

На правах рукописи

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

ЯКОВЛЕВА АННА ПЕТРОВНА

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЫШЕНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ
СПОСОБНОСТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС КОМБИНИРОВАННОЙ
ОБРАБОТКОЙ**

Специальность 05.02.08. – Технология машиностроения

**АВТОРЕФЕРАТ
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**



Работа выполнена в Калужском филиале МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель-доктор технических наук, профессор
Созинов А.И.

Официальные оппоненты: д.т.н., профессор **Ямников А.С.**

к.т.н., доцент **Шаталов В.К.**

Ведущее предприятие –Калужское Опытное Бюро Машиностроения (КОБМ).

Защита диссертации состоится «29» июня 2005г. на заседании диссертационного совета Д212.141.06 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

Ваш отзыв на реферат в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просим высылать по указанному адресу.

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

Телефон для справок: 267-09-63.

Автореферат разослан «26» мая 2005г

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Васильев А.С.

В диссертации рассматриваются вопросы, связанные с технологическим обеспечением нагрузочной способности зубчатых колес, работающих в условиях высоких скоростей и нагрузок.

Актуальность темы.

В транспортном машиностроении широко используют цилиндрические, прямозубые зубчатые колеса с внешним зацеплением среднего модуля (от 2 до 6мм). В основном их изготавливают из цементуемых (12Х2Н4А, 20Х3МВФ и др.) и азотируемых (40ХНМА, 38ХМЮА и др.) сталей по стандартным техпроцессам: 1) зубофрезерование, ХТО (цементация), зубошлифование; 2) зубофрезерование, зубошлифование, азотирование.

Одной из основных тенденций в производстве зубчатых колес данной группы является повышение их нагрузочной способности, т.е. износостойкости, контактной и изгибной прочностей.

Анализ литературы, опыт отечественных и зарубежных предприятий показывает, что применение методов, основанных на пластической деформации, применяемых как для формообразования, так и для упрочнения поверхностного слоя деталей машин, позволяет существенно повысить их нагрузочную способность. Работы, выполненные Балтер М.А., Браславским В.М., Павловым В.А., Рыжовым Н.М., Юдиным Д.Л., Дальским А.М., Орловым В.В., Питухиным А.В. и др. показали возможность повышения нагрузочной способности зубчатых колес за счет использования методов поверхностного пластического деформирования (ППД), которые существенно улучшают структуру и свойства обработанной поверхности на операциях окончательного формообразования и могут выполнять функцию технологического «барьера», ослабляющего или исключаяющего проявление отрицательных факторов, наследуемых готовым изделием от предыдущих операций механической обработки резанием.

Одним из основных способов ППД зубчатых колес, применяемых в настоящее время, является обкатывание зубьев высокопрочными зубчатыми накатниками повышенной точности. Однако при данном способе упрочнения наиболее нагруженная часть зуба – выкружка, в которой, как правило, зарождаются трещины, недостаточно упрочняется вследствие особенностей кинематики метода обката (наличия повышенного относительного скольжения сопряженных зубчатых профилей инструмент-заготовка при упрочнении). В связи с этим актуальными являются исследования, направленные на повышение нагрузочной способности зубчатых колес технологическими методами на основе применения упрочняющей технологии.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1732151

яковлева А. П. Технологичес

МГТУ
им. Н. Э. БАУМАНА
БИБЛИОТЕКА

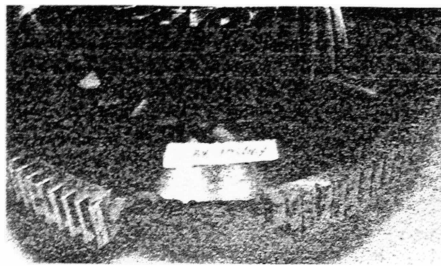


Рис.1. Зубчатое колесо $m = 2,75$; $z = 112$; сталь 20ХЗМВФ, разрушенное вследствие дефектов на поверхности в области переходной кривой.

Цель и задачи исследований.

Основной целью работы является повышение нагрузочной способности (износостойкости, контактной и усталостной прочности) высокоскоростных тяжелонагруженных зубчатых колес на основе выбора кинематической схемы формообразования выкружки и упрочнения профиля зубьев. Для достижения этой цели необходимо:

1. Провести анализ существующих методов повышения нагрузочной способности зубчатых колес.
2. Разработать методику расчета зуборезного инструмента, позволяющего модифицировать профиль переходной кривой для обеспечения оптимальной степени деформации при формообразовании выкружки зубьев.
3. Вывести аналитические зависимости, позволяющие рассчитать технологические параметры комбинированной обработки зубчатых колес.
4. Разработать деформирующие инструменты для формообразования переходных кривых и упрочнения активного профиля, позволяющих обеспечить требуемые функциональные параметры качества поверхностного слоя зубьев (шероховатость, волнистость и микротвердость).
5. Исследовать влияние комбинированной обработки на структуру и физико-механические свойства цементируемых и азотируемых сталей.
6. Установить влияние комбинированной обработки на нагрузочную способность зубчатых колес.

Научная новизна работы.

Научная новизна заключается в следующем:

Установлена взаимосвязь технологических параметров комбинированной обработки, геометрических параметров деформирующего инструмента на основе теоретических расчетов сил и площади контакта в станочном зацеплении инструмент-деталь, что позволило обеспечить

оптимальные функциональные параметры поверхностного слоя и повысить нагрузочную способность зубчатых колес.

Практическая ценность работы.

Предложенные методики расчетов изложены в форме, удобной для использования в производстве зубчатых колес. Использование результатов теоретических и экспериментальных исследований позволяет повысить нагрузочную способность тяжелонагруженных зубчатых колес на 25-30%. Универсальность разработанного комбинированного метода обработки зубофрезерованием и пластическим деформированием определяет высокую экономическую эффективность предлагаемой технологии.

Реализация результатов работы.

Основные результаты работы внедрены на Калужском заводе путеремонтных машин (КПРМЗ), а также нашли применение в учебном процессе при подготовке инженеров в МГТУ им. Н.Э.Баумана в г. Калуге. По заказу КПРМЗ при участии автора выполнены научно-исследовательские работы по повышению качества изготовления тягового редуктора путеремонтной машины УТМ (Универсальный тяговый модуль).

Апробация работы.

Основные вопросы диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- на научных семинарах кафедры М1-КФ «Технология машиностроения» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001г., 2002г.
- на научных семинарах кафедры М7-КФ «Технология конструкционных материалов» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001г., 2002г.
- на научном семинаре кафедры МТ-3 «Технология машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003г.
- на Всероссийской научно-технической конференции, Калуга, 2001г.
- на научном семинаре кафедры М1-КФ «Технология машиностроения» КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005г.

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 7 работ.

Объем работ.

Диссертационная работа изложена на 131 странице машинописного текста, состоит из введения, шести глав, приложений и списка использованной литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечается актуальность проблемы повышения нагрузочной способности зубчатых колес в условиях возрастающих скоростей и передаваемых нагрузок. Дана общая характеристика результатов

исследований, полученных в диссертации, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе основное внимание уделено анализу влияния технологических методов обработки и зависимости нагрузочной способности шестерен от состояния поверхностного слоя зубьев. Показано, что нагрузочная способность зубчатых колес определяется не только параметрами поверхностного слоя активного профиля, но и состоянием поверхностного слоя переходной кривой (выкружки) зубчатых колес. Приводятся данные, согласно которым основными причинами преждевременного выхода из строя зубчатых передач является износ рабочих профилей и усталостные трещины у основания зубьев. В работах Ямникова А.С., Овумяна Г.Г., Орлова В.В. и других отмечается, что зубофрезерование является широко применяемым методом механической обработки для тяжелонагруженных зубчатых колес, в том числе и закаленных до высокой твердости. Для высокоскоростных, тяжелонагруженных зубчатых колес в настоящее время основным способом окончательной обработки является зубошлифование, которое по данным Якимова А.В., Рыжова Н.М. и др. часто сопровождается дефектами поверхностного слоя в виде прижогов, трещин, растягивающих остаточных напряжений.

По существующим технологическим процессам производства высокоскоростных тяжелонагруженных передач форма и размеры выкружки определяются стандартной технологией, в частности, радиусом закругления режущий кромки зубообрабатывающего инструмента. В связи с тем, что выкружка зубьев окончательно формируется на зубофрезерной операции, а износ фрез начинается с вершин зубьев, даже при допустимом износе фрез (до 0,8 мм.) образуются риски и задиры в области переходной кривой и впадины зубьев.

В современном машиностроении широко применяются методы упрочняющей обработки для повышения качества поверхности деталей машин. В работах Балтер М.А., Браславского В.М., Павлова В.А., Папшева Д.Д., Гуляева В.И. и др. отмечается положительное влияние пластической деформации на состояние поверхностного слоя. При ППД повышается нагрузочная способность (износостойкость, контактная и усталостная прочность), уменьшается шероховатость и волнистость, возрастает твердость упрочненных поверхностей деталей машин. Однако в этих работах не достаточно изучено влияние ППД на качество поверхности переходных кривых и нагрузочную способность тяжелонагруженных зубчатых колес среднего модуля.

Существующие отечественные способы упрочнения зубчатых колес среднего модуля не всегда обеспечивают требуемое качество поверхности в области переходной кривой и впадины зубьев или упрочнение

осуществляется методом единичного деления, который не имеет широкого применения из-за низкой производительности.

Как показал анализ литературы наибольшая эффективность в повышении нагрузочной способности для тяжелонагруженных деталей машин, работающих при высоких скоростях, обеспечивается применением комбинированной обработки, выполняемой в различных структурных состояниях материала. Поэтому разработка метода, совмещающего зубофрезерование, как наиболее производительного и распространенного способа механической обработки и пластическую деформацию, положительно влияющую на нагрузочную способность зубчатых колес, является актуальным.

На основании анализа литературных источников поставлены задачи, направленные на дальнейшее совершенствование комбинированной обработки применительно к тяжелонагруженным зубчатым колесам среднего модуля.

Во второй главе описывается методика проведения экспериментальных исследований, используемые образцы и инструмент, методы и измерительные приборы.

Для определения эффективности применения комбинированной обработки использован метод сравнительного анализа свойств поверхностного слоя и нагрузочной способности зубчатых колес, обработанных по различным технологиям.

Для исследования были выбраны тяжелонагруженные зубчатые колеса газотурбинных двигателей и тяговых редукторов подвижного состава с $m=2; 2,5; 2,75; 3; 5$ с различным числом зубьев, изготовленных из сталей 12Х2Н4А, 20Х3МВФ и 40ХНМА широко используемые для изготовления зубчатых передач исследуемой группы.

В соответствии со стандартным и разработанными техпроцессами были изготовлены зубчатые колеса по нескольким вариантам:

- Сталь 12Х2Н4А и 20Х3МВФ:

1 вариант: (стандартный техпроцесс), зубофрезерование, цементация, закалка, зубошлифование.

2 вариант: (разработанный), зубофрезерование, КО, цементация, закалка, зубошлифование).

- Сталь 12Х2Н4А и 20Х3МВФ (зубчатые колеса, обработанные по двухзаходным техпроцессам, когда после цементации до закалки детали отправляют в цех для окончательной механической обработки, т.е.нарезание, шлицев, пазов и др.):

1 вариант: зубофрезерование, цементация, закалка, зубошлифование (стандартный);

2 вариант: зубофрезерование, цементация, КО, закалка, зубошлифование (разработанный).

- Сталь 40ХНМА:

1 вариант: (стандартный), зубофрезерование, зубошлифование, азотирование.

2 вариант: (разработанный), зубофрезерование, КО, азотирование.

Для исследования влияния методов обработки на нагрузочную способность зубчатых колес в разработанный техпроцесс включен метод комбинированной обработки (КО).

Для тяжелонагруженных зубчатых колес, работающих при высоких скоростях и знакопеременных нагрузках, КО заключается в чистовом зубофрезеровании фрезой с модифицированным производящим контуром (с протуберанцем) и формообразовании выкружки объемной пластической деформацией (ОПД). Комбинированную обработку выполняли на зубофрезерных станках модели 5К328. Объемную пластическую деформацию выкружек зубчатых колес методом обкатки производили разработанным и изготовленным специальным инструментом, представленным на рис.2. Инструмент устанавливается на оправку зубофрезерного станка и формообразование выкружки производится путем вдавливания ролика в поверхность впадины на определенную глубину.

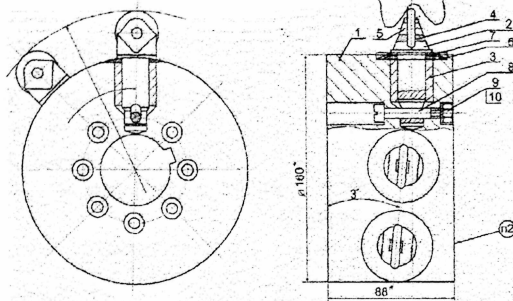


Рис.2. Инструмент для обработки объемным пластическим деформированием выкружки зубчатых колес среднего модуля

Для зубчатых колес, работающих при высоких скоростях и нагрузках и испытывающих интенсивный износ рабочих профилей, метод комбинированной обработки (КО) включает зубофрезерование фрезой с протуберанцем и совмещение в одном технологическом цикле ППД активного профиля и ОПД выкружки. Для этого применен специальный деформирующий инструмент, показанный на рис.3. Комбинированную обработку выполняли на зубофрезерных станках модели 5К328.

Основная часть работ по исследованию свойств поверхностного слоя проводилась на роликовых образцах диаметром 38 мм., шириной 11мм. и изготовленных из тех же материалов, что и зубчатые колеса. Термическая обработка образцов и зубчатых колес производилась совместно. Для

получения следов обработки вдоль оси, аналогично следам на зубчатых колесах, образцы обрабатывались на том же оборудовании, что и зубчатые колеса. Пластическая деформация образцов проводилась специальным инструментом, имитирующим работу инструмента для пластической деформации зубчатых колес.

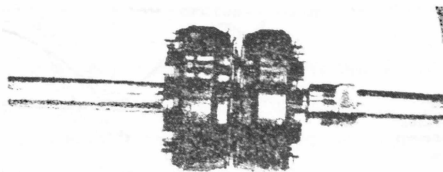


Рис.3.Инструмент для поверхностного пластического деформирования профиля и объемного пластического деформирования впадины зубчатых колес

Испытания на ударную вязкость проводили на маятниковом копре согласно ГОСТ 9454-98. Образцы обрабатывались в соответствии с технологией изготовления зубчатых колес. Процесс зубофрезерования имитировали изготовлением канавки дисковой фрезой. Канавку получили вдавливанием пуансона в предварительно фрезерованный паз шириной 2мм и глубиной 1,5 мм. После деформации глубина канавки составила 2мм. При пластической деформации канавки выдавливались пуансоном с радиусом, равному радиусу ролика деформирующего инструмента.

Испытания на усталостную прочность проводили на гидравлической пульсаторной машине ГРМ-2 согласно ГОСТ 8453-98.

Измерение твердости выполняли на твердомерах ТК (Роквелл), микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на алмазную пирамиду в 100 грамм.

Контроль на сплюсность металла выкружки после ОПД (отсутствие трещин) производили на магнитном дефектоскопе МДМ-6000.

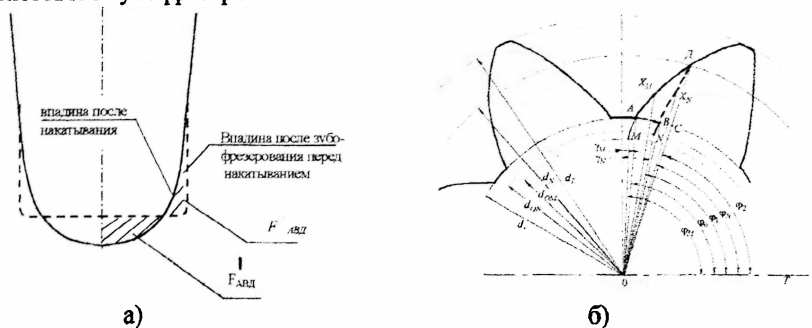
Исследования остаточного аустенита проводились на приборе «Дрон 4-07» согласно ГОСТ 7312-98.

Испытания на износ и контактную прочность производили на модернизированном контрольно-обкатном станке 5К720А. Износ образцов оценивали методом радиоактивных изотопов. Для учета естественного распада использовали контрольный образец. Замеры в процессе изнашивания образцов на стенде проводили непрерывно. Результаты измерений активности образцов по тарифовочной кривой переводили в линейные величины износа (мм.).

Третья глава посвящена теоретическому расчету профиля червячной фрезы для чистового зубофрезерования тяжело нагруженных зубчатых колес

среднего модуля. Для вывода основных аналитических зависимостей использовались методики Гавриленко В.А.

Используя равенство объемов металла, вытесненного со дна впадины и размещенного в области переходной кривой, рассчитан профиль червячной фрезы с модифицированным производящим контуром (с протуберанцем) для чистового зубофрезерования.



d_i - диаметр впадин зубчатого колеса;

d_{ON} - диаметр основной окружности для эвольвенты ДН;

d_{OM} - диаметр основной окружности для эвольвенты ДМ;

d_N - точка начала эвольвенты ДН;

d_L - диаметр вершин зубчатого колеса.

$\varphi_n; \varphi_n; \varphi_1; \varphi_2; \varphi_0$ - углы, определяющие положение эвольвент ДН и ДМ.

Рис.4. Схема к расчету червячной фрезы с модифицированным производящим контуром (с протуберанцем) для чистового зубофрезерования

$$F_{\text{АВД}} = F^1_{\text{АВД}}; \text{ (рис.4.а)}$$

$F^1_{\text{АВД}}$ - объем металла, вытесненный со дна впадины на единицу ширины зубчатого колеса.

$F_{\text{АВД}}$ - объем металла, размещенный в области переходной кривой на единицу ширины зубчатого колеса.

$$F_{\text{АВД}} = F_{\text{АСД}} - F_{\text{ВСД}}; \text{ (согласно рис.4.б)} \quad (1)$$

$$F_{\text{АСД}} = \iint \rho d\rho d\varphi; \quad (2)$$

$$F_{\text{ВСД}} = \iint \rho d\rho d\varphi; \quad (3)$$

ρ - радиус вектор точек $X_M; X_N$

Получено окончательное выражение для вычисления объема металла, вытесненного со дна впадины и размещенного в области переходной кривой зубчатого колеса в зависимости от угла протуберанца:

$$F_{ABD} = \frac{(d_N^2 - d_{OM}^2)^{\frac{3}{2}} - (d_i^2 - d_{OM}^2)^{\frac{3}{2}}}{24d_{ON}} - \frac{d_i^2}{8} \left[\frac{\sqrt{d_i^2 - d_{OM}^2} - \sqrt{d_N^2 - d_{OM}^2}}{d_{OM}} - \arccos \frac{d_{OM}}{d_i} + \arccos \frac{d_{OM}}{d_N} \right] - \frac{(d_N^2 - d_{ON}^2)^{\frac{3}{2}} - (d_i^2 - d_{ON}^2)^{\frac{3}{2}}}{24d_{ON}} + \frac{d_i^2}{8} \left[\frac{\sqrt{d_i^2 - d_{ON}^2} - \sqrt{d_N^2 - d_{ON}^2}}{d_{ON}} - \arccos \frac{d_{ON}}{d_i} + \arccos \frac{d_{ON}}{d_N} \right] \quad (4),$$

где $d_{ON} = d_e \cdot \cos \alpha_{\partial_N}$; d_e - диаметр делительной окружности; α_{∂_N} - искомый угол профиля фрезы с протуберанцем; d_i - диаметр впадин зубчатого колеса; d_N - диаметр начала новой эвольвенты ДН; d_{OM} - диаметр точки М на эвольвенте ДМ. Задавая технологические параметры обработки давлением впадины, определен объем (на единицу ширины зубчатого колеса) выдавленного из впадины и размещенного в области переходной кривой металла. Для вычисления угла профиля червячной фрезы с протуберанцем α_{∂_N} по формуле (4) разработана компьютерная программа на языке Borland Pascal.

На рисунке 5 показан профиль фрезы с модифицированным исходным контуром в осевом сечении. Остальные размеры в соответствии с ГОСТ3648-88.

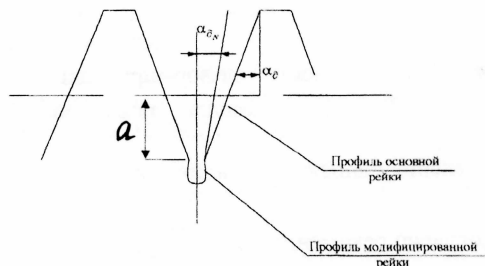


Рис.5. Профиль червячной фрезы с модифицированным производящим контуром (с протуберанцем) для чистового зубофрезерования.

В данной работе проведен теоретический расчет и экспериментальная проверка силы при объемном пластическом деформировании выкружек зубчатых колес среднего модуля. Для вывода основных аналитических зависимостей использовались рекомендации Сторожева А.Г. и Браславского В.М.

α_{∂} - угол вдавливания, $\sin \alpha_{\partial} = \frac{c}{a}$; принимаем согласно рекомендациям Браславского В.М.;

a – радиус профиля ролика, мм;

R_p – радиус ролика, т.е. $(D_p/2)$, мм;

r – радиус галтели переходной кривой зубчатого колеса, мм;

b – расстояние от оси вращения инструмента до центра ролика, мм;

$h_{\text{пл}}$ и h_y – пластическая и упругая составляющая деформации;

S_b – вертикальная подача детали, мм/об;

l_n , $\alpha_{\text{пл}}$, l_y , α_y – длины и углы контакта ролика с деталью от пластической и упругой составляющей деформации соответственно.

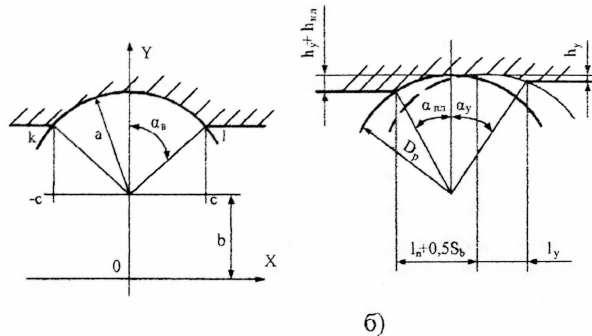


Рис.6. Схема к расчету площади контакта.

$$P = S_x \sigma_N, \quad (1)$$

P – сила деформирования;

S_x – площадь контактной поверхности деформирующего ролика с дном впадины зубчатого колеса, т.е. площадь поверхности, образованная вращением дуги kl вокруг оси OX .

σ_N – величина распределения напряжений на поверхности контакта.

$$\sigma_N = 2,75 \sigma_s \quad (2)$$

σ_N – определяем согласно рекомендациям Сторожева А.Г.

σ_s – напряжение текучести.

$$S_x = \frac{\pi(\alpha_{\text{пл}} + \alpha_y)}{180^\circ} \int_{-c}^{+c} |y| \sqrt{1 + y'^2} dx \quad (3)$$

Получено выражение для вычисления силы, необходимой для вытеснения металла со дна впадины и размещения в области переходной кривой зубьев при объемной пластической деформации:

$$P = \frac{2,57 \pi a \sigma_s}{90} \left(2\sqrt{2rh - h^2} + 2b \arcsin \alpha_s \left(\arcsin \frac{\sqrt{2R_p(h_{\text{пл}} + h_y)} + 0.5S}{R_p} + \arcsin \frac{2h_y}{R_p} \right) \right), \text{ Н} \quad (4)$$

$h_y = 2,4 R_p (1 - \mu^2)^2 \left(\frac{HB}{E} \right)^2$ – упругая деформация, рассчитанная согласно формуле Н.М.Михина.

(5)

μ – коэффициент Пуассона;
НВ – твердость по Бринеллю;
 E – модуль упругости.

Таким образом, определена сила деформирования, которая определяется физико-механическими свойствами обрабатываемого материала, глубиной вдавливания ролика и геометрическими размерами деформирующего инструмента.

В работе приведена экспериментальная проверка силы вдавливания ролика деформирующего инструмента, которая показала адекватность сделанных теоретических расчетов.

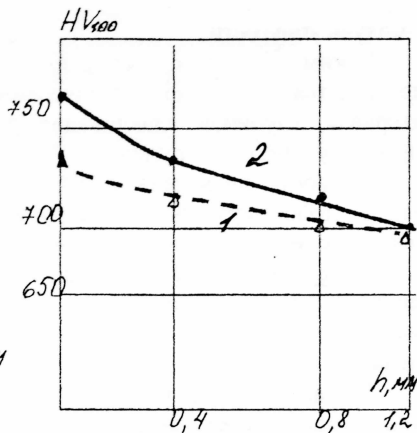
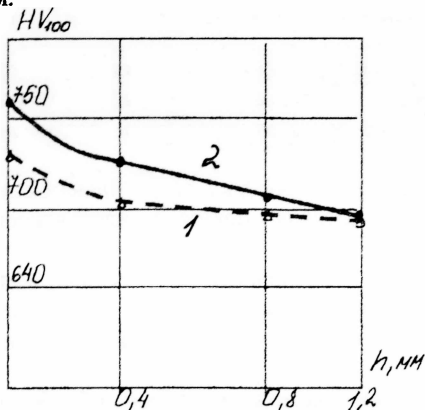
Четвертая глава посвящена исследованию зависимости шероховатости, волнистости и физико-механических свойств поверхностного слоя зубчатых колес от режимов комбинированной обработки.

В работе было исследовано влияние комбинированной обработки, выполненной перед азотированием, на свойства поверхностного слоя зубчатых колес из стали 40ХНМА. Активный профиль зубьев упрочнялся поверхностной пластической деформацией (ППД), а выкружка формировалась объемной пластической деформацией инструментом, представленным на рис.3. Металлографические исследования показали, что твердость и толщина азотируемого слоя зависят от параметров комбинированной обработки. У зубчатых колес, обработанных с применением комбинированной обработки толщина упрочненного слоя и твердость поверхностного слоя (HV 650) больше, чем у колес, обработанных по стандартной технологии (HV600) на 10%.

Влияние пластической деформации на изменение микротвердости в поверхностном слое цементируемых зубчатых колес было исследовано на роликовых образцах. На рис.7. представлены графики изменения микротвердости поверхности образцов, изготовленных из сталей 12Х2Н4А и 20Х3МВФ и обработанных по различным технологиям – стандартной и предлагаемой. Как видно из графиков микротвердость поверхностного слоя, обработанного по предлагаемой технологии увеличивается на 15...20% по сравнению со стандартной технологией.

На рис.8. показана выкружка зубчатого колеса $m=2,5$, $z=50$, сталь 20Х3МВФ, полученная комбинированной обработкой. В результате применения пластического деформирования при формообразовании впадины взамен обработки резанием по стандартной технологии повысились показатели качества поверхностного слоя: шероховатость поверхности уменьшается в 10 раз с $Rz\ 10$, исходной после зубофрезерования, до $Rz1$. Данные металлографических исследований показали, что наблюдается значительное измельчение зерна и их направленная ориентация без

нарушения сплошности материала, при этом глубина упрочнения более 1,5 мм.



а)

б)

Рис.7. График зависимости микротвердости от глубины поверхностного слоя: а) 1 -1 вариант (стандартный); 2 -2 вариант (разработанный) сталь 12X2H4); б) 1 -1 вариант (стандартный); 2 -2 вариант (разработанный) сталь 20X3MBФ)

При поверхностной пластической деформации (ППД) профиля зубьев в различных структурных состояниях шероховатость и волнистость исходной поверхности сглаживается, образуется плосковершинный профиль неровностей, увеличивается радиус закругления вершин неровностей в 10-20 раз, уменьшается неоднородность распределения вершин по высоте, волнистость уменьшается в 2 раза.

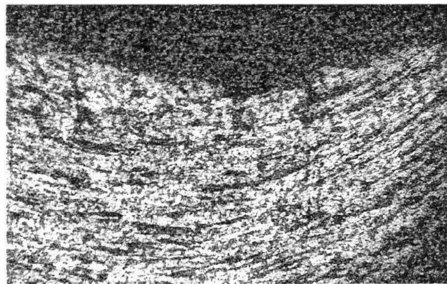


Рис.8. Выкружка зубчатого колеса авиационного двигателя $m=2,5$, $z=50$, сталь 20X3MBФ после применения комбинированной обработки

Таким образом, комбинированная обработка положительно влияет на состояние поверхностного слоя зубчатых колес исследуемой группы.

В пятой главе представлены результаты влияния комбинированной обработки на содержание остаточного аустенита и структуру в поверхностном слое зубчатых колес.

В работе исследовано влияние пластической деформации на содержание остаточного аустенита в поверхностном слое зубчатых колес, обработанных по сравниваемым техпроцессам. Исследования показали изменение показателей остаточного аустенита на поверхности в зависимости от технологии обработки. При обработки по стандартному техпроцессу остаточный аустенит составил 38%, тогда как по предлагаемому техпроцессу – 20% для стали 12Х2Н4А. Для зубчатых колес из стали 20Х3МВФ остаточный аустенит составил 40% при обработке по стандартной технологии, а для колес, обработанных по предлагаемой технологии – 24%. Подобные результаты получены в работах Гуляева А.П.

Таким образом комбинированная обработка способствует уменьшению остаточного аустенита в поверхностном слое цементированных деталей машин.

Шестая глава посвящена экспериментальному исследованию нагрузочной способности зубчатых колес среднего модуля, обработанных комбинированной обработкой.

С целью получения результатов износостойкости зубчатых колес, обработанных по сравниваемым техпроцессам (стандартному и предлагаемому) проведены испытания на износ цилиндрических образцов в условиях трения качения. Установлено, что износостойкость образцов, подвергнутых комбинированной обработке выше на 15..20%, обработанных по стандартной технологии (рис.8.). Это можно объяснить большей твердостью и более измельченной микроструктурой поверхностного слоя образцов, обработанных по предлагаемому техпроцессу с применением КО.

Исследование износостойкости зубчатых колес из азотируемых сталей, показало, что износ образцов, изготовленных по предлагаемой технологии на 30% ниже, чем стандартных.

В работе было исследована зависимость контактной прочности азотируемых зубчатых колес от условий обработки. Испытания образцов, обработанных различными методами, показали, что контактная прочность поверхностей зубчатых колес, обработанных комбинированной обработкой (КО) в 1,5 раза выше обработанных по стандартной технологии.

В работе проведено исследование влияния КО на изгибную прочность зубчатых колес. Испытания на машине с гидропульсатором показали, что объемная пластическая деформация выкружек позволяет повысить изгибную прочность зубчатых колес на 25% (рис 9.).

Для определения целесообразности применения КО зубчатых колес, работающие при динамических нагрузках и влияния этого метода на

ударную вязкость проводили испытания образцов, обработанных различными методами (стандартному и предлагаемому).

На рис.10.(а) образцы, обработанные по предлагаемой технологии прогнулись, но не сломались, а образцы, обработанные по стандартной технологии полностью сломались. Результаты испытаний показывают, что применение КО, при которой формообразование переходной поверхности зубчатых колес ОПД производится после зубофрезерования позволяет повысить ударную вязкость на 15-20%.

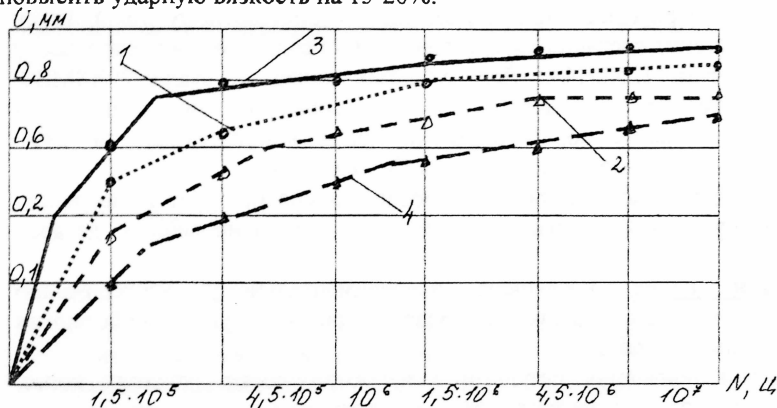


Рис.8. График зависимости износа от количества циклов нагружения (1 - 1 вариант (стандартный); 2 - 2 вариант (разработанный) сталь 12Х2Н4А); (3 - 3 вариант (стандартный); 4 - 4 вариант (разработанный) сталь 20Х3МВФ)

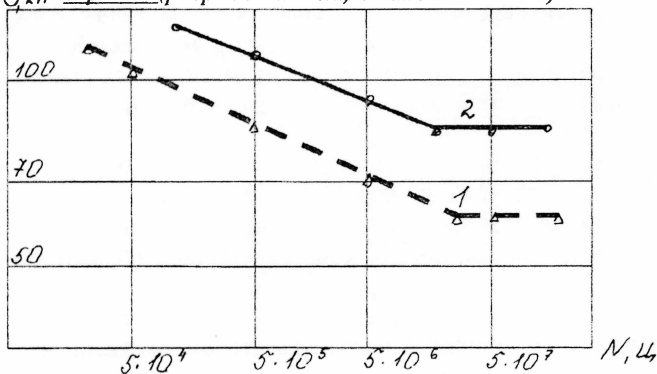


Рис.9. Влияние упрочнения выкружек на изгибную прочность зубчатых колес $m=2,75$; $\alpha_n=28^\circ$; сталь 20Х3МВФ (1 - 1 вариант (стандартный); 2 - 2 вариант (разработанный))

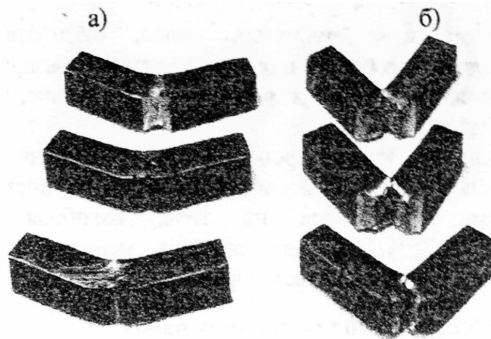


Рис.10. Образцы после испытания на ударную вязкость (а- обработанные по предлагаемой технологии; б- обработанные по стандартной технологии)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе анализа зарубежного и отечественного опыта показана эффективность нового подхода к повышению нагрузочной способности зубчатых колес методом комбинированной обработки, при которой зубофрезерование производится специальной фрезой с протуберанцем, активный профиль упрочняется ППД, а формообразование наиболее нагруженной части зуба (переходной поверхности) производится объемным пластическим деформированием.
2. Разработана методика расчета червячных фрез, производящий исходный контур которых обеспечивает модификацию профиля переходной кривой с целью обеспечения оптимальных степени деформации и усилия формообразования переходной поверхности и дна впадины зуба.
3. Получены теоретические зависимости, позволяющие рассчитать силы деформирования переходной поверхности зубчатых колес среднего модуля от технологических условий обработки.
4. Показано влияние режимов комбинированной обработки на функциональные параметры качества поверхностного слоя зубьев (шероховатость переходной поверхности зубьев уменьшилась с $Rz10$ до $Rz1$ мкм.; радиусы закругления впадин микропрофиля увеличились в 10-20 раз; высота волнистости уменьшилась в 2 раза).
5. Отмечается положительное влияние комбинированной обработки на твердость азотируемых и цементируемых поверхностей. Для азотируемой стали 40ХНМА относительный прирост твердости составляет 10%, для цементируемых сталей 12Х2Н4А и 20Х3МВФ после закалки на 12... 15%, глубина упрочнения более 0,8 мм.

6. В поверхностном слое зубчатых колес, обработанных КО уменьшается количество остаточного аустенита в 2 раза, улучшается структура упрочненного слоя (иглы мартенсита мельче, происходит дробление карбидной сетки).
7. Установлено влияние комбинированной обработки на показатели нагрузочной способности высокоскоростных зубчатых колес (износостойкость повышается на 15%, изгибная прочность увеличивается на 25%, ударная вязкость повышается на 20%, контактная прочность увеличивается в 1,5 раз).

Список опубликованных работ:

1. Яковлева А.П. Повышение изгибной прочности тяговых зубчатых колес //Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо-и машиностроении: Труды Всероссийской научно-технической конференции: -М., 2001. –Т.1. –С.34-35.
2. Яковлева А.П. Поверхностное пластическое деформирование цементованных зубчатых колес //Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо-и машиностроении: Труды Всероссийской научно-технической конференции: -М., 2001. -Т.1. -С. 36-37.
3. Яковлева А.П., Баландин А.Д., Павликов П.Я. Расчёт профиля червячной фрезы под накатывание зубчатых колёс //Труды МГТУ им. Н.Э.Баумана. – 2002. -№ 584.– С. 125 – 132.
4. Яковлева А.П. Влияние пластической деформации на структуру и твердость цементованного слоя зубчатых колес. //Тезисы докладов международной конференции. –М: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2005. –С.266.
5. Павликов П.Я., Яковлева А.П. Формообразование выкружки зубчатых колес методом пластической деформации //Труды МГТУ им.Н.Э.Баумана. 2003. -№585. -С. 45-49.
6. Павликов П.Я., Яковлева А.П. Влияние пластической деформации на структуру и свойства цементованного слоя зубчатых колес. //Материалы Всероссийской научно-технической конференции к 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана -М., 2004. –С. 123-124.
- 7.Павликов П.Я., Яковлева А.П. Повышение ресурса тяжело нагруженных передач комбинированной обработкой. //Материалы Всероссийской научно-технической конференции к 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана. -М., 2004. –С.125-126.