

Министерство образования и науки Украины  
Донбасская государственная машиностроительная академия

БЕЛАН ИЛЬЯ АНДРЕЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОВОГО ШЛИФОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ  
ВЫСОКОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ТЯЖЁЛЫХ СТАНКОВ

8.05050301 – металлорежущие станки и системы

Автореферат магистерской работы

Краматорск – 2017

Работа выполнена на кафедре «КМСИТ» Донбасской государственной машиностроительной академии Министерства образования и науки Украины.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Клочко Александр Александрович

Защита состоится «\_11\_» \_\_\_\_\_ января \_\_\_\_\_ 2017 г. в \_\_ часов на заседании Государственной экзаменационной комиссии в Донбасской государственной машиностроительной академии по адресу: г. Краматорск, б-р Машиностроителей, 34, корп. № 3, ауд. 3308.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одним из главных направлений развития техники является повышение качества при одновременном росте количества и многообразия производимых зубчатых колес. Это направление определяет степень концентрации и специализацию производства. Оценкой уровня развития производства является уровень технологии. Проблема качества касается не только готовых конструкций, но и деталей машин, среди которых важнейшее место принадлежит зубчатым колесам. Данная работа посвящена комплексной проблеме повышения эффективности процесса зубошлифования на основе достижения высокой требуемой точности и качества поверхностного слоя с оценкой комплексного влияния конструктивно-технологических факторов на процесс формирования поверхностного слоя зубьев зубчатых колес с целью повышения их износостойкости, а также производительности технологического процесса в оптимальных производственных условиях.

**Связь с научными программами, планами, темами.** Работа выполнена на кафедре «КМСИТ» Донбасской государственной машиностроительной академии (ДГМА) и является составной частью научных исследований, проведенных кафедрой в рамках комплексного плана исследований Министерства образования Украины по проблеме разработки прогрессивных конструкций станков. Результаты магистерской работы использованы при исполнении госбюджетной темы:

**Целью исследования** Целью исследований является повышение эффективности процесса зубошлифования зубчатых колес на станках, работающих по методом обкатки двухсторонним конусным шлифовальным кругом, путем обеспечения заданной точности и улучшения качества поверхностного слоя зубьев.

### **Задачи исследования:**

1. Установить взаимосвязи между параметрами режимов шлифования, характеристиками инструмента, свойствами и характеристиками поверхностного слоя, геометрической точностью зубчатого колеса и оборудования.
2. Обосновать возможность управления в процессе шлифования геометрической точностью зубчатых колес, свойствами и характеристиками поверхностного слоя, природозащитными мероприятиями.
3. Доказать возможность прогнозирования долговечности (износостойкости) зубчатых колес и шлифовального круга.
4. Выработать практические рекомендации для обеспечения высокой эффективности процесса шлифования.

**Объект исследования:** цилиндрические зубчатые колеса

**Предмет исследования:** технологические методы шлифования зубчатых колес

**Методы исследования.** Решение поставленных в работе задач осуществлялось с использованием теоретических и экспериментальных методов исследования. Методологической основой работы является системный подход к изучению и описанию объекта и предмета исследования и, в первую очередь, формирования принципов импульсного зубошлифования. Теоретические исследования базируются на основных положениях технологии машиностроения.

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

1. Впервые разработаны схемы импульсного зубошлифования для обеспечения высокой производительности и стойкости шлифовального круга.
2. Предложены конструкции кругов для импульсного шлифования с целью обеспечивающие минимизацию локальной температуры в зоне

контакта круга с обрабатываемой изделиями.

**Практическое значение полученных результатов** заключается:

- в разработке научно обоснованных требований к повышению точности и производительности зубчатых колес;
- разработана математическая модель колебания глубины прерывистого круглого наружного шлифования и реализована в пакете “VisSim”. Разработанная модель и блок-схема её реализации может быть использована для анализа широкого спектра условий прерывистого шлифования.

**Достоверность полученных результатов.** Достоверность полученных результатов работы обеспечивается точностью постановки задач, использованием математически корректных методов исследования.

**Личный вклад соискателя** состоит в формулировке цели и задач работы; разработке методов их решения; проведении экспериментальных исследований. Вклад автора в работы, выполненные в соавторстве, состоял в непосредственном участии во всех стадиях работы, включая постановку задачи, выполнения теоретических и экспериментальных исследований.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты магистерской работы докладывались на XII международной научно-технической конференции «Тяжелое машиностроение. Проблемы и перспективы развития» (г. Краматорск, 2016).

**Публикации.** По результатам магистерской работы опубликовано 1 работы, которая входит – в специализированном издании ВАК Украины и 1 тезисы докладов.

**Структура и объем работы.** Магистерская работа состоит из введения, семи разделов, общих выводов, библиографического списка из 76 наименований и одного приложения. Основной текст изложен на --- страницах машинописного текста, включающих \_\_ рисунков, \_\_ таблиц. Общий объем работы составляет\_\_ страниц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** Одним из главных направлений развития техники является повышение качества при одновременном росте количества и многообразия производимых зубчатых колес. Это направление определяет степень концентрации и специализацию производства. Оценкой уровня развития производства является уровень технологии. Проблема качества касается не только готовых конструкций, но и деталей машин, среди которых важнейшее место принадлежит зубчатым колесам.

**В первом разделе** выполнен анализ проблемы, связанной с состоянием поверхностного слоя деталей машин (в том числе и зубчатых колес) указывает на то, что существует комплекс проблем технологических, конструкторских и эксплуатационных, в совокупности предъявляющих требования к свойствам и характеристикам поверхностного слоя, что указывает на необходимость проведения научных исследований.

Стратегия формирования поверхностного слоя начинается с момента получения полуфабриката и заканчивается в месте с полученной характеристикой. Стратегия процесса формирования поверхностного слоя состоит из фаз (этапов), представленных на рис.1.1 [53, 63]. Анализируя представленную модель необходимо принимать во внимание тенденции направления в развитии технологии машиностроения, особенно в области формирования поверхностного слоя в отдельных фазах (этапах).



Рис. 1. Фазы (этапы) формирования поверхностного слоя

Следует учитывать, что абразивная обработка, как окончательная операция технологического процесса, виду наличия тепловых явлений, случайности выбора режущих кромок участвующих в процессе шлифования зерен и т.п., влияет на формирование поверхностного слоя иначе, чем обработка резанием. Эти явления, которые связаны с конструкцией станка, имеют свою специфику, зависящую, например, от особенностей работы вращающегося инструмента (шлифовального круга).



Рис. 2. Воздействие абразивного инструмента на формирование поверхностного слоя

Анализируя распределение микротвердости в поверхностном слое, можно сделать вывод, что на структурные изменения верхнего слоя решающим образом влияет распределение тепла, так как в верхней части верхнего слоя могут появляться температуры, которые являются достаточными для создания мартенситных структур (рис. 3). Влияние

температуры и воздействие трения уменьшается с достижением более глубоких зон поверхностного слоя.

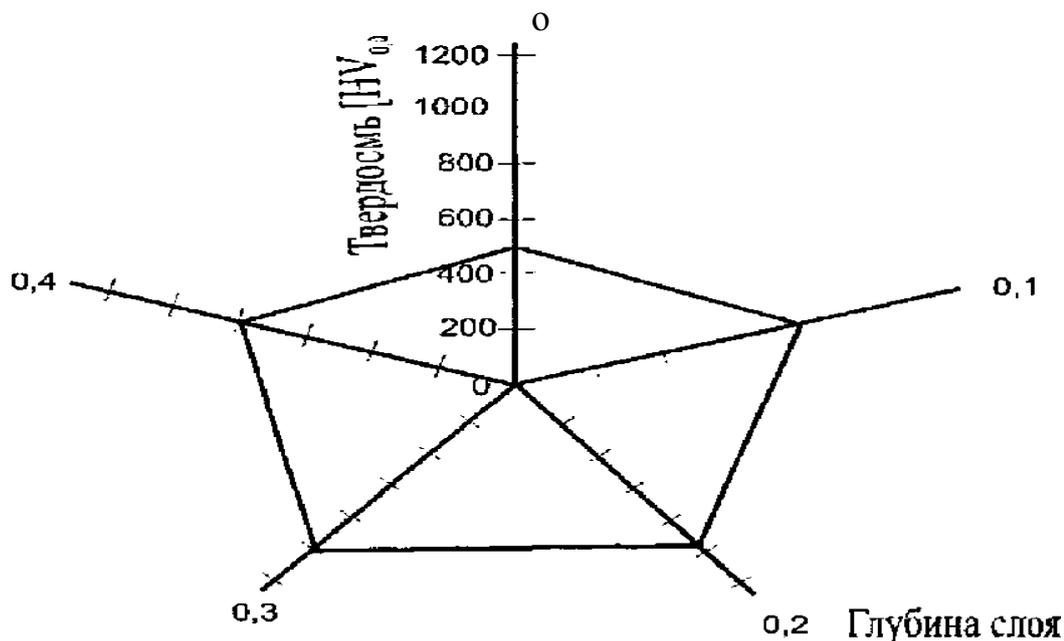


Рис. 3. Распределение микротвердости в поверхностном слое обрабатываемого материала

**Во втором разделе** выполнено математическое моделирование кинематики процесса зубошлифования для оценки точности профилирования зуба

Рассмотрим схему профилирования эвольвенты при шлифовании указанным выше способом.

На рис 4 приведена схема формообразования профиля зуба колеса при использовании шлифовального круга с углом  $\alpha_{ш} \neq 0$

Наибольшая огранка профиля также зависит от кинематики данного процесса формообразования. Ее максимальное значение будет у головки зуба и равняется отрезку КТ (рис 4). Следует отметить, что существующие математические зависимости по определению кинематической погрешности профиля не учитывают влияния всего комплекса параметров процесса шлифования зуба (кинематические неточности станка, динамику процесса шлифования, упругопластические деформации поверхностного

обрабатываемого слоя детали, силовые и тепловые характеристики процесса контактного взаимодействия единичного зерна с поверхностью) и степень их совместного влияния на указанную погрешность.

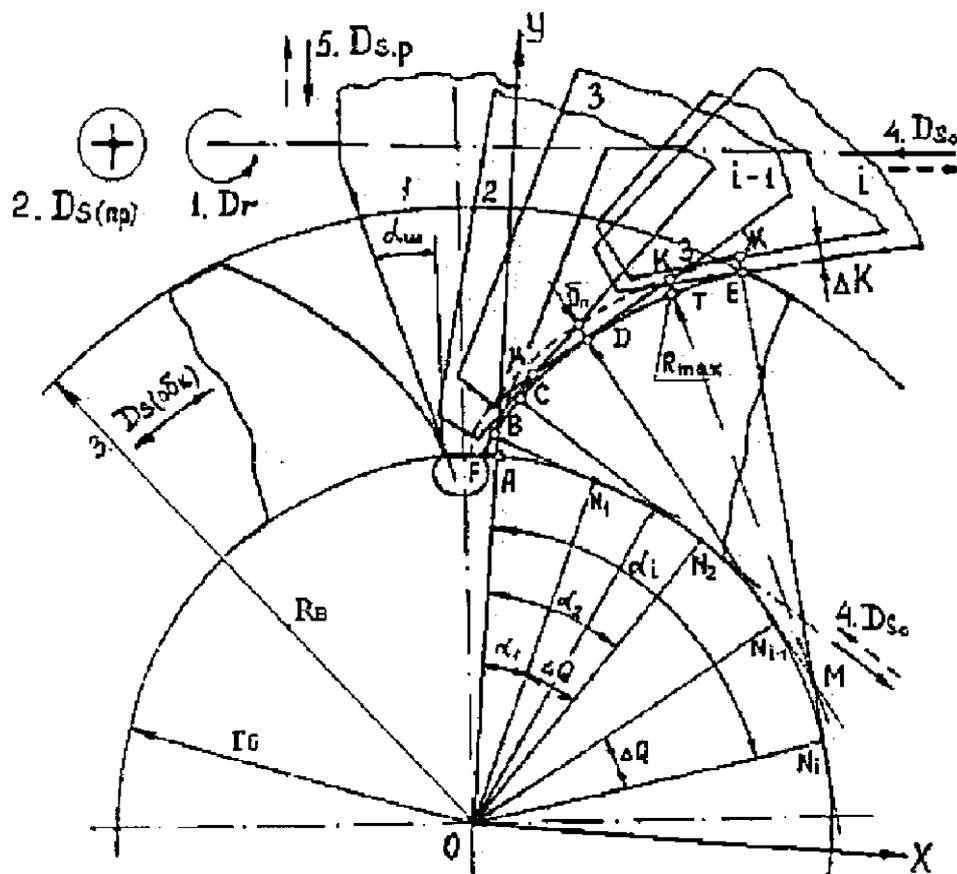


Рис. 4. Схема взаимодействия шлифовального круга с углом  $\alpha_{ш} \neq 0$  с поверхностью зуба в процессе формообразования эвольвентного профиля

Составляющая силы резания  $F_H$ , действующей на зерно и вызывающая отжатие шлифовального круга, будет зависеть от припуска на проход или от величины динамического натяга ( $h_H$ ) и она равна (рис.5)

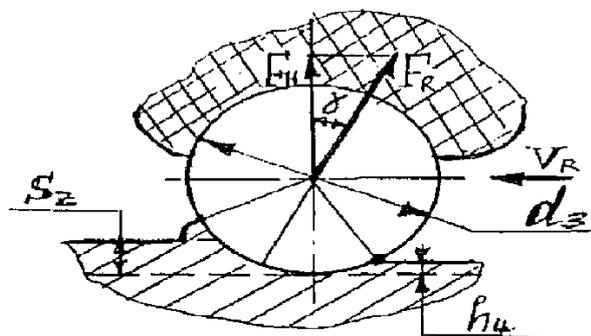


Рис.5. Схема силового взаимодействия зерна абразива с обрабатываемым материалом

Из рис.5 следует, что интересующая нас составляющая ( $F_H$ ) вызывающая отжатие шлифовального круга от обрабатываемой поверхности, будет равна:

$$F_H = F_R \cdot \cos(\gamma) \quad (1)$$

Величину угла  $\gamma$  следует определять из следующих соображений. По данным работ; при высоких скоростях резания (свыше 10м/с) величина упругого восстановления ( $h_y$ ) поверхностного слоя стремится к нулю. Следовательно ею можно пренебречь, а для угла  $\gamma$  можно записать соотношение:

$$\gamma = \arctg\left(\frac{S_2}{\Gamma}\right) \quad (2)$$

Где 
$$\Gamma = \frac{d_3}{2\sin(\omega)} \quad (3)$$

поэтому угол охвата материалом части сферы зерна будет равен:

$$\omega = \arccos\left[\left(\frac{d_3 - S_z}{d_3}\right)\right] = \arccos\left(1 - \frac{S_z}{d_3}\right) \quad (4)$$

Поскольку вектор деформационного воздействия до разрушения материала направлен по касательной к поверхности, то вектор упругого сопротивления материала от объемной деформации будет определяться эпюрой упругих напряжений в зоне сектора угла  $\omega$ . Следовательно для угла  $\gamma$  можно записать следующее соотношение:

$$\gamma = \arctg\left(\sqrt{\frac{2S_z}{d_3}}\right) \quad (5)$$

Анализ математической модели процесса формообразования эвольвентного шлифованием профиля зуба конусным кругом показал, что на

погрешность профиля зуба колеса влияет большое число факторов, связанных с количеством одновременно выполняемых движений согласно реализуемой на станке кинематической схеме, соответствующей данному способу обработки. Шлифование кругами с  $\alpha_{ш} \neq 0$  оказывается предпочтительным, так как исключает наличие кинематической погрешности профиля у ножки зуба колеса и влияние радиального биения на точность профилирования.

**В третьем разделе** разработана математическая модель динамики прерывистого шлифования

Как известно прерывистое шлифование применяется для уменьшения нагрева шлифуемой поверхности за счет периодического прерывания её контакта с кругом. Для этого на периферии круга формы ПП выполняются пазы. Схема такого шлифования показана на рис. 6

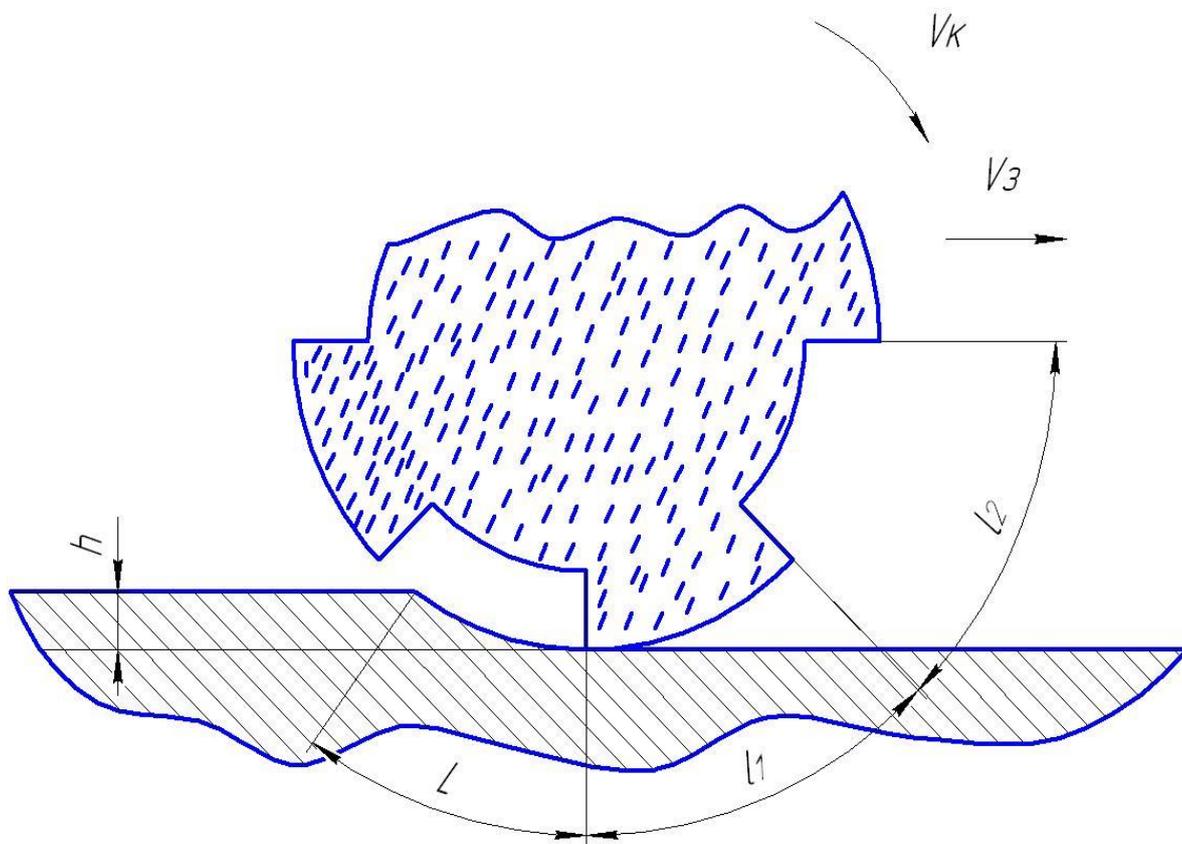


Рис.6– Схема прерывистого шлифования периферией круга формы ПП.

Разработаны блок-схемы моделирования (ИЗШ) в пакете “VisSim” и её анализ

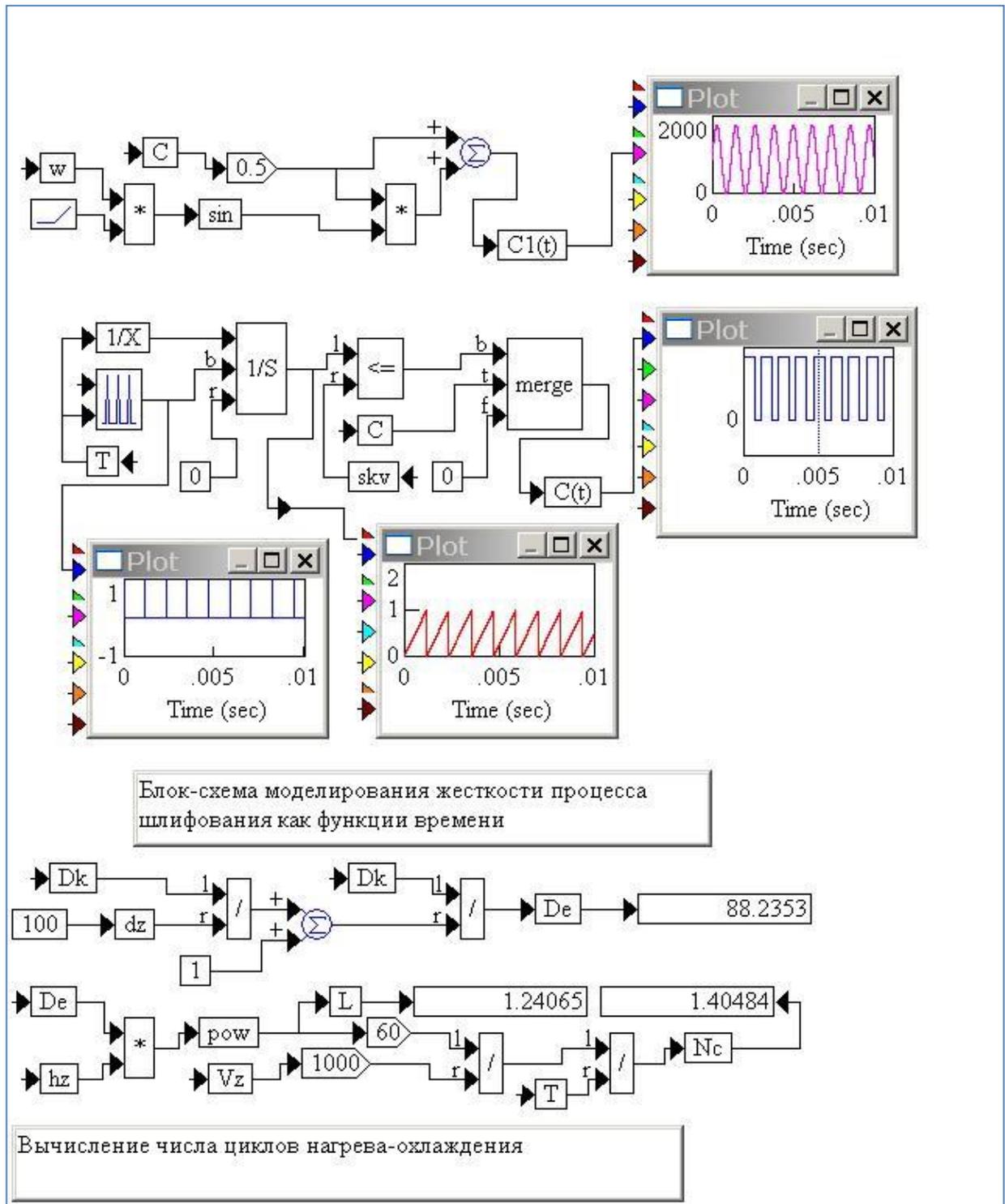


Рис. 7 – Блок-схема моделирования “жесткости” процесса прерывистого шлифования и расчета числа циклов  $N_c$  нагрева – охлаждения

Установлено, что моделирование “жесткости” процесса прерывистого шлифования как функции времени в виде гармонического или ступенчатого

сигналов не вносит большого различия в величину колебаний глубины шлифования. Колебания глубины шлифования возбуждаемое прерывистой поверхностью круга, при рекомендуемых соотношениях размеров выступов и впадин на ней, находятся в диапазоне шероховатости чистового или тонкого шлифования. Следовательно, требования к шероховатости поверхности и ее волнистость не ограничивают применение прерывистого шлифования.

**В четвёртом разделе** приведены результаты исследований стабильности процесса зубошлифования с учетом геометрических характеристик точности и состояния поверхностного слоя. Поверхностный слой контактирующих поверхностей зубьев зубчатых колес в действительности ограничивается сформированными по-разному поверхностными слоями при химическом, физическом и механическом их взаимодействии как в процессе изготовления, так и в процессе эксплуатации (рис. 10). Поэтому можно говорить о так называемом технологическом поверхностном слое и эксплуатационном, свойства и характеристики которых непрерывно изменяются. Взаимодействия в процессе эксплуатации этих разнообразных поверхностей происходят в процессе многочисленных точечных контактов, значительно изменяя условия, в которых работают поверхности зубьев зубчатых колес при эксплуатации. Кроме химико-физических и механических изменений, происходящих в технологическом процессе изготовления зубчатых колес, появляются новые изменения, которые вносит в уже существующий поверхностный слой процесс эксплуатации зубьев зубчатых колес. В результате этих изменений поверхностный слой зубчатых колес подвергается разрушению, что ведет к преждевременному исключению из эксплуатации зубчатых колес. Проблема износа зубьев зубчатых колес является существенной, так как обусловлена характером процессов трения при их взаимодействии, и отражает многообразие износа и его масштабность. Анализ процессов изнашивания деталей машин показывает, что равномерный износ поверхностного слоя имеет место в примерно 65% исследуемых случаев, охватывая около 0,106мм

эвольвентной поверхности зуба. При этом 21% износа наблюдается на головке и ножке зуба, а ширина изношенной поверхности составляет 0,040 мм. Около 9% составляет износ поверхности зуба по среднему диаметре, с шириной изношенной поверхности около 0,06 мм. Приведенные результаты показывают, что формирование поверхностного слоя зубьев зубчатых колес имеет существенное значение для их высокой долговечности, так как правильно сформированный поверхностный слой может способствовать значительному уменьшению износа эвольвентной поверхности зубьев зубчатых колес.

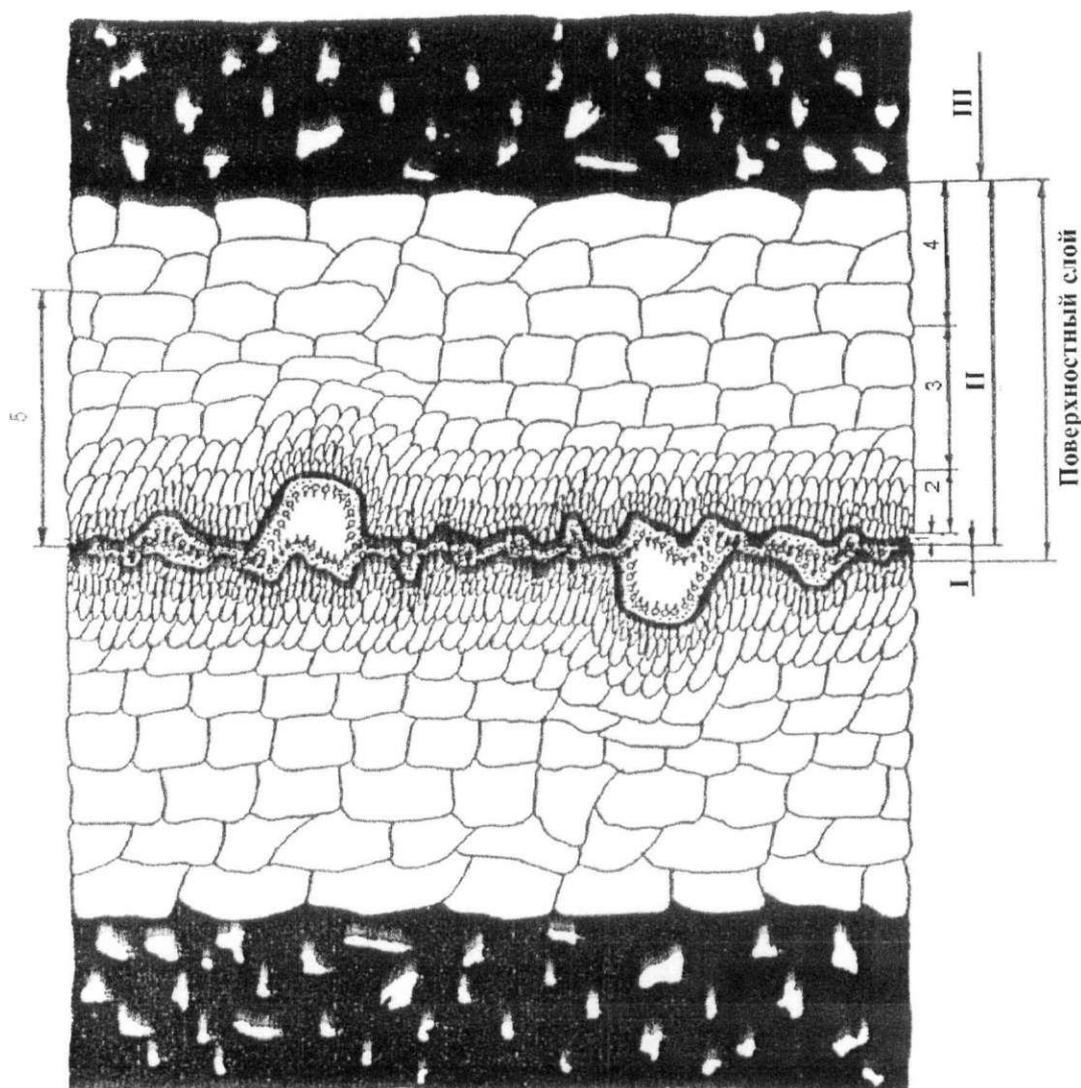


Рис. 8. Схема контактирования поверхностных слоев зубьев зубчатых колес в процессе эксплуатации

Состояние поверхностного слоя зубьев зубчатых колес, определяющее качество поверхности этих деталей машин, характеризуется, прежде всего, шероховатостью поверхности, микроструктурой, микротвердостью, остаточными напряжениями и другими свойствами и характеристиками, которые свойственны многим деталям машин и которые изменяются в зависимости от химического состава обрабатываемого материала.

## **ВЫВОДЫ**

1. Анализируя распределение микротвердости в поверхностном слое, можно сделать вывод, что на структурные изменения верхнего слоя решающим образом влияет распределение тепла, так как в верхней части верхнего слоя могут появляться температуры, которые являются достаточными для создания мартенситных структур. Влияние температуры и воздействие трения уменьшается с достижением более глубоких зон поверхностного слоя.
2. Анализ математической модели процесса формообразования эвольвентного шлифованием профиля зуба конусным кругом показал, что на погрешность профиля зуба колеса влияет большое число факторов, связанных с количеством одновременно выполняемых движений согласно реализуемой на станке кинематической схеме, соответствующей данному способу обработки. Шлифование кругами с  $\alpha_{ш} \neq 0$  оказывается предпочтительным, так как исключает наличие кинематической погрешности профиля у ножки зуба колеса и влияние радиального биения на точность профилирования.
3. Установлено, что моделирование “жесткости” процесса прерывистого шлифования как функции времени в виде гармонического или ступенчатого сигналов не вносит большого различия в величину колебаний глубины шлифования. Колебания глубины шлифования возбуждаемое прерывистой поверхностью круга, при рекомендуемых соотношениях размеров выступов и впадин на ней, находятся в диапазоне шероховатости чистового или тонкого шлифования. Следовательно,

требования к шероховатости поверхности и ее волнистость не ограничивают применение прерывистого шлифования.

4. Установленные выше взаимосвязи и полученные зависимости на основании проведенных многочисленных экспериментальных исследований, а также анализ конструктивных особенностей зубчатых колес позволяют управлять состоянием поверхностного слоя зубчатых колес в зависимости от их условий эксплуатации и возникающих при этом эксплуатационных нагрузок.

### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ МАГИСТЕРСКОГО ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА**

1. Новые технологические способы обработки высокоточных зубчатых реек в тяжёлом станкостроении / А. А. Ключко, Д. В. Евсейчик, И. А. Билан // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2016. – Вып. 39. – С. 143–148.