

**Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК**



**ДОНБАССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ**

**МАГИСТЕРСКАЯ РАБОТА**

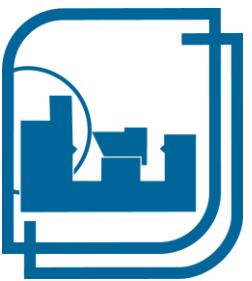
**на тему:**

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

Выполнила ст.гр. МС 09-1м

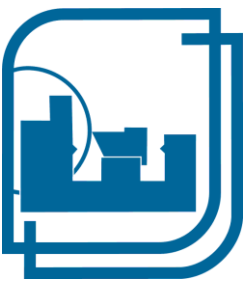
**Чмырь Вера Александровна**

Научный руководитель д.т.н. проф. **Ключко Александр Александрович**



## Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

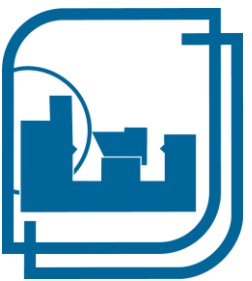
**Цель исследования** – разработка и исследование технологических методов формообразования поверхностного слоя КЗЗК, позволяющих значительно повысить качество поверхностного слоя и точность зубообработки, снизить трудоемкость технологических операций окончательной обработки зубьев. Проектирования технологического оснащения, позволяющего повысить эффективность формообразования при обеспечении требуемой точности зубчатых зацеплений, разработки научно-обоснованной системы оценок технологического обеспечения эксплуатационных свойств контактирующих поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес.



## Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

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

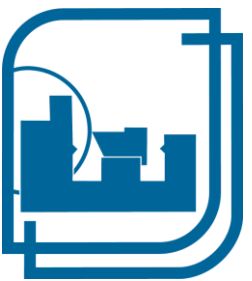
**Предмет исследования:** – формирование поверхностного слоя технологическим воздействием при зубообработке закаленных крупномодульных зубчатых колес с обеспечением эксплуатационных свойств



## Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

### Задачи исследования:

- 1) Установить влияние качества поверхностного слоя КЗЗК после механической зубообработки на их эксплуатационные характеристики.
- 2) Научно обосновать технологические методы обеспечения эксплуатационных КЗЗК.
- 3) Исследовать критерии формирования параметров систем обработки, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства КЗЗК.
- 4) Разработать и теоретически обосновать методику расчета параметров состояния поверхностного слоя КЗЗК в зависимости от условий их обработки.



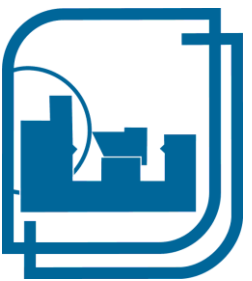
## Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

5) Исследовать направления повышения производительности зубообработки КЗЗК.

6) Теоретически обосновать технологические способы реализации влияния параметров волнистости на эксплуатационные свойства КЗЗК.

7) Разработать методику моделирования управления точностью, качеством и производительностью формообразования при обработке КЗЗК.

8) Разработать математическую модель прогнозирования показателей качества во взаимосвязи с комплексным параметром состояния поверхностного слоя КЗЗК.



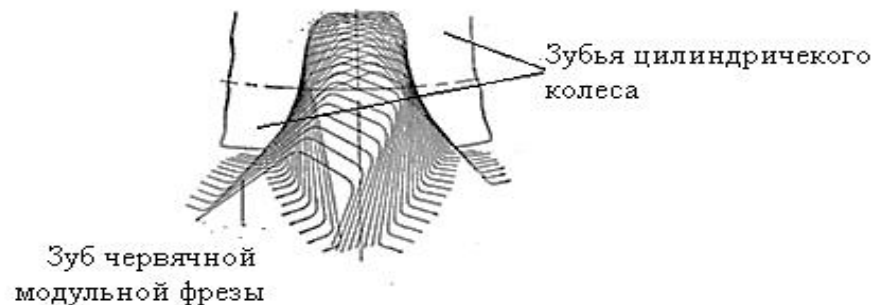
# Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

## Проблемы технологии зубообработки КЗЗК

### Примеры операций обработки КЗЗК


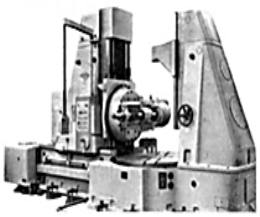
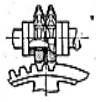
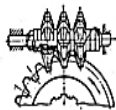
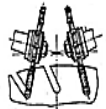
В машиностроении широкое распространение получили цилиндрические прямозубые и косозубые зубчатые колеса, обрабатываемые методом профильного формообразования и методом обката.


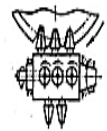
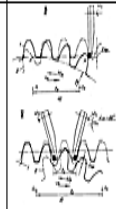
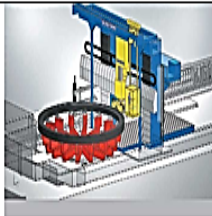
#### Образование эвольвентного профиля цилиндрического зубчатого колеса червячной фрезой

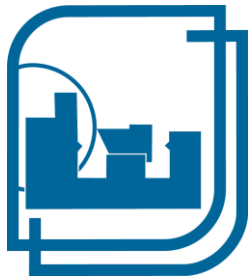


# Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

## Методы технологического воздействия при изготовлении КЗЗК

Способ обработки зубьев	Эскиз обработки	Тип станка. Область применения
Фрезерование дисковой модульной фрезой $m = 12 \dots 36$ мм	 $\beta=00$	
Фрезерование двумя дисковыми модульными фрезами $m = 12 \dots 36$ мм	 $\beta=00$	Станок зубофрезерный вертикальный 5А342П, Серия: 381572 ГОСТ18065-91 Диаметр обработки до 2000мм.
Фрезерование тремя дисковыми модульными фрезами $m = 12 \dots 36$ мм	 $\beta=00$	Станок зубофрезерный вертикальный мод. WFS-54 Диаметр обработки до 5000мм Для цилиндрических зубчатых колес степени точности 8-9ВГОСТ1643-81 Число нарезаемых зубьев $z=7-240$
Фрезерование специальными дисковыми фрезами (трепанация) с специальным суппортом	 Предварительное фрезерование, $\beta = 00$	Станок зубофрезерный с накладным суппортом

Фрезерование твердосплавной червячной модульной фрезой в нагретом состоянии заготовки $m = 12 \dots 30$ мм	 $\beta=\pm 350$	Специальный зубофрезерный станок Для зубообработки закаленных цилиндрических зубчатых колес; Степень точности 10-12 ВГОСТ1643-81
Ротационное зубофрезерование $m = 12 \dots 30$ мм		Станок зубофрезерный
Скоростное зубофрезерование немодульными дисковыми фрезами $m = 12 \dots 55$ мм	 $\beta=\pm 350$	 Станок зубофрезерный PowerTec 7500



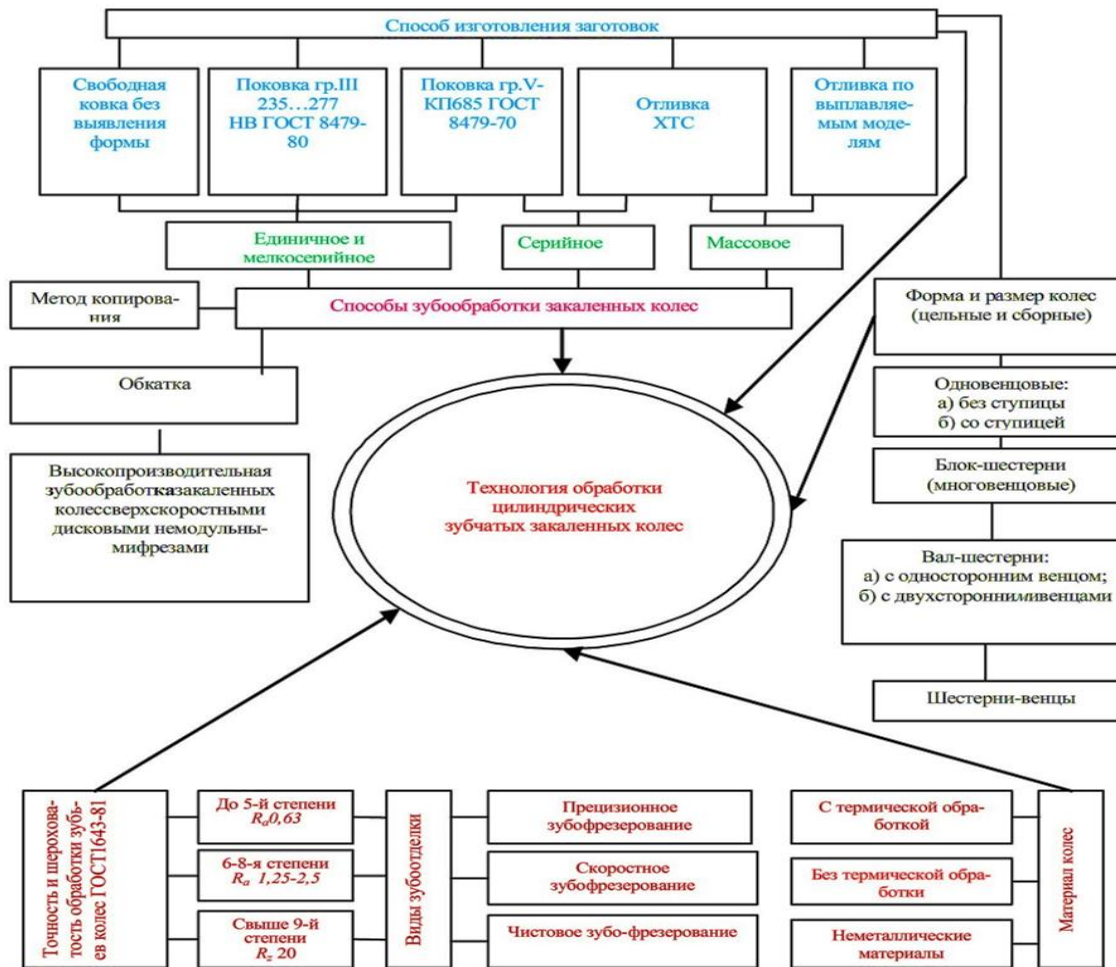
## Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

### Основные факторы, влияющие на технологию изготовления КЗЗК

На технологию изготовления зубчатых колес влияет целый ряд факторов: геометрические параметры, технические условия на изготовление зубчатых колес, материал, геометрические параметры поверхностного слоя, степень точности в соответствии с требованиями ГОСТ1643-81, вид производства, эксплуатационные параметры зубчатых колес на «рабочих осях», что и определяет выбор решения принципиальных вопросов технологии, как способ изготовления заготовки, метод образования зубьев, термическая обработка и выбор способа окончательной зубообработки.



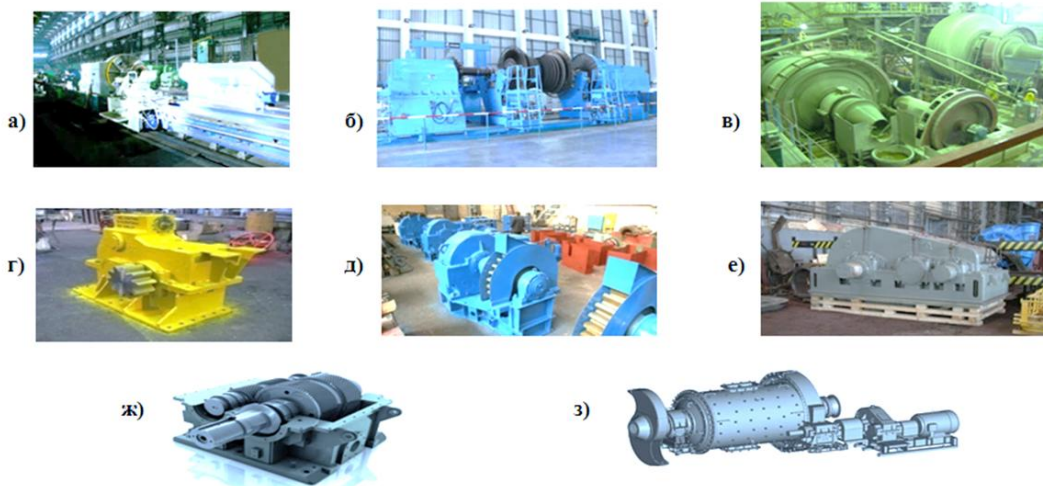
# Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК




# Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

## Функциональный анализ взаимодействия контактирующих поверхностей КЗЗК

Виды крупномодульных закаленных зубчатых передач тяжелых токарных станков, редукторов с цилиндрическими колесами



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( $m = 20-50\text{мм}$ )

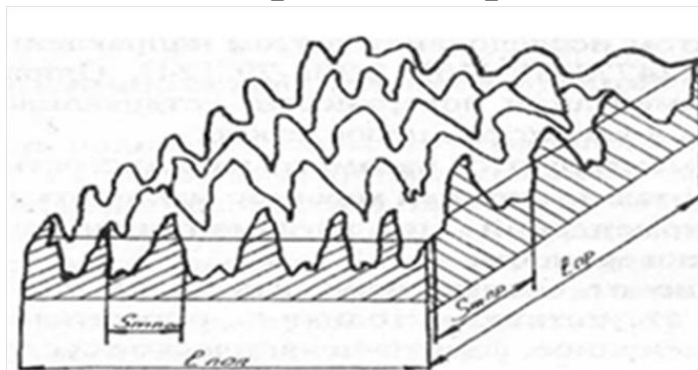


## Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

Анализ моделей по расчету характеристик контакта поверхностей основан на представлении выступов реальной элементарной поверхности в виде сферы, конусов, цилиндров, столбиков прямоугольной формы, эллипсоидов, эллиптических параболоидов.

Выступы имеют сферическую форму. При этом, имеет место линейная зависимость роста числа выступов при увеличении глубины рассматриваемого уровня поверхностного слоя закаленных зубчатых колес

### Элементарная поверхность



# Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

## Направления повышения производительности, точности и качества зубообработки КЗЗК

### Моделирование припуска при формообразовании поверхностного слоя КЗЗК при встречном скоростном зубофрезеровании

Схема реза зубом фрезы на торце заготовки при встречной подаче

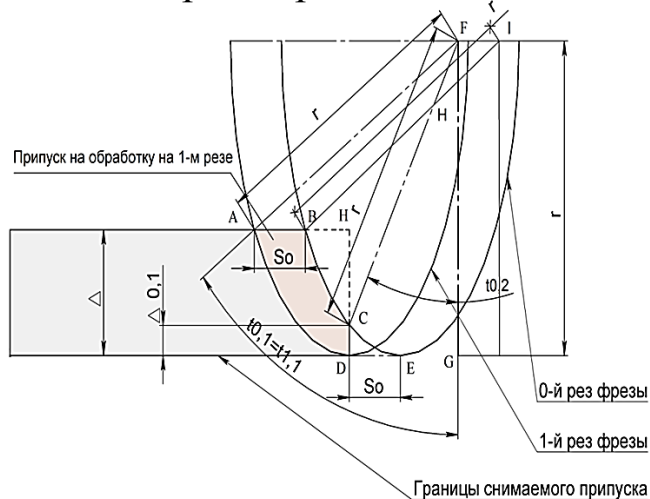
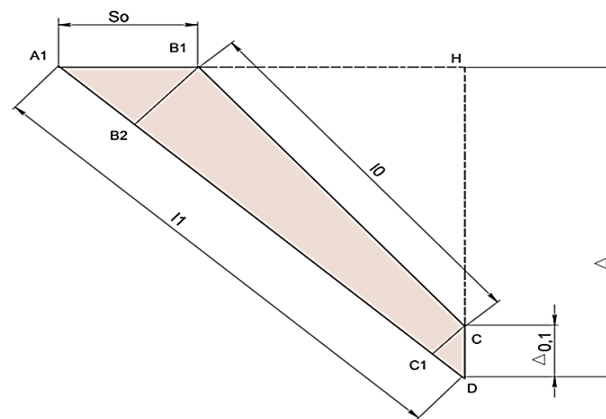


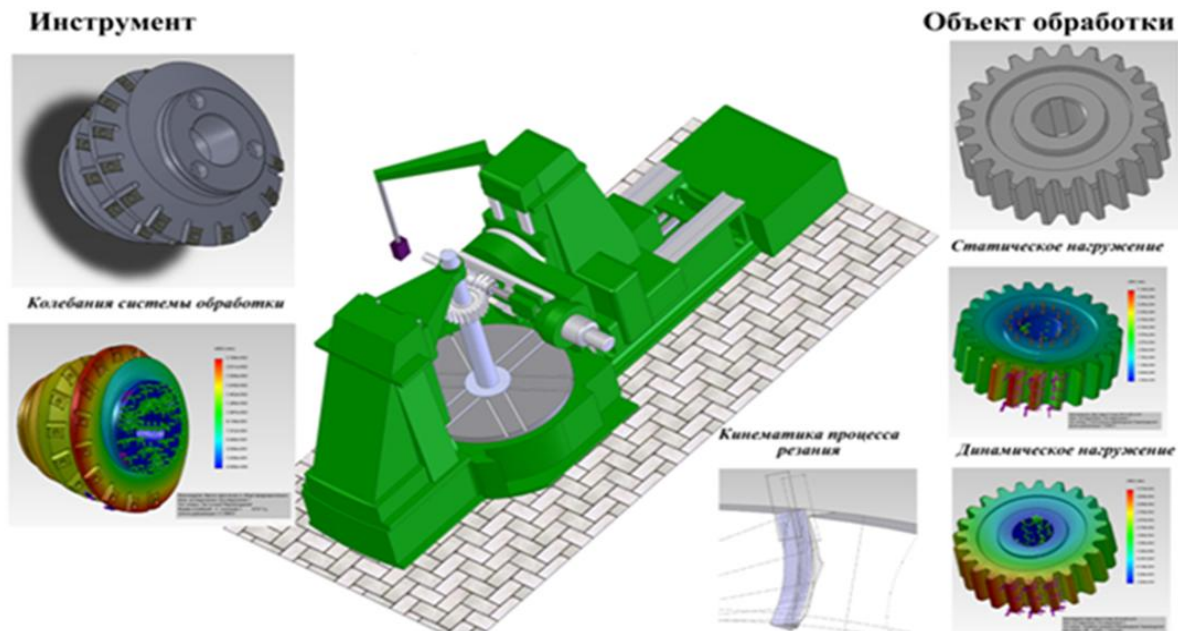
Схема припуска с прямоугольными сторонами эквивалентная схеме



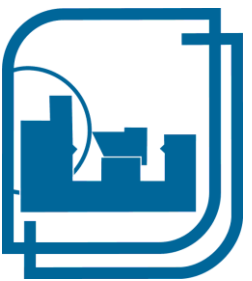
# Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

## Расчет параметров состояния поверхностного слоя КЗЗК в зависимости от условий обработки

Направления исследования параметров формирования поверхностного слоя зубчатых колес: геометрической и кинематической точности, шероховатости, поверхностной твердости, волнистости, производительности при зубофрезеровании



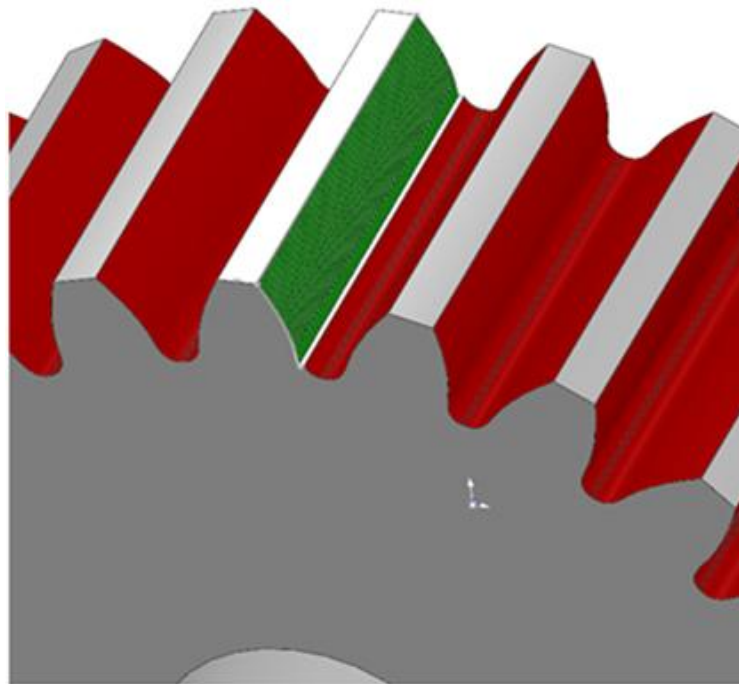




## Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

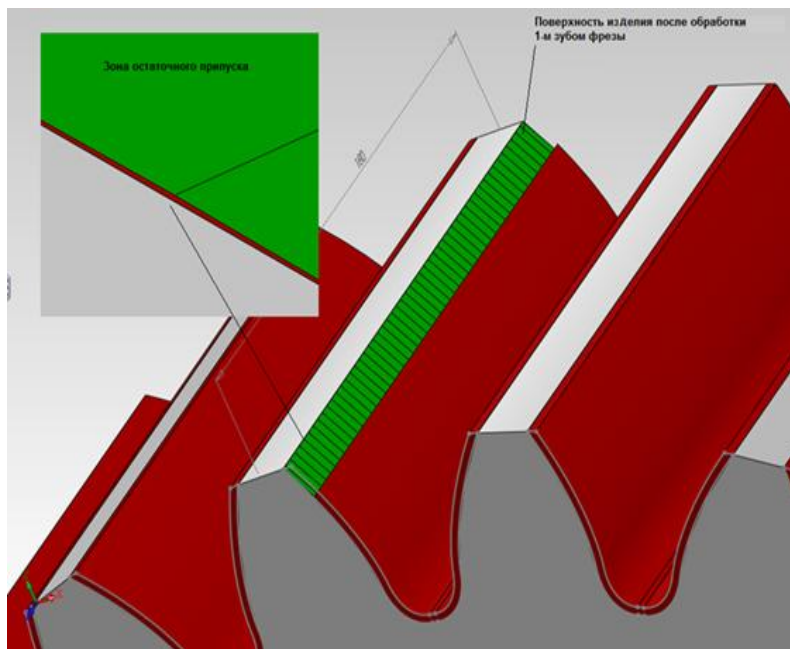
При зубофрезеровании червячными модульными фрезами, специальными немодульными дисковыми фрезами кинематика их перемещения относительно обрабатываемой поверхности способствует формированию как поперечной, так и продольной шероховатости

Формирование поперечной и продольной шероховатости при зубофрезеровании

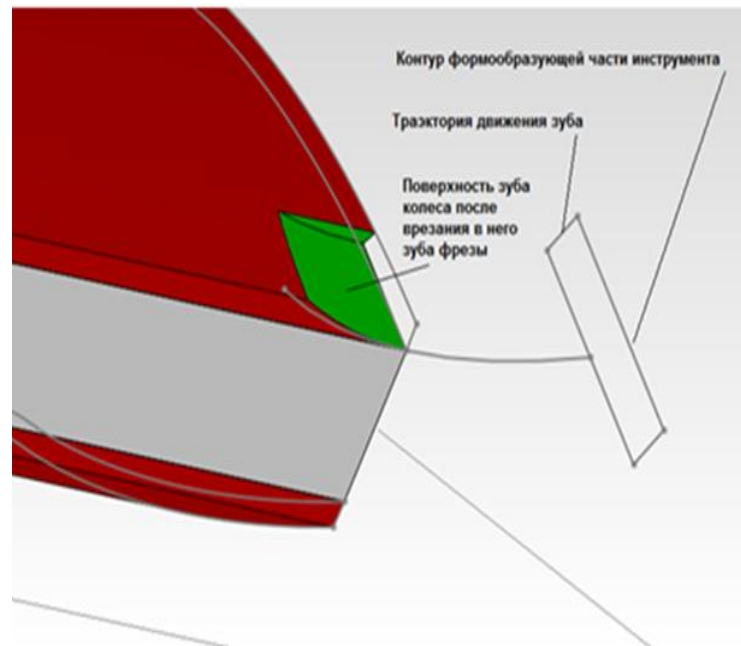


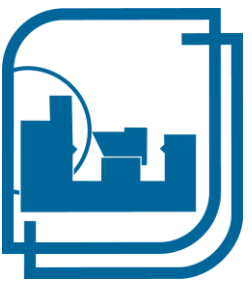
# Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

Формирование шероховатости поверхности зубьев колеса после врезания в него зуба фрезы



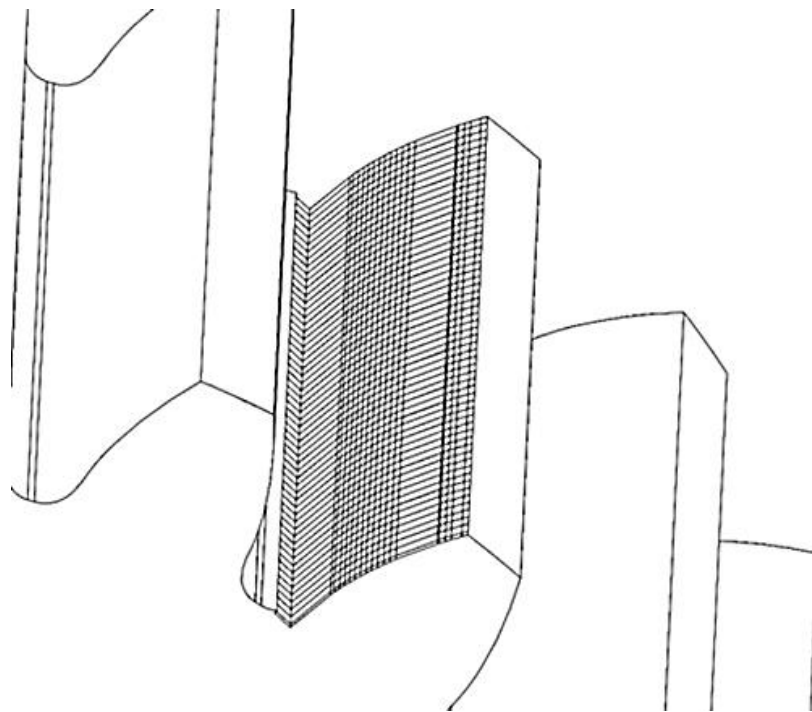
Формирование поверхности изделия после обработки первым зубом фрезы по всей длине зубчатого колеса






## Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

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

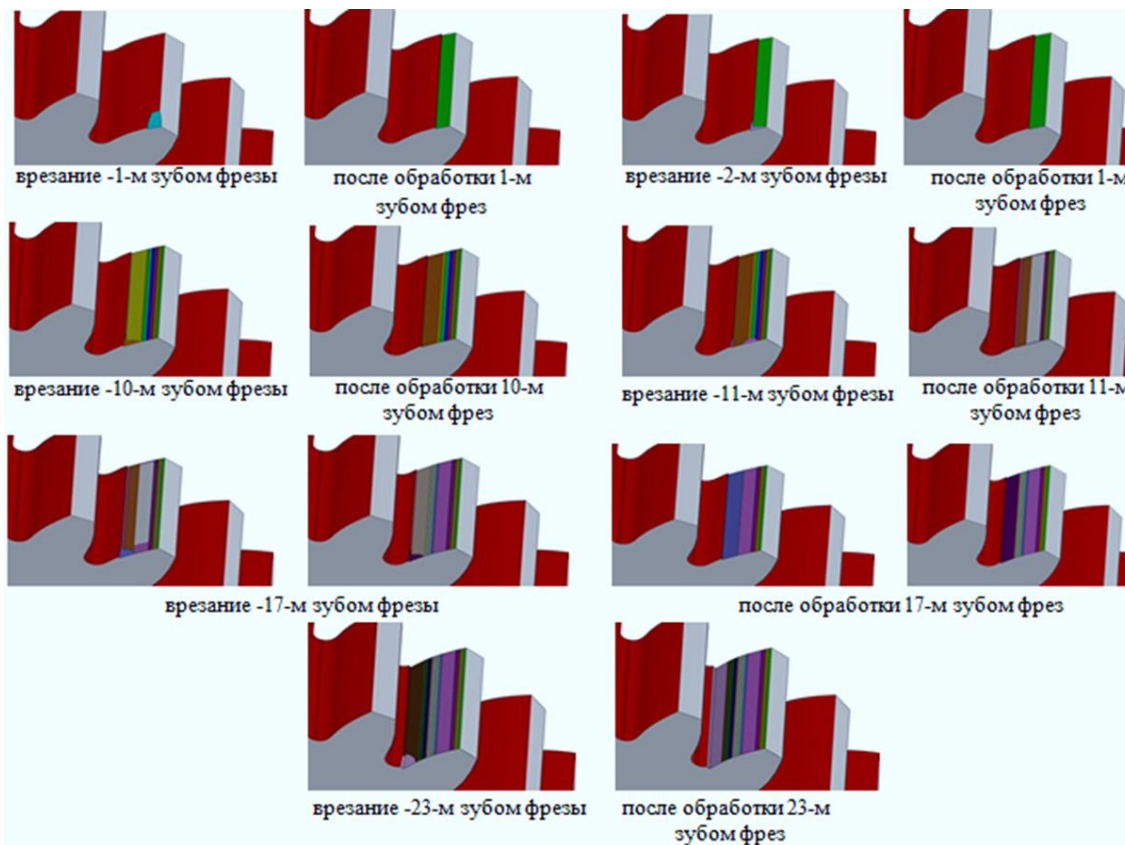






# Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

**Процесс формирования шероховатости поверхностного слоя при последовательной обработке всех зубьев колеса червячной модульной**



# Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

## Радиус скругления режущей кромки и эмпирические коэффициенты

Марка обрабатываемой стали	Материал инструмента	$\rho$ , мкм	Коэффициенты					
			$a$	$b$	$c$	$p$	$m$	$l$
45	T15K6	85	0.52	-6.54	1.11	4.2	0.71	0.50
40ХН	T15K6	110	0.52	-6.59	1.15	4.5	0.75	0.50
34ХНМ	T15K6	125	0.50	-5.99	0.97	5.0	0.72	0.40
38ХМЮА	ВК8	140	0.70	-7.22	0.53	5.1	0.73	0.35

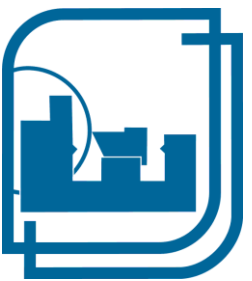
## Исследование влияния радиуса округления режущей кромки зубьев фрезы

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

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

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

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

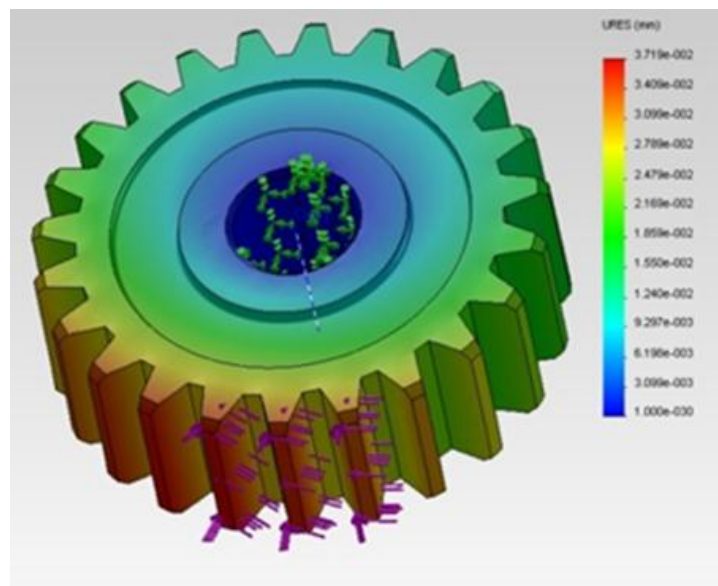


## Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

### Методология разработки модели управления качеством и производительностью формообразования при обработке КЗЗК

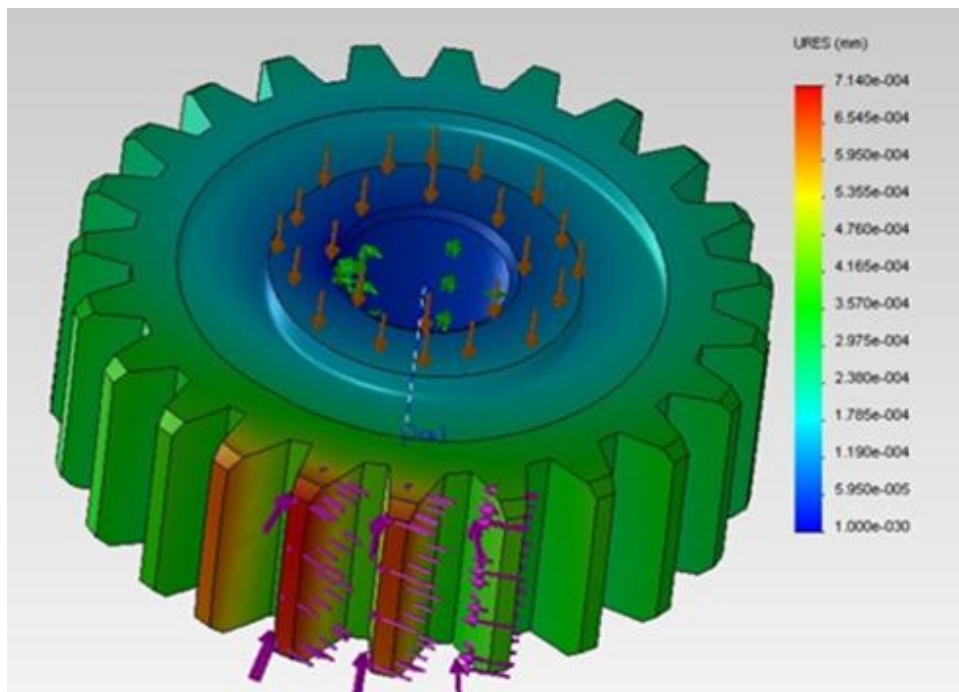
При механической обработке закаленных крупномодульных зубчатых колес поверхностный слой подвергается пластическому деформированию и местному кратковременному нагреву. В этом слое возникают остаточные напряжения, которые имеют значительную величину

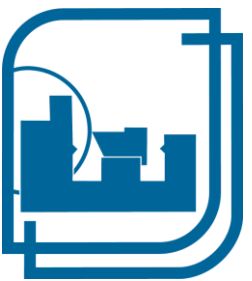
Возникновение остаточных напряжений в поверхностном слое при динамическом нагружении



# Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

Возникновение остаточных напряжений в поверхностном слое при статическом нагружении



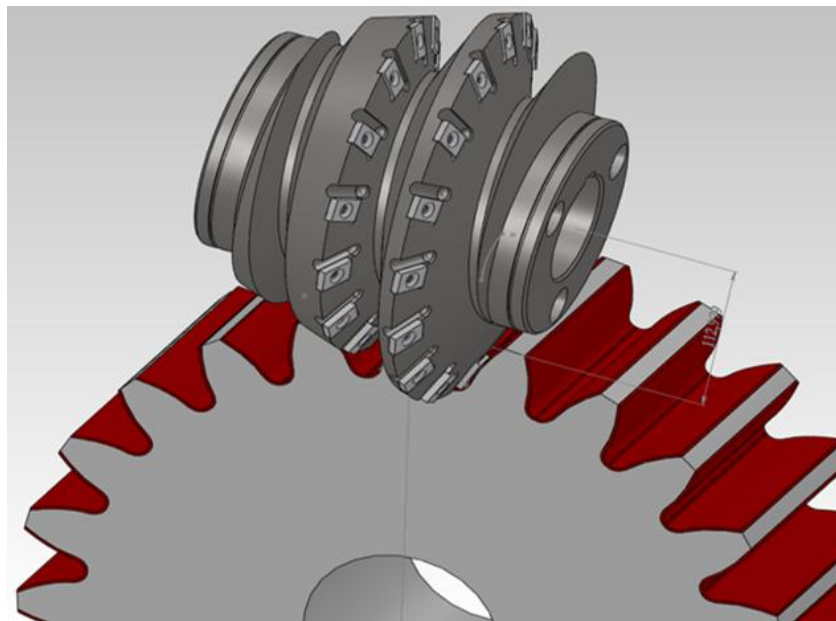


Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

**Математическая модель прогнозирования структуры и параметров технологических систем КЗЗК**

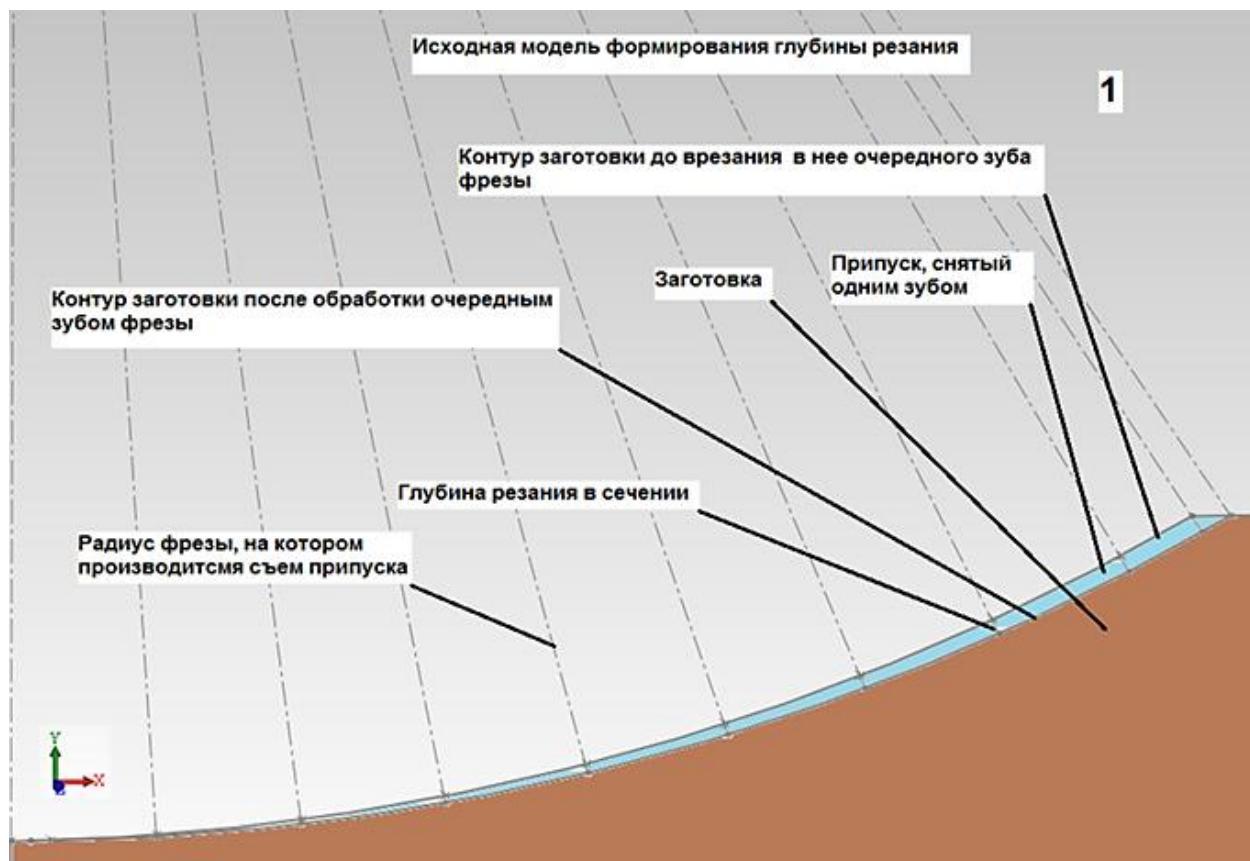
**Общие принципы моделирования оптимального управления параметрами точности, качества и производительности КЗЗК**

Моделирование  
параметров  
технологических  
процессов  
зубообработки КЗЗК  
фрезами оснащенными  
твердосплавными  
режущими пластинками



# Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

## Исходная модель формирования процесса формообразования

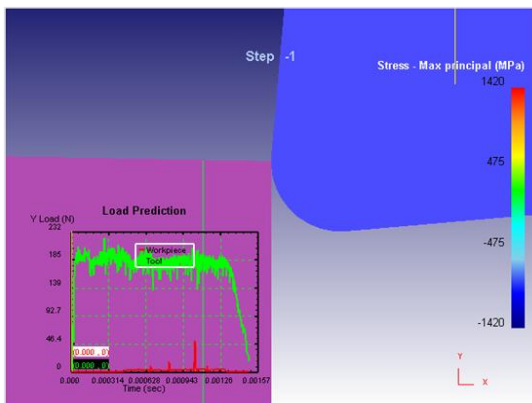




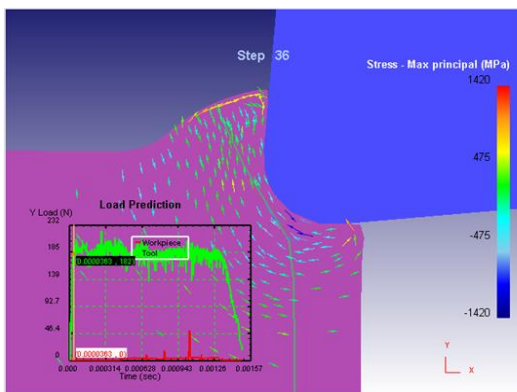
# Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

## Формообразование поверхностного слоя зубообрабатывающей фрезы

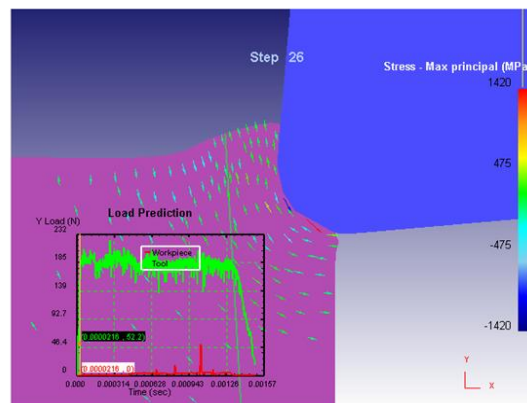
при  $\alpha_i \ll K_{\text{созн}}\rho$



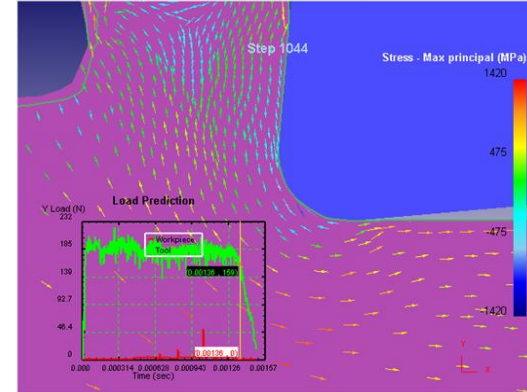
при  $\alpha_i = K_{\text{созн}}\rho$



при  $\alpha_i < K_{\text{созн}}\rho$

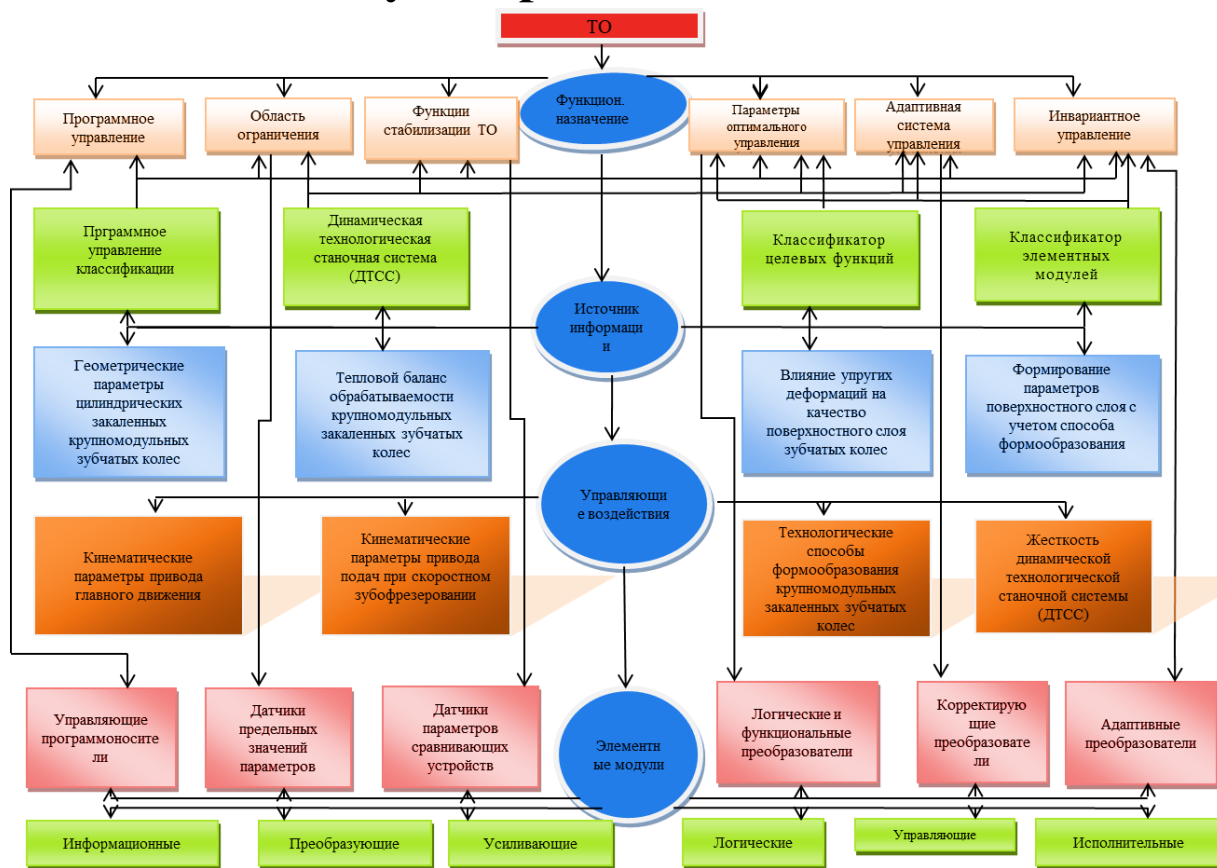


$\alpha_i > K_{\text{созн}}\rho$

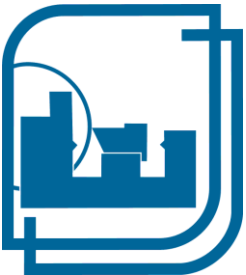


# Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

## Информационное моделирование технологических процессов зубообработки КЗЗК







# Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

## Комплексные параметры технологических воздействий зубчатого зацепления крупномодульных колес

### Комплексные параметры состояния поверхностей КЗЗК

Экспериментальные данные по интенсивности износа

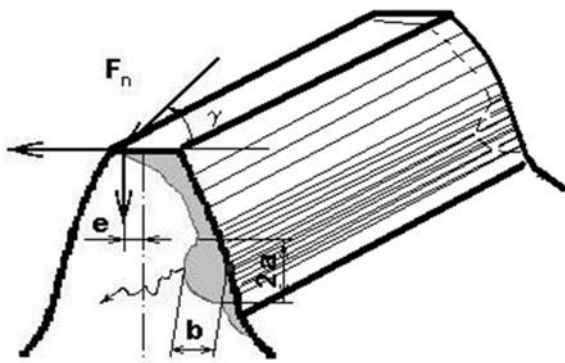
Материал образца	Условия проведения эксперимента и значения параметров трения			
	$I \leq [I]$		$I \geq 2[I]$	
	Линейный износ	Коэффициент трения	Линейный износ	Коэффициент трения
40Х	0,006	0,64	0,03	0,26
38ХМЮ А	0,0012	0,51	0,012	0,14

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

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

# Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

Эпюра износа зуба шестерни зубчатой передачи



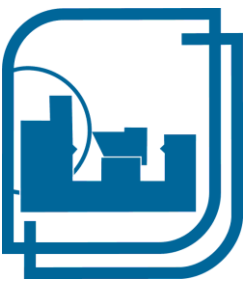
Образование питтингов на поверхности зуба колеса



Интенсивность износа и коэффициент трения в период нормального износа:

$$J = \frac{2.5\pi\nu^{0.5}P^{7/6}}{n\lambda(\nu+1)t_m^{3/2}(K^I\sigma_T)^{2/3}} \sqrt{\frac{30(1-\mu^2)(2\pi R_a W_z H_{\max})^{1/3}}{ES_m}}$$

$$f = \frac{\tau_0}{c^I K^I \sigma_T} + \beta + \frac{8\alpha_I (K^I \sigma_T)^{1/3}}{t_m} \sqrt{\frac{30(1-\mu^2)(2\pi P R_a W_z H_{\max})^{1/3}}{ES_m t_m}}$$



# Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

## Комплексный параметр по обеспечению минимальных пластических деформаций зубьев КЗЗК

Превышение предела выносливости материала приводит к износу рабочей поверхности

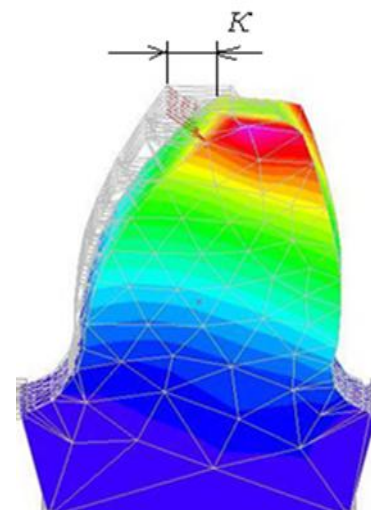
Схема объемной деформации зуба при эксплуатации зубчатого колеса



а)

б)

а) начальная стадия; б) предельное состояние

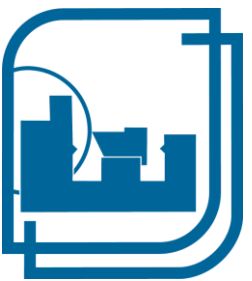




## Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

### Научная новизна полученных результатов:

1. Сформулирована концепция эффективности моделирование взаимосвязи эксплуатационных свойств поверхностей КЗЗК с их показателями качества, что позволяет решить основную технологическую проблему зубообработки – обеспечение производительности, точности и качества зубообработки КЗЗК.
2. Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден механизм моделирования технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей КЗЗК.
3. Сформулировано научное положение по выбору и назначению технологического обеспечения системы параметров поверхностного слоя КЗЗК.



## Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК

### Общие выводы

**1.** Определена и математически описана взаимосвязь эксплуатационных свойств КЗЗК с их показателями качества, что позволило решить основную технологическую проблему зубообработки – обеспечение производительности, точности и качества зубообработки КЗЗК.

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

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

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

Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя КЗЗК



**Спасибо  
за внимание!**