлялись прибором для измерения шума и вибрации ВШВ-003. Значения виброскорости и виброускорения определялись по общему уровню. Для измерения параметров виброскорости и виброускорения использовался датчик ДН-3-М1.

После определения исходных динамических характеристик зубчатой передачи на активных профилях зубьев в опасных по питтингу зонах определялись действительные значения радиусов кривизны с использованием устройства «Радиусомер для активной поверхности зуба эвольвентной передачи». В ходе измерений установлено: радиусы кривизны уменьшились до 35 – 50 мм при первоначальных своих значениях, равных 120 – 130 мм. Было принято решение о проведении корректирующих операций. Корректировку произвели для всех 76 зубьев ведомого зубчатого колеса на глубину 0,07 – 0,1 мм по всей длине зубьев (см. рисунок 8). После корректировки профилей зубьев передачу закрыли, подготовили к эксплуатации и у нее повторно замерили виброакустические параметры. В откорректированной зубчатой передаче было зафиксировано снижение уровней звукового давления во всех октавных полосах на 15 – 40 %, а значения виброскорости и виброускорения были снижены в 1,1 – 1,5 раз по сравнению с изношенной

зубчатой передачей. Зубчатая передача, откорректированная защищаемым методом в условиях Локомотивного депо г. Могилев, пущена в эксплуатацию.



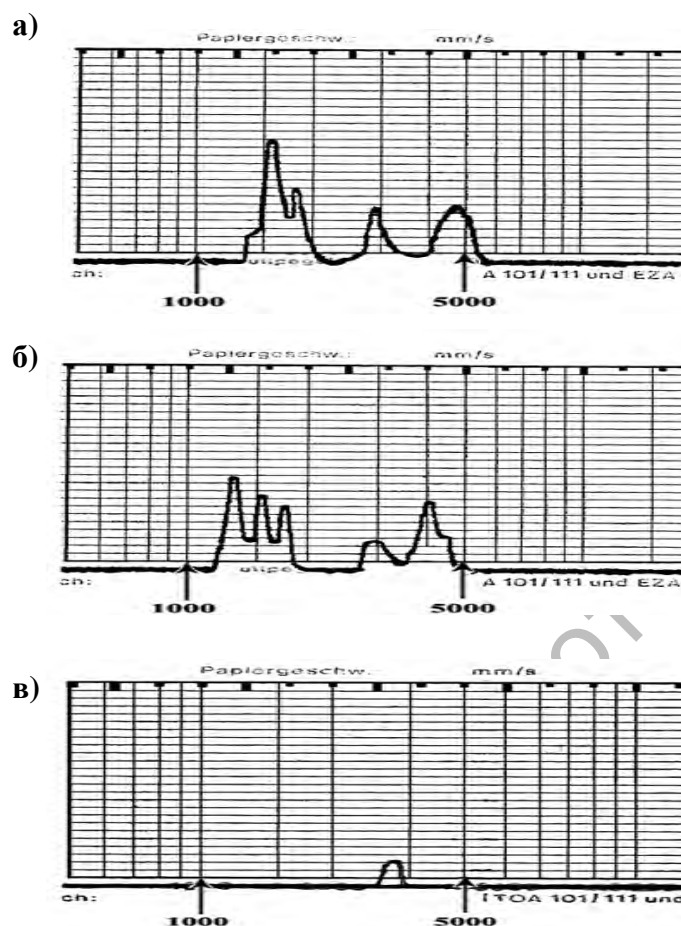
Рисунок 8 – Корректировка профилей зубьев ведомого зубчатого колеса КМБ локомотива ЧМЭЗ

Экспериментальная проверка разработанного метода применительно к зубчатым колесам мультипликатора компрессора «Demag» Vк-25 С проводилась совместно с УП «Технотот» и ОАО «ЭнТехМаш».

Совместно с УП «Технотот» исследовалось влияние износов на радиусы кривизны и величину виброактивности зубчатого зацепления. Определение действительных радиусов кривизны проводилось с использованием разработанного устройства «Радиусомер для активной поверхности зуба эвольвентной передачи». Теоретическое значение радиуса кривизны для ведущего зубчатого колеса в опасной зоне составляет $225 \text{ мм} \pm 10\%$. В ходе замеров установлено снижение действительных значений радиусов кривизны в 4,7 раза.

Исследования виброактивности зубчатого зацепления мультипликатора позволили установить взаимосвязь износа рабочих профилей зубьев на величину вибраций, генерируемых зубчатой передачей. Для анализа вибрационных характеристик компрессоров использован аппаратный комплекс, включающий виброметр типа 00033 компании «РОБОТРОН». Для регистрации спектра к выходам анализатора был подключен самописец, позволяющий записывать на прямоугольной диаграмме графики спектров. Датчики устанавливались в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Для мультипликатора компрессора «Demag» диапазон зубцовой частоты находится в пределах 1000 – 5000 Гц.

Диагностика бывшего в эксплуатации компрессора показала наличие вибраций от зубчатого зацепления (рисунок 9, а и б). В полосе 1000 – 2000 Гц значения виброскорости составляли 0,64 мм/с., в полосе 2000 – 3200 Гц – 0,86 мм/с., в полосе 3200 – 4000 Гц – 0,1 мм/с. Для нового зубчатого зацепления амплитуда виброскорости на рассматриваемой зубцовой частоте оказалась практически равной нулю (рисунок 9, в).



а – в вертикальной и б – в горизонтальной плоскостях бывшего в эксплуатации мультипликатора; в – для нового мультипликатора

Рисунок 9 – Спектрограммы зубчатого мультипликатора компрессора «Demag» Vк-25 С

Совместными усилиями специалистов службы главного механика ОАО «Могилевхимволокно» и ОАО «ЭнТехМаш» была восстановлена работоспособность зубчатой передачи мультипликатора компрессора «Demag» Vк- 25 С. В результате этого был получен годовой экономический эффект в сумме более 34 млн. бел. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили получить новые результаты и сделать следующие выводы.

1. В результате анализа технического состояния трансмиссий, эксплуатируемых в технологическом оборудовании, установлено, что в ряде закрытых, преимущественно крупномодульных, зубчатых передачах наиболее характерным критерием потери работоспособности является сочетание контактного выкрашивания рабочих поверхностей зубьев с их неравномерным

износом. Показано, что в связи с неравномерным по высоте зубьев износом уменьшаются радиусы кривизны контактирующих поверхностей, что приводит к соответствующему увеличению контактных напряжений и сокращению ресурса передач, не учитываемому существующими методиками расчетов зубчатых передач на контактную прочность [8, 12, 13, 18, 19, 21, 23, 27].

2. Впервые на основе анализа результатов моделирования, теоретических и экспериментальных исследований установлены закономерности и получена уточненная зависимость для определения влияния неравномерности износа по высоте зубьев зубчатых передач на значения действительных радиусов кривизны изношенных зубьев, учитывающая радиусы основной окружности зубчатых колес. Предложены методика количественной оценки этого явления и критерии, позволяющие определить остаточный ресурс с учетом изменения контактных напряжений и осуществить технически обоснованную корректировку рабочих профилей зубьев, за счет чего достигается снижение влияния изменений радиусов кривизны на контактную выносливость и ресурс зубчатых передач. В результате реализации этой методики на примере зубчатых колес КМБ локомотива ЧМЭЗ и мультипликатора компрессора «Demag» Vk-25 С, имеющих величину основного радиуса, равную $r_b = 357,08$ мм ($m = 10$ мм, $z = 76$, $x_{\Sigma} = 0$) и $r_b = 602,57$ мм ($m = 4,5$ мм, $z = 285$, $x_{\Sigma} = 0$) соответственно, показано, что уменьшение радиуса кривизны в 3 раза и возрастание контактных напряжений в 1,7 раз возникает у передач локомотива ЧМЭЗ при износе профилей зубьев, равном 0,1 мм, у передач мультипликатора компрессора «Demag» уже при 0,01 мм [5, 8, 17].

3. В результате анализа результатов использования разработанной методики при корректировке зубьев бывших в эксплуатации зубчатых передач подтверждена не только эффективность ее применения с позиций предотвращения возникновения питтинговых лунок, но и показана возможность снижения уровней шума и вибраций, возрастание которых относительно исходного уровня обусловлено износом рабочих поверхностей зубьев. Установлено, что эксплуатационные износы рабочих поверхностей зубьев мультипликатора компрессора «Demag» Vk-25 С привели к увеличению виброскорости в диапазоне зубцовых частот в 8 – 10 раз по сравнению с аналогичными характеристиками нового мультипликатора компрессора. При корректировке активных профилей зубьев ведомого зубчатого колеса КМБ локомотива ЧМЭЗ в соответствии с разработанной методикой уровни звукового давления во всех октавных полосах снизились на 15 – 40 %, а значения виброскорости и виброускорения снизились в 1,1 – 1,5 раз по сравнению с изношенной зубчатой передачей [4, 11, 20, 22, 24, 26].

4. Предложена методика учета числа циклов нагружений до начала зарождения усталостных трещин в опасных по питтингу зонах в зависимости от коэффициента возрастания кривизн рабочих поверхностей зубьев, обусловленного их износом, и твердости рабочих поверхностей зубьев. Показана нелинейная зависимость этого коэффициента от твердости поверхности зубьев. Установлено, что при ее изменении от 200 НВ до 55 HRC число циклов нагружения до двухкратного увеличения коэффициента

возрастания кривизны увеличивается ориентировочно в 2,5 раза. В совокупности использование разработанного метода позволяет существенно повысить точность прогнозирования скорости возрастания кривизны рабочих поверхностей зубьев и оценить остаточный ресурс трансмиссий [7, 8].

5. На основе проведенного комплекса исследований структуры, фазового состава, свойств упрочненного слоя и параметров износа рабочих поверхностей зубьев установлено, что применение разработанной методики позволяет осуществить ряд повторных корректирующих операций без потери качественных показателей зубчатых передач. Так, например, в течение всего цикла эксплуатации для мультипликатора компрессора «Demag» Vк-25 С может быть осуществлено до трех корректирующих операций частично изношенных профилей зубьев зубчатых колес, у КМБ локомотива ЧМЭЗ – до восьми [13].

6. Разработаны новые устройства для контроля и корректировки рабочих профилей частично изношенных зубьев, использование которых позволяет обеспечить высокую эффективность применения предложенного метода предупреждения питтинга крупномодульных зубчатых передач на основе повышения достоверности прогнозирования остаточного ресурса и технически обоснованного выбора сроков проведения корректирующих операций, а также минимизировать отрицательное влияние этих операций на параметры функционирования других узлов редукторов, сопутствующих корректировке профилей зубьев [3, 6, 8, 9, 15, 16, 20, 28, 29, 30, 31, 32].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанная методика и приборно-техническое обеспечение метода предупреждения питтинга крупномодульных передач путем корректировки рабочих поверхностей зубьев непосредственно в условиях их эксплуатации прошли апробацию и нашли практическое применение в Локомотивном депо г. Могилев, на ОАО «Могилевхимволокно», а также в учебном процессе ГУВПО «Белорусско-Российский университет» и УО «Могилевский государственный университет продовольствия».

С учетом этого разработанный метод, рекомендации по его использованию и приборно-техническое обеспечение могут быть использованы для предупреждения питтинга преимущественно в крупномодульных зубчатых передачах технологического оборудования и мобильных средств повышенной мощности непосредственно на местах их эксплуатации и технического обслуживания [3, 8, 15, 29, 30, 31, 32, 33]. Это позволит повысить срок службы находящихся в эксплуатации зубчатых передач, снизить затраты и трудоемкость ремонта. Годовой экономический эффект от использования метода применительно к зубчатой передаче мультипликатора компрессора «Demag» Vк-25 С, эксплуатируемого на ОАО «Могилевхимволокно» составил более 34 млн. руб.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, включенных в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований, рекомендуемый ВАК

1. Игнатищев, Р.М. Основы эксплуатационного метода предупреждения питтинга поверхностей зубьев / Р.М. Игнатищев, Ю.В. Машин // Вестн. МГТУ. – 2004. – № 1. – С. 50–54.

2. Машин, Ю.В. О допустимости корректировки профилей зубьев крупномодульных передач / Ю.В. Машин // Вестн. МГТУ. – 2005. – № 2. – С. 104–107.

3. Игнатищев, Р.М. Зубчатые передачи, питтинг. Приборно-техническое обеспечение эксплуатационного метода повышения надежности и долговечности / Р.М. Игнатищев, Ю.В. Машин // Вестн. машиностроения. – 2005. – № 11. – С. 13–15.

4. Машин, Ю.В. Возможность снижения виброшумовой активности зубчатых передач / Ю.В. Машин, В.А. Кемова, П.В. Другаченко // Вестн. МГТУ. – 2006. – № 1. – С. 164–167.

5. Игнатищев, Р.М. Основы новых путей упреждения питтинга в зубчатых передачах / Р.М. Игнатищев, Ю.В. Машин, П.В. Другаченко // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2006. – № 3. – С. 88–96.

6. Игнатищев, Р.М. Сущность эксплуатационного метода упреждения питтинга в эвольвентных передачах / Р.М. Игнатищев, Ю.В. Машин, П.В. Другаченко // Вестн. Беларус.-Рос. ун-та. – 2007. – № 1. – С. 90–99.

7. Игнатищев, Р.М. Эвольвентные цилиндрические передачи. Оценка ожидаемого времени наработки до появления питтинга / Р.М. Игнатищев, Ю.В. Машин // Вестн. машиностроения. – 2007. – № 2. – С. 27–28.

Брошюра

8. Игнатищев, Р.М. Зубчатые передачи. Как предсказывать и упреждать питтинг. Инженеру-механику / Р.М. Игнатищев, Ю.В. Машин. – Могилёв: УПКП «МОУТ», 2004. – 68 с.

Статьи в сборниках научных трудов

9. Игнатищев, Р.М. Эксплуатационный метод предупреждения прогрессирующего питтинга поверхностей зубьев / Р.М. Игнатищев, Ю.В. Машин // Современные методы проектирования машин: Респ. межвед. сб. науч. тр. / Беларус. нац. техн. ун-т; под общ. ред. П.А. Витязя. – Мн.: УП «Технопринт», 2004. – Вып. 2, Т. 4. – С. 117–120.

10. Игнатищев, Р.М. Новый путь повышения культуры эксплуатации и проектирования зубчатых передач / Р.М. Игнатищев, Ю.В. Машин, В.А. Кемова // Межвед. сб. науч.- метод. ст. / Белорус. нац. техн. ун-т; под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск, 2005. Вып. 19 – С. 150–156.

11. О возможности использования вибродиагностики для оценки в зубчатых передачах контактных напряжений / Р.М. Игнатищев, В.В. Кулешов, Ю.В. Машин, В.А. Кемова // Перспективные технологии, материалы и системы: сб. тр. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2005. – С. 118–123.

12. Машин, Ю.В. Анализ причин контактного разрушения активных профилей зубьев мультипликатора «DEAG» VK-25C / Ю.В. Машин, В.А. Логвинова // Детали машин и трибология: межвуз. сб. науч. тр. / Калинингр. гос. техн. ун-т; под общ. ред. С.В. Федорова. – Калининград, 2005. – С. 121–130.

13. Машин, Ю.В. Исследования причин питтинга зубьев тяговой передачи локомотива ЧМЭЗ / Ю.В. Машин // Детали машин и трибология: межвуз. сб. науч. тр. / Калинингр. гос. техн. ун-т; под общ. ред. С.В. Федорова. – Калининград, 2005. – С. 110–119.

Материалы научных конференций

14. Игнатищев, Р.М. Основы эксплуатационного метода повышения долговечности зубчатых передач / Р.М. Игнатищев, И.М. Кузменко, Ю.В. Машин // Современные технологии, машины и материалы для зимнего содержания автомобильных дорог: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 13–14 февр. 2003 г. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев: МГТУ, 2003. – С. 35–37.

15. Машин, Ю.В. Способ определения радиусов кривизны рабочих поверхностей зубчатых передач / Ю.В. Машин // Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев. 15–16 мая 2003 г. / МГТУ; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев: МГТУ, 2003. – С. 301.

16. Машин, Ю.В. Эксплуатационные методы предупреждения питтинга эвольвентных зубчатых передач / Ю.В. Машин // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Респ. науч.-техн. конф., Могилев, 29 янв. 2004 г. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2004. – С. 112.

17. Логвинова, В.А. Исследование изменений радиусов кривизны активных профилей зубьев на примере компрессоров «DEAG» VK-25 / В.А. Логвинова, Ю.В. Машин // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 2004 г. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2004. – Ч. 1. – С. 122–123.

18. Машин, Ю.В. Предпосылки образования питтинга в крупномодульных зубчатых передачах / Ю.В. Машин, В.А. Логвинова // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 2004 г. / Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2004. – Ч. 1. – С. 126–127.

19. Игнатищев, Р.М. Причина и качественное описание питтинг-процесса в зубчатых передачах / Р.М. Игнатищев, Ю.В. Машин, В.А. Логвинова // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. V Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 1–2 июля 2004 г. / ГГТУ им. П.О. Сухого; редкол.: В.М. Кенько [и др.]. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2004. – С. 17–18.

20. Машин, Ю.В. Методика предупреждения контактного разрушения зубьев в крупномодульных зубчатых передачах / Ю.В. Машин // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Респ. науч.-техн. конф., Могилев, 27 янв. 2005 г. / Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2005. – С. 102.

21. Машин, Ю.В. О явлении питтинга в главных передачах локомотивов белорусской железной дороги / Ю.В. Машин, В.А. Кемова // Содружество наук. Барановичи – 2005: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Барановичи, 22 фев. 2005 г. / БарГУ; редкол.: В.И. Кочурко [и др.]. – Барановичи: БарГУ, 2005. – Ч. 2. – С. 285–287.

22. Машин, Ю.В. Влияние эксплуатационно-нормальных износов зубьев на динамику передачи / Ю.В. Машин // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 21–22 апр. 2005 г. / Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2005. – Ч. 1. – С. 113–114.

23. Машин, Ю.В. Контактные трещины в зубчатых передачах закрытого типа / Ю.В. Машин // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 21–22 апр. 2005 г. / Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2005. – Ч. 1. – С. 115.

24. Машин, Ю.В. Исследование влияния корректировки профилей зубьев на виброактивность зубчатых передач / Ю.В. Машин // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Респ. науч.-техн. конф., Могилев, 26 янв. 2006 г. / Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2006. – С. 56.

25. Машин, Ю.В. Исследование напряженного состояния зубьев тяговой передачи локомотивов / Ю.В. Машин, М.Э. Подымако // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Респ. науч.-техн. конф., Могилев, 26 янв. 2006 г. / Беларус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2006. – С. 57.

26. Машин, Ю.В. Геометрическое исследование зубчатого зацепления после снятия компенсирующей полоски / Ю.В. Машин, Г.А. Колосов, П.В. Другаченко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 20–21 апр.

2006 г. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2006. – Ч. 1. – С. 161.

27. Машин, Ю.В. Причины низкой долговечности зубчатого мультипликатора компрессора «Demag» / Ю.В. Машин, В.А. Кемова, П.В. Другаченко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 20–21 апр. 2006 г. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2006. – Ч. 1. – С. 159–160.

28. Машин, Ю.В. Повышение долговечности зубчатых передач путем разработки эксплуатационного метода упреждения питтинга / Ю.В. Машин // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 янв. 2007 г. / Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2007. – С. 6–7.

Патенты

29. Радиусомер для поверхностей зубьев эксплуатируемых эвольвентных передач: пат. ВУ 8159 С1, МКИ7 G 01 В 5/20, F 16 Н 1/00 / Р.М. Игнатищев, Ю.А. Мясникович, Ю.В. Машин, В.А. Логвинова; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20031036; заявл. 11.12.2003; опубл. 30.06.2005, Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2005. – № 2. – С. 71.

30. Устройство для корректировки активных профилей зубьев: пат. ВУ 3036 U, МКИ7 В 23 F 19/00 / Р.М. Игнатищев, В.А. Красовский, Ю.А. Мясникович, Ю.В. Машин, О.Н. Кутас, П.В. Другаченко; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № и 20060084; заявл. 14.02.06; опубл. 15.06.06 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2006. – № 5. – С. 68.

31. Радиусомер для активной поверхности зуба эвольвентной передачи: пат. ВУ 9220 С1, МКИ7 F 16 Н 1/00 / Р.М. Игнатищев, Ю.А. Мясникович, В.А. Красовский, Ю.В. Машин, О.Н. Кутас, П.В. Другаченко; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20040641; заявл. 08.07.2004; опубл. 30.04.2007, Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 2. – С. 127.

32. Устройство для корректировки активного профиля зуба: пат. ВУ 9223 С1, МКИ7 В 23 Р 6/00 / Р.М. Игнатищев, Ю.А. Мясникович, В.А. Красовский, Ю.В. Машин, О.Н. Кутас, П.В. Другаченко; заявитель Белорус.-Рос. ун-т. – № а 20040642; заявл. 08.07.2004; опубл. 30.04.2007, Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 2. – С. 68.

Депонированная рукопись

33. Опыт промышленного использования эксплуатационного метода предупреждения питтинга в эвольвентных зубчатых передачах / Ю.В. Машин, О.Н. Кутас; Белорус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2003. – 9 с. Деп. в БелИСА 06.10.2003, № Д 200378 // Реферат. сб. неопубл. работ. – 2003. – Вып. 4(19). – С. 116.

РЭЗЮМЕ

МАШЫН Юрый Віктаравіч

Папярэджанне пітынгу буйнамодульных перадач шляхам карэкціроўкі працоўных паверхняў зуб'яў ва ўмовах эксплуатацыі

Ключавыя словы: зубчатая перадача, нармалёва-эксплуатацыйныя зносы, геаметрыя зачэплення, радыус крывізны, пітынг, кантактная трываласць, формула Герца, радыусамер, карэкціроўка профіляў зуб'яў.

Аб'ектам даследавання з'яўляюцца буйнамодульныя ($m \geq 4$ мм) закрытыя эвальвентныя перадачы.

Прадмет даследаванняў – рэсурс зубчатых перадач і шляхі яго павялічэння.

Мэтай даследаванняў з'яўляецца распрацоўка метаду папярэджання пітынгу буйнамодульных перадач закрытага тыпу шляхам карэкціроўкі працоўных паверхняў зуб'яў ва ўмовах эксплуатацыі.

Асноўныя вынікі даследаванняў, якія дазволілі ажыццявіць аднаўленне супрацьпітынгавай устойлівасці зубчатых перадач шляхам ужывання профілекарэктыруючых аперацый, атрыманы з выкарыстаннем прылады «Рыдыусамер для актыўнай паверхні зуба эвальвентнай перадачы» і профілекарэктыруючых шліфмашынак.

Азначэнне вібраакустычнай актыўнасці зубчатых перадач ажыццяўлялася з выкарыстаннем вібрашумамера ВШВ-003 і апаратурнага комплексу, які ўключае ў сябе віброметр тыпу 00033 кампаніі «Рабатрон». Даследаванні структуры, фазавага складу і ўласцівасцяў матэрыялаў зуб'яў колаў ажыццяўлялі з выкарыстаннем мікраскопаў «МЕТАМ» РВ-21 і МІМ-7, мікрацвердасць шліфоў вымяралася з дапамогай мікрацвердамера ПМТ-3.

Распрацавана метадыка і адпаведнае прыборна-тэхнічнае суправаджэнне, якое дазваляе здзяйсняць карэкціроўку профіляў зуб'яў непасрэдна на месцах эксплуатацыі зубчатых перадач.

Вынікі даследаванняў выкарыстаны пры апрабацыі метаду ў дачыненні да зубчатага зачэплення мультыплікатара кампрэсара «Demag» Vк-25 С, а таксама да зубчатай перадачы коламаторнага блоку лакаматыва ЧМЭЗ.

РЕЗЮМЕ

МАШИН Юрий Викторович

Предупреждение питтинга крупномодульных передач путем корректировки рабочих поверхностей зубьев в условиях эксплуатации

Ключевые слова: зубчатая передача, нормально-эксплуатационные износы, геометрия зацепления, радиус кривизны, питтинг, контактная прочность, формула Герца, радиусомер, корректировка профилей зубьев.

Объектом исследования являются крупномодульные ($m \geq 4$ мм) закрытые эвольвентные передачи.

Предмет исследований – ресурс зубчатых передач и пути его увеличения.

Целью исследований является разработка метода предупреждения питтинга крупномодульных передач закрытого типа путем корректировки рабочих поверхностей зубьев в условиях эксплуатации.

Основные результаты исследований, позволившие осуществить восстановление противопиттинговой устойчивости зубчатых передач путем применения профилекорректирующих операций, получены с использованием устройства «Радиусомер для активной поверхности зуба эвольвентной передачи» и профилекорректирующих шлифмашинок.

Определение виброакустической активности зубчатых передач осуществлялось с использованием виброшумомера ВШВ–003 и аппаратного комплекса, включающего в себя виброметр типа 00033 компании «Роботрон». Исследования структуры, фазового состава и свойств материалов зубьев колес осуществлялись с использованием микроскопов «МЕТАМ» РВ–21 и МИМ–7, микротвердость шлифов измерялась с помощью микротвердомера ПМТ–3.

Разработана методика и соответствующее приборно-техническое сопровождение, позволяющее осуществлять корректировку профилей зубьев непосредственно на местах эксплуатации зубчатых передач.

Результаты исследований использованы при апробации метода применительно к зубчатому зацеплению мультипликатора компрессора «Demag» Vк–25 С, а также к зубчатой передаче колесомоторного блока локомотива ЧМЭЗ.

SUMMARY

MASHIN Yuriy Viktorovich

Pitting protection of coarse-pitch gears by correction of teeth working surfaces during operation

The Keywords: gear, orderly-working deteriorations, geometry of interlocking, radius of curvature, pitting, contact strength, Hertz formula, radius measuring instrument correction of the teeth profiles.

The Object of the research: closed coarse-pitch ($m \geq 4$ mm) involute gear.

The Subject of the research: gear operating life & the ways of its increase.

The Aim of the research is the development of the method that allows to increase operating life of closed coarse-pitch gears by correction of teeth working surfaces during operation.

The basic research results, which allow to realize reconstruction of gear antipitting stability by means of profile correcting measures, are obtained with the help of “Radius measuring instrument for active tooth surface on involute gear” and profile correcting polishing machines.

Vibroacoustic activity was measured with the help of vibration & noise measuring instrument VSHV-003 and device complex, which includes «Robotron» vibrometer type 00033. Structure investigation, analysis of phase structure and material quality of gears was made by means of microscope «METAM» RV-21 and MIM-3.

The method has been developed as well as corresponding devices and instruments, what allows to correct teeth profiles in operating places.

The results of the research were used during the method approbations for teeth interlocking of «Demag» Vk - 25 C compressor multiplicator, and for gear assembly of CHME3 locomotive.

МАШИН Юрий Викторович

**ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ПИТТИНГА КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ПЕРЕДАЧ
ПУТЕМ КОРРЕКТИРОВКИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ В
УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

по специальности 05.02.02
«Машиноведение, системы приводов и детали машин»

Подписано в печать 28.10.2008 г. Формат 60x84/16/ Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл.-печ.л. 1,4. Уч.-изд.л. 1,3. Тираж 60 экз. Заказ №688.

Издатель и полиграфическое исполнение
Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет»
ЛИ №02330/375 от 29.06.2004 г.
212000, г. Могилев, пр. Мира, 43.