

На правах рукописи

Воронков Александр Викторович

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ ПЕРИФЕРИЕЙ КРУГА  
ПУТЕМ ПОПЕРЕЧНОЙ ОСЦИЛЛЯЦИИ  
ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ЗАГОТОВКИ

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Орел – 2012

Работа выполнена в Технологическом институте им. Н.Н. Поликарпова ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК».

Научный руководитель

кандидат технических наук, доцент,  
Василенко Юрий Валерьевич

Официальные оппоненты:

Козлов Александр Михайлович,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО Липецкий государственный  
технический университет», заведующий  
кафедрой «Технологии машиностроения»

Поляков Алексей Иванович,  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»,  
доцент кафедры «Технология машиностроения  
и конструкторско-технологическая  
информатика»

Ведущая организация

ФГБОУ ВПО «Брянский государственный  
технический университет»

Защита состоится «27» апреля 2012 г., в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д212.182.06 при ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК».

Автореферат разослан «24» марта 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Василенко Юрий Валерьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Машиностроение – это ядро всей экономики и главный плацдарм для инновационных преобразований, который в современных условиях приобретает особое системообразующее значение. Его приоритетное технологическое развитие становится решающим условием инновационного развития страны. Одной из главных задач, стоящих перед отечественным машиностроением, остается его технологическая модернизация.

В настоящее время большое количество научно-технических работ направлено на интенсификацию способов шлифования с целью повышения производительности обработки. Однако не всегда должное внимание уделяется обеспечению эксплуатационных показателей качества обработанных поверхностей деталей машин, поэтому комплексный подход к совершенствованию способов абразивной обработки поверхностей деталей машин становится наиболее востребованным, экономически оправданным и технологически обоснованным в современном машиностроении.

Эксплуатационные свойства деталей машин определяются как параметрами шероховатости обработанной поверхности, так и направлением неровностей. ГОСТ 2.309-73 регламентирует лишь обозначение типа микрорельефа и направление его измерения, если оно отличается от предусмотренного ГОСТ 2789-73. Однако в данных ГОСТах, отсутствуют параметры рассматриваемых микрорельефов (шаг неровностей, угол их скрещивания и пр.)

В этой связи одним из актуальных научных направлений в технологии машиностроения является развитие методов и способов высокопроизводительной обработки, в том числе абразивной, обеспечивающих формирование микрорельефа обработанной поверхности с управляемым расположением микронеровностей. В наибольшей степени эксплуатационным требованиям удовлетворяют поверхности, имеющие изотропный микрорельеф.

Под поверхностью с изотропным микрорельефом понимается поверхность, у которой высотные параметры шероховатости инвариантны к направлению измерения.

Задача формирования изотропного микрорельефа эффективно решена для ряда лезвийных и абразивных способов механической обработки. В этой связи актуальными являются исследования направленные на разработку научно – обоснованных технологических решений по формированию изотропного микрорельефа при плоском шлифовании периферией круга.

**Цель работы:** повышение качества и производительности процесса плоского шлифования периферией круга путем сообщения вынужденных поперечных осцилляций заготовке.

Для достижения поставленной цели в работе **решались следующие задачи:**

- разработать способ плоского шлифования периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки и выполнить его кинематический анализ;
- разработать математическую модель определения шероховатости поверхности детали при плоском шлифовании периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки;
- разработать программу для ПЭВМ, позволяющую производить имитационное моделирование и анализ микрогеометрии поверхности после плоского шлифования периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки;
- провести экспериментальные исследования влияния технологических факторов на эффективность процесса плоского шлифования периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки;

- разработать научно-обоснованные конструкторско-технологические рекомендации по практическому применению способа плоского шлифования периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки.

**Объект исследования:** процесс плоского шлифования периферией круга.

**Предмет исследования:** микрорельеф обработанной поверхности.

**Методы исследования:** теоретические исследования базируются на теориях шлифования материалов, инженерии поверхности, механических колебаний, планирования многофакторного эксперимента, математической статистики, дифференциального и интегрального исчисления.

**Автор защищает:**

- способ плоского шлифования периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки, его кинематическую модель и зависимости по расчету скорости съема металла;
- математическую модель определения шероховатости при плоском шлифовании периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки;
- результаты экспериментальных исследований влияния технологических факторов на шероховатость обрабатываемой поверхности и производительность плоского шлифования периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки;
- конструкторско-технологические рекомендации по практическому применению способа плоского шлифования периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки.

**Научная новизна работы:**

- разработан способ и технология плоского шлифования периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки, обеспечивающие формирование различного типа направления неровностей;
- получена кинематическая модель, устанавливающая взаимосвязь технологических параметров обработки и осцилляции заготовки с углом скрещивания неровностей, траекторией движения абразивного зерна, длиной его дуги контакта с обрабатываемой заготовкой и скоростью съема металла;
- разработана математическая модель определения шероховатости поверхности при плоском шлифовании периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки.

**Практическая значимость:**

- разработана конструкция промышленной установки для реализации способа плоского шлифования периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки;
- получены научно обоснованные технологические рекомендации по практическому применению способа плоского шлифования периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки.

**Результаты работы внедрены** на ЗАО «Техоснастка» (г. Орел) и ООО «Центр Погрузчик - Сервис» (г. Орел).

**Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии», Орел, 2008 – 2011 гг.; региональной студенческой научно – технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства», Орел, 2008 – 2011 гг.; всероссийской научно-технической конференции «Студенческая научная весна 2008: Машиностроительные технологии», Москва, 2008 г.; международной научно-технической конференции «Проблемы качества машин и их конкурентоспособности», Брянск, 2008 г.; международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения», Москва, 2009 г.; региональной научно-практической кон-

ференции молодых ученых и аспирантов «Научный потенциал Орловщины в модернизации промышленного комплекса малых городов России», Орел – Ливны, 2010 г.; международной научно-технической конференции «Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения», Брянск, 2011 г.

### **Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 18 печатных работах, в том числе 5 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК для публикации материалов диссертационных исследований, 1 монография, 4 решения о выдаче Патента РФ на изобретение.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и 4 приложений. Работа изложена на 140 страницах, содержит 65 рисунков и 17 таблиц, список литературы из 97 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность, цель, задачи, объект и предмет исследования, методы исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

**Первая глава** посвящена аналитическому обзору состояния вопроса по формированию изотропного микрорельефа при различных методах обработки. Значительный вклад в развитие науки о качестве поверхностного слоя внесли как отечественные ученые: С.Б. Айбиндер, А.С. Ахматов, А.П. Бабичев, С.Г. Бишутин, А.М. Беляев, В.Ф. Безъязычный, А.С. Васильев, О.А. Горленко, В.Г. Гусев, А.М. Дальский, Б.В. Дерягин, В.В. Ефимов, Ю.М. Зубарев, В.В. Измайлов, В.Б. Ильицкий, А.В. Киричек, А.М. Козлов, И.И. Колтунов, Е.Н. Маслов, Ю.К. Новоселов, А.Н. Овсеенко, И.А. Одинг, Н.П. Петров, П.А. Ребиндер, В.М. Смелянский, Ю.С. Степанов, А.Г. Суслов, А.В. Тотай, А.П. Улашкин, М.М. Хрущев, В.С. Харченков, Ю.Г. Худобин, Л.В. Шнейдер, П.И. Ящерицын, так и зарубежные: Н. Адам, В. Гаркинс, Д. Кумабе, Ф. Линг, Е. Рабинович, Е. Ридил, Х. Утс, Р. Хольм, Х. Чихос, Дж. Шульман.

При шлифовании, в зависимости от принятой кинематической схемы и конструкции инструмента, соотношения скоростей резания, продольной и поперечной подач, на обработанной поверхности формируется различный микрорельеф. Получаемые поверхности обладают и различными эксплуатационными показателями. В наибольшей степени эксплуатационным требованиям удовлетворяют поверхности, имеющие изотропный микрорельеф.

Формирование изотропного микрорельефа, как правило, происходит за счет совершенствования кинематики процесса. В этой связи актуальными являются направления научных исследований, заключающиеся в разработке способов и технологий, основанных на введении в зону резания дополнительных движений (вынужденных осцилляций). Кроме того, введение в зону резания вынужденных осцилляций способствует увеличению толщины среза единичным абразивным зерном, что приводит к сокращению времени обработки и, как следствие, повышению производительности.

**Вторая глава** посвящена теоретическому обоснованию технологии плоского шлифования периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки (ПОЗ).

Одним из направлений получения изотропного микрорельефа при плоском шлифовании является осцилляция зоны резания, которую можно осуществить за счет специального привода шпинделя или заготовки. С точки зрения модернизации станочного оборудования предпочтительнее выглядит метод сообщения поперечных осцилляций заготовке, поскольку подобную схему конструктивно проще осуществить. Поэтому разработан способ плоского шлифования периферией круга с сообщением обрабатываемой заготов-

ке вынужденных поперечных колебаний заданной амплитуды и частоты (рисунок 1) [15]. При этом способе обработки круг совершает вращательное движение со скоростью резания  $V_{кр}$ . В поперечном направлении со скоростью  $V_{nn}$  и в продольном направлении со скоростью  $V_D$  осуществляется движение стола станка, на котором устанавливается обрабатываемая заготовка. Заготовке сообщаются поперечные колебания со скоростью  $V_{XA}$ , которая определяется по зависимости:

$$V_{XA} = 2\pi f a \cos 2\pi f R \varphi_A / 10^3 V_{кр} , \quad (1)$$

где  $a$  – амплитуда осцилляций, мм;  $f$  – частота вынужденных осцилляций, Гц;  $R$  – радиус шлифовального круга, мм;  $\varphi_A$  – угол контакта шлифовального круга с заготовкой, радианы;

Наложение на заготовку осцилляций обеспечивает участие большего числа зерен в процессе обработки, траектории движения которых увеличены и не эквидистанты, что приводит к образованию сетки разнонаправленных микронеровностей и увеличению металлосъема (рисунок 2). На рисунке 3 (а, б) представлен график зависимости максимальной скорости осциллирующего движения заготовки  $V_{XA}$  от частоты осцилляций  $f$  и амплитуды колебаний  $a$ .

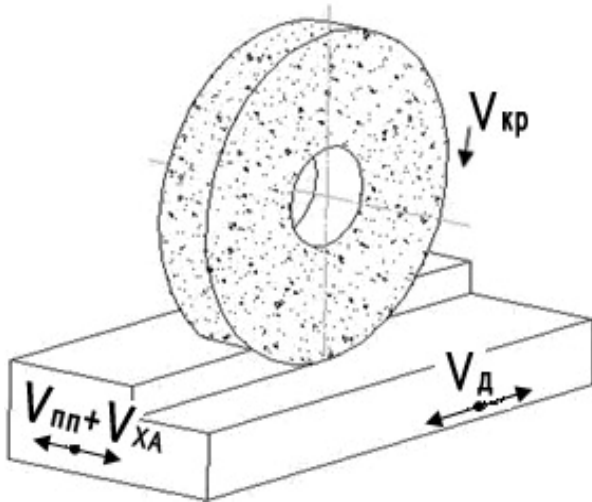


Рисунок 1 – Кинематическая схема процесса плоского шлифования периферией круга с ПОЗ

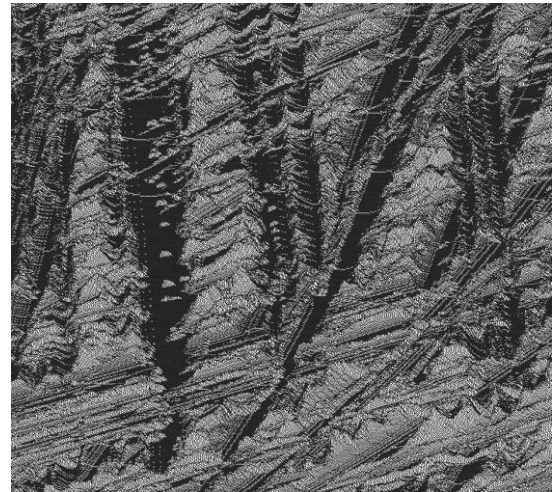


Рисунок 2 – Топография обработанной поверхности предлагаемым способом (увеличено в 3000 раз)

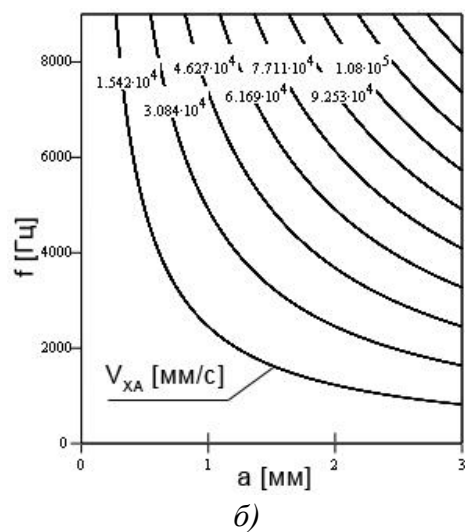
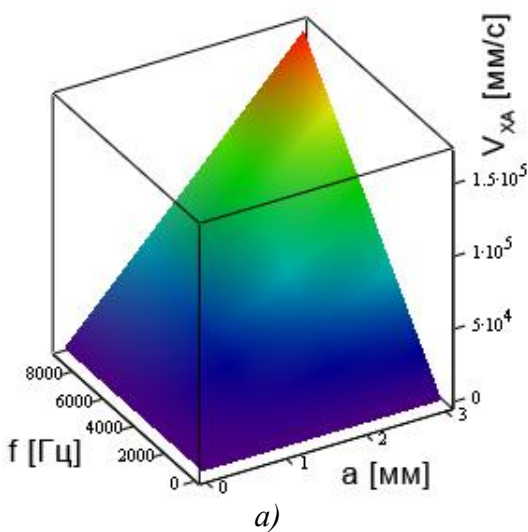


Рисунок 3 – Зависимость максимальной скорости колебаний  $V_{XA}$  от амплитуды  $a$  и частоты  $f$  осцилляций

При такой обработке поверхность получается с меньшей степенью разрыхления и нарушения правильного кристаллического строения и лучшими эксплуатационными свойствами.

Для теоретического обоснования способа плоского шлифования периферией круга с ПОЗ были разработаны следующие математические модели:

1. Кинематическая модель процесса плоского шлифования периферией круга с ПОЗ, которая позволяет определить траекторию резания, длину дуги контакта абразивного зерна с заготовкой, толщину среза при обработке единичным абразивным зерном, скорость съема металла.

В модели используются следующие допущения: 1) образование среза происходит в результате преимущественного резания единичным абразивным зерном; 2) режущие абразивные зерна круга разделены промежутками по окружности и по высоте – расположены на концентрических окружностях; 3) абразивные зерна представлены в виде точек; 4) исходная поверхность детали гладкая – ее профиль представляет собой горизонтальную прямую линию.

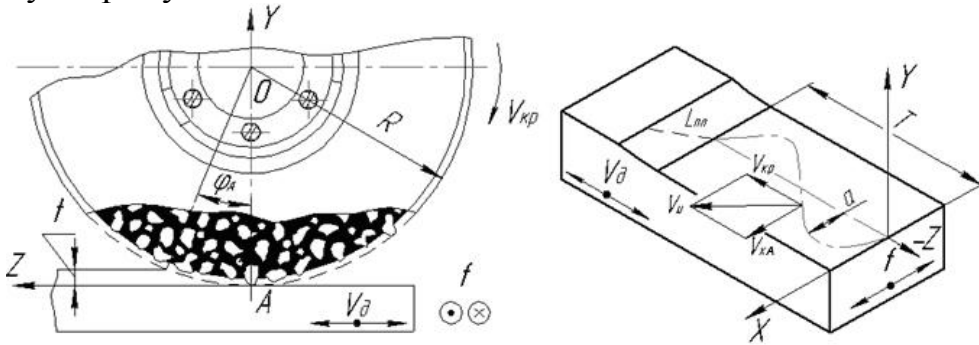


Рисунок 4 – Схема движения инструмента при плоском шлифовании периферией круга с ПОЗ

Основываясь на общих положениях теоретической механики, были выведены уравнения движения (2) единичного абразивного зерна (точка А), лежащего на расстоянии R от мгновенного центра скоростей (рисунок 4).

Уравнение (2) описывает траекторию движения абразивного зерна в одной плоскости – торцевом сечении круга. Для описания траектории движения абразивного зерна при плоском шлифовании периферией круга с ПОЗ, необходимо ввести дополнительное уравнение, описывающее осциллирующее движение заготовки (3). Опуская промежуточные преобразования, получено уравнение траектории движения абразивного зерна при шлифовании периферией круга с ПОЗ (4):

$$\begin{cases} y_A = R (1 - \cos \varphi_A), \\ z_A = R \left( \sin \varphi_A \pm \frac{V_d \varphi_A}{60 V_{кр}} \right). \end{cases} \quad (2)$$

$$x_A = a \sin \left( \frac{2\pi f R \varphi_A}{10^3 V_{кр}} \right). \quad (3)$$

$$\begin{cases} x_A = a \sin \left( \frac{2\pi f R \varphi_A}{10^3 V_{кр}} \right); \\ y_A = R (-\cos \varphi_A); \\ z_A = R \left( \sin \varphi_A \pm \frac{V_d \varphi_A}{\sqrt{60 V_{кр}^2 + \pi a f}} \right). \end{cases} \quad (4)$$

Элементарная длина кривой контакта шлифовального круга с заготовкой:

$$L_{нл} = \int_0^{\varphi_A} \sqrt{dx_A^2 + dy_A^2 + dz_A^2} d\varphi_A. \quad (5)$$

Полная длина кривой контакта единичного абразивного зерна с заготовкой в пределах угла  $\varphi_A$ :

$$L_{нл} = 2 \cdot 10^{-3} \varphi_A \left[ 25 \cdot 10^4 R^2 \left[ \left( \cos \varphi_A \pm \frac{V_d \varphi_A}{\sqrt{60 V_{кр}^2 + V_{хА}^2}} \right)^2 + \sin^2(\varphi_A) \right] + 2\pi f a^2 \cos \left( \frac{2\pi f R \varphi_A}{10^3 V_{кр}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

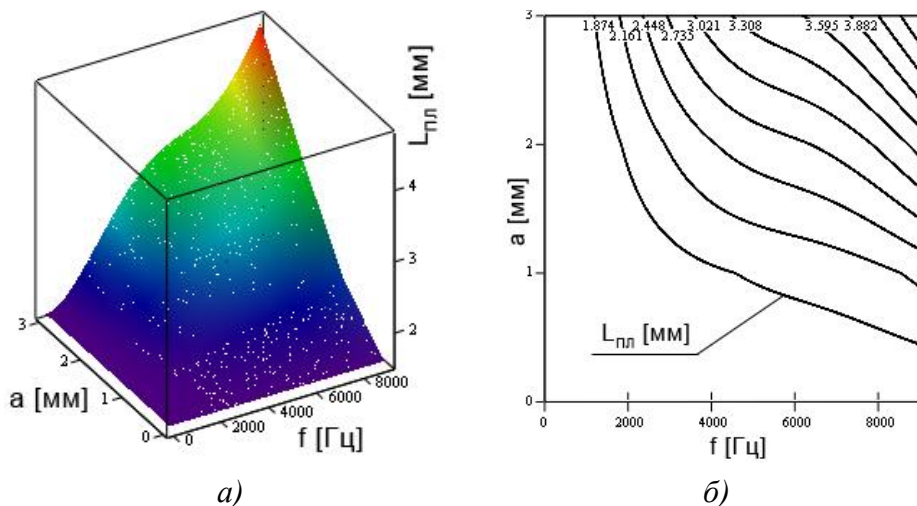


Рисунок 5 – Зависимость длины дуги контакта  $L_{nl}$  от частоты  $f$  и амплитуды  $a$  осцилляций

дуги контакта единичного абразивного зерна с заготовкой до 24%, при скорости осцилляций  $V_{XA} = 34$  м/с ( $a = 0,6$  мм,  $f = 9$  кГц). При низкочастотных осцилляциях ( $f \leq 200$  Гц) увеличение длины дуги контакта не превышает 0,5%. Следовательно, повышение производительности процесса за счет увеличения длины дуги контакта возможно лишь при высокочастотных осцилляциях.

Наличие поперечных осцилляций положительно отражается на производительности процесса, т.к. происходит изменение формы среза единичным абразивным зерном.

Для абразивного зерна, аппроксимированного в форме эллипсоида вращения, толщина среза  $a_{XZ}$  единичным абразивным зерном определяется уравнением (7), а суммарное перемещение шлифовального круга за время поворота на угол  $\varphi_A$  зависимостью (8):

$$a_{XZ} = 3t \sqrt[3]{\frac{S_{XZ}^2}{L_{nl}^2}}, \quad (7) \quad S_{XZ} = \frac{R\varphi_A \sqrt{9V_{XA}^2 + 25 \cdot 10^2 V_o^2}}{3 \cdot 10^3 V_{кр}}. \quad (8)$$

Формула для расчета объема недеформированного среза единичным абразивным зерном имеет вид:

$$W_{cp} = \frac{1}{3} a_{XZ} L_{nl} \sqrt{2\rho a_{XZ}}, \quad (9)$$

Скорость съема металла при плоском шлифовании периферией круга с ПОЗ:

$$Q_T = 2 \cdot 10^4 N_{реж} V_{кр} a_{XZ} L_{nl} \sqrt{2\rho a_{XZ}} B k_Q^{-1}, \quad (10)$$

В зависимостях (7) – (10) используются следующие обозначения:  $t$  – глубина шлифования, мм;  $\rho$  – средний радиус округления вершин режущих кромок, мм;  $N_{реж}$  – число режущих кромок, приходящихся на 1 мм<sup>2</sup> рабочей поверхности круга;  $B$  – высота круга, мм;  $k_Q$  – коэффициент, учитывающий уменьшение скорости съема металла из-за упругих отжатий и износа круга.

На рисунке 6 представлен график зависимости скорости съема металла  $Q_T$  от частоты осцилляций  $f$  ( $D_{кр} = 250$  мм,  $B = 40$  мм,  $t = 0,01$  мм,  $V_d = 20$  м/мин,  $V_{кр} = 35$  м/с,  $a = 0,6$  мм.)

Из графика видно, что осцилляция зоны резания ( $f = 90$  Гц,  $a = 0,6$  мм) обеспечивает увеличение скорости съема металла в 1,55...1,75 раза и, как следствие, повышение производительности.

2. Математическая модель определения шероховатости поверхности после плоского шлифования периферией круга с ПОЗ, построенная на теории инженерии поверхности. Шероховатость обработанной поверхности после плоского шлифования периферией круга с ПОЗ:

$$Ra = 0,18 \cdot h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \quad (11)$$

На рисунке 5 (а, б) представлен график зависимости длины дуги контакта  $L_{nl}$  абразивного зерна с заготовкой от частоты  $f$  и амплитуды  $a$  осцилляций ( $D_{кр} = 250$  мм,  $B = 40$  мм,  $t = 0,01$  мм,  $V_d = 20$  м/мин,  $V_{кр} = 35$  м/с).

Введение в кинематику процесса плоского шлифования дополнительного движения (поперечная осцилляция заготовки) обеспечивает увеличение длины



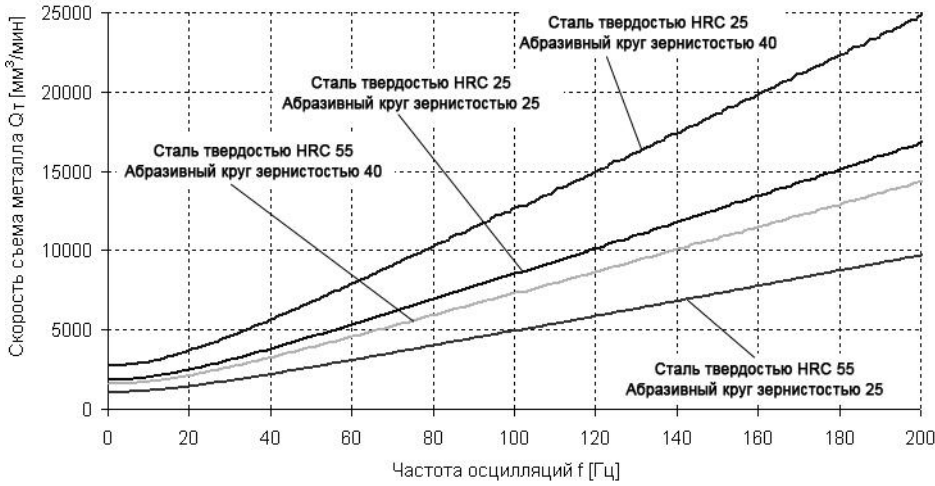


Рисунок 6 – Зависимость скорости съема металла  $Q_T$  от частоты осцилляций  $f$

инструмента и заготовки, мкм.;  $h_4$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная шероховатостью рабочих поверхностей инструмента, мкм ( $h_4 = 0$ ).

На основе анализа геометрии абразивного круга, кинематики перемещения рабочей части инструмента и детали получена формула для расчета составляющей профиля шероховатости  $h_1$ . Расчетная схема изображена на рисунке 7.

$$h_1 = \frac{lt\xi^{\left(\frac{N \cdot B}{S_{XZ}} - 1\right)}}{2\sqrt{L_{ni}^2 - t^2}} \left( 1 \pm V_\sigma / \sqrt{60V_{кр}^2 + \left(\frac{3}{50} a \cdot f\right)^2} \right), \quad (12)$$

Влияние колебаний инструмента на шероховатость обработанной поверхности оценивалась с помощью составляющей  $h_2$ , отражающей перемещение концевое сечения шпинделя относительно поверхности обрабатываемой заготовки. Данная составляющая связывает приложенную в том же сечении силу  $P_y$  от единичного абразивного зерна и коэффициенты податливости системы:  $a_i$  – в случае абсолютно жестких опор (Рисунок 8, а);  $\Delta a_i$  – в случае податливых опор (Рисунок 8, б). Приняты следующие допущения: 1) система, состоящая из шпинделя с установленным на его конце абразивным кругом, рассматривается как абсолютно жесткий двухопорный ротор на упругих опорах с соответствующими коэффициентами жесткости; 2) колебания рассматриваются в плоскости перпендикулярной оси вращения ротора; 3) на роторе отсутствуют неуравновешенные массы; 4) продольные перемещения центра масс ротора пренебрежимо малы; 5) угол отклонения центральной оси ротора от горизонтального положения пренебрежимо мал и в расчетах не учитывается.

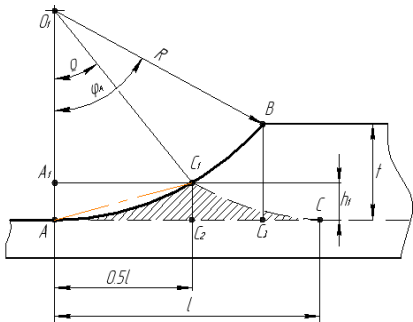


Рисунок 7 - Расчетная схема к определению составляющей профиля шероховатости  $h_1$

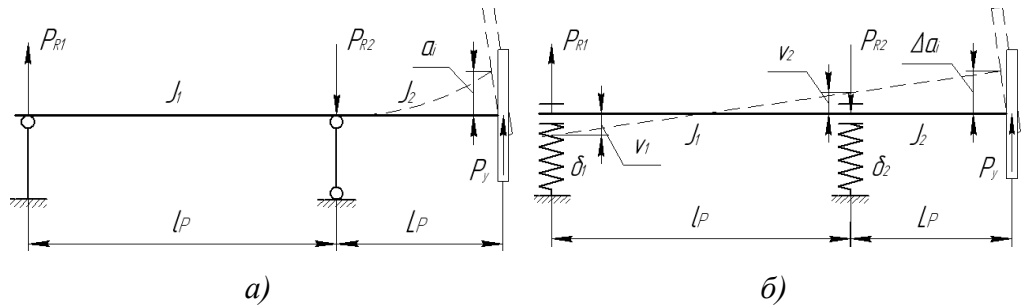


Рисунок 8 - Расчетная схема к определению составляющей  $h_2$ :  
а) в случае абсолютно жестких опор;  
б) в случае податливых опор

где  $h_1$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента, мкм;  $h_2$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности, мкм;  $h_3$  – составляющая профиля шероховатости, обусловленная пластическими деформациями в зоне контакта ин-

$$h_2 = \frac{1}{n_i} \left( \frac{J_2 l_p^3 + J_1 l_p^2 L_p}{3EJ_1 J_2} + \frac{1}{j_{II}} \left[ \left( \frac{l_p}{L_p} \right)^2 + \left( 1 + \frac{l_p}{L_p} \right)^2 \right] \right) \sum_{i=0}^{n_i} P_{yi} \quad (13)$$

Составляющую  $h_3$  для плоского шлифования периферией круга с ПОЗ определяли на основании работ Сулова А.Г. Ввиду наличия осциллирующей подачи детали вдоль оси X, в традиционной формуле для расчета  $h_3$  следует учитывать не только поперечную подачу  $S_{III}$ , но и осциллирующую подачу  $S_X$ :

$$h_3 = \frac{\left( 1 - \frac{2\tau_a}{\sigma_T} \right) \left[ \left( 0,12 \cdot V_{III} \cdot t_3 \pm \frac{V_{xA} R \varphi_A}{10^3 V_{кр}} \right) + 0,5r \left( 1 - \frac{2\tau_a}{\sigma_T} \right) \right]}{32} \quad (14)$$

Уравнения (12) – (14) включают в себя следующие параметры:  $l$  – среднестатистическое расстояние между зёрнами, мм;  $N$  – число выхаживаний;  $\tau_a$  – адгезионное взаимодействие инструмента и детали;  $\sigma_T$  – предел текучести обрабатываемого материала, Па;  $V_{III}$  – поперечная интегрированная подача, м/мин;  $r$  – радиус скругления режущих зёрен, мм;  $n_i$  – количество элементарных площадок на поверхности инструмента;  $J_1$  и  $J_2$  – моменты инерции площади сечения соответствующих участков ротора, м<sup>4</sup>;  $E$  – модуль упругости материала, Па;  $l_p$  – расстояние между опорами, м;  $L_p$  – вылет переднего конца шпинделя, м;  $j_{II}$  – динамическая жесткость, Н/м;  $P_{yi}$  – сила суммарного резания всеми рабочими зёрнами, находящимися на рассматриваемой контактной площадке, Н.

На рисунках 9 (а - б) и 10 представлены графики зависимости составляющих  $h_1$  -  $h_3$  шероховатости обработанной поверхности от частоты осцилляций  $f$  (при  $t = 0,01$  мм,  $V_d = 20$  м/мин,  $V_{кр} = 35$  м/с, ст. 45 (HRC 45...50), круг ПП 250×40×76 4A40CM19K 35м/с А2 кл.) Из графиков видно, что осцилляция зоны резания обеспечивает снижение шероховатости обработанной поверхности на 1,4 раза ( $f = 90$  Гц,  $a = 0,6$  мм) по сравнению с традиционным маятниковым шлифованием.

На основании математических зависимостей рассмотренных выше была разработана программа для имитационного моделирования процесса плоского шлифования периферией круга с ПОЗ (далее ПИМ). Интерфейс программы изображен на рисунке 11.

Программа позволяет как визуально просматривать любой участок обработанной поверхности, так и выполнять его анализ, в который входит: анализ шероховатости поверхности согласно ГОСТ 2789–73; построение профилограмм поверхности; построение линий разреза поверхности под любым углом; гармонический анализ микронеровностей обработанной поверхности; построение гистограмм высот и их распределения по поверхности; построение опорной кривой (кривой Аббота) обработанной поверхности.

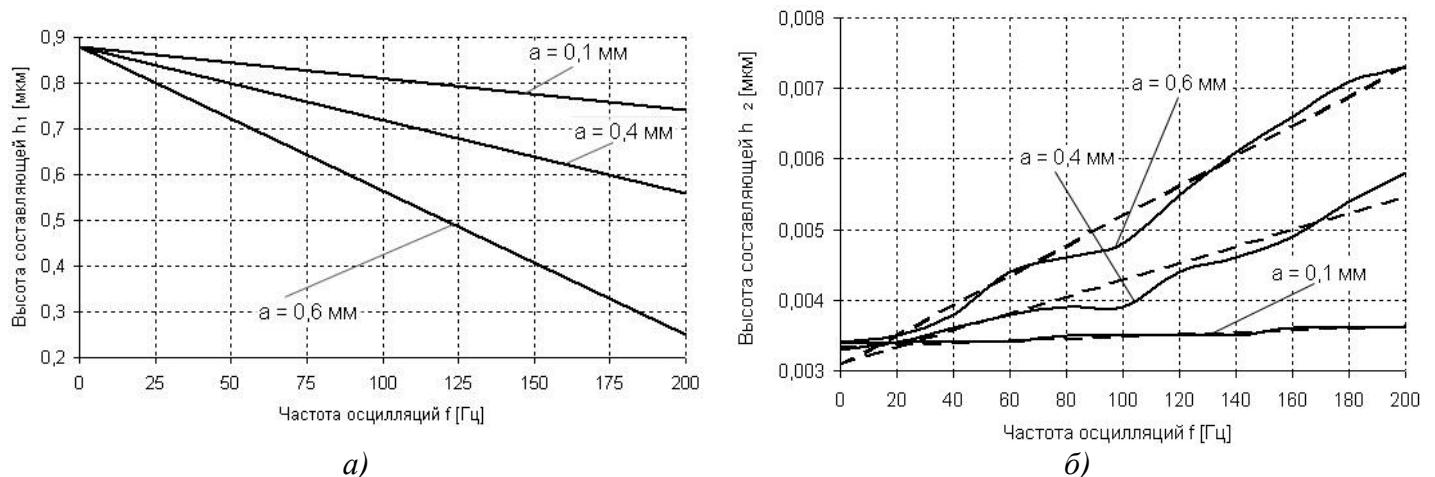


Рисунок 9 – Зависимость составляющей  $h_1$  (а) и  $h_2$  (б) шероховатости обработанной поверхности от частоты осцилляций  $f$

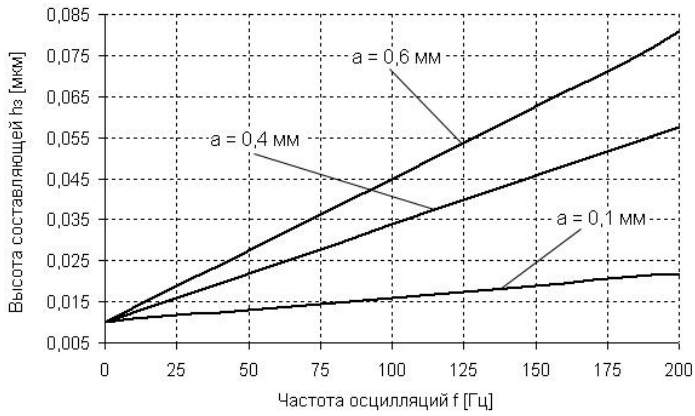


Рисунок 10 – Зависимость составляющей  $h_3$  шероховатости обработанной поверхности от частоты осцилляций  $f$

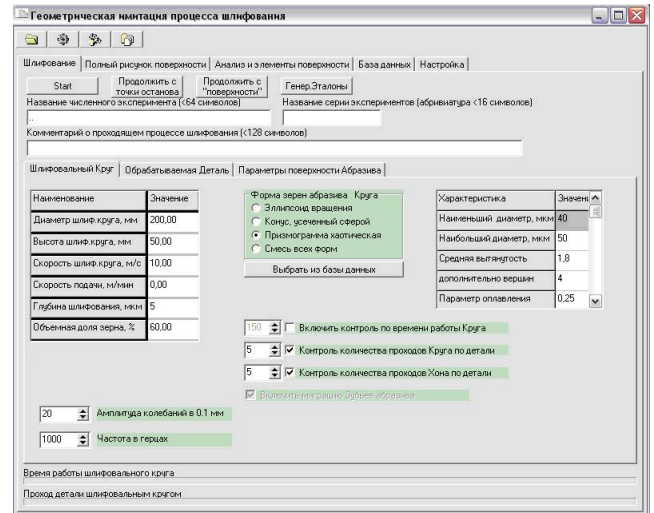


Рисунок 11 – Интерфейс программы для геометрической имитации процесса плоского шлифования периферией круга с ПОЗ

На рисунке 12 представлены опорные кривые поверхности, построенные по данным, полученным с помощью данной программы ( $a$  – шлифование периферией круга с ПОЗ - Сталь 45 (HRC 45...50),  $D_{кр} = 250$  мм,  $B = 40$  мм,  $V_{кр} = 35$  м/с,  $V_d = 15$  м/мин,  $t = 0,01$  мм,  $f = 500$  Гц,  $a = 0,1$  мм;  $b$  – маятниковое шлифование периферией круга - Сталь 45 (HRC 45...50),  $D_{кр} = 250$  мм,  $B = 40$  мм,  $V_{кр} = 35$  м/с,  $V_d = 15$  м/мин,  $t = 0,01$  мм). Анализ опорной кривой поверхности (рисунок 12) показывает, что она имеет плавный переход от зоны незначительного контакта в зону развитого контакта, площадь плоских участков, возникающих на контактной поверхности при  $0 \div 20\%$  среза, увеличивается не менее чем на 35% по сравнению с маятниковым шлифованием, что свидетельствует о том, что при работе такая поверхность требует меньше времени на приработку и обладает лучшими эксплуатационными характеристиками.

Численные исследования, проведенные в ПИМ, показали, что при скорости осцилляций  $V_{ХА} = 5...35$  м/с,  $V_{кр} = 35$  м/с,  $V_d = 20$  м/мин и  $t \leq 0,015$  мм на обработанной поверхности формируется изотропный микрорельеф с углом скрещивания неровностей  $\alpha = 12^{\circ}...90^{\circ}$ .

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния технологических факторов на эффективность процесса плоского шлифования периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки. Эксперименты проводились на установке, изображенной на рисунке 13, а – б, которая включала в себя: 1 - приспособление для шлифования периферией круга с ПОЗ; 2 - электродвигатель АИР71А2У2; 3 - преобразователь частоты Altivar ATV312Н075N4, необходимый для управления частотой вращения электродвигателя. Сообщение осцилляций рабочему столу приспособления 1 производится с помощью эксцентриковой втулки, установленной на приводном валу.

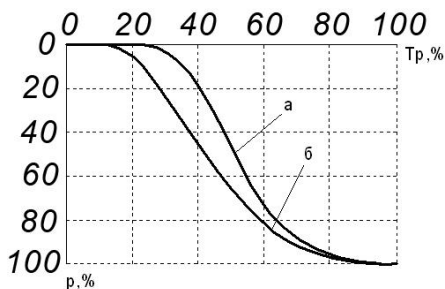


Рисунок 12 – Опорные кривые поверхности

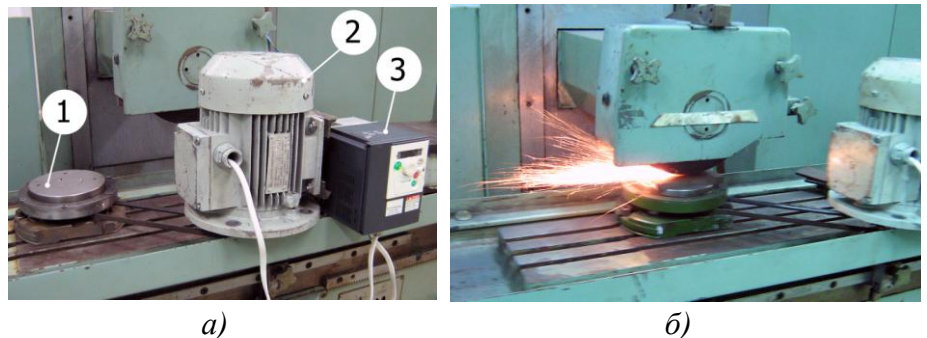


Рисунок 13 – Установка для экспериментальных исследований процесса плоского шлифования с ПОЗ

Первый этап экспериментальных исследований был направлен на определение производительности процесса плоского шлифования периферией круга с ПОЗ.

По результатам проведенных экспериментальных исследований получены уравнения регрессии для определения шероховатости обрабатываемой поверхности в зависимости от времени обработки (числа выхаживаний):

- для стали 45:

$$Ra_n = 0,4028 - 0,0187 \cdot n - 0,0261 \cdot f + 0,0167 \cdot t - 0,0083 \cdot n \cdot t; \quad (15)$$

- для стали 40ХН:

$$Ra_n = 0,7744 - 0,0362 \cdot n - 0,0286 \cdot f + 0,0210 \cdot t - 0,0010 \cdot n \cdot t. \quad (16)$$

В результате проведенного экспериментального исследования влияния частоты осцилляций на скорость съема металла выявлено, что осцилляция зоны резания позволяет увеличить скорость съема металла, что приводит к снижению основного времени обработки.

На рисунке 14 (а - б) представлены графики зависимости скоростного съема металла  $Q_T$  от частоты осцилляций  $f$ , построенные с помощью математических моделей, рассмотренных в главе 2, и экспериментальных данных.

Сопоставление экспериментальных и расчетных данных, полученных при помощи зависимости (7), показало расхождение не более 15%, что является приемлемым, учитывая стохастичность процесса шлифования.

Экспериментальные исследования показали, что способ плоского шлифования периферией круга с ПОЗ целесообразно применять при числе проходов от 1 до 4 (для стали 45) и при числе проходов от 1 до 3 (для стали 40ХН), так как при данных условиях наблюдается снижение шероховатости обработанной поверхности до 40%. Это приводит к уменьшению основного времени обработки, необходимого для достижения требуемой шероховатости обработанной поверхности и увеличению производительности. При числе выхаживаний от 5 до 8 (для стали 45) и числе выхаживаний от 4 до 8 (для стали 40ХН) снижение шероховатости составляет 12%, а при числе выхаживаний более 8 снижение шероховатости не превышает 4%.

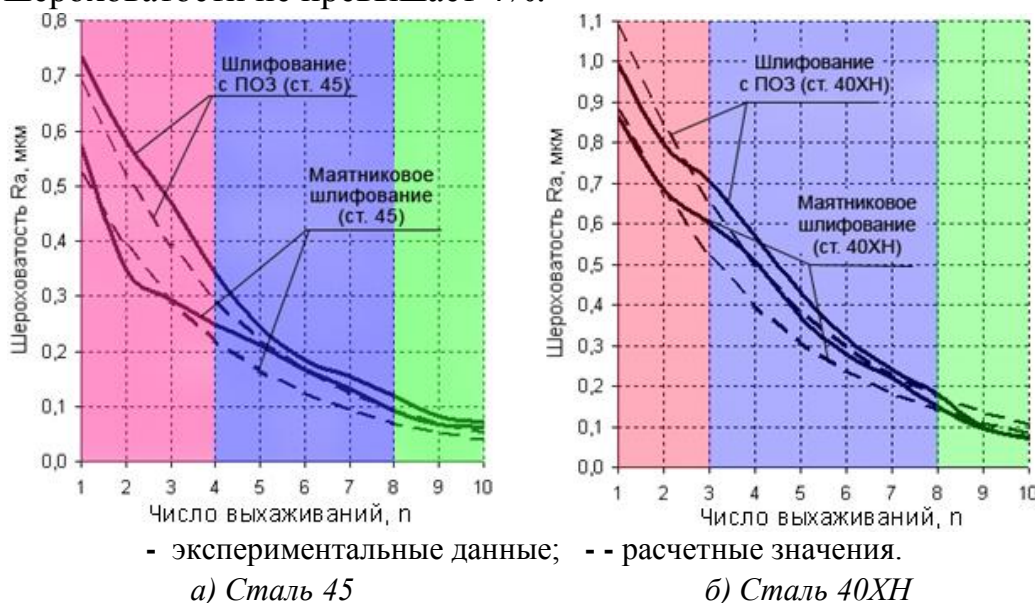


Рисунок 14 – Влияние числа выхаживаний на шероховатость поверхности при различных способах плоского шлифования периферией круга

периферией круга с ПОЗ.

По результатам этих исследований получены следующие уравнения регрессии:

1. Уравнения регрессии влияния технологических факторов на продольную шероховатость обработанной поверхности  $Ra_{пр}$ :

Установлено, что способ плоского шлифования с ПОЗ обеспечивает повышение производительности за счет увеличения скорости съема металла до 31% (рисунок 15).

На втором этапе был проведен ряд экспериментальных исследований влияния технологических факторов на шероховатость обрабатываемой поверхности при шлифовании пе-

- для стали 45:

$$Ra_{PP} = 0,3937 - 10,3539 \cdot t - 0,0257 \cdot f - 0,0082 \cdot V_d + 0,2487 \cdot f \cdot t + 2,7571 \cdot t \cdot V_d - 0,0293 \cdot f \cdot t \cdot V_d \quad (17)$$

- для стали 40ХН:

$$Ra_{PP} = 0,6466 - 18,3856 \cdot t - 0,0442 \cdot f - 0,0141 \cdot V_d + 0,4561 \cdot f \cdot t + 4,6211 \cdot t \cdot V_d - 0,0519 \cdot f \cdot t \cdot V_d; \quad (18)$$

2. Уравнения регрессии влияния технологических факторов на поперечную шероховатость обработанной поверхности  $Ra_{ПП}$ :

- для стали 45:

$$Ra_{ПП} = 0,4737 + 41,6640 \cdot t + 0,0675 \cdot f + 0,00849 \cdot V_d - 0,3763 \cdot f \cdot t - 1,3078 \cdot f \cdot V_d - 0,0135 \cdot V_{osci} \cdot t \cdot V_d; \quad (19)$$

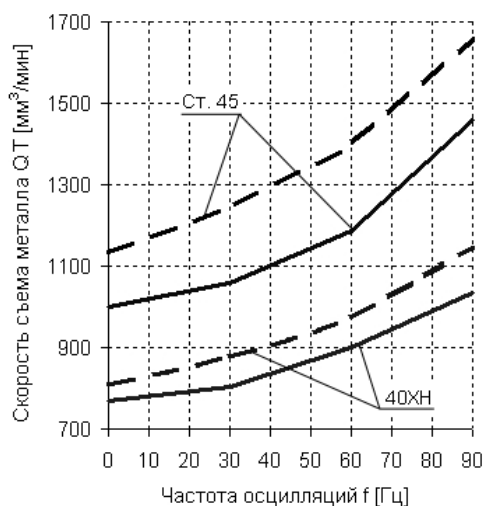
- для стали 40ХН:

$$Ra_{ПП} = 0,7256 + 21,8266 \cdot t + 0,0134 \cdot f + 0,0102 \cdot V_d - 0,1415 \cdot f \cdot t - 0,7625 \cdot f \cdot V_d - 0,0097 \cdot V_{osci} \cdot t \cdot V_d. \quad (20)$$

Экспериментальные исследования показали, что осцилляция зоны резания ( $V_{ХА} = 0,35$  м/с) обеспечивает снижение шероховатости обработанной поверхности как в продольном, так и в поперечном направлении в среднем в 1,43 раза. Выявлено, что для обеспечения максимальной производительности с формированием изотропного микрорельефа, способ плоского шлифования периферией круга с ПОЗ целесообразно применять при глубинах шлифования до 0,015 мм.

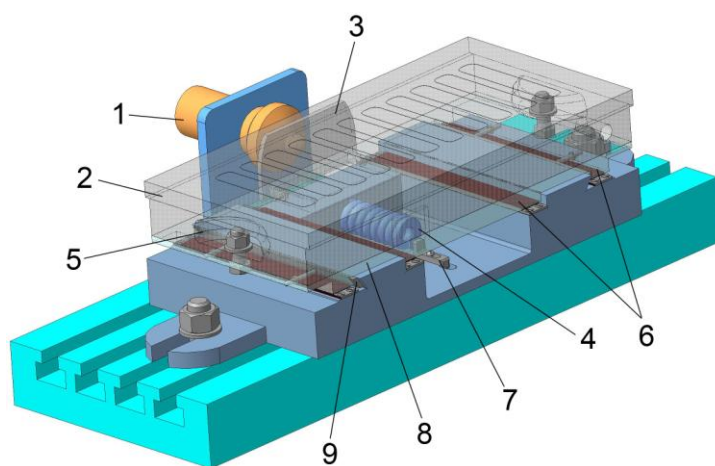
При скорости движения стола  $V_d \leq 23$  м/мин и фиксированных  $f = 90$  Гц,  $a = 0,6$  мм,  $t = 0,005 \dots 0,015$  мм, на обработанной поверхности формируется изотропный микрорельеф, с углом скрещивания неровностей  $\alpha < 1$  град.

**В четвертой главе** представлено оборудование и технологические рекомендации по практическому применению способа плоского шлифования периферией круга с ПОЗ. В результате экспериментальных исследований была апробирована конструкция лабораторной установки для реализации способа плоского шлифования периферией круга с ПОЗ. На ее базе была разработана конструкция промышленной установки для реализации предложенного способа (рисунок 16).



- экспериментальные данные;  
-- расчетные значения.

Рисунок 15 – Графики зависимости скоростного съема металла  $Q_T$  от частоты осцилляций  $f$



1 – Индентор УГ ИЛ10-1.8; 2 – Магнитная плита; 3 – Планка; 4 – Пружина; 5 – Винт; 6 – Плоский подшипник; 7 – Упор; 8 – Промежуточная плита; 9 – Пластина.

Рисунок 16 – Общий вид промышленной установки для плоского шлифования периферией круга с ПОЗ

Частота осцилляций обеспечивается ультразвуковым генератором (фазовой АПЧ), амплитуда осцилляций устанавливается механической настройкой приспособления.

Таблица 1 – Минимальная достаточная величина амплитуды осцилляций  $a$  в зависимости от зернистости абразивного круга.

Номер зернистости	16	25	40
Амплитуда осцилляций $a$ , мм	$\geq 0,16$	$\geq 0,25$	$\geq 0,4$

Таблица 2 – Зависимость угла скрещивания следов абразивных зерен  $\alpha$  и скорости осцилляций  $V_{ХА}$  ( $D_{кр} = 125$  мм,  $V_{кр} = 35$  м/с,  $V_{д} = 20$  м/мин,  $t = 0,05$  мм).

$V_{ХА}$ , м/с	5	10	15	20	25	30	35
$\alpha$ , град	12	25	35	51	64	77	90

Таблица 3 – Рекомендуемые технологические режимы применения способа плоского шлифования периферией круга с ПОЗ (Круг ПП 250×40×76 4А40СМ19К 35м/с А2 кл,  $V_{кр} = 35$  м/с,  $a = 0,6$  мм).

$f$ , Гц	30	45	60	75	90	Ra, мкм (ГОСТ 2789-73)
	$V_{д}$ , м/мин					
0,005	$\frac{4^*}{3^*}$	$\frac{7}{4}$	$\frac{11}{10}$	$\frac{16}{12}$	$\frac{23}{19}$	$\frac{0,39...0,29}{0,63...0,60}$
0,01	$\frac{5}{3}$	$\frac{7}{4}$	$\frac{10}{8}$	$\frac{13}{11}$	$\frac{21}{18}$	$\frac{0,50...0,35}{0,74...0,69}$
0,015	$\frac{3}{2}$	$\frac{6}{4}$	$\frac{9}{6}$	$\frac{13}{11}$	$\frac{20}{18}$	$\frac{0,64...0,55}{0,81...0,76}$

\* Верхнее значение для стали 45, нижнее – для стали 40ХН.

периферией круга с ПОЗ назначается аналогично окончательному традиционному маятниковому шлифованию.

Проведено опытное внедрение способа плоского шлифования периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки в условиях ЗАО «Техоснастка» (г. Орел) и ООО «Центр Погрузчик – Сервис» (г. Орел). Расчет годового экономического эффекта показал, что срок окупаемости проекта составляет до 4 месяцев, а суммарный годовой экономический эффект составит более 400 тыс. рублей.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В представленной научно – квалификационной работе изложены научно обоснованные технические и технологические решения, направленные на повышение качества и производительности плоского шлифования периферией круга путем поперечной осцилляции обрабатываемой заготовки, имеющие существенное значение для машиностроения.

2. Разработан способ плоского шлифования периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки, обеспечивающий снижение шероховатости обработанной поверхности в 1,4 раза с формированием на ней изотропного микрорельефа, и повышение производительности обработки в 1,7 раза.

3. Разработана кинематическая модель плоского шлифования периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки. Установлено, что поперечная осцилляция заготовки обес-

Разработаны рекомендации по практическому применению способа плоского шлифования периферией круга с ПОЗ:

- согласно ГОСТ 2789-73 шероховатости исходной поверхность Ra не ниже 2,5 мкм (чистовое строгание,

чистовое цилиндрическое и торцовое фрезерование, плоское предварительное шлифование);

- минимальная достаточная величина амплитуды осцилляций  $a$  в зависимости от зернистости абразивного круга представлена в таблице 1;

- скорость осцилляций  $V_{ХА}$  не должна превышать скорость абразивного круга  $V_{кр}$  ( $V_{ХА} \leq V_{кр}$ ). Зависимость угла скрещивания следов абразивных зерен  $\alpha$  и скорости осцилляций  $V_{ХА}$  представлены в таблице 2;

- максимальная производительность за счет сокращения основного времени обработки обеспечивается при числе выхаживаний  $n \leq 4$ ;

- рекомендуемые технологические режимы применения способа плоского шлифования периферией круга с ПОЗ представлены в таблице 3.

- глубина шлифования  $t$  при обработке способом плоского шлифования

печивает увеличение длины дуги контакта абразивного зерна с заготовкой до 24% и скорости съема металла до 76% при скорости осцилляций  $V_{ХА} = 34$  м/с.

4. Разработана математическая модель определения шероховатости поверхности детали при плоском шлифовании периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки. Теоретически обосновано снижение шероховатости  $Ra$  обработанной поверхности до 42% по сравнению с традиционным шлифованием.

5. Разработана программа имитационного моделирования плоского шлифования периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки. Численным экспериментом установлено, что площадь плоских участков, возникающих на контактной поверхности при  $0 \div 20\%$  срезе, увеличивается не менее чем на 35%. Установлено, что при скорости осцилляций  $V_{ХА} = 5...35$  м/с,  $V_{кр} = 35$  м/с,  $V_{д} \leq 20$  м/мин и  $t \leq 0,015$  мм на обработанной поверхности формируется изотропный микрорельеф с углом скрещивания неровностей  $\alpha = 12...90$  град.

6. Экспериментально установлено, что увеличение скорости съема металла (на 31%) и снижение шероховатости обработанной поверхности до 40% наблюдается при числе выхаживаний  $n \leq 4$  ( $f = 90$  Гц,  $a = 0,6$  мм).

7. Экспериментально установлено, что осцилляция зоны резания снижает шероховатость обработанной поверхности в продольном и в поперечном направлении до 1,4 раза при  $f = 90$  Гц,  $a = 0,6$  мм. При увеличении скорости движения стола  $V_{д}$  шероховатость обработанной поверхности в продольном направлении растет, а в поперечном - снижается. При скорости движения стола  $V_{д} \leq 23$  м/мин и фиксированных  $f = 90$  Гц,  $a = 0,6$  мм,  $t = 0,005...0,015$  мм на обработанной поверхности формируется изотропный микрорельеф, с углом скрещивания неровностей  $\alpha < 1$  град.

8. Разработана конструкция установки для промышленной реализации способа плоского шлифования периферией круга с поперечной осцилляцией заготовки и технологические рекомендации по практическому применению данного способа. Установка и технологические рекомендации прошли производственную апробацию на ЗАО «Техоснастка» (г. Орел) и ООО «Центр Погрузчик - Сервис» (г. Орел), ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения составил более 400 тыс. рублей.

## Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

### Монографии:

1. Повышение эффективности плоского шлифования усложнением кинематики процесса [Текст] / А.В. Воронков, Ю.В. Василенко, А.В. Морозова // Моделирование технологических процессов абразивной обработки. Монография / Г.В. Барсуков, Л.Г. Вайнер, Ю.В. Василенко, А.В. Воронков и др. - Под ред. Ю.С. Степанова и А.В. Киричека – М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 256 с.: ил. – с. 99 – 144.

### Список публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК:

2. Воронков, А.В. Повышение качества и производительности финишных операций механической обработки [Текст] / Ю.В. Василенко, А.В. Воронков. – Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии»: IX Международная научно-техническая конференция. - №2-2/270(545).-Орел: ИПЦ ОрелГТУ, 2008. – с. 4 - 9.

3. Воронков, А.В. Плоское виброшлифование с сообщением колебаний обрабатываемой заготовке [Текст] / Ю.В. Василенко, А.В. Воронков, О.С. Заброда. – Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». - №3-3/271(546).-Орел: ИПЦ ОрелГТУ, 2008.– с. 8 - 9.

4. Воронков, А.В. Обзор способов чистовой механической обработки с наложением вибраций / Ю.В. Василенко, А.В. Воронков, О.С. Заброда // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии»: материалы студенческой региональной научно-технической конференции. - №2-4/270(545).-Орел: ИПЦ ОрелГТУ, 2008. – с. 56 - 59.

5. Воронков, А.В. Кинематическая модель процесса плоского шлифования с поперечной осцилляцией заготовки [Текст] / Ю.В. Василенко, А.В. Воронков, О.С. Заброда. – Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - №2-4/274(560). - Орел: ИПЦ ОрелГТУ, 2009. – с. 78 - 81.

6. Воронков, А.В. Математическая модель шероховатости поверхности детали при плоском шлифовании с усложненной кинематикой [Текст] / А.В. Воронков. – Фундаментальные и прикладные

ные проблемы техники и технологии. - №2/3(286) 2011. - Орел, ИПЦ ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК». - с. 23 - 30

**Список публикаций в других изданиях, решения о выдаче патентов РФ:**

7. Воронков, А.В. Повышение качества поверхности при чистовой обработке плоских поверхностей [Текст] / Ю.В. Василенко, А.В. Воронков, О.С. Заброда. – Всероссийская научно-техническая конференция студентов, посвященная 140-летию высшего технологического образования МГТУ им. Н.Э. Баумана. «Студенческая научная весна 2008: Машиностроительные технологии». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – с. 55 - 56.

8. Воронков, А.В. Повышение качества и производительности отделочной обработки [Текст] / Ю.В. Василенко, А.В. Воронков. – Проблемы качества машин и их конкурентоспособности: материалы 6-й Международной научно-технической конференции, г. Брянск, 22-23 мая 2008 г. / под. общ. ред. А.Г. Сулова. – Брянск: БГТУ, 2008. – с. 271 - 272.

9. Воронков, А.В. Теоретический анализ кинематики процесса плоского шлифования периферией круга с осевыми колебаниями [Текст] / А.В. Воронков, О.С. Заброда. – XXXV Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция. Научные труды в 8 томах. Т.1.М.:МАТИ, 2009, 250 с. -3с.- С. 101-103.

10. Воронков, А.В. Финишная вибрационная обработка поверхности детали [Текст] / А.В. Воронков, О.С. Заброда. – 59 открытая студенческая научно-техническая конференция СНТК МАМИ-2009. 13 -30 апреля 2009 г. Ч1. - с. 35 - 36.

11. Воронков, А.В. Математическая визуализации процесса плоского шлифования с поперечной осцилляцией заготовки [Текст] / А.В. Воронков, И.Ф. Шадрин, О.А. Василенко, О.С. Заброда. – Сборник трудов Региональной научно-практической конференции молодых ученых и аспирантов, Орел-Ливны, 26 февраля 2010 / Под общей редакцией Ю.С. Степанова. – Орел: ОрелГТУ, 2010. – с. 19 - 23.

12. Воронков, А.В. Формирование изотропного микрорельефа при плоском шлифовании периферией круга [Текст] / Ю.В. Василенко, А.В. Воронков, О.С. Заброда. – Сборник трудов Региональной научно-практической конференции молодых ученых и аспирантов, Орел-Ливны, 26 февраля 2010 / Под общей редакцией Ю.С. Степанова. – Орел: ОрелГТУ, 2010. – с. 36 - 41.

13. Воронков, А.В. Обзор комплексных способов механической обработки обеспечивающих увеличение дуги контакта инструмента с заготовкой [Текст] / А.В. Воронков, А.Ю. Казаков, А.В. Тюхта, О.А. Василенко. – Сборник трудов Региональной научно-практической конференции молодых ученых и аспирантов, Орел-Ливны, 26 февраля 2010 / Под общей редакцией Ю.С. Степанова. – Орел: ОрелГТУ, 2010. – с. 111 - 115.

14. Воронков, А.В. Установка для экспериментальных исследований процесса плоского шлифования с поперечной осцилляцией заготовки / А.В. Воронков // «Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения (ТМ-2011)» [Текст] + [Электронный ресурс]: 3Б ТР - 3 Международная научно-техническая конференция, г. Брянск, 15-20 мая 2011. / Под общ. ред. Сулова А.Г. – Брянск: Десяточка 2011 . – с. 30 - 31.

15. Решение о выдаче патента РФ на изобретение от 24.11.2011 г., заявка № 2010139844/02(056951) Способ плоского виброшлифования. Степанов Ю.С., Киричек А.В., Афонасьев Б.И., Самойлов Н.Н., Овсянникова И.В., Василенко Ю.В., Воронков А.В. // В24В7/00, В24В1/00, В24Д7/06 28.09.2010 г.

16. Решение о выдаче патента РФ на изобретение от 6.12.2011 г., заявка № 2010139850/02(056957) Способ вибрационного плоского шлифования. Степанов Ю.С., Киричек А.В., Афонасьев Б.И., Самойлов Н.Н., Овсянникова И.В., Василенко Ю.В., Воронков А.В. // В24В7/00, В24В1/00, В24Д7/06 28.09.2010 г.

17. Решение о выдаче патента РФ на изобретение от 24.11.2011 г., заявка № 2010139846/02(056953) Устройство для плоского виброшлифования. Степанов Ю.С., Киричек А.В., Афонасьев Б.И., Самойлов Н.Н., Овсянникова И.В., Василенко Ю.В., Воронков А.В. // В24В7/00, В24В1/00, В24Д7/06 28.09.2010 г.

18. Решение о выдаче патента РФ на изобретение от 25.11.2011 г., заявка № 2010139848/02(056955) Устройство для вибрационного плоского шлифования. Степанов Ю.С., Киричек А.В., Афонасьев Б.И., Самойлов Н.Н., Овсянникова И.В., Василенко Ю.В., Воронков А.В. // В24В7/00, В24В1/00, В24Д7/06 28.09.2010 г.

Подписано в печать «20» марта 2012 г.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 01ОП/12

Отпечатано с готового оригинал – макета на полиграфической базе

ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК». Россия, 302030, г. Орел, ул. Московская, д. 65.