М315920

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА

на правах рукописи

ЛОГИНОВ Виктор Владимирович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗНОСА ПО ДЛИНЕ ЗУБЬЕВ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ПРЯМОЗУБЫХ ПЕРЕДАЧ

05.02.02. – Машиноведение и детали машин

А в т о р е ф е р а т

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 1977

МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА

на правах рукописи

ЛОГИНОВ Виктор Владимирович

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗНОСА ПО ДЛИНЕ ЗУБЬЕВ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ПРЯМОЗУБЫХ ПЕРЕДАЧ

05.02.02. - Машиноведение и детали машин

М 3/5920
НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1315920
Логинов В.В. Исследование

Автореферат

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва - 1977

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор ПОСТНИКОВ В.И.

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор ПЕТРУСЕВИЧ А.И.,
кандидат технических наук АРХИПОВ В.С.

Ведущее предприятие – НАТИ

Автореферат разослан "4" мая 1977 г.

Защита диссертации состоится "20" июня 1977 г. на заседании специализированного Ученого Совета "Машиностроение" Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического училища имени Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., дом 5.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатями, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ имени Н.Э.Баумана.

Ученый секретарь Совета
к.т.н., с.н.с. П.К.Попов

Л79641 объем 1 п.л. тип. МВТУ. Заказ 737 тираж 100
подписано к печати 29/III-1977 г.

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ
МВТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

Актуальность проблемы. Долговечность и надежность машин во многом зависят от износостойкости их деталей. Установление причин изнашивания и его динамики позволяет разработать комплекс мероприятий по повышению износостойкости деталей. При оценке долговечности и надежности зубчатых передач, работающих со значительным взаимным перекосом зубьев, важным фактором является концентрация нагрузки, которая влияет на неравномерность износа и выкрашивания по длине зубьев.

Получение эпюр износа позволяет установить концентрацию нагрузки по длине зубьев и открывает возможности для разработки более прогрессивных конструктивных вариантов зубчатых передач. Тема работы входит в комплекс проблем по повышению долговечности и надежности изделий и является продолжением работ по практическому использованию метода контроля износа с применением поверхностной активации.

Цель работы. Разработка методики контроля и исследование распределения износа по длине зубьев тяжелонагруженных прямозубых передач с применением поверхностной активации. Разработка способа экспериментальной оценки коэффициента концентрации нагрузки на основе измерения распределения износа по длине зубьев.

Методы исследований. Основой экспериментальных исследований является использование метода поверхностной активации для контроля износа деталей машин и механизмов. В качестве контрольного метода для оценки распределения износа по длине зубьев применяется метод искусственных баз (вырезанных лунок).

Научная новизна. Существующие методические разработки по применению метода поверхностной активации не позволяют использовать его для получения эпюр износа по длине зубьев. В настоящей работе впервые проведен контроль распределения износа и оценка коэффициента концентрации нагрузки на основе распределения износа по длине зубьев.

Практическая ценность. Разработана методика и математический аппарат, позволяющие вести контроль распределения износа и получение эпюр износа по длине зубьев. Представленный способ экспериментальной оценки позволяет определить коэффициент концентрации нагрузки по неравномерности износа в целях уточнения расчета зубчатых передач на изнашивание и прочность зубьев.

Результаты работы используются при отработке конструкции бортовой передачи тракторов "Беларусь", проводимой ИНДМАШ АН БССР совместно с ГСКБ по пропашным тракторам (Минский тракторный завод).

Апробация работы. Результаты работы доложены на международном семинаре (г.Минск, май 1976 г.), заседании кафедры "Детали машин" МВТУ им.Баумана, научно-техническом Совете НАТИ.

Объем работы. Диссертация изложена на 181 страницах машинописного текста, включающих введение, пять глав, выводы по работе, и содержит 15 таблиц, 65 рисунков, список литературы из 106 наименований, приложение на 7 страницах.

Ниже излагается основное содержание работы.

В первой главе представлен аналитический обзор исследований износостойкости тяжелонагруженных зубчатых передач. Этому вопросу посвящены работы Хрущова М.М., Скундина Г.И., Гришко В.А., Перминова А.Е. и других исследователей. Изнашивание рассматривается как один из видов разрушения поверхности зубьев. Основным видом изнашивания зубьев является механический износ, который заключается в срезании микронеровностей или их усталостном изнашивании при повторном приложении нагрузки.

Анализ исследований по распределению износа по профилю зубьев показывает, что в результате длительной работы тяжелонагруженных зубчатых передач наибольший износ наблюдается на ножке зуба в околополюсной зоне.

На работоспособность зубчатых передач влияет неравномерный по длине зуба износ, возникающий вследствие взаимного перекоса зубьев и концентрации нагрузки приводящей к ускорению начала контактного выкрашивания рабочих поверхностей, что снижает долговечность деталей зубчатых передач. Поэтому важно уменьшить концентрацию нагрузки. Повышение износостойкости достигается увеличением твердости рабочей поверхности зубьев. Для цементованных сталей рекомендуется твердость поверхности зубьев HRC 58...62.

Анализ методов исследования износа показал, что наиболее широко для контроля износа зубьев используются методы микрометрирования, профилографирования, искусственных баз и радиоиндикаторные методы. Из последних выделим метод поверхностной активации, обладающий высокой точностью и чувствительностью,

не требующий специальных мер радиационной защиты. Однако анализ работ по исследованию износа с применением поверхностной активации показывает, что недостаточно разработаны вопросы исследования износа по нескольким точкам, расположенным на сложной геометрической поверхности вблизи друг друга.

Для достижения поставленных выше целей необходимо решать следующие задачи:

I) Разработать расчетно-аналитические зависимости для контроля распределения износа по длине зубьев с применением поверхностной активации.

2) Разработать теоретические основы экспериментальной оценки коэффициента концентрации нагрузки путем контроля распределения износа по длине зубьев.

3) Провести экспериментальные исследования распределения износа по длине зубьев с применением поверхностной активации и метода искусственных баз, процесса конктактного выкрашивания с применением поверхностной активации.

4) Дать практические рекомендации в виде расчетных зависимостей для определения: а) интенсивности изнашивания и величин износа зубьев, б) коэффициентов концентрации нагрузки, в) момента начала контактного выкрашивания по изнашиванию зубьев тяжелонагруженных прямозубых передач.

Во второй главе разработаны теоретические основы оценки неравномерности распределения износа. Показано, что износ в зоне концентрации нагрузки можно определить по формуле:

$$h = 3{,}04 \cdot J \sqrt{\frac{q_n \cdot \rho_{np} \cdot K_\beta}{E}} (T - T_{np}) \cdot n \cdot \eta + h_{np}, \qquad (I)$$

где J – интенсивность изнашивания;
q_n – нормальная нагрузка на единицу длины зуба, Мн/м;
K_β – коэффициент концентрации нагрузки;
ρ_{np} – приведенный радиус кривизны, см ;
E – модуль упругости, Мн/м^2 ;
T – время работы, мин.;
n – частота вращения, об/мин ;
η – коэффициент скольжения;
T_{np} – время приработки, мин ;
h_{np} – величина приработочного износа, мкм.

Зависимость (I) получена на основе формулы Дроздова Ю.Н. путем ввода коэффициента концентрации нагрузки. Интенсивность изнашивания определяется экспериментальным путем при испытаниях зубчатых передач на изнашивание после приработки зубьев при установившемся изнашивании (при этом приработочный износ и время приработки не учитываются).

В работе дается теоретический расчет интенсивности изнашивания для случая упругого контакта по известной формуле

$$J = \frac{0,7 p_0}{E \cdot n_M},$$

где p_0 – номинальное давление;

n_M – число циклов до начала отделения материала.

Теоретическая интенсивность изнашивания равна $3,8 \cdot 10^{-8}$ (при $p_0 = 1500$ Мн/м^2, $n_M = 1,4 \cdot 10^5$ циклов).

Важным фактором при расчете зубчатых передач на долговечность является коэффициент концентрации нагрузки, расчет которого производится по зависимости Петрусевича А.И. Необходимо отметить, что для расчета нужно установить угол взаимного перекоса зубьев, величина которого зависит от действующих нагрузок, "технологического" перекоса, деформации деталей передачи под нагрузкой.

Анализ расчетных методов определения коэффициента концентрации нагрузки показывает, что с учетом закручивания тела шестерни минимальный коэффициент концентрации нагрузки (т.е. при нулевом угле взаимного перекоса) не может быть меньше рассчитанного по формуле

$$K_\beta^{min} \geq 1,09 + 0,1 \left(\frac{b}{d_1}\right)^2,$$

где b – ширина зубчатого венца (длина зуба);

d_1 – диаметр начальной окружности.

В данной главе приводится расчет угла взаимного перекоса и коэффициента концентрации нагрузки для бортовых передач транспортных машин (на примере бортовой передачи трактора МТЗ-80), детали которых испытывают дополнительные деформации вследствие того, что являются частью несущей системы машины. Полученная для бортовой передачи трактора зависимость коэффициента концентрации нагрузки от крутящего момента показывает,

что с увеличением передаваемой нагрузки от 500 до 2500 н.м. коэффициент концентрации нагрузки уменьшается от 2,26 до I,34 вследствие упругой податливости зубьев. Отклонение зубьев от заданного направления при их нарезании, не соответствующее стандартным допускам, еще более увеличивает концентрацию нагрузки.

В работе предлагается экспериментальная оценка коэффициента концентрации нагрузки, путем исследования неравномерности износа по длине зубьев. Теоретическое обоснование такой оценки основывается на зависимости:

$$dh = J\,dS, \qquad (2)$$

где dh – приращение величины износа;
dS – приращение пути трения.

Для различных видов изнашивания его интенсивность пропорциональна контактному давлению в степени от I до 2 (или при герцевском контакте пропорциональна нагрузке в степени от 0,5 до I). При прохождении "герцевского" контакта путь трения скольжения пропорционален контактному давлению (или нагрузке в степени 0,5).

Таким образом зависимость (2) можно представить как

$$h = \kappa \cdot p^{n}, \qquad (3)$$

где κ – коэффициент пропорциональности;
p – нормальная нагрузка;
n – показатель степени.

Для всех точек, лежащих на одной образующей боковой поверхности зуба величины κ и n будут одинаковыми, и коэффициент концентрации нагрузки можно выразить через величину износа

$$K_{\beta} = \frac{p_{max}}{p_{н}} = \left(\frac{h_{max}}{h_{н}}\right)^{\frac{1}{n}},$$

где h_{max} – максимальный износ;
$h_{н}$ – номинальный износ.

Номинальный износ определяется при условии равномерного распределения износа по длине зуба

$$h_н = \frac{1}{b}\int_b h(b)\,db, \qquad (4)$$

где $h(b)$ – функция распределения износа по длине зубьев. Поскольку трудно определить закон распределения износа не только теоретически, но и экспериментально, поэтому в основу определения номинального износа положим, что износ в нескольких точках нам известен. Тогда интеграл в уравнении (4) можно решить приближенно методом трапеций

$$h_н = \frac{1}{b_{1i}}\left(\frac{h_1 + h_2}{2}b_{12} + \frac{h_2 + h_3}{2}b_{23} + \cdots + \frac{h_{i-1} + h_i}{2}b_{i-1,i}\right)$$

Для приближенной оценки коэффициента концентрации нагрузки достаточно экспериментальным путем получить величины износа в трех точках, расположенных симметрично относительно середины зуба ($b_{12} = b_{23}$) при расстоянии между крайними точками $b_{13} = 0{,}8\,b$. В этом случае номинальный износ определяется как

$$h_н = \frac{h_1 + 2h_2 + h_3}{4}.$$

Таким образом, зная распределение износа по длине зубьев, можно приближенно определить коэффициент концентрации нагрузки по известным величинам износа в трех точках

$$K_{\beta} = \left(\frac{4h_{max}}{h_1 + 2h_2 + h_3}\right)^{\frac{1}{n}}. \qquad (5)$$

Обработка результатов, полученных Зоммером при исследовании распределения износа методом искусственных баз, по предлагаемой нами зависимости (5) показала, что для шевронных зубчатых колес коэффициент концентрации нагрузки при $n = 1$ находится в пределах 1,1 – 1,37.

Вследствие концентрации нагрузки происходит повышенный износ и преждевременное выкрашивание зубьев в зоне концентрации нагрузки, поэтому представляет интерес связь между моментом начала контактного выкрашивания и соответствующей ему величиной износа.

Для оценки влияния изнашивания на контактное выкрашивание необходимо проанализировать напряженное состояние поверхностных слоев материала зубьев. Анализ результатов расчета величин абсолютной глубины расположения наиболее напряженной точки 8.

приводит к выводам:

I. При контакте тяжелонагруженных цементованных зубьев (σ_H = I500-2500 Мн/м^2), работающих со смазкой (коэффициент трения до 0,I) возможно зарождение глубинных микротрещин(глубина расположения 0,2-0,5 мм). Механическое изнашивание контактирующих поверхностей при этом будет способствовать выходу глубинных микротрещин наружу. Учитывая высокую износостойкость цементованных зубьев можно отметить, что начавшееся выкрашивание приводит к прогрессирующему контактному разрушению поверхностных слоев, последнее неоднократно отмечалось различными исследователями.

2. Для менее твердых материалов зубчатых колес (улучшенных, нормализованных), работающих в условиях контактных напряжений, превышающих предел длительной контактной выносливости (σ_H = 500-I000 Мн/м^2), наиболее напряженная точка находится ближе к поверхности (до 0,I мм),поэтому вследствие механического изнашивания контактирующих поверхностей будут удаляться поверхностные слои, в которых образуются микротрещины, что способствует некоторому увеличению долговечности по условию контактной прочности. Такое явление наблюдается в открытых зубчатых передачах при ограниченной смазке и в передачах, подверженных абразивному изнашиванию.

На основании зависимости (3) и уравнения, описывающего наклонную ветвь кривой контактной усталости, связь между моментом начала выкрашивания и величиной износа можно представить

$$\lg N = C - \frac{m}{2n} \lg h , \qquad (6)$$

где C – константа, отражающая механические свойства материала зубьев;

m – параметр кривой контактной усталости (m = 6);

N – число циклов до начала контактного выкрашивания.

Зависимости (I) и (6) представляют систему уравнений, решения которой дадут величины износа и число циклов до начала контактного выкрашивания. Учитывая трансцендентность уравнения (6), решение системы производится графически.

<u>В третьей главе</u> проводится обоснование методических положений контроля распределения износа по длине зубьев с применением поверхностной активации. В качестве объекта испытаний вы-

брана шестерня бортовой передачи трактора МТЗ-80 (m = 6,5 мм, Z_1 = I3, Z_2 = 72). На основе анализа действующих на детали передачи нагрузок обосновываются режимы ускоренных испытаний зубчатых передач на изнашивание и контактную прочность. Предельная форсированная нагрузка ограничивается изгибной прочностью зубьев и проверяется на сопротивление заеданию. Шестерня изготавливается в двух конструктивных вариантах: серийный - вал-шестерня; опытный - зубчатый венец с бочкообразными эвольвентными зубьями и с внутренними шлицами.

В соответствии с двумя вариантами шестерен выбираются два режима испытаний:

- для серийных шестерен контактные напряжения σ_H = I970 Мн/м^2 и соответствуют предельной форсированной нагрузке;
- для опытных шестерен σ_H = I740 Мн/м^2 и соответствуют нагрузке, принятой по заводской методике испытаний.

В целях сравнения распределения износа, кроме серийных сопряженных колес, используются два самоустанавливающихся колеса. Материал всех зубчатых колес сталь 20ХНР ГОСТ 4543-6I, глубина цементации I,2 мм, твердость рабочих поверхностей зубьев серийных шестерен HRC 58...6I, опытных - HRC 6I...65, сопряженных колес HRC 56...6I, шероховатость рабочей поверхности зубьев по 6 классу. Частота вращения шестерни 240-320 об/мин.

До настоящего времени определение эпюр износа по сложной геометрической поверхности трения с применением поверхностной активации не проводилось. В настоящей работе это осуществлено впервые в отечественной практике оценки износа зубьев. Одновременное определение величины износа нескольких точек одной поверхности с помощью метода поверхностной активации можно рассматривать как измерение закономерно изменяющейся активности нескольких гамма-источников. При этом в отдельных случаях источники разнесены на такое расстояние, что их взаимное влияние может быть частично исключено коллимацией, и тогда задача сводится к смешанному гамма-спектрометрическому и геометрическому разделениям с предшествующим расчетом или экспериментальным подбором коллиматора.

Ограниченная длина зуба шестерни (56 мм) и еще более ограниченный участок износа (42 мм) обусловили выбор количества точек-свидетелей износа. Для получения эпюры нами выбраны три точки, одна из которых расположена в центре, а две другие I0.

симметрично на той же образующей на расстоянии 19 мм.

Анализ активации материалов показывает, что при активации сталей наиболее приемлемыми для регистрации изотопами, обеспечивающими достаточно большую продолжительность испытаний, являются ^{56}Co и ^{58}Co. Первый образуется при активации железа протонами, второй - альфа-частицами. Активированные точки располагались на поверхности зуба по двум вариантам: а) все три точки имели один изотоп ^{58}Co; б) характерный изотоп центральной точки ^{56}Co, характерные изотопы крайних точек - ^{58}Co. При таком расположении точек-свидетелей износа для раздельного контроля износа необходимо, разработав соответствующую методику, использовать совместно геометрическое и гамма-спектрометрическое разделение изотопов. С помощью соответствующих режимов и геометрии активации обеспечивалась заранее заданная глубина активированного слоя. Диаметр активированных участков 3 мм. Средний угол падения пучка на поверхность зуба - 69^{0}.

Измерение интенсивности излучения изотопов осуществляется методом сцинтилляционной гамма-спектрометрии. Совместные измерения ^{56}Co и ^{58}Co усложняются наличием у этих изотопов характерных гамма-линий ($E_\gamma = 0{,}805$ мэв и $E_\gamma = 0{,}845$ мэв), которые имеющимися аппаратурными средствами практически не разделяются. Для уменьшения взаимного влияния соседних источников в работе использовались два одноканальных конических коллиматора с различными параметрами.

Для определения интенсивности излучения каждой активированной точки необходимо составить систему уравнений. Учитывая, что помимо гамма-спектрометрического разделения используется геометрическое разделение, каждое уравнение для определения суммарной интенсивности всех излучателей составлено в зависимости от расположения точки, находящейся в момент измерения по оси детектора. Тогда система уравнений будет иметь вид

$$J_{\underline{I}} = K_1^{\underline{I}} \cdot J_1 + K_2^{\underline{I}} \cdot J_2 + K_3^{\underline{I}} \cdot J_3$$
$$J_{\underline{II}} = K_1^{\underline{II}} \cdot J_1 + K_2^{\underline{II}} \cdot J_2 + K_3^{\underline{II}} \cdot J_3$$
$$J_{\underline{III}} = K_1^{\underline{III}} \cdot J_1 + K_2^{\underline{III}} \cdot J_2 + K_3^{\underline{III}} \cdot J_3 \quad ,$$

где $J_{\underline{I}}, J_{\underline{II}}, J_{\underline{III}}$ – суммарные интенсивности излучателей в каждом из 3-х положений детали относительно детектора;

J_1, J_2, J_3 – интенсивности излучения каждого источника;

$K_i^{(j)}$ – коэффициенты взаимного влияния источников в зависимости от положения детали относительно детектора, при этом i – номер источника (точки на зубе), j – номер варианта положения детали относительно детектора.

Решения этой системы дадут интенсивности излучения каждого источника, по изменению которых судят о величине линейного износа. Экспериментальное определение коэффициентов взаимного влияния проводится на установке, моделирующей геометрические условия измерения активированных шестерен.

Экспериментальные исследования проводились на стенде в лаборатории КИБ шасси ГСКБ по пропашным тракторам (г.Минск, МТЗ). Стенд позволяет воспроизводить нагрузки, действующие на бортовую передачу при эксплуатации, и состоит из 2-х задних мостов трактора МТЗ-80, собранных в замкнутый контур. Для регистрации излучения используется радиометрический комплекс.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований распределения износа по длине зубьев прямозубой бортовой передачи трактора МТЗ-80. Испытано 10 бортовых шестерен (5 серийных, 5 опытных). Износ 2-х шестерен контролировался кроме метода поверхностной активации методом искусственных баз. Две серийные шестерни испытывались при работе в паре с самоустанавливающимися колесами.

Динамика изнашивания, контролируемая по трем точкам на поверхности одного из зубьев, позволяет получить эпюры износа по длине зубьев. Для построения эпюр износа серийных шестерен использованы величины износа зубьев через 15,30,45 часов работы (рис.1а). Шестерня 1 испытывалась без изгибающей нагрузки и неравномерность износа объясняется "технологическим " перекосом из-за непараллельности зубьев при их нарезании (0,07 мм при норме 0,02 мм). Переменное действие изгибающего усилия уменьшает величину максимального износа (шестерня 3) по сравнению с постоянно действующим усилием (шестерня 2). Кроме этого, несмотря на наличие "технологического" перекоса, концентрация нагрузки при действии изгибающего усилия направлена в сторону точки Ш (шестерня 2-4). Меньший износ зубьев шестерен 4 и 5 по сравнению с шестернями 1 и 3 объясняется самоустановкой сопряженного колеса и выравниванием нагрузки по длине зубьев.

По результатам исследования изнашивания опытных шестерен построены эпюры износа через I5,30,45,I00 часов работы(рис.Iб). Шестерни 6 и 7 работали без изгибающей нагрузки, поэтому вследствие "технологического" перекоса износ зуба в точке I выше, чем в точке Ш. Шестерня 8 работала с постоянной изгибающей нагрузкой 60% по времени, действие которой уменьшает начальный взаимный перекос зубьев. Это подтверждается близкими значениями величин износа в крайних точках. Шестерни 9 и I0 работали с постоянной изгибающей нагрузкой. Шестерня 9 имеет более выраженную неравномерность распределения износа по сравнению с шестерней I0, вследствие того, что зубья шестерни 9 были изготовлены без "бочки". Эпюры показывают, что при действии усилия, изгибающего полуось, происходит увеличение взаимного перекоса зубьев. Последнее приводит к увеличению концентрации нагрузки и повышенному износу зубьев в зоне концентрации нагрузки. Более высокий износ зубьев серийных шестерен происходит по следующим причинам: ввиду меньшей твердости рабочей поверхности зубьев; из-за повышенной передаваемой нагрузки; отсутствие бочкообразности на поверхности зубьев приводит к увеличению концентрации нагрузки и неравномерному износу зубьев.

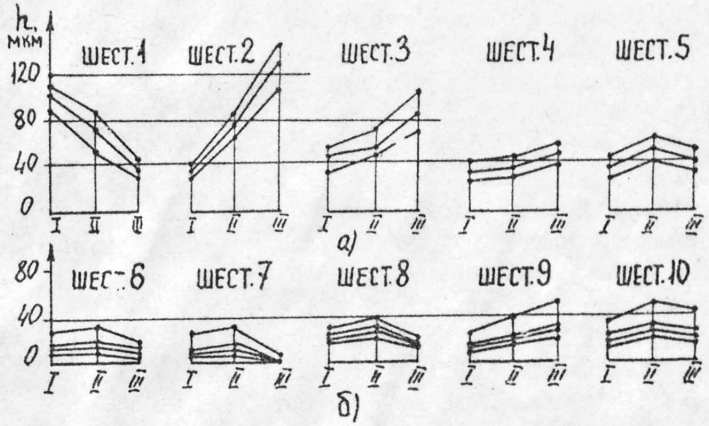


Рис. I. Эпюры износа зубьев
а - серийные шестерни;
б - опытные шестерни.

Испытания на изнашивание до начала контактного выкрашивания позволили установить связь между величиной износа и моментом начала выкрашивания. Экспериментальные результаты описываются уравнением линейной регрессии (при условии $5 \cdot 10^5 < N < 4 \cdot 10^6$). $\lg N = 11{,}45 - 2{,}84 \lg h$.

Сравнение данной зависимости с уравнением (5) позволяет определить значение показателя степени $m/2n = 2{,}84$; $n = 1{,}05$. На основании этого для дальнейшей обработки результатов испытаний принято, что износ пропорционален нормальной нагрузке. Знание динамики распределения износа дает возможность по формуле (5) получить при $n = 1$ зависимости коэффициентов концентрации нагрузки во времени для всех испытанных шестерен. Значения коэффициентов концентрации нагрузки находятся в пределах: 1,5 – 1,7 – для серийных шестерен с нормальными зубьями; 1,3–1,4 – для шестерен с бочкообразными зубьями (стрела "бочки" 0,02–0,04 мм); 1,1–1,2 – для шестерен, работающих в паре с самоустанавливающимися колесами.

Экспериментальные величины интенсивности изнашивания, показывают, что при наличии смазки имеет место упругий контакт зубьев, при этом интенсивность изнашивания находится в предалах $(2\text{–}6) \cdot 10^{-8}$. Теоретическая интенсивность изнашивания, вычисленная ранее, равна $3{,}8 \cdot 10^{-8}$. Необходимо отметить, что в процессе испытаний при сборке и разборке передач с твердостью зубьев шестерен HRC 63...65 наблюдалось скальвание рабочей поверхности, поэтому целесообразно ограничить поверхностную твердость величиной HRC 62 единицы.

Сравнение величин износа, полученных по методу поверхностной активации и методу искусственных баз, показало незначительное расхождение результатов по причине контроля износа на разных зубьях одной шестерни.

В настоящей работе исследован процесс контактного выкрашивания с применением поверхностной активации. Ножки зубьев шестерен II и I2 активировались по полосе, находящейся в околополюсной зоне. Изнашивание и контактное выкрашивание контролировались по изменению интенсивности излучения наведенного изотопа ^{56}Co. Поскольку активировался поверхностный слой, глубиной 0,2 мм, то установлено, что унос массы с активированной поверхности пропорционален числу циклов. Проведенные нами иссле-

дования показали возможность использования метода поверхностной активации для исследования динамики контактного выкрашивания, что значительно расширяет область применения МПА.

В пятой главе дается экономическое обоснование внедрения МПА для контроля распределения износа по длине зубьев шестерен бортовой передачи трактора МТЗ-80. При сравнении с микрометрированием основной экономический эффект получен за счет более высокой точности и чувствительности МПА, что позволяет сокращать длительность испытаний.

В Ы В О Д Ы

I. На основе анализа условий работы бортовых передач транспортных и сельскохозяйственных машин разработаны расчетные зависимости: интенсивности изнашивания и величины износа от концентрации нагрузки; момента начала контактного выкрашивания рабочих поверхностей зубьев от величины их износа. Указанные зависимости рекомендуется применять при проведении проектных расчетов зубчатых передач.

2. Разработан экспериментальный способ определения коэффициента концентрации нагрузки, позволяющий на основе экспериментальных данных распределения износа по длине зубьев произвести оценку концентрации нагрузки при проверочном расчете зубчатых передач.

3. Разработана методика получения эпюр износа по длине зубьев на основе дифференцированного измерения интенсивности гамма-излучения изотопов, наведенных в нескольких точках контролируемой поверхности при совместном использовании геометрии измерений и гамма-спектрометрического анализа. Точность определения линейных величин износа составляет II%.

4. На основе экспериментальных исследований установлено, что для бортовой передачи трактора МТЗ-80, работающей с крутящим моментом 2-2,5 Кн.м и нагрузкой, изгибающей полуось, равной I 3 Кн, коэффициент концентрации нагрузки следует принимать: для нормальных зубьев I,5-I,7; для бочкообразных зубьев I,3-I,4 (стрела "бочки" 0,02-0,04 мм); при использовании самоустанавливающихся сопряженных зубчатых колес коэффициент концентрации нагрузки уменьшается до I,I - I,2.

5. Экспериментальное исследование контактной прочности зубьев (5-6 класс шероховатости) показывает, что при контакте тяжелонагруженных цементованных поверхностей, работающих в масля-

ной среде, интенсивное изнашивание ускоряет процесс контактного разрушения рабочих поверхностей зубьев, что подтверждает теоретические положения, разработанные на основе анализа напряженного состояния поверхностных слоев материала зубьев.

6. Установлена линейная связь величин износа зубьев тяжелонагруженной бортовой передачи трактора МТЗ-80 и нагрузки, справедливая только до момента начала контактного выкрашивания или заедания зубьев.

7. Сравнение теоретической интенсивности изнашивания, равной $3{,}8 \cdot 10^{-8}$ при условии упругого контакта, и экспериментальной интенсивности изнашивания, находящейся в пределах $(2\text{-}6) \cdot 10^{-8}$, показывает, что при наличии смазки и нагрузки, упомянутой в п.4, в тяжелонагруженных зубчатых передачах имеет место упругий контакт зубьев.

8. При исследовании контактного выкрашивания установлено, что унос массы с поверхности (в околополюсной зоне на ножке зуба) до глубины 0,2 мм пропорционален числу циклов нагружения зубьев.

9. Экономический эффект за счет сокращения длительности испытания при условии внедрения метода контроля распределения износа по длине зубьев с применением поверхностной активации на Минском тракторном заводе составляет 37 тыс.рублей.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

I. Постников В.И., Гарбар И.Н., Логинов В.В. Исследование износа приборных зубчатых передач в вакууме. "Известия вузов. Машиностроение", 1976, № 5.

2. Наследышев Ю.К., Кошман В.Н., Фельдман И.Н., Логинов В.В. Гарбар И.Н. Радиоизотопный контроль износа деталей машин и оборудования. Сб ."Методы и средства повышения надежности машин", Минск, БНИИНТИ, 1976.

3. Логинов В.В., Гарбар И.Н., Наследышев Ю.К., Скорынин Ю.В., Фельдман И.Н., Кошман В.Н. Исследование износа зубьев шестерен конечной передачи трактора с применение радиоактивных изотопов. Сб. "Развитие методов исследований триботехнических явлений в машинах". Минск, ИНДМАШ АН БССР, 1976.