

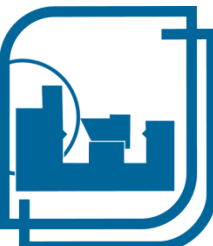
**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКРАТНОСТИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ  
ПЕРЕДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ  
ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ**



**ДОНБАССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКРАТНОСТИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ  
ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ  
ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ  
ЦЕНТРОВ**

**Магистр: Кошелева А. Д., гр. МС-09-1м.  
Руководитель: д.т.н., профессор Ключко А. А.**

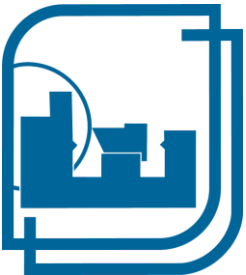


## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКРАТНОСТИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ

**Целью исследования** является создание высокоскоростных, тяжело нагруженных новых видов зубчатых передач, обладающих повышенной износостойкостью, плавностью работы, низкими шумовыми характеристиками.

**Объект исследования:** цилиндрические эвольвентные зубчатые передачи, которые преимущественно применяются в приводах вертикально-фрезерных обрабатывающих центров.

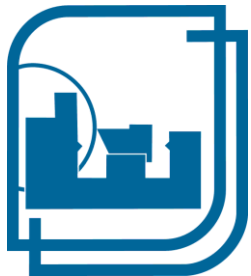
**Предмет исследования:** оценка влияния геометрических параметров зубчатого зацепления на износостойкость, высокую плавность и долговечность передач.



## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКРАТНОСТИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ

### **Задачи исследования:**

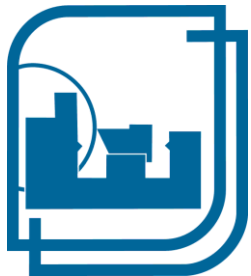
1. Проанализировать причины разрушения зубчатых колес.
2. Выделить основные направления повышения износостойкости и несущей способности зубчатых колес.
3. Установить влияние передаточного отношения зубчатых колес фрезерных обрабатывающих центров на износостойкость, высокую плавность и долговечность зацепления.
4. Теоретически обосновать влияние модификации профиля зубьев на снижение динамических нагрузок передачи.
5. Сформулировать рекомендации по применению разработанного некрatного зубчатого зацепления.
6. Разработать методику и программу подбора некрatных зубчатых зацеплений для приводов высокоскоростных вертикально-фрезерных обрабатывающих центров.



## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГЛУБОКОГО СВЕРЛЕНИЯ ПУТЕМ НАЛОЖЕНИЯ ВИБРАЦИЙ НА ИНСТРУМЕНТ

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

1. Обоснована целесообразность применения цилиндрических зубчатых передач с некрatным зацеплением в приводах вертикально-фрезерных обрабатывающих центров.
2. Доказана возможность увеличения износостойкости, плавности и долговечности в некрatном зацеплении в сравнении с кратным зацеплением при проектировании приводов обрабатывающих центров на основе некрatных зубчатых передач.



## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГЛУБОКОГО СВЕРЛЕНИЯ ПУТЕМ НАЛОЖЕНИЯ ВИБРАЦИЙ НА ИНСТРУМЕНТ

### **Практическое значение полученных результатов заключается:**

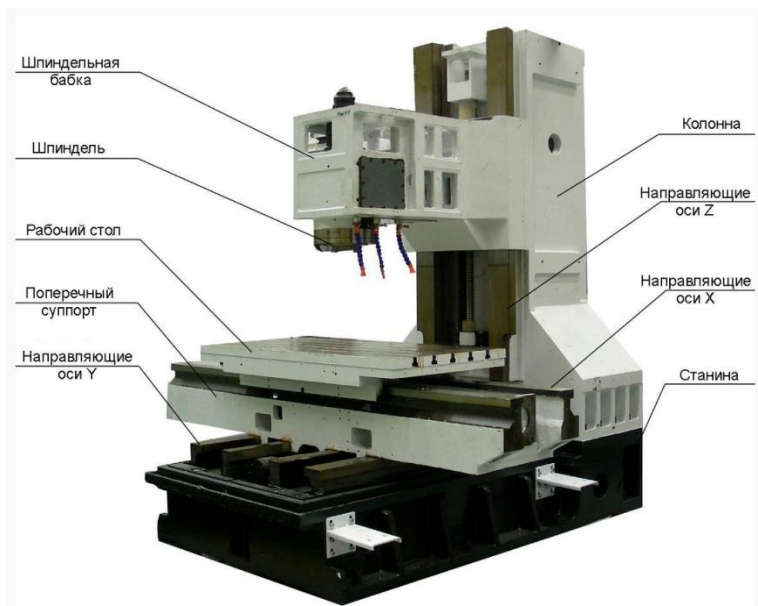
- в разработке научно обоснованных требований к зубчатым передачам приводов вертикально-фрезерных обрабатывающих центров;
- в методиках и программах по внедрению некратных зубчатых зацеплений в приводы обрабатывающих центров.

# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКРАТНОСТИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ

## ГЕОМЕТРИЯ ЗУБЧАТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПРИВодОВ ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ

### Анализ объекта исследования

Основные узлы станка VDF-1200



Фрезерный обрабатывающий центр VDF-1200



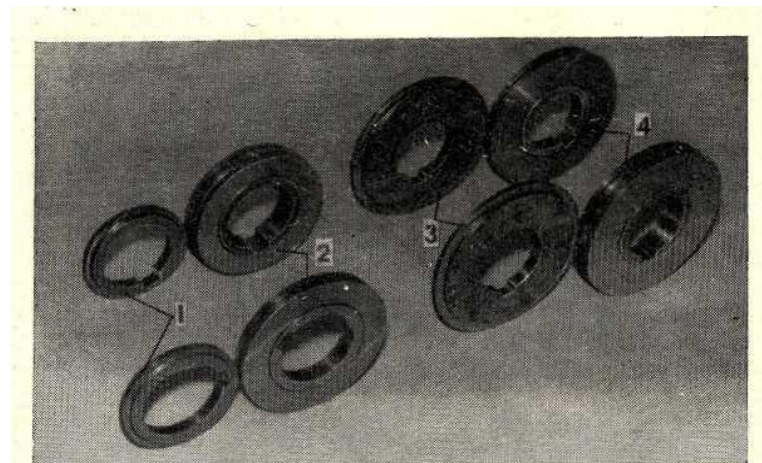
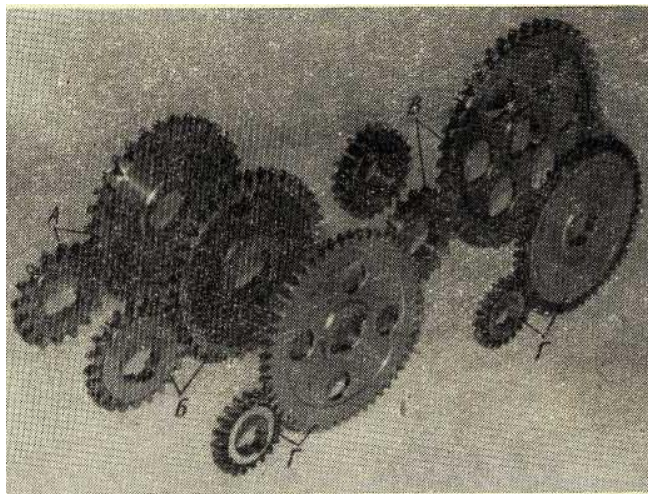
# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКРАТНОСТИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ

## Задачи, объекты и основные черты методологии исследования зубчатых колес на износостойкость

Эвольвентные зубчатые пары основных типоразмеров:  $m = 3; 4$  и  $5$  мм;  $z_1 = 16 \dots 21$ ;  $z_2 = 32 \dots 52$ ;  $b = 10$  мм;  $a = 100 \dots 150$  мм; степень точности 6 - 7 по ГОСТ 1643—81

1 — 80 мм; 2 — 108 мм; 3 — 130 мм; 4 — 132 мм, изготовленные из стали 12ХНЗА, 30ХНЗА

Образцы для испытаний на изнашивание при имитации условий работы зубьев передач



# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКРАТНОСТИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ

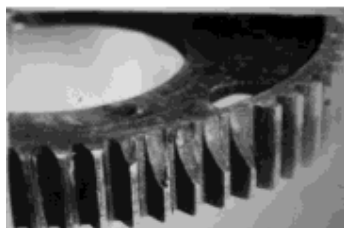
## СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЗУБЧАТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ С УЧЕТОМ НЕКРАТНОГО ЗУБЧАТОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

### Основные виды разрушений зубчатых колес

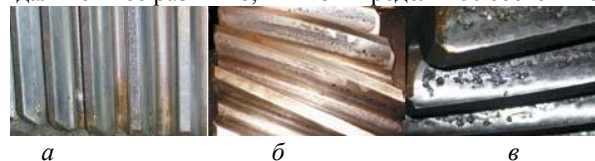
Поломка зубьев зубчатого колеса ( $u = 2,5$ )



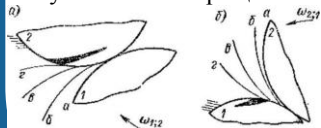
Разрушение зубьев шестерни ( $z = 80$ ) в виде косо́го скола, возможно инициированное переко́сом при монта́же



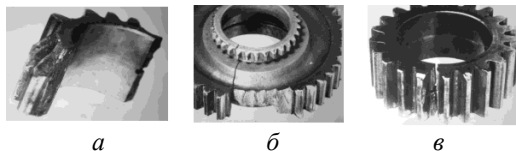
Превышение предела выносливости материала приводит к выкрашиванию рабочей поверхности: *a* – начальная стадия; *б* – дальнейшее развитие; *в* – предельное состояние



Влияние смазки на развитие усталостных трещин



Разрушения зубчатых колес, вызванные: *a*, *б* – заниженной в 2 раза глубиной цементованного слоя (0,7 мм вместо 1,4 мм); *в* – увеличенной толщиной цементованного слоя (1,6 мм), превышающей необходимую толщину на 0,2 мм



Начальная стадия абразивного износа колеса - появление рисок на рабочей поверхности зубьев



Полированная поверхность зуба - признак граничного трения

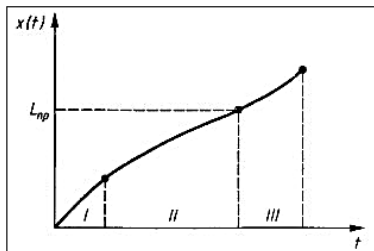




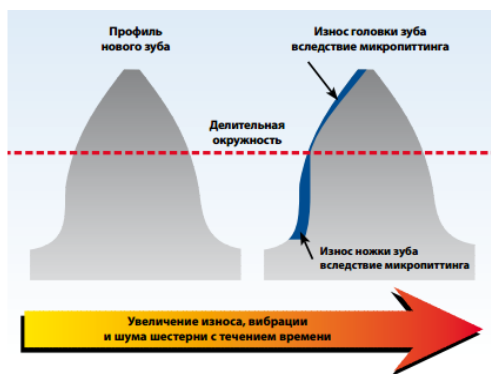
# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКРАТНОСТИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ

## Износостойкость и несущая способность деталей машин, входящих в состав высших кинематических пар

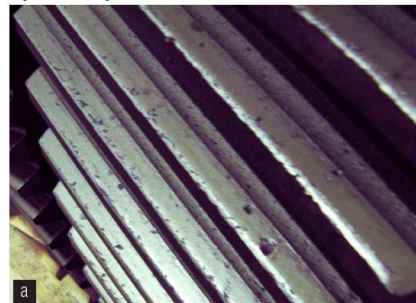
Характер процесса изнашивания:  
*I* – период приработки; *II* – период нормального рабочего износа; *III* – период интенсивного изнашивания



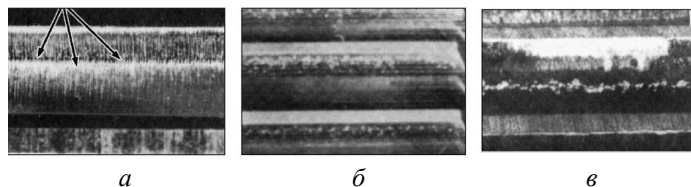
Прогрессирование износа зуба шестерни



Зубчатое колесо привода главного движения фрезерного обрабатывающего центра, подвергшееся интегральному износу



Этапы развития заедания зубьев зубчатых колес:  
*a* – начало заедания из-за недостатка смазки (горизонтальная линия на изношенных поверхностях означает полную линию); *б* – видны следы точечного износа; *в* – разрушительное заедание, вследствие чего колесо выходит из строя



*a*

*б*

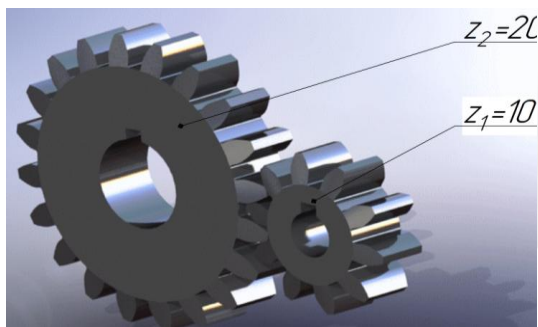
*в*

# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКРАТНОСТИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ

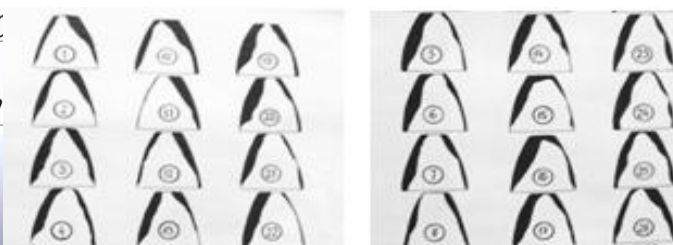
## ОБЛАСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СКОРОСТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ПЛАВНОСТИ ИХ РАБОТЫ, ИЗНОСОСТОЙКОСТИ, И ДОЛГОВЕЧНОСТИ

### Методика обоснования некратности зацепления высокоскоростных высокоточных зубчатых передач

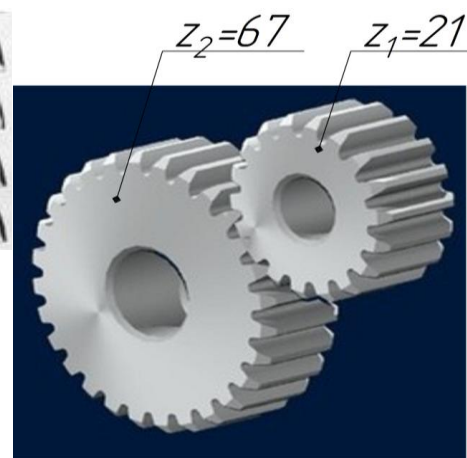
Зубчатое зацепление с передаточным отношением  $u = 2$



Профили изношенных зубьев передачи с передаточным отношением  $u = 2$



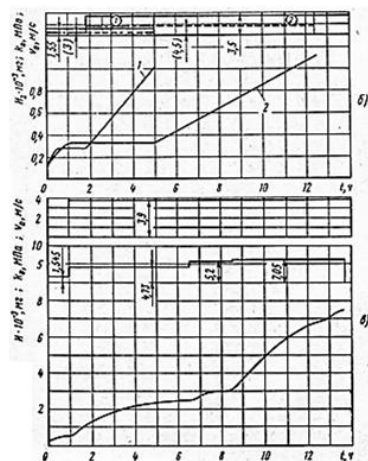
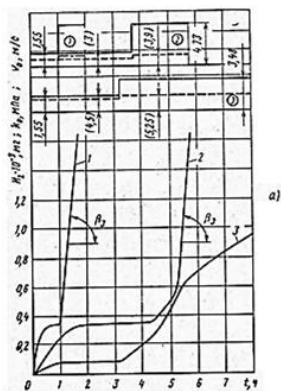
Некратная схема зацепления зубчатых колес  $u = 4,619047$



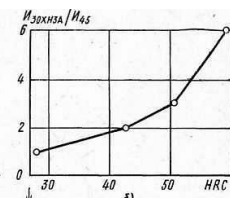
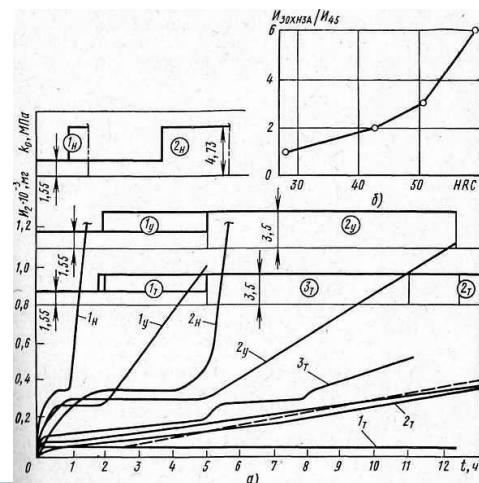
# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКРАТНОСТИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ

## Изнашивание шестерен и колес зубчатых пар с различными сочетаниями твердости зубьев

Кривые износа колес зубчатых пар типоразмера Г, изготовленных из сталей: а и б – сталь 45; в – 30ХНЗА



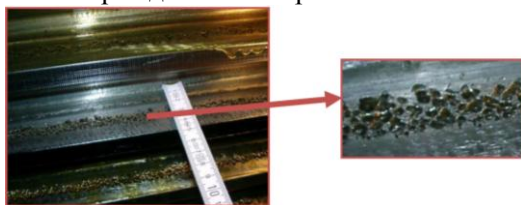
Кривые износа колес зубчатых пар с различными видами химико-термической обработки и твердостью зубьев: а — характер процессов;  $1_H, 2_H$  — нормализованных колес (сталь 45,  $HV 200 \pm 10$ );  $1_Y, 2_Y$  — улучшенных (сталь 30ХНЗА,  $HV 265 \pm 5$ );  $1_T, 2_T, 3_T$  — закаленных (сталь 45,  $HRC 58 \pm 1, 51 \pm 1, 44 \pm 2$  соответственно); б — относительная износостойкость  $I_{30ХНЗА}/I_{45}$



# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКРАТНОСТИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ

## Роль смазочной среды в износостойкости и противозадирной стойкости зубчатых колес

Кратные зубчатые колеса, поврежденные микропиттингом



Шестерни с кратным передаточным отношением: микропиттинг привел к сколу части боковой поверхности зубьев



Образование макропиттинга из микропиттинга у шестерни с кратным передаточным отношением



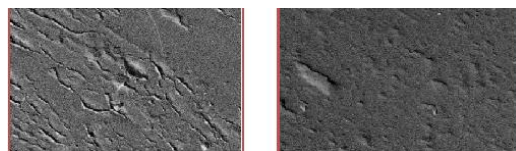
Вмятина от частицы износа, ведущая к выкрашиванию поверхности зубчатых колес



Фотография использована с разрешения СЕАТЭС-Н (французский институт по вопросам трения и смазки с полемической кафедрой)

Контактная поверхность зубчатых колес, подверженных питтингу, привода главного движения:

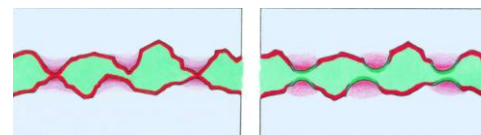
*a* – с кратным передаточным отношением; *б* – после замены на некрatную пару



*a*

*б*

Применение специального масла для защиты от микропиттинга  
*a* – вершины пар трения до; *б* – вершины пар трения после не соприкасаются



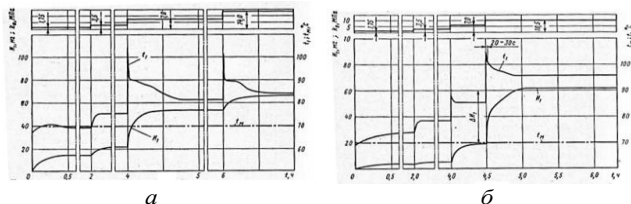
*a*

*б*

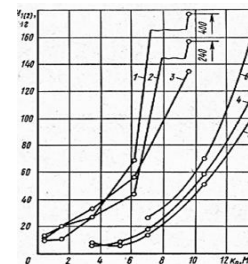
# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКРАТНОСТИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ

## Влияние кратковременных перегрузок на приработочное изнашивание зубчатых пар

Характерные кривые износа шестерен и изменения температуры их зубьев при резких повышениях постоянной нагрузки: а и б — при различной интенсивности приработочного изнашивания



Зависимость интегрального износа шестерен  $I_1$  и колес  $I_2$  от коэффициента окружного усилия  $k_0$



Условия испытаний зубчатых колес, результаты которых даны на рисунке

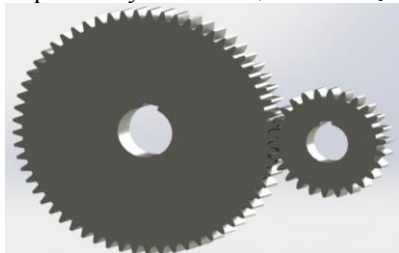
Кривая на рис.	Индексы типоразмера и колеса зубчатой пары	Характер нагрузки	$t_M, ^\circ\text{C}$
1	А (Ш)	Постоянная ступенчато возрастающая	100
2	А (Ш)	То же	70
3	А (Ш)	То же	100
4	Б (Ш+К)	Постоянная с кратковременными перегрузками	70
5	А (Ш)	То же	70
6	А (К)	То же	70

# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКРАТНОСТИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ

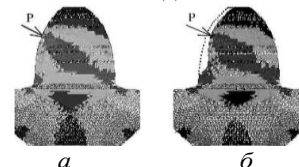
## ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ, ВЫСОКАЯ ПЛАВНОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ ПРИ ИХ НЕКРАТНОМ ЗАЦЕПЛЕНИИ

### Создание и исследование некротной зубчатой передачи высокоскоростного вертикально-фрезерного обрабатывающего центра

Принятое некротное зубчатое зацепление:  $z_1 = 26$ ,  $z_2 = 61$

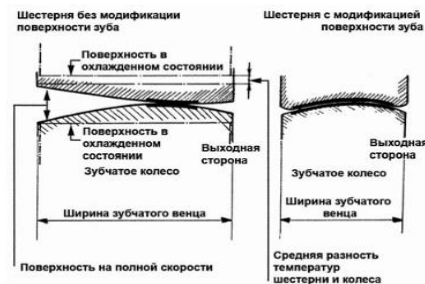


Распределение приведенных напряжений в нормальном сечении зуба шестерни при  $m=10$  мм,  $z=26$ : *a* – при некротном зацеплении с колесом; *б* – при кратном зацеплении, износ зуба составляет 20% по делительному диаметру



Некротное зубчатое зацепление с и без модификации поверхности зуба

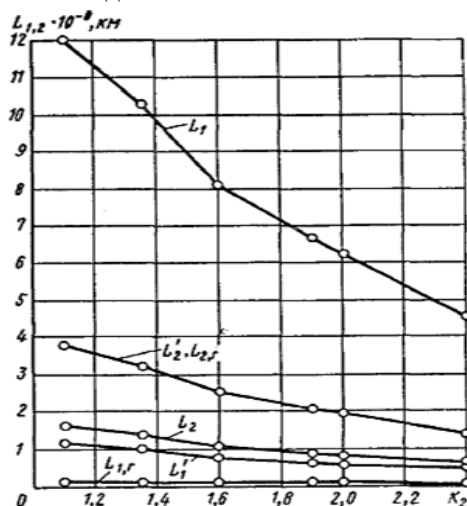
Распределение приведенных напряжений в нормальном сечении зуба колеса при  $m=10$  мм,  $z=61$ : *a* – зуб при некротном зацеплении; *б* – при кратном зацеплении зуб изношен 20% по делительному диаметру



# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКРАТНОСТИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ

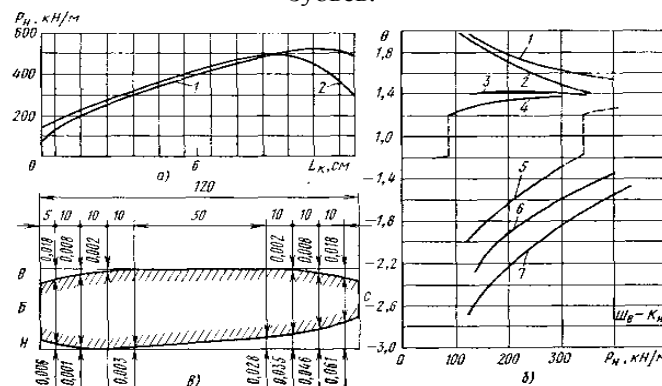
## Анализ долговечности некрастных зубчатых передач вертикально-фрезерного обрабатывающего центра

Кривые зависимости расчетной долговечности зубчатых колес от коэффициента концентрации нагрузки по длине контактных линий



Результаты исследования концентрации нагрузки в некрастной передаче:

*a* — теоретическое (1) и экспериментальное (2) распределения удельной нормальной нагрузки  $P_n$  (при номинальном ее значении 370 кН/м) по длине линии контакта  $L_K$ ; *b* — зависимость коэффициентов концентрации нагрузки  $\theta$  от величины  $P_n$ ; кривые 1—7 соответствуют непрямым рабочим поверхностям зубьев  $\Delta_0$  в мкм: +50, +30, +10, -10, -20, -35, -50; Шв—Кн — случай взаимодействия верхнего профиля зуба шестерни с нижним профилем зуба колеса; *в* — параметры криволинейной продольной коррекции зубьев шестерен некрастных передач; *B* и *H* — верхний и нижний профили; *B* и *C* — торцы, обращенные к буксе и к середине колесной пары, соответственно контактных линий, предотвращения кромоочного контактирования, снижения динамических нагрузок, вызванных погрешностями изготовления зубчатых колес и деформациями их зубьев.

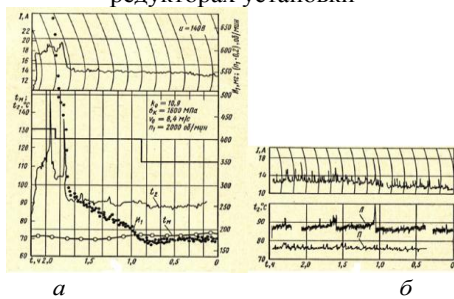


# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКРАТНОСТИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ

## Зависимость износостойкости зубчатых пар от частоты их вращения и температуры смазочного масла

Характерные изменения:

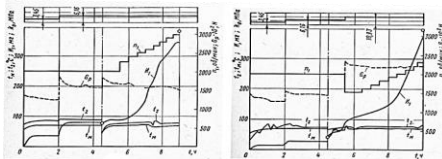
*a* — износа зубьев шестерни  $I_1$ , температуры зубьев сопряженного колеса  $t_2$  и силы тока в электродвигателе  $I$  с приближением частоты вращения испытуемой зубчатой пары (сталь 12ХНЗА) к предельной при стабилизированной температуре масла на входе в зацепление  $t_{in}$ ; *б* — величин  $I$  и  $t_2$  зубчатых пар (сталь 45) в левом (*Л*) и в правом (*П*) редукторах установки



*a*

*б*

Характерные результаты испытаний зубчатых пар (без модификации профиля головок зубьев) при основных нагрузках, соответствующих  $k_0 = 6,16$  МПа (*a*) и  $k_0 = 10,93$  МПа (*б*)

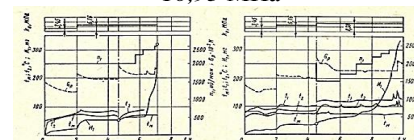


*a*

*б*

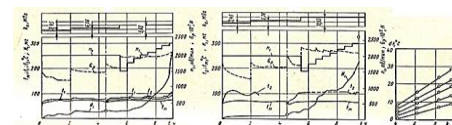
Результаты испытаний зубчатых колес (с модификацией профиля головок зубьев) методом ступенчатого повышения частоты вращения:

*a, б, в, г* — характерные процессы изнашивания при основных нагрузках, соответствующих  $k_0 = 6,16; 8,39; 9,62; 10,93$  МПа



*a*

*б*

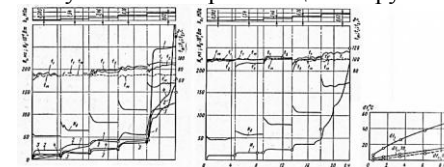


*в*

*г*

*д*

Характерные результаты испытаний зубчатых пар методом ступенчато возрастающей нагрузки

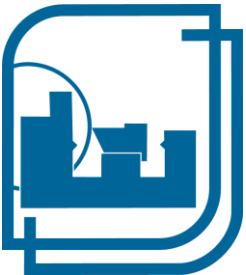


*a*

*б*

*в*






# ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКРАТНОСТИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Расчет передаточного отношения зубчатых колес фрезерных станков зачастую сводится к подбору таких чисел зубьев, при котором обеспечивается неравномерное изнашивание зубьев.
2. Для обеспечения стабильной работы зубчатых пар необходимо при изготовлении зубчатых колес использовать стали с твердостью рабочих поверхностей  $H < HB 350$ . Стали с такой твердостью обеспечивают высокую приработку зубьев, в результате чего погрешности, допущенные при нарезании зубьев и сборке передачи, частично устраняются в процессе приработки.
3. При замене зубчатых зацеплений на некратные повышается износостойкость передачи, что позволяет работать с высокими скоростями резания, оказывая положительное влияние на производительность фрезерных обрабатывающих центров.
4. В результате исследования была спроектирована некратная зубчатая передача с передаточным отношением  $u = 2,346$ , удовлетворяющая требованиям, которые предъявляются к высокоскоростным передачам, а именно: обеспечение максимально возможных нагрузок  $q_{\delta u}$ , которые могут быть переданы при безыносной работе зубчатых колес; близость значений  $q_{\delta u}$  в расчетных точках на ножках зубьев шестерни и колеса; условия, способствующие выравниванию износостойкости в крайних точках линии зацепления, т. е. существенно меньшие скорости скольжения на ножках зубьев шестерни, чем на ножках зубьев колеса, где эффективные радиусы кривизны больше, чем на ножках шестерни.
5. Манипулируя допускаемыми напряжениями некратных зубчатых колес, можно широко регулировать соотношение расчетных и опытных с характеристик долговечности, однако для научно обоснованной корректировки расчета на контактную выносливость необходимы учет масштабного фактора, роли смазочного слоя в зацеплении и привлечение вероятностных методов (особенно при определении внешних динамических нагрузок).



**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКРАТНОСТИ ЗАЦЕПЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ  
ПЕРЕДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ  
ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ**

**Благодарю за внимание!**