

Министерство образования и науки Украины  
Донбасская государственная машиностроительная академия  
Кафедра компьютеризованных мехатронных систем, инструментов  
и технологий

УДК 621.91

**Чмырь Вера Александровна**

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ТЯЖЕЛЫХ  
ТОКАРНЫХ СТАНКОВ ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ  
КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗАКАЛЕННЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС**

8.05050301 – металлорежущие станки

Автореферат магистерской работы

Краматорск – 2014

Работа выполнена на кафедре: «Компьютеризированные мехатронные системы, инструмент и технологии» Донбасской государственной машиностроительной академии Министерства образования и науки Украины.

Научный руководитель: д.т.н., профессор Клочко Александр Александрович

Защита состоится 22 декабря 2014 года в 9 часов на заседании Государственной экзаменационной комиссии Донбасской государственной машиностроительной академии.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Магистерская работа посвящена решению одной из **актуальных** научно-технических задач современного тяжелого станкостроения – обеспечение производительности, точности и качества зубофрезерования крупномодульных закаленных зубчатых колес. Повышение эффективности промышленного производства в значительной степени связано с разработкой и освоением тяжелых станков, приводы которых содержат в себе крупномодульные зубчатые передачи.

**Цель исследования:** разработка и исследование альтернативной зубошлифовальной технологии формирования поверхностного слоя цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес, позволяющей повысить его качество и точность зубообработки, снизить трудоемкость технологических операций окончательной обработки зубьев на основе функционального анализа зубчатых зацеплений с использованием научно обоснованной системы оценок технологического обеспечения эксплуатационных свойств зубчатых передач.

**Объект исследования:** технологические системы зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес.

**Предмет исследования:** обеспечение заданных эксплуатационных свойств крупномодульных зубчатых колес путем формирования поверхностного слоя зуба методами механической обработки резанием.

**Методы исследования.** Экспериментальные исследования проводились в производственных и лабораторных условиях на реальном технологическом оборудовании.

Математическая обработка результатов исследований выполнялась с использованием прикладного программного обеспечения (пакету MathCAD). Достоверность теоретических положений работы подтверждается результатами экспериментальных исследований и промышленным внедрением результатов исследований процессов формообразования при скоростной зубообработке закаленных крупномодульных зубчатых колес.

### **Научная новизна полученных результатов:**

На основе широкого анализа и обобщения промышленных достижений в зубообработке закаленных крупномодульных зубчатых колес, требований к тяжело нагруженным и ответственным зубчатым передачам сформулированы и реализованы общие принципы разработки технологических основ обеспечения производительности, точности и качества зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес, позволяющие интенсифицировать технологический процесс зубообработки с обеспечением качества поверхностного слоя зубчатых колес, характеризующих их эксплуатационные свойства.

1. Сформулирована концепция эффективности моделирование взаимосвязи эксплуатационных свойств поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес с их показателями качества, что позволяет решить основную технологическую проблему зубообработки – обеспечение производительности, то-

чности и качества зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес.

2. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден механизм моделирования технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес при помощи системной оптимизации.

3. Сформулировано научное положение по выбору и назначению технологического обеспечения системы параметров поверхностного слоя крупномодульных зубчатых колес.

4. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены общие принципы механизма моделирования оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес с помощью трансцендентных уравнений взаимосвязи качественных и количественных показателей поверхностного слоя зубчатых колес

**Личный вклад соискателя.** Результаты, которые выносятся на защиту магистерской работы, получены соискателем самостоятельно. Постановка задач исследований, анализ и обсуждение полученных результатов выполнялись соискателем совместно с научным руководителем.

**Апробация результатов работы.** Основные положения и результаты докладывались на конференциях: Международная научно-техническая конференция «Тяжелое машиностроение. Проблемы и перспективы развития» (г. Краматорск 2014г.)

**Публикации.** По результатам магистерской работы опубликовано 2 статьи в фаховых изданиях Украины.

**Структура и объем работы.** Магистерская работа состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка использованных источников с 66 наименованиями. Основной текст содержит 46 рисунков, 10 таблиц. Общий объем работы содержит 150 страниц.

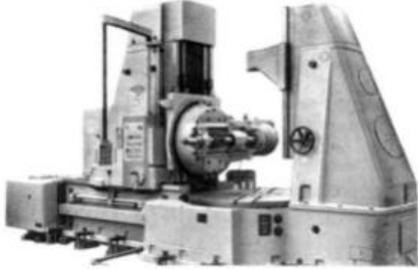
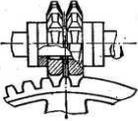
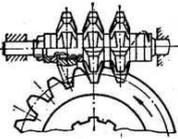
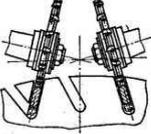
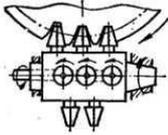
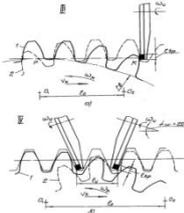
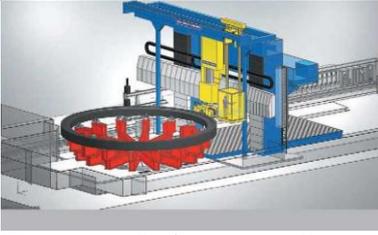
## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель и задачи исследования, объект, предмет и методы исследования, научная новизна и практическое значение полученных результатов. Приведен уровень апробации работы, личный вклад соискателя.

**Первый раздел** посвящен рассмотрению проблем технологии зубообработки крупномодульных зубчатых колес. Исследованы методы технологического воздействия при изготовлении КЗЗК (табл. 1). Также проанализированы основные факторы, влияющие на технологию изготовления КЗЗК (рис. 1). Выполнен функциональный анализ взаимодействия контактирующих поверхностей КЗЗК. Приведены виды крупномодульных закаленных зубчатых передач тяжелых токарных станков с цилиндрическими колесами (рис. 2).

Таблица 1

## Методы и способы обработки цилиндрических зубчатых колес

Способ обработки зубьев	Эскиз обработки	Тип станка. Область применения
Фрезерование дисковой модульной фрезой $m = 12...36$ мм	 $\beta=00$	
Фрезерование двумя дисковыми модульными фрезами $m = 12...36$ мм	 $\beta=00$	<p>Станок зубофрезерный вертикальный 5А342П, Серия: 381572 ГОСТ18065-91</p>
Фрезерование тремя дисковыми модульными фрезами $m = 12...36$ мм	 $\beta=00$	<p>Диаметр обработки до 2000м. Станок зубофрезерный вертикальный мод. WFS-54 Диаметр обработки до 5000м Для цилиндрических зубчатых колес степени точности 8-9 ВГОСТ1643-81 Число нарезаемых зубьев <math>z=7-240</math></p>
Фрезерование специальными дисковыми фрезами (трепанация) с специальным суппортом	 Предварительное фрезерование, $\beta = 00$	<p>Станок зубофрезерный с накладным суппортом</p>
Фрезерование твердосплавной червячной модульной фрезой в нагретом состоянии заготовки $m = 12...30$ мм	 $\beta=\pm 350$	<p>Специальный зубофрезерный станок Для зубообработки закаленных цилиндрических зубчатых колес; Степень точности 10-12 ВГОСТ1643-81</p>
Ротационное зубофрезерование $m = 12...30$ мм		<p>Станок зубофрезерный</p>
Скоростное зубофрезерование немодульными дисковыми фрезами $m = 12...55$ мм	 $\beta=\pm 350$	 <p>Станок зубофрезерный PowerTec 7500</p>

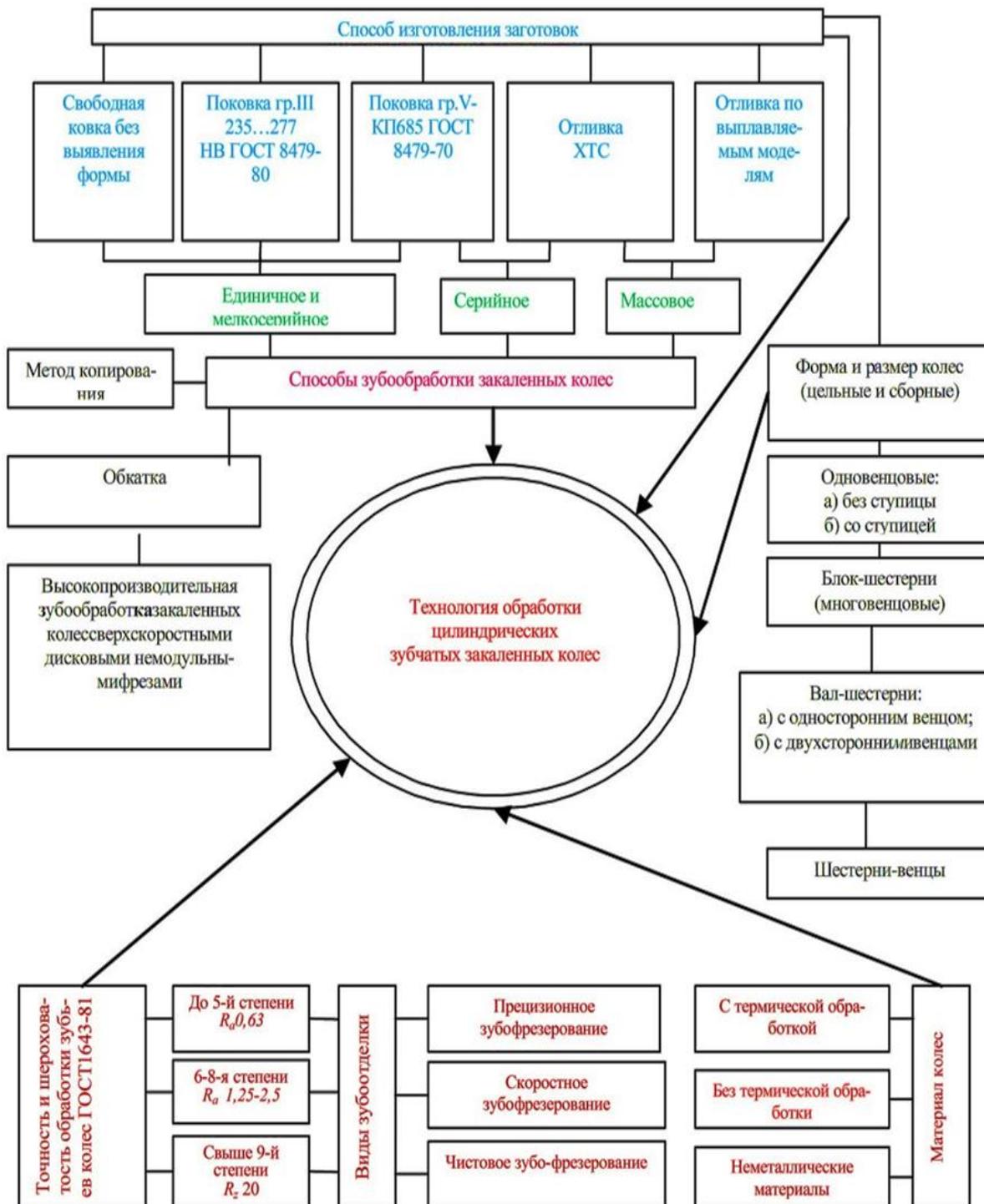


Рис. 1 - Основные факторы, влияющие на технологию изготовления КЗЗК



а) Тяжелый токарный станок модели 1К670Ф3 ( $m = 14-24\text{мм}$ ); б) Тяжелый токарный станок модели РТ95 ( $m = 12-16\text{мм}$ ); в) Рудоразмольная мельница ( $m = 24-65\text{мм}$ ; г) Редуктор шлаковоза ( $m=20-46\text{мм}$ ); д) Редуктор ЦДН-630 ( $m = 18-36\text{мм}$ ); е) Редуктор ЦЦ2-1250 ( $m = 20-40\text{мм}$ ); ж) Редуктор ( $m = 12-18\text{мм}$ ); з) Рудоразмольная шаровая мельница ( $m = 20-50\text{мм}$ )

Рис. 2 – Виды крупномодульных закаленных зубчатых передач тяжелых токарных станков, редукторов с цилиндрическими колесами

**Во втором разделе** изучены направления повышения производительности, точности и качества зубообработки КЗЗК. Выполнено моделирование припуска при формообразовании поверхностного слоя КЗЗК при встречном скоростном зубофрезеровании (рис. 3).

Схема реза зубом фрезы на торце заготовки при встречной подаче

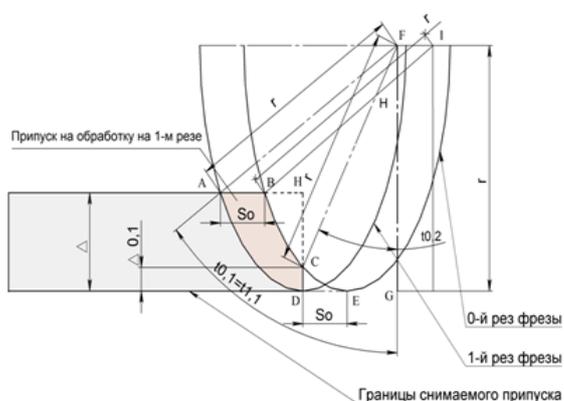


Схема припуска с прямоугольными сторонами эквивалентная схеме

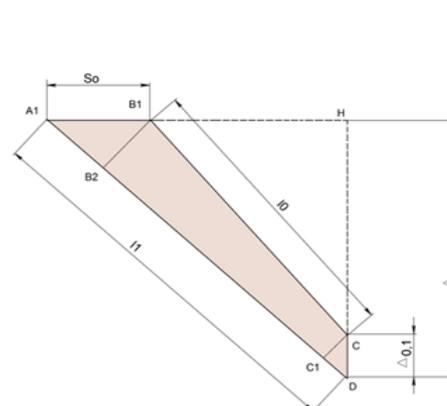


Рис. 3 – Моделирование припуска при формообразовании поверхностного слоя КЗЗ

При зубофрезеровании червячными модульными фрезами, специальными немодульными дисковыми фрезами кинематика их перемещения относительно обрабатываемой поверхности способствует формированию как поперечной, так и продольной шероховатости (рис. 4).

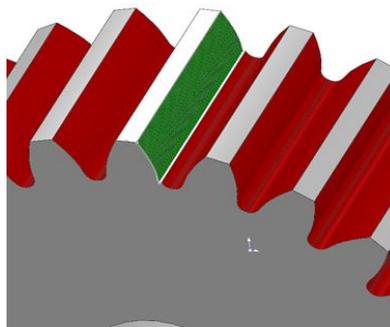


Рис.4 – Формирование поперечной и продольной шероховатости при зубофрезеровании

Формирование шероховатости поверхности зубьев колеса после врезания в него зуба фрезы показано на рис. 5. Формирование поверхности после обработки 1-м зубом фрезы по всей длине зубчатого колеса промоделировано на рис. 6.

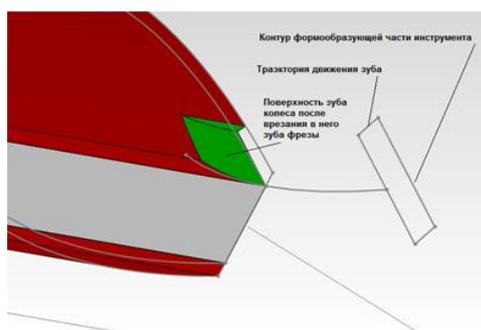


Рис.5 – Формирование шероховатости поверхности зубьев колеса после врезания в него зуба фрезы

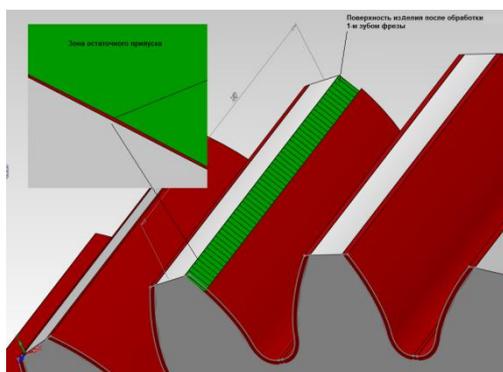


Рис.6 – Формирование поверхности изделия после обработки первым зубом фрезы по всей длине зубчатого колеса

Моделирование процесса шероховатости поверхности при обработке зубчатого колеса из стали 45,  $m = 20$ ,  $z = 23$  показано на рис.7.

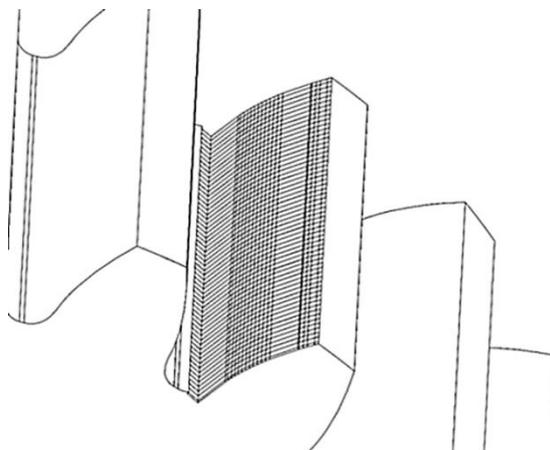


Рис. 7 – Моделирование процесса шероховатости поверхности при обработке зубчатого колеса из стали 45,  $m = 20$ ,  $z = 23$

Исследован и промоделирован процесс формирования шероховатости поверхностного слоя при последовательной обработке всех зубьев колеса червячной модульной фрезой (рис. 8)

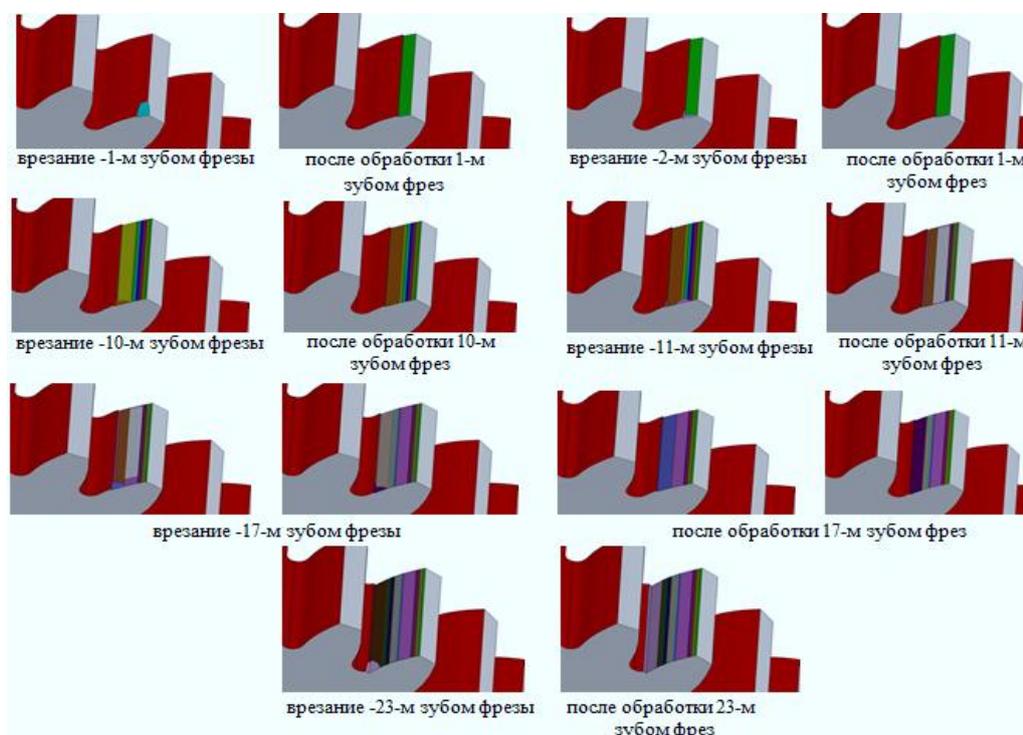


Рис. 8 – Процесс формирования шероховатости поверхностного слоя при последовательной обработке всех зубьев колеса червячной модульной фрезой

На основе обработки экспериментальных исследований были получены формулы режимов резания:

$$\text{для } S_{\text{мин}} = 25 \text{ мм/мин} \quad R_z = 2 + 500(2\rho + \sqrt{4\rho - 0,0025}) + 3,11\sqrt{\rho},$$

$$\text{для } S_{\text{мин}} = 50 \text{ мм/мин} \quad R_z = 300 + 500(2\rho + \sqrt{4\rho^3 - 0,01}) + 3,11\sqrt{\rho},$$

$$\text{для } S_{\text{мин}} = 100 \text{ мм/мин} \quad R_z = 91 + 141,5\rho + 158\sqrt{2\rho - 0,1} + 3,11\sqrt{\rho},$$

$$\text{для } S_{\text{мин}} = 200 \text{ мм/мин} \quad R_z = 179,2 + 130\rho + 315\sqrt{2\rho - 0,1} + 3,11\sqrt{\rho}.$$

**В третьем разделе** разработана математическая модель прогнозирования структуры и параметров технологических систем КЗК и общие принципы моделирования оптимального управления параметрами точности, качества и производительности КЗК. Задача моделирования технологических процессов оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес (рис. 9) предлагается решать методами технологического воздействия с учетом специфических условий формообразования зубчатых колес.

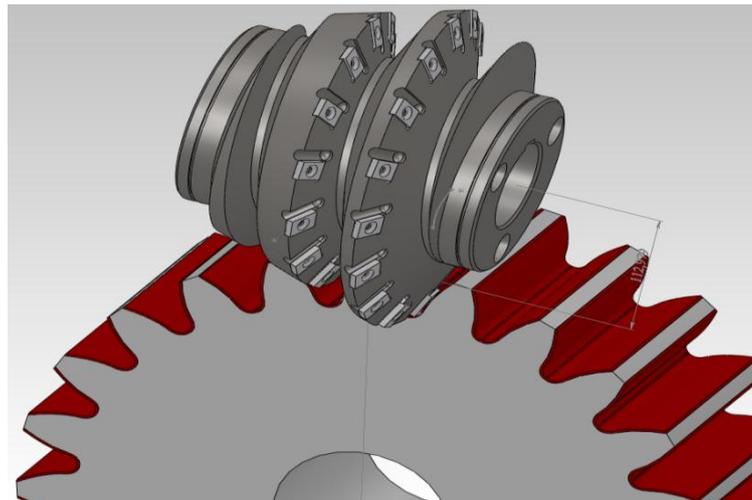


Рис. 9 – Моделирование параметров технологических процессов зубообработки КЗК фрезамиоснащёнными твердосплавными режущими пластинками

Задача оптимального управления процессом зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес дифференциально аппроксимируется на два этапа: первый связан с обоснованием выбора значений технологических параметров режима резания, удовлетворяющим заданному критерию качества, параметрами формирования толщины срезаемого слоя глубины резания (рис. 10); второй – предполагает управление режимами резания с целью поддержания оптимального значения показателя критерия качества в условиях действия на процесс возмущающих воздействий.



Рис.10 – Исходная модель формирования процесса формообразования

Разработано информационное моделирование технологических процессов зубообработки КЗЗК (рис. 11)

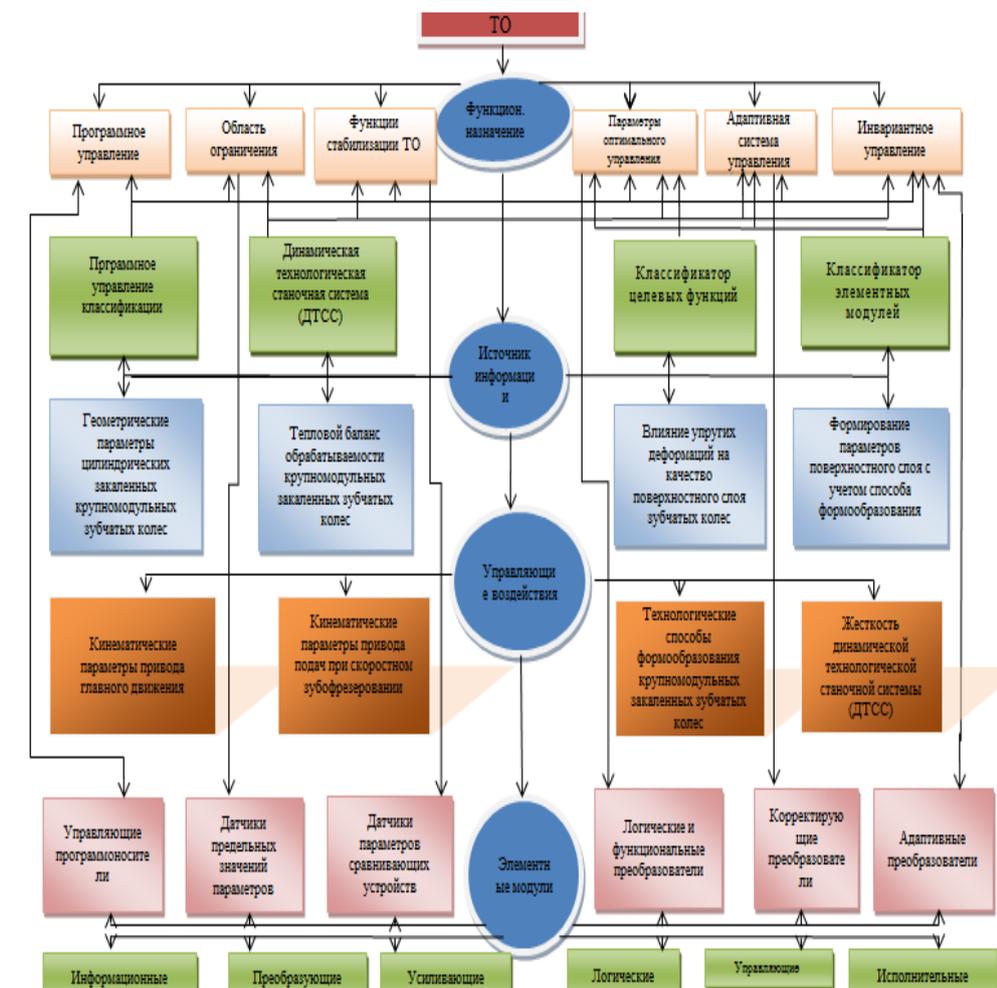


Рис. 11 – Классификация ТО моделирования технологических процессов оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки КЗЗК

**В четвертом разделе** разработаны комплексные параметры технологических воздействий зубчатого зацепления крупномодульных колес.

Выполнены расчеты интенсивности износа и коэффициента трения в период нормального износа (табл. 2)

Таблица 2

Экспериментальные данные по интенсивности износа:

Материал образца	Условия проведения эксперимента и значения параметров трения			
	$I \leq [I]$		$I \geq 2[I]$	
	Линейный износ	Коэффициент трения	Линейный износ	Коэффициент трения
40X	0,006	0,64	0,03	0,26
38ХМЮА	0,0012	0,51	0,012	0,14

$$I = \frac{R_a}{K^1 \cdot S_m} \quad \text{Комплексный параметр } I, \text{ характеризующий износ.}$$

$$[I] = \frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T (1 - \mu^2)}{E} \quad \text{Комплексный параметр, условий обработки}$$

Экспериментальные данные по интенсивности износа и коэффициенту трения после 3 минут приработки образцов с контртелом из стали 34ХНМ приведены в табл. 2 для средних значений и трех опытов.

Общие закономерности изнашивания эвольвентных зубчатых передач учитывают влияние приведенного радиуса кривизны, состояния поверхностного слоя (шероховатость эвольвентной поверхности, волнистость, параметры макроотклонения, микротвердость, остаточный напряжения поверхностного слоя), давления, удельного скольжения и создание условий самовосстановления эвольвентного профиля зубчатого колеса за счет эффекта избирательного переноса.

Изменение этих факторов определяют распределение износа по профилю зуба. Теоретическое распределение износа профиля зуба предполагает отсутствие износа в полюсе зацепления, где относительное скольжение зубьев равно нулю.

Однако, в отличие от теоретического распределения износ в полюсе, как показывает анализ экспериментальных данных, может быть существенным. На (рис. 11) представлена эпюра износа зуба шестерни, полученная на основании анализа опытных данных.

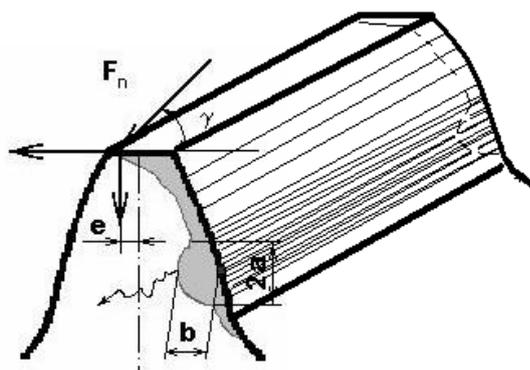


Рис. 11 – Эпюра износа зуба шестерни зубчатой передачи

Износ оценивался по изменению толщин зуба, измеренных в 10 точках профиля от ножки до головки зуба. Представляет определенный интерес износ в зоне полюса. Результаты стендовых испытаний показали, что на профиле зуба шестерни в процессе изнашивания образуется выемка, а на сопряженном зубе колеса – выступ. Повышенный износ наблюдался на головке зуба.

Эксплуатационные показатели контактирующих эвольвентных поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес изменяют свои значения. Происходящие изменения обуславливают изменение эксплуатационных свойств закаленных крупномодульных зубчатых колес в целом. Следовательно, необходимо стремиться создать состояние поверхности с минимально изменяющей свои параметры качества в процессе эксплуатации.

В процессе эксплуатации невозможно контролировать физические процессы, происходящие в зоне контакта зубчатого зацепления. В тоже время вид износа, характер разрушения и распределение действующих сил позволяют получить информацию о параметрах их эксплуатации и характере износа (рис.12).



а) начальная стадия; б) предельное состояние

Рис. 12 – Превышение предела выносливости материала приводит к износу рабочей поверхности

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В магистерской работе на основе использования современных положений технологического воздействия и обобщения научных достижений в зубообработке закаленных крупномодульных зубчатых колес, требований к тяжелонагруженным и ответственным зубчатым передачам сформулированы и реализованы общие принципы разработки технологических основ обеспечения производительности, точности и качества зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес, характеризующих их эксплуатационные свойства.

1. Определена и математически описана взаимосвязь эксплуатационных свойств поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес с их показателями качества, что позволило решить основную технологическую проблему зубообработки – обеспечение производительности, точности и качества зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес.

2. Предложен новый подход выбора методов зубообработки поверхностей зубчатых колес, в основу которого положено:

- методика расчета параметров состояния поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес в зависимости от условий их обработки;
- исследование влияния параметров волнистости на эксплуатационные свойства цилиндрических крупномодульных зубчатых колес;
- теоретическое определение степени упрочнения цилиндрических зубчатых колес;
- методология разработки модели управления качеством и производительностью формообразования при обработке закаленных крупномодульных зубчатых колес.

Это позволило разработать теоретические основы технологического воздействия для достижения требуемого качества и точности поверхностного слоя с учетом технологической наследственности.

3. Разработан механизм технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей зубьев закаленных крупномодульных колес на основе математического структурно-параметрического моделирования процесса их обработки с целью соответствия обеспечения конструкторских требований.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Обобщенная модель технологического процесса формообразования цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Ключко, В. А. Чмырь, М. А. Саенко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 31. – С. 235–250

2. Совершенствование технологии изубонарезания червячными модульными фрезами с контактно-реактивной пайкой режущих пластин / Е. В. Мироненко, А. А. Ключко, В. Ф. Шаповалов, В. А. Чмырь // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2013. – Вып. 33. – С. 3–7.

