

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 Анализ эффективности методов правки шлифовальных кругов.....	4
1.1 Классификация современных методов правки и особенности формирования рабочей поверхности шлифовальных кругов.....	4
1.2 Анализ вибрационной правки кругов.....	13
1.3 Выводы из обзора и задачи исследования.....	16
2 Исследование формирования рабочей поверхности шлифовального круга при вибрационной правке алмазным роликом методом шлифования.....	19
2.1 Вводная часть.....	19
2.2 Исследование рабочей поверхности шлифовального круга при вибрационной правке.....	21
2.3 Механизм вибрационной правки алмазным роликом.....	35
2.4 Исследование микрорельефа рабочей поверхности круга при вибрационной правке алмазными роликами.....	37
2.5 Оптимизация режимов вибрационной правки шлифовальных кругов алмазными роликами.....	45
3 Разработка конструкций устройств для вибрационной и прерывистой правки шлифовального круга алмазным роликом.....	50
3.1 Устройство для вибрационной правки кругов с механическим возбуждением вибраций.....	50
3.1.1 Описание устройства.....	50
3.1.2 Проектирование устройства.....	51
3.1.3 Расчет упругих элементов.....	54
3.2 Устройство для прерывистой правки шлифовальных кругов.....	58
3.2.1 Описание устройства.....	58
3.2.2 Проектирование устройства.....	60
3.2.3 Кинематика правящего устройства с алмазными роликами.....	61
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	69
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	70

ВВЕДЕНИЕ

Одним из распространенных методов обработки материалов является процесс шлифования. Так в машиностроении из всех применяемых металлорежущих станков 10 ÷ 12 % являются шлифовальные. На заводах массового производства количество шлифовальных станков значительно больше. Например, в автомобильной промышленности шлифовальные станки составляют – до 20 %, а в подшипниковой промышленности – до 55 ÷ 60 %.

Процесс шлифования и его разновидности относительно легко поддаются механизации и автоматизации. При изготовлении деталей массового производства наряду с назначением оптимальных режимов резания устанавливают высокие требования к станкам, инструменту и технологической оснастке. Такое комплексное решение вопросов обеспечивает наиболее высокие технические и экономические показатели.

Неотъемлемой частью процесса шлифования является правка шлифовальных кругов, во многом определяющая результат обработки. Правка круга необходима не только для восстановления режущих свойств абразивных кругов путем последовательного удаления затупившихся зерен, но и для формирования сложных профилей на этих кругах при врезном профильном шлифовании одновременно нескольких координатно-связанных поверхностей. Известно, что от условий процесса правки зависит расход абразивного инструмента, его режущие свойства, а, следовательно, производительность обработки и качество шлифуемой детали.

Таким образом, повышение эффективности процесса шлифования во многом связано с необходимостью исследования и совершенствования процессов правки шлифовальных кругов, с определением возможности рационального использования правящих инструментов.

Целью данной работы является повышение качества поверхности шлифованных изделий за счет вибрационной правки шлифовальных кругов алмазными роликами.

1. Анализ эффективности методов правки шлифовальных кругов

1.1 Классификация современных методов правки и особенности формирования рабочей поверхности шлифовальных кругов

Эксплуатация автоматизированного шлифовального оборудования, повышение скоростей резания, применение шлифовальных материалов повышенной прочности и твердости привели в последние годы к многочисленным исследованиям процессов правки шлифовальных кругов.

Описание конструкций правящих инструментов, способов и рекомендуемых режимов правки шлифовальных кругов, влияние процесса правки на показатели абразивной обработки приведено в монографиях, других публикациях, где приведены классификации современных методов правки.

К числу таких исследований относятся работы отечественных и зарубежных ученых, в том числе: В.В. Авакяна, Е.С. Киселёва, В.В. Коломийца, А.В. Королёва, В.И. Малышева, А.С. Попова, В.Ф. Романова, Г.Палича, К.Судзуки, Д. Кумабэ и др.

Большинство авторов отмечают, что применение скоростных методов обработки, новых видов абразивных материалов и связок, повышение требований к качеству и точности шлифованных деталей вызывают необходимость совершенствования процессов восстановления режущей способности и геометрической формы шлифовальных кругов, создания новых высокоэффективных методов правки.

На рисунке 1.1 приведена классификация основных методов правки абразивных кругов. В классификации представлены наиболее распространенные методы правки – обтачиванием и шлифованием, и не учтены такие методы, как электроэрозионная правка, химическая и др., имеющие узкоспециальное назначение. Особо показаны методы вибрационной правки, в частности с ультразвуковыми и вынужденными колебаниями правящего инструмента, автоколебаниями.

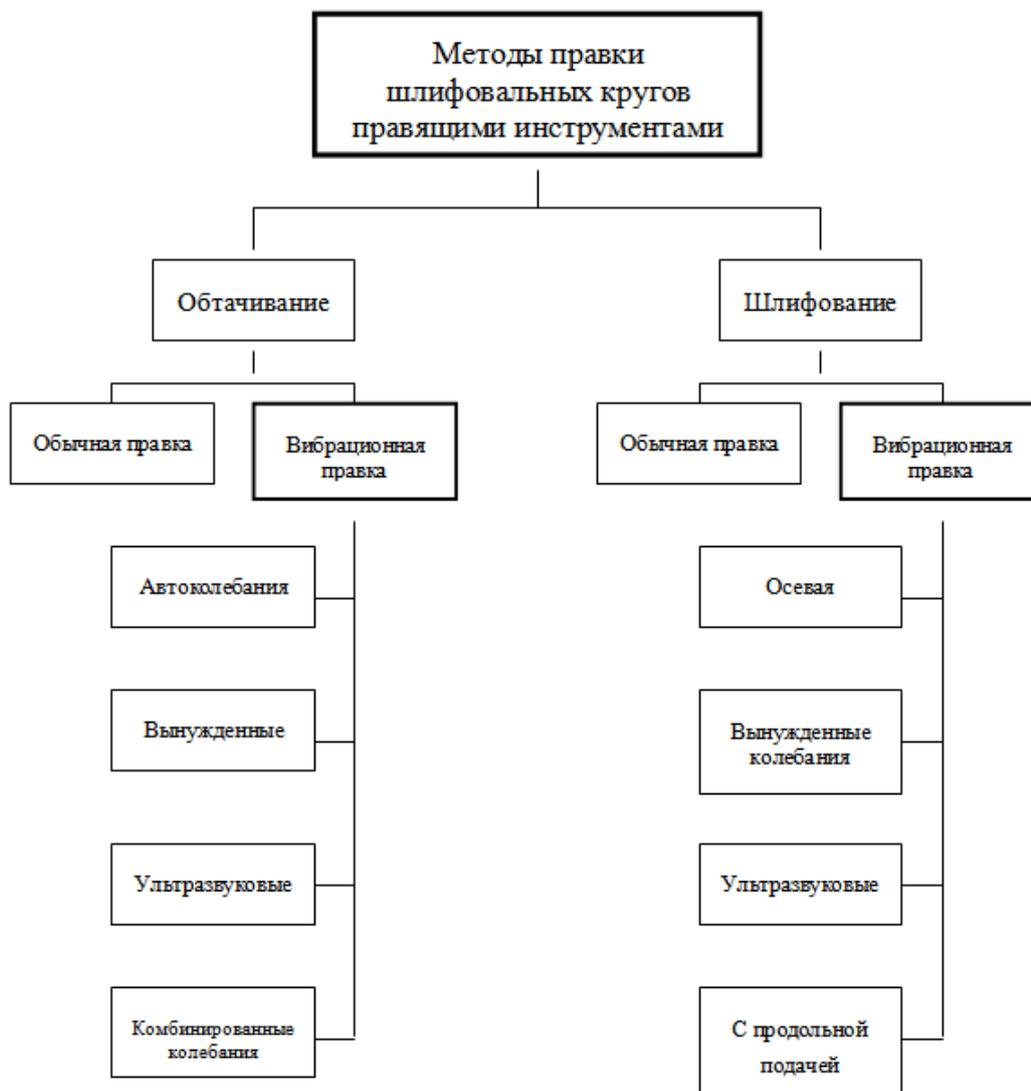


Рисунок 1.1 - Методы правки шлифовальных кругов

Отечественная промышленность производит алмазные правящие инструменты широкой номенклатуры, различающейся технологическим назначением, конструкцией, габаритными размерами, а также типом качеством алмазного сырья. Наиболее распространенными являются стандартные правящие инструменты, алмазные карандаши, алмаз в оправе, алмазная игла, алмазные резцы, правящие ролики. Все они оснащаются преимущественно дефицитными природными алмазами, и только для карандашей предусмотрено, наряду с природными алмазами, использование синтетических алмазов.

Среди многокристалльных правящих инструментов особое значение

имеют правящие ролики. Технология изготовления их алмазносного слоя правящих роликов весьма разнообразна. Ролики оснащают как природными алмазами, так и синтетическими, на связке различных типов. Оснащение роликов синтетическими алмазами, позволяет создать весьма эффективный правящий инструмент, способный успешно конкурировать с роликами, оснащенный крупнокристалльными природными алмазами.

Несмотря на конструктивные различия, качество алмазов и связок, все указанные правящие инструменты можно классифицировать на три основных типа рисунок 1.2: а) однокристалльный правящий инструмент (алмаз в оправе, алмазная игла, алмазный резец); б) многокристалльный правящий инструмент, (алмазный карандаш типа С и Ц, гребенки, бруски); в) правящий алмазный ролик (АР).



Рисунок 1.2 - Классификация правящих инструментов

Используя общепринятую терминологию, укажем, что одно- и многокристалльный инструмент работают по методу обтачивания, а правящий ролик по методу шлифования.

Классификация правящих инструментов по основным характерным

признакам, позволяет более точно оценить степень влияния конструкции и характеристики правящего инструмента на показатели процесса шлифования. Кроме того, появляется возможность определения областей рационального применения того или иного типа инструмента.

Технологические показатели процесса шлифования в значительной степени зависят от методов и условий правки шлифовальных кругов. Ряд авторов связывают это обстоятельство с конкретными особенностями формирования рельефа рабочей поверхности круга, присущими каждому из методов правки. Г.Г. Покладий [1] изучая влияние образования микрокромки на абразивных зернах на показатели микрорезания, провел сравнительные исследования процесса микрорезания единичным алмазным зерном в виде усеченного конуса с гладкой площадкой при вершине и зерном с так называемой активизированной площадкой. Активизация осуществлялась нанесением царапин на площадку в продольном и поперечном направлениях. При этом на ней образовывались микросколы, представляющие собой режущие элементы высотой 3...6 мкм. Автор установил, что при микрорезании стали ШХ15 зерном с активизированной площадкой и глубиной вдавливания в металл $h < 6$ мкм, тангенциальная сила резания P_z меньше, чем при работе зерна с плоской площадкой, независимо от диаметра последней. При глубине вдавливания, приближающейся к высоте микрокромки, происходит постепенное выравнивание значений P_z , а при h превышающей высоту микрокромки влияние активизации площадки зерна практически не проявляется. Единичное зерно с гладкой площадкой при вершине практически не в состоянии производить резание при глубине менее 2...4 мкм. В этом случае наблюдается преимущественно пластическое оттеснение металла. В то же время зерно с активизированной площадкой оказалось способным проводить микрорезания при $h = 1$ мкм, что свидетельствует о его более высокой режущей способности. Автор делает вывод о том, что для повышения режущей способности шлифованных инструментов необходимо формирование

микросколов на площадках износа абразивных зерен без их объемного разрушения. Этот вывод подтверждается и другими исследованиями, в которых было отмечено, что при правке кругов на керамической связке алмазным роликом, на абразивных зернах создается относительно большое количество сколов вершинок на абразивных зернах, по сравнению с правкой карандашом.

В работе Т. Суто и Т. Ваида [2] по исследованию рабочей поверхности шлифовального круга были получены результаты, которые позволили сделать следующие выводы. При одном и том же режиме правки шлифовального круга количество всех режущих кромок на его рабочей поверхности уменьшается экспонентно, а средняя площадь изношенной поверхности уменьшается по линейному закону с понижением твердости шлифовального круга. При одних и тех же условиях правки шлифовального круга общее количество режущих кромок на рабочей поверхности тем меньше, чем больше средний диаметр абразивных зерен круга, а площадь износа режущих кромок с увеличением среднего диаметра зерен абразива увеличивается, причем обе указанные закономерности имеют линейный характер в логарифмических координатах. Чем мягче режим правки шлифовального круга, тем больше количество и тем продолжительнее срок работы эффективных режущих кромок в процессе шлифования. Вместе с тем, определенной зависимости площади износа всех режущих кромок от режима правки шлифовального круга на первой стадии процесса шлифования отмечено не было, однако средняя площадь износа увеличивается быстрее в случае шлифования кругом, подвергнутым мягкому режиму правки. Интенсивность увеличения длины ленточки износа с ужесточением режима шлифования не зависит от условий правки шлифовального круга.

С увеличением окружной скорости круга и увеличением отношения скоростей круга и изделия продолжительность работы режущих кромок увеличивается, количество режущих кромок возрастает, а из них износ становится более интенсивным. Если чистота поверхности обработанной

шлифованием при постоянных условиях шлифования находится в ярко выраженной зависимости от количества режущих кромок на рабочей поверхности круга, то сопротивление шлифованию на одну режущую кромку заметному влиянию не подвергается.

А.И. Исаев и др. [3] приводят в работе формулу для определения показателя, характеризующего остроту режущих абразивных зерен $\mu = \frac{n_{cp}}{\rho_{cp}}$, где n_{cp} – число режущих кромок на зерне; ρ_{cp} – радиус скругления зерна.

Для зерен электрокорундов белого и хромистого, монокорунда эльбора значение μ составило соответственно 0,30; 0,41; 0,40; 0,60. Показано, что, создавая определенное число микрокромки на абразивном зерне, можно регулировать режущие свойства абразивного инструмента.

К. Йокогава [4] исследовал влияние правки круга на формирование микрорельефа абразивного инструмента. Автор показал, что при правке карандашом на рабочей поверхности круга образуются элементы резьбового профиля в свою очередь, качество шлифованных поверхностей связано с конкретными параметрами микрорельефа круга, зависящего от режима правки и формы алмаза.

А.К. Байкалов и И.Л. Сукенник [5] установили, что процесс правки является разновидностью резания хрупкого абразивного материала и принципиально не отличается от обработки других хрупких материалов (стекло, керамики и др.). Процесс резания связан с диспергированием обрабатываемого дефектного слоя, в котором возникают микротрещины и другие деформационные изменения, способствующие последующему удалению зерен или их частиц.

Однако ряд исследователей считают, что механизм формирования рельефа рабочей поверхности круга имеет более сложный характер. Так, в работе С.Малкина и Мюррея Т. [6] отмечено, что при правке круга роликом контакт между алмазным и абразивным зерном может вызвать пластическую деформацию абразивного материала. Исследование

поверхности абразивных зерен на электронном микроскопе показало, что при правке роликом возможны как деформация, так и разрушение зерна. Установлено, что на весьма малых глубинах правки может иметь место даже стружкообразование, а увеличение глубины приводит к хрупкому разрушению или вырыванию зерен из связки.

В работах других авторов, показано, что преимущественным видом износа алмазов правящих карандашей является термоусталостное разрушение. Это подтверждается исследованием, которые показали, что с ростом окружной скорости правки возрастает тепловой фактор, приводящий к образованию на алмазных кристаллах сети микротрещин, следов разрушения. Это сопутствует интенсификации износа правящих инструментов, а соответственно изменению показателей процесса шлифования.

1.2 Анализ вибрационной правки кругов

Авторы целого ряда работ пришли к выводу, о том, что при правке круга необходимо назначать режим правки и выбирать правящий инструмент способные формировать на рабочей поверхности круга развитый микрорельеф. Известны работы отечественных и зарубежных авторов, посвященных исследованию правки с наложением на правящий инструмент механических колебаний, в том числе Королева А.В. [9], Березняка Р.А. [10], Пилинского В.И., Малышева В.И. [8], Киселева Е.С., [7] и др.

Авторы рассматривают различные способы наложения механических колебаний на правящий инструмент. В том числе правку с наложением на правящий инструмент колебаний ультразвуковой частоты с помощью магнитострикционных и пьезокерамических преобразователей, правку в режиме автоколебаний, вынужденных колебаний и пьезокерамических преобразователей и др.

Одной из первых работ, посвященных вибрационной правке, является статья японских исследователей Насса Х. и Харада Т. [11]. Исследовалась правка с наложением вибраций на твердосплавную пластину, служившую

правлящим инструментом ультразвуковых колебаний. Авторы установили, что в результате вибрационной правки на рабочей поверхности круга образуется большое количество микрокромки. При правке, таким образом, круги пригодны для чистового шлифования. Правка круга такой же пластиной, но с низкой частотой колебаний приводит к разрушению и вырыванию зерен с поверхности круга, который в результате такой правки целесообразно применять для обдирочного шлифования.

К числу ранних работ относится техническое решение авторов L. Balamuth и A. Kuris по патенту США [12], содержащие правящее устройство с вибратором генерирующим колебания правящего инструмента с частотой 5-20 кГц и амплитудой $25 \div 50$ мкм. Шлифовальный круг при правке должен вращаться с пониженной скоростью от 1 до 5 м/с.

Авторы полагают, что формирование рабочей поверхности круга обеспечивается за счет вибраций правящего инструмента, а также кавитацией направляемой в зону правки смазочно-охлаждающей жидкости. Кроме того, вибрационная правка, по мнению авторов, дает возможность использовать твердосплавный правящий инструмент вместо алмазного.

Из патентной литературы известно ограниченное число работ по вибрационной правке кругов алмазными роликами. Большинство из них разработано А. И. Глейзером и В.И. Малышевым. Ниже представлены основные конструкции устройств для вибрационной правки шлифовальных кругов.

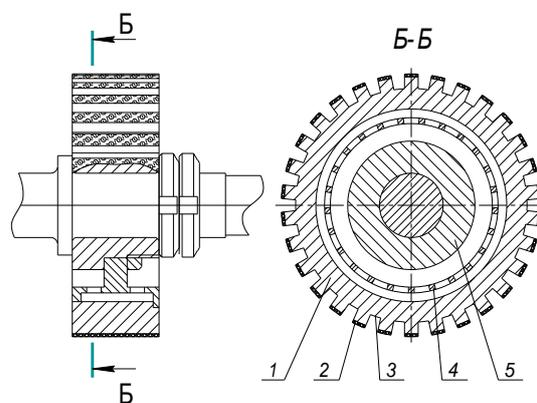


Рисунок 1.3 - Устройство для вибрационной правки

Устройство по а. с. № 1484669 [13] (рисунок 1.3) содержит посадочную втулку 5 с установленным на ней правящим роликом 1, упругий элемент 4, установленный между ними концентрично ролику 1. На рабочей поверхности ролика выполнены равномерно расположенные пазы 3.

Устройство работает следующим образом.

Правящий ролик 1 через посадочную втулку 5, получая вращение от оправки, в процессе правки удаляет с круга слой абразивного материала. В результате циклического прохождения пазов 3 при вращении правящего ролика 1 возникают возбуждающие импульсы силы, действующие на упругий элемент 4. При условии, что частота возбуждающих импульсов равна частоте собственных колебаний правящего ролика 1, возникают изгибные колебания последнего. Амплитуда колебаний регулируется за счет изменения подачи инструмента.

Характеристики устройства:

- Наружный диаметр $D=100$ мм;
- Высота ролика $H=25$ мм;
- Масса $m = 2$ кг;
- Частота вращения $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$, $n_p = 6000$ об/мин;
- Число пазов на рабочей поверхности ролика $z = 30$.

Недостатки устройства:

- Высокая частота вращения ролика (при $n_p = 6000$ об/мин окружная скорость $V_{\text{окр.}} = 31,4$ м/с)
- Амплитуда колебаний полностью зависит от подачи при правке, т.е. для получения высокой амплитуды требуется большая подача, что влечет за собой съем дополнительного количества абразива.

Устройство по а. с. № 1684001 [14] рис. 1.4 содержит правящий ролик 1, имеющий на своей рабочей поверхности пазы 2, которые расположены группами, следующими друг за другом. Расстояние между пазами в пределах каждой группы одинаковы, но отличны от расстояний в смежных группах.

Посредством упругого элемента 3 ролик связан с приводной оправкой 4 так, что правящий ролик и упругий элемент образуют колебательную систему.

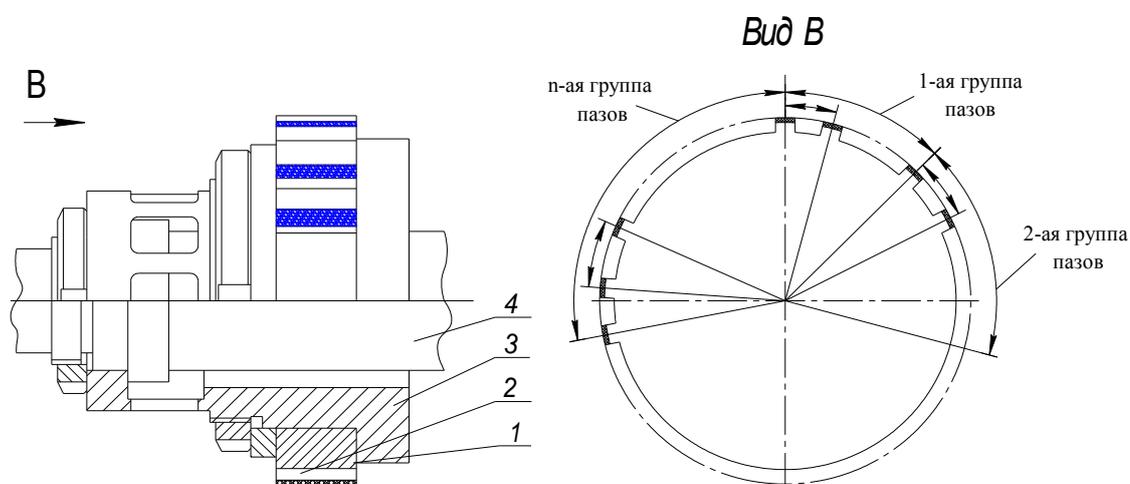


Рисунок 1.4 - Устройство для вибрационной правки

Принцип работы устройства основан на наложении высоко- и низкочастотных колебаний правящего ролика.

Характеристики устройства:

- Наружный диаметр $D = 100$ мм;
- Число пазов $z = 19$ (по схеме $20 \times 9 + 18 \times 10$);
- Окружная скорость $V_p = 30$ м/с;
- Частота вращения $n_p = 1000$ об/мин;
- Частота колебаний
 - высокочастотная составляющая $f_1 = 350$ Гц;
 - низкочастотная составляющая $f_2 = 20$ Гц.

Недостатки устройства:

- Низкий уровень вибраций.

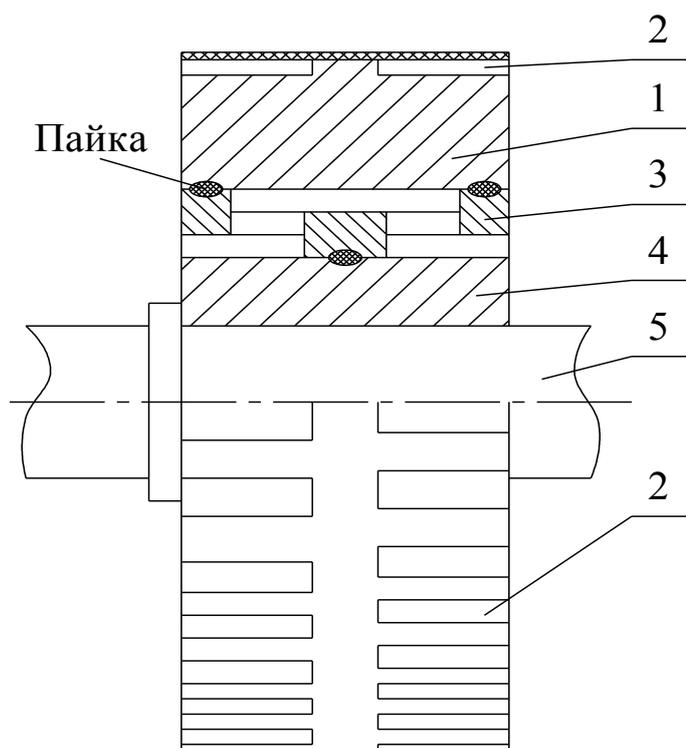


Рисунок 1.5 - Устройство для вибрационной правки

Устройство по а. с. № 1585130 [15] (см. рисунок 1.5) содержит правящий ролик 1, имеющий на рабочей поверхности режущий слой. На рабочей поверхности выполнены равнорасположенные, направленные вдоль оси или под углом пазы в 2 или более ряда. Посредством упруго элемента 3 правящий ролик связан с посадочной втулкой 4. При вращении правящего ролика 1 возникают возбуждающие импульсы силы, частота следования в каждом ряду различна. В результате возникают колебания правящего ролика, формирующего на поверхности шлифовального круга регулярный макро- и микрорельеф.

Характеристики устройства:

- Наружный диаметр D=100 мм;
- Окружная скорость $V_{\text{окр.}} = 30 \text{ м/с};$
- Частота вращения $n_p = 1000 \text{ об/мин};$
- Число пазов $Z_1=50, Z_2=40;$
- Частота колебаний

- Гц; — высокочастотная составляющая $f_1 = 750$
- Гц. — низкочастотная составляющая $f_2 = 80$

Недостатки устройства:

- Невозможно править круги малой ширины;
- Требуется поперечная подача.

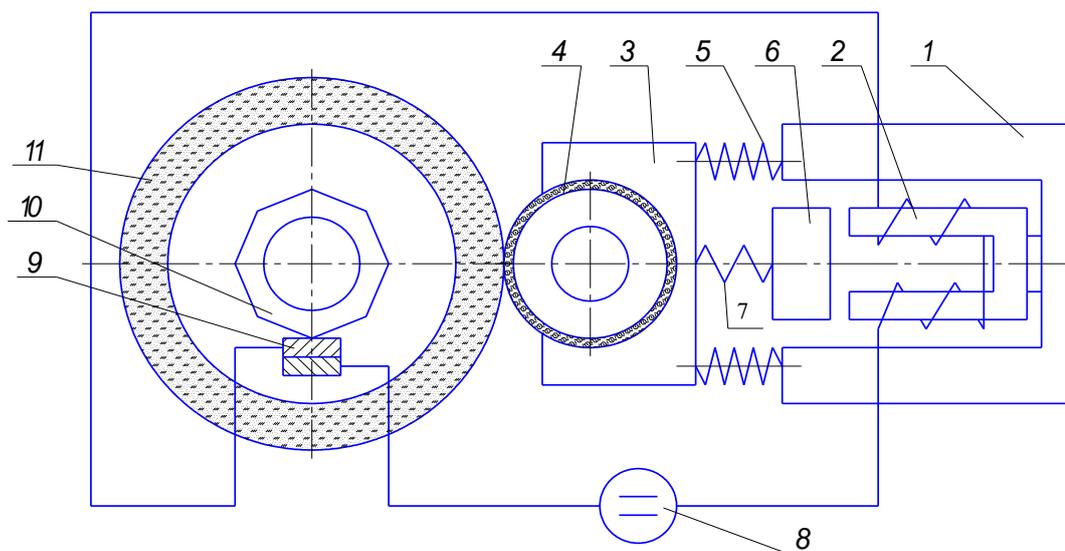


Рисунок 1.6 - Устройство для вибрационной правки

Устройство по а. с. № 1502281 [16] (см. рисунок 1.6) содержит основание 1, на котором смонтирован возбудитель 2 колебаний и основная масса 3, упруго связанная с основанием 1 и несущая правящий инструмент 4, дополнительную массу 6, упруго связанную с основной массой 3, а также цепь синхронизации частоты возбудителя колебаний с числом оборотов абразивного круга.

Устройство работает следующим образом.

Шлифовальному кругу 11 сообщают вращение с заданной скоростью. При этом в результате периодического размыкания цепи питания электромагнита, последний передает на дополнительную массу 6 импульсы возбуждающей силы, следующие с частотой $\omega_v = n \cdot \omega_{кр.}$. В результате

вынужденных колебаний на рабочей поверхности формируется устойчивый макро- и микрорельеф.

Характеристики устройства:

- Основная масса $m_1=20$ кг;
- Дополнительная масса $m_2=0,3$ кг;
- Частота возбуждения $\omega_v=300$ с⁻¹;
- Частота вращения круга $\omega_{кр.}=2400$ с⁻¹;
- Число кулачков прерывателя $n=8$.

Недостатки конструкции:

- Наличие дополнительного источника энергии;
- Большая масса и громоздкость конструкции.

Все устройства для вибрационной правки, приведенные выше, основаны на принципе автоколебаний и вынужденных колебаниях.

1.3 Выводы из обзора и задачи исследования

Анализ литературных источников, посвященных исследованиям процессов правки в основном шлифовальных кругов, позволяет оценить серьезный вклад, который внесли их авторы в дело развития теории и практики абразивной обработки, и в частности правки абразивного инструмента.

Из обзора следует, что:

Приведенный выше анализ показывает, что принцип вибрационной правки реализован в условиях мелкосерийного производства. Вибрационная правка в массовом автоматизированном производстве пока еще не нашла применения, как на уровне исследований, так и в практике абразивной обработки. Данные об использовании вибрационной правки в массовом производстве отсутствуют.

Как показывает обзор, вибрационной правки круга, несмотря на проведенные исследования, требует дальнейшие изучения. Исследования последних лет и внедрение этого прогрессивного процесса правки в производство показали его эффективность.

Вместе с тем современные требования к качеству выпускаемой продукции вызывают необходимость создания надежных устройств и правящего инструмента для вибрационных методов правки и исследований процесса правки шлифовальных кругов. Учитывая возросшую роль правки при шлифовании и недостаточную изученность процесса правки, рассмотрим подробнее особенности вибрационной правки при шлифовании и пути ее совершенствования.

Наложение механических колебаний на правящий инструмент является важным резервом повышения производительности и качества абразивной обработки. Процесс правки является комплексной задачей, включающей совершенствование оборудования, повышением качества шлифованных кругов, оптимизацию режима обработки, совершенствование правящего инструмента. На решение этой задачи направлены усилия отечественных и зарубежных исследователей в области скоростного шлифования.

Несовершенство методов вибрационной правки кругов при шлифовании снижает эффективность его в автоматизированном массовом производстве. В последнее время ведутся интенсивные исследования влияния методов и условий правки, в том числе вибрационной, на показатели правки – производительность, микрорельеф круга, стойкость правящего инструмента и его работоспособность, а также влияния условий правки на показатели шлифования – производительность процесса, качество поверхностного слоя шлифуемой детали и пр.

Перспективным методом является вибрационная правка с использованием колебаний ультразвуковой частоты ряд устройств для правки с различными видами колебаний. Проведены исследования различных способов ультразвуковой правки обтачиванием. Изучая влияние условий вибрационной правки на показатели шлифования.

Математические модели оптимального режима резания, разработанные для различных схем шлифования, позволяет эффективно управлять процессом

шлифования с целью обеспечения максимальной производительности операции при заданном качестве обработки.

Основной целью исследования и разрешения указанных вопросов в данной работе сводится к решению следующих задач:

1) исследовать процесс вибрационной правки шлифовальных кругов алмазными роликами;

2) разработать конструкции устройств для вибрационной правки алмазными роликами, учитывая недостатки известных конструкций;

3) рассчитать условия работы предложенных устройств;

4) оптимизировать процесс шлифования, учитывая правку шлифовального круга алмазным роликом.

2 Исследование формирования рабочей поверхности шлифовального круга при вибрационной правке алмазным роликом

2.1 Вводная часть

Решение проблемы обеспечения эффективности производства и качества выпускаемой продукции в машиностроении требует совершенствования процесса шлифования, который является важнейшей завершающей операцией технологического процесса механической обработки деталей машин. Основным недостатком процесса шлифования, сдерживающий рост производительности и ухудшающий качество выпускаемой продукции, - возникновение высоких температур в зоне резания. Прерывистые круги являются эффективным средством снижения температуры при шлифовании. В связи с этим исследование и дальнейшая разработка способа нанесения регулярного рельефа (прерывности) на поверхность круга при правке алмазными роликами является весьма актуальной задачей, решение которой неразрывно связано с проблемой повышения эффективности шлифовальных операций. В работе применялись теоретические методы исследования. Теоретические исследования базируются на элементах высшей математики, теоретической механики, теории колебаний твердого тела. Исследования проводились с помощью современных прикладных компьютерных программ.

Процесс формирования рабочей поверхности круга (РПК) представляет собой последовательность наложения вибрационных волн на поверхность шлифовального круга, причем фаза этих волн непрерывно меняется по определенному закону с каждым оборотом. Расчет формообразования проводился с помощью персонального компьютера в программной среде MathCAD 11.

Правка шлифовального круга методом шлифования заключается в том, что удаление с рабочей поверхности круга дефектного слоя производится за счет срезания, дробления и скалывания затупленных абразивных зерен правящим инструментом, которому сообщается принудительное вращение с

окружной скоростью, меньшей, чем окружная скорость правящего круга. Направления вращения правящего и абразивного инструментов могут совпадать или быть встречными, как в данном рассматриваемом случае. В качестве правящего инструмента для правки методом шлифования используются алмазные ролики (АР) с зернистостью 500/400, 400/315, 315/200 и круги из карбида кремния на керамической связке зернистостью 50 – 160, твердостью Т – ЧТ, диаметром 60 – 150 мм.

Правка шлифовальных кругов методом шлифования АР подразделяется на три кинематических способа:

- правка с продольной подачей (АР перемещается параллельно оси круга, то есть вдоль периферии круга),
- правка с тангенциальной подачей (АР перемещается тангенциально относительно цилиндрической части круга),
- правка с врезной подачей (ось шлифовального круга и ось АР лежат в одной плоскости и при этом АР перемещается в радиальном направлении к шлифовальному кругу).

Каждый из выше перечисленных способов правки шлифовальных кругов, может быть реализован с наложением вибрационных полей или без наложения на правящий инструмент.

В качестве исследования процесса правки шлифовального круга роликом в программной среде MathCAD 11 [17], будет выбрана правка шлифовального круга методом шлифования с врезной подачей (поперечной) и наложением радиальных вибрационных полей на правящий инструмент (АР). Так как алмазные зерна на поверхности ролика расположены хаотично и некоторые зерна выступают за пределы наружной окружности ролика, то для аналитического исследования принимаем, что все зерна имеют одинаковую высоту и не выходят за границу наружной поверхности ролика.

2.2 Формирование рабочей поверхности шлифовального круга при вибрационной правке

Исследование рельефа рабочей поверхности шлифовального круга, производится для правки методом шлифования с врезной подачей и наложением вибрационных полей в радиальном направлении к центру шлифовального круга, с некоторой частотой вибрации f и амплитудой A . На рисунке 2.1 изображена принципиальная схема правки методом шлифования с наложением механических колебаний в радиальном направлении.

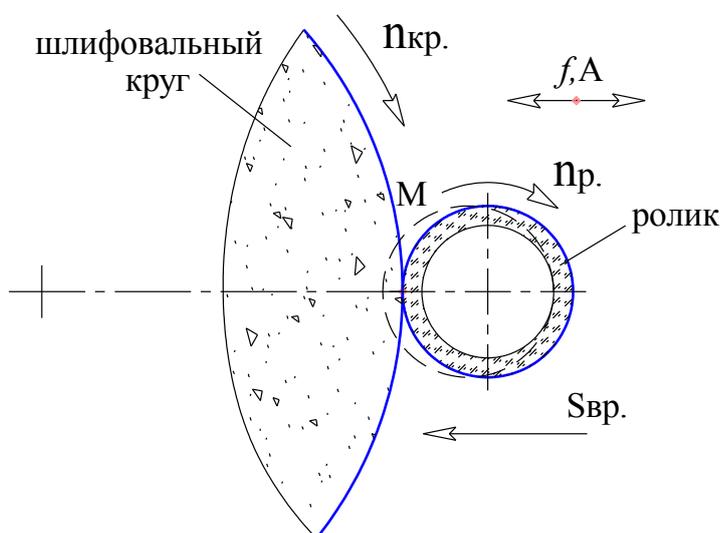


Рисунок 2.1 - Принципиальная схема правки АР методом шлифования с наложением радиальных вибраций

Согласно рисунку 2.1 видно, что ролик по отношению к шлифовальному кругу совершает гармонические колебания. Такие гармонические колебания правящего инструмента (АР) с некоторой частотой вибрации f и амплитудой A , можно выразить в виде уравнения гармонических колебаний, которое в общем виде выглядит следующим образом:

$$F(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0); \quad (2.1)$$

где A – амплитуда колебания правящего инструмента, м; $(\omega \cdot t + \varphi_0)$ – фаза колебаний, при заданной амплитуде она определяет значение изменяющейся величины $F(t)$ в любой момент времени t ; φ_0 – начальная фаза, определяет

значение величины $F(t)$ в начальный момент времени $t = 0$.

Следовательно, положение точки в любой момент времени, изменяется по синусоидальному закону. Рассмотрим задачу для нашего случая. Возьмем на окружности ролика рисунка 2.1 точку М, это есть точка контакта поверхности правящего ролика с поверхностью шлифовального круга. Сообщим точке М вращательное движение равное скорости круга $V_{кр.}$, а круг мысленно остановим. Сообщим этой же точке М колебательное движение в радиальном направлении по отношению к шлифовальному кругу с частотой колебаний f и амплитудой A . Итак, точка М изменяет свое положение по синусоидальному закону:

$$F(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0); \quad (2.1)$$

Пусть ω есть частота циклических колебаний АР, тогда частота собственных колебаний f ролика в радиальном направлении будет представлена в виде выражения:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f; \quad (2.2)$$

Скорость вращения шлифовального круга рассчитывается по формуле:

$$V_{кр.} = \frac{\pi \cdot D_{кр.} \cdot n_{кр.}}{1000 \cdot 60}; \quad (2.3)$$

где $D_{кр.}$ – диаметр шлифовального круга, мм; $n_{кр.}$ – частота вращения шлифовального круга, об/мин;

Время t определяется формулой:

$$t = \frac{\theta \cdot D_{кр.}}{V_{кр.} \cdot 2 \cdot 10^3}; \quad (2.4)$$

где θ – угол поворота шлифовального круга, рад; $D_{кр.}$ – диаметр шлифовального круга, мм; $V_{кр.}$ – скорость вращения шлифовального круга, м/с.

Подставляя выражение (2.3) в (2.4), получим:

$$t = \frac{30}{\pi \cdot n_{кр.}} \cdot \theta; \quad (2.5)$$

Если рассматривать колебания точки М на определенном участке круга,

тогда угол поворота шлифовального круга θ можно заменить на длину этого участка λ , проведя подстановку $\theta = (\lambda \cdot 2 \cdot 10^3) / D_{кр.}$ в выражение (2.5) получим:

$$t = \frac{\lambda \cdot 6 \cdot 10^4}{\pi \cdot n_{кр.} \cdot D_{кр.}}; \quad (2.6)$$

Подставляя выражения (2.2) и (2.6) в уравнение гармонических колебаний (2.1) получаем уравнение траектории движения точки М для данного случая:

$$F(\lambda) = A \cdot \sin\left(\frac{1.2 \cdot 10^5 \cdot f}{n_{кр.} \cdot D_{кр.}} \cdot \lambda + \varphi_0\right); \quad (2.7)$$

Следовательно, траектория движения точки контакта М описывается уравнением гармонических колебаний, которое представлено в виде уравнения (2.7). Это дает возможность определить положение точки М на любом участке шлифовального круга.

Правка роликом методом шлифования с врезной подачей и наложением вибрационного поля, осуществляется за счет вращения наружной поверхности ролика и его колебательного движения в радиальном направлении по отношению к шлифовальному кругу. Необходимо решить задачу, которая бы связывала траекторию движения точки М и рабочую окружность ролика.

Пусть точка М жестко закреплена с окружностью ролика и не вращается вместе с роликом, тогда ролик будет совершать такие же гармонические колебания в радиальном направлении по отношению к шлифовальному кругу, что и точка М. Следовательно, окружность ролика будет оставлять след на рабочей поверхности круга в виде дуги контакта.

Составим уравнение окружности ролика таким образом, чтобы оно полностью зависело от траектории перемещения точки М рисунка 2.2.

В общем случае уравнение окружности может быть представлено в виде:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2; \quad (2.8)$$

где x, y – координаты центра окружности по оси абсцисс и ординат

соответственно; a, b – параметры смещения центра окружности по оси абсцисс и ординат соответственно; R – радиус окружности.

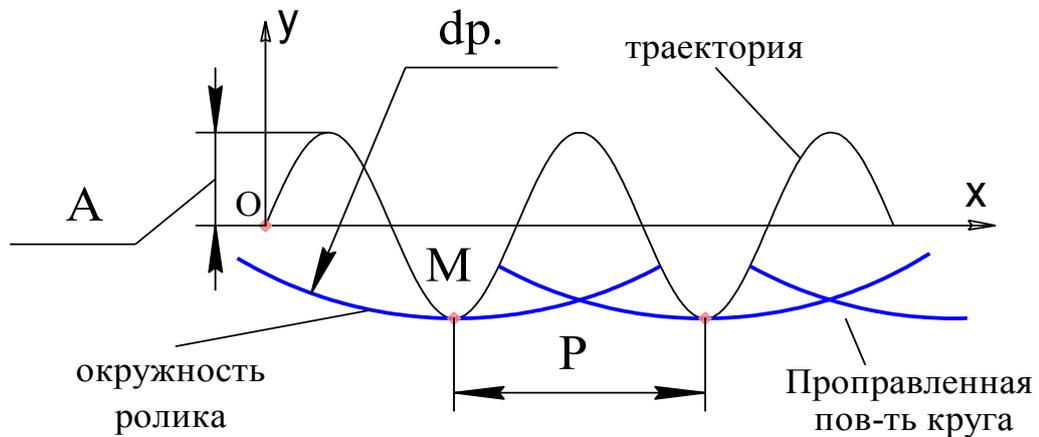


Рисунок 2.2 - Схема перемещения окружности ролика с точкой M по траектории

На рисунке 2.2 видно, что точка M это общая точка между впадиной траектории и окружностью ролика. Параметр P – шаг между положениями окружностей ролика по траектории. В данном случае необходимо связать точку M со впадиной траектории. В итоге, уравнение окружности ролика можно представить в виде выражения (2.9). Прделав подстановку, вместо параметра смещения b подставляем $(d_p/2) - A$, а радиуса окружности $R = (d_p/2)$, получим:

$$(x - a)^2 + \left(y - \left(\frac{d_p}{2} - A \right) \right)^2 = \left(\frac{d_p}{2} \right)^2; \quad (2.9)$$

Проведем замену в выражении (2.9) следующих переменных $x = \lambda$; $y = L(\lambda)$ получим:

$$(x - a)^2 + \left(L(x) - \left(\frac{d_p}{2} - A \right) \right)^2 = \left(\frac{d_p}{2} \right)^2; \quad (2.10)$$

Выразим из выражения (2.10) за знак равенства $L(\lambda)$ получим:

$$L(x) = \left(\frac{d_p}{2} - A \right) - \sqrt{\left(\frac{d_p}{2} \right)^2 - (x - a)^2}; \quad (2.11)$$

Параметр a в выражении (2.11) определяет положение окружности ролика с точкой M на любом участке длины окружности шлифовального круга. Чтобы

определить данное положение окружности ролика с точкой М, следует выбрать систему отсчета с координатами. Для этого необходимо длину окружности шлифовального круга, представить в виде бесконечной прямой разделенную на равные участки $\Delta L = \pi \cdot D_{кр.}$. Пусть система отсчета будет выглядеть так, как на рисунке 2.3, с осями координат x;y. Так как траектория движения окружности ролика (синусоида) выходит из точки О с координатами (0;0), следует, что расстояние от начала координат до первой впадины траектории будет равно $(3/4) \cdot P$ (рисунок 2.3). Как показано ранее, параметр P – это расстояние между впадинами траектории движения окружности ролика с точкой М, либо шаг между следующим положением ролика по траектории. Определим параметр P, полагаясь на схему приведенную на рисунке 2.3.

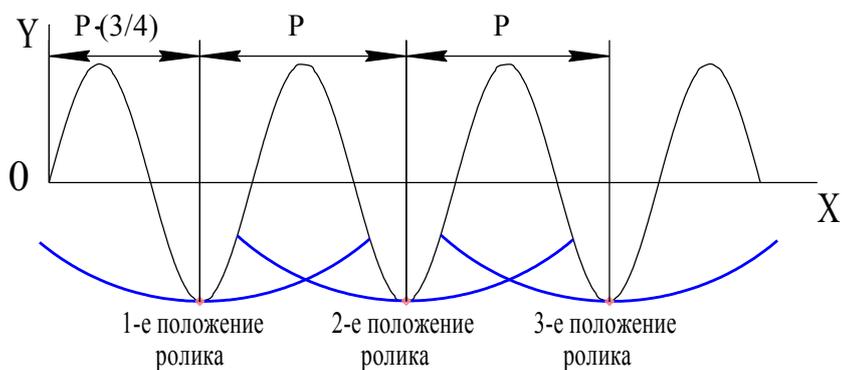


Рисунок 2.3 - Схема положения окружности ролика при 1-м обороте круга

Пусть за время τ точка М переместится по траектории на расстояние равное шагу P. Тогда точка М совершит возвратно-поступательное движение в радиальном направлении по отношению к шлифовальному кругу, то есть за период T, который обратно пропорционален частоте колебаний точки М $T = 1/f$. За это время τ шлифовальный круг повернется на угол θ , который можно получить из выражения (2.5):

$$\theta = \frac{\pi \cdot n_{кр.}}{30} \cdot \tau; \quad (2.12)$$

Угол поворота круга θ также определяется:

$$\theta = \frac{P \cdot 2 \cdot 10^3}{D_{кр.}} ; \quad (2.13)$$

Приравняв значения $\tau = T$ и выражения (2.12) с (2.13) получим:

$$\frac{\pi \cdot n_{кр.}}{30 \cdot f} = \frac{P \cdot 2 \cdot 10^3}{D_{кр.}} ; \quad (2.14)$$

Из полученного выражения (2.14) вынесем за знак равенства параметр P получим:

$$P = \frac{\pi \cdot n_{кр.} \cdot D_{кр.}}{6 \cdot 10^4 \cdot f} ; \quad (2.15)$$

где $n_{кр.}$ – частота вращения шлифовального круга, об/мин; $D_{кр.}$ – диаметр окружности шлифовального круга, мм; f – частота радиальных вибраций ролика, Гц.

Следовательно, параметр P определяет положение окружности ролика на любом участке длины шлифовального круга. Проведем замену параметра a в выражении (2.11) на значение параметра P в выражении (2.15) получим:

$$L_{\text{ш}} = \left(\frac{d_{p.}}{2} - A \right) - \sqrt{\left(\frac{d_{p.}}{2} \right)^2 - \left[\lambda - \frac{\pi \cdot n_{кр.} \cdot D_{кр.}}{6 \cdot 10^4 \cdot f} \right]^2} ; \quad (2.16)$$

Значит, уравнение (2.16) описывает положение окружности ролика на любом участке длины шлифовального круга.

Так как для программной среды MathCAD 11 необходимо получить уравнения положения окружности ролика для каждой впадины траектории рис. 2.3, следует вывести такое уравнение. Следовательно, 1-е положение окружности ролика от начала координат равно $(3/4) \cdot P$, 2-е положение $(3/4) \cdot P + P$, а 3-е $(3/4) \cdot P + P + P$. Тогда k -е положение будет определяться, как $P \cdot (4 \cdot k + 3) \cdot 4^{-1}$, подставляя это выражение в уравнение (2.16) получим:

$$L_{\text{ш}} = \left(\frac{d_{p.}}{2} - A \right) - \sqrt{\left(\frac{d_{p.}}{2} \right)^2 - \left[\lambda - \frac{\pi \cdot n_{кр.} \cdot D_{кр.} \cdot (k \cdot 4 + 3)}{2,4 \cdot 10^5 \cdot f} \right]^2} ; \quad (2.17)$$

Под параметром k понимается k -е положение окружности ролика на заданном интервале участка λ шлифовального круга, которое численно принимается $k = 1, 2, 3, m + 1$; соответственно 1-е, 2-е, 3-е, $(m + 1)$ -е положение окружности ролика.

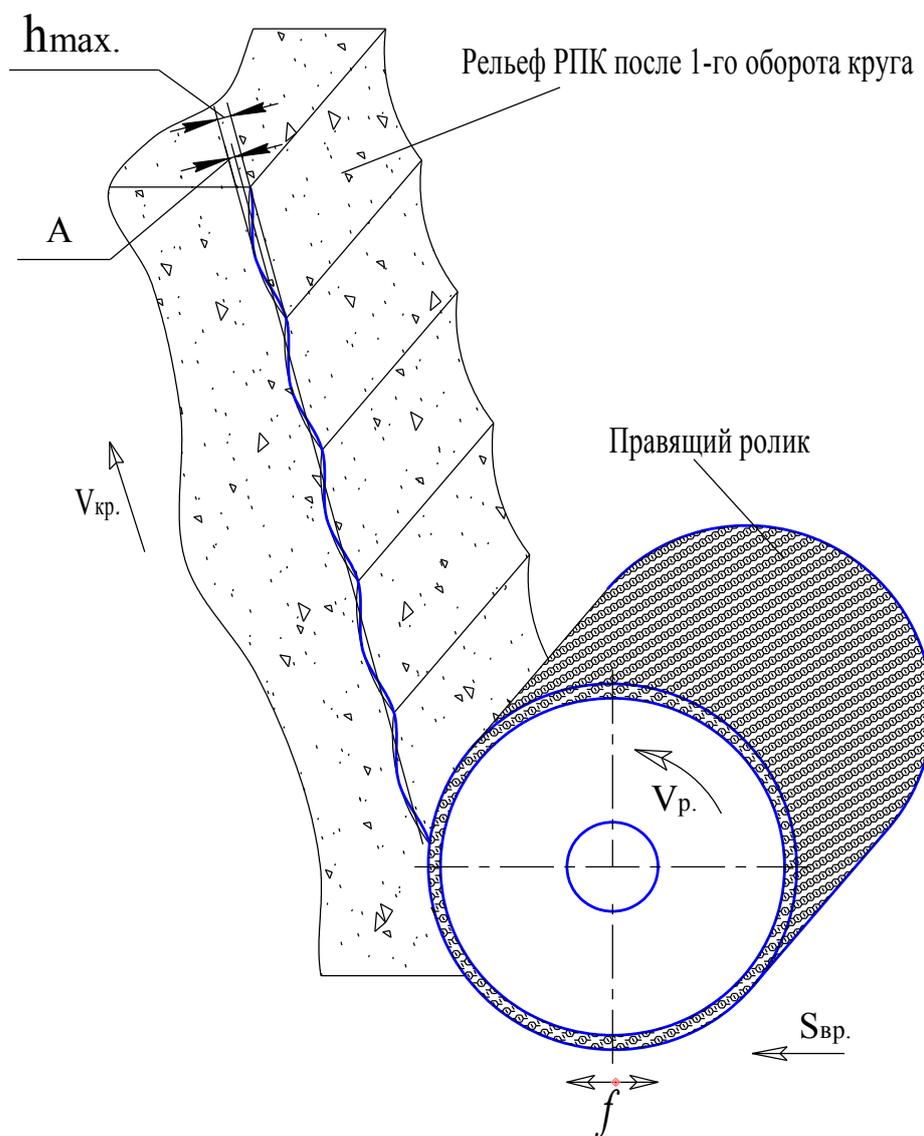


Рисунок 2.4 - Схема формирования рельефа РПК после первого оборота круга

На рисунке 2.4 показана схема формирования рабочей поверхности круга (РПК) при 1-м его обороте. Видно, какой след (дуга среза шлифовальных зерен

с поверхности круга) оставляет окружность правящего ролика при вибрационной правке. Также показана, какая максимальная высота получается после первого оборота круга. На рисунке 2.5 изображена схема формирования рабочей поверхности круга (РПК) при n -м его обороте. Видно, что максимальная высота рельефа круга уменьшается в зависимости от количества оборотов круга.

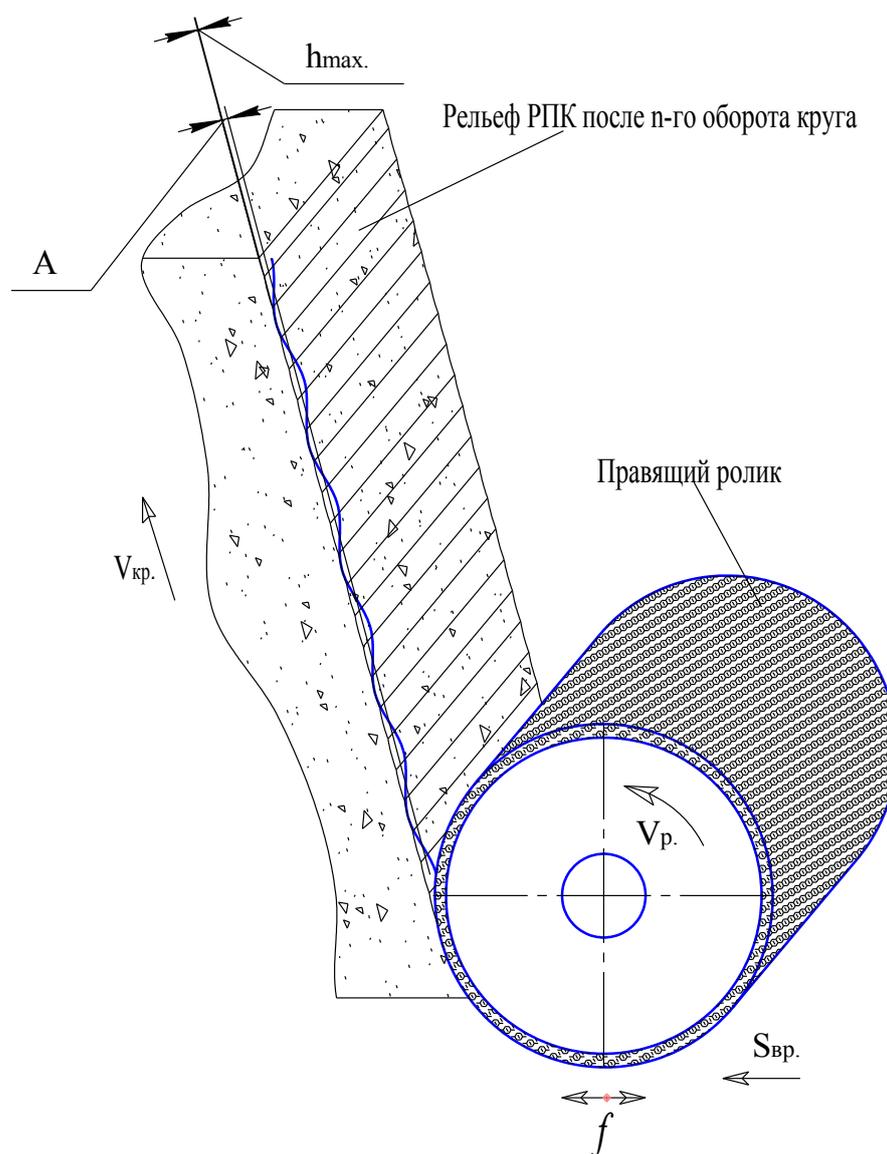


Рисунок 2.5 - Схема формирования рельефа РПК после n -го оборота круга

Правка шлифовального круга методом шлифования с врезной подачей и наложением радиальных вибрационных полей на правящий инструмент АР, как говорилось ранее, осуществляется за счет перемещения правящего АР в

радиальном направлении к центру шлифовального круга. Следовательно, правящий инструмент AP перемещается по траектории, которая закручивается в спираль к центру шлифовального круга. Так как минутная врезная подача правящего AP $S_{вр.}$ измеряется в мм/мин., то ее необходимо преобразовать в подачу на оборот шлифовального круга мм/об.. Значит, перемещение AP в радиальном направлении будет зависеть от вращения шлифовального круга. Преобразование выглядит следующим образом:

$$S'_{вр.} = \frac{S_{вр.}}{n_{кр.}}; \quad (2.18)$$

где $S_{вр.}$ – врезная подача правящего AP, мм/мин; $n_{кр.}$ – частота вращения шлифовального круга, об/мин.

При правке шлифовального круга с поперечной (врезной) подачей, его диаметр окружности $D_{кр.}$ уменьшается с каждым оборотом круга, тогда можно получить зависимость, как уменьшается диаметр $D^z_{кр.}$ шлифовального круга при его вращении:

$$D^z_{кр.} = D_{кр.} - 2 \cdot (z-1) \cdot S'_{вр.}; \quad (2.19)$$

где $D_{кр.}$ – начальный диаметр шлифовального круга перед его правкой, мм; z – число оборотов шлифовального круга при его правке, которое принимается численно – 1, 2, 3, $m+1$, где соответственно 1-й, 2-й, 3-й, ($m+1$)-й оборот круга; $S'_{вр.}$ – врезная подача правящего AP, мм/об.

Следовательно, при уменьшении диаметра окружности шлифовального круга, уменьшается и ее длина, которая представлена в виде выражения:

$$\Delta L^z = \pi \cdot [D_{кр.} - 2 \cdot (z-1) \cdot S'_{вр.}]; \quad (2.20)$$

Для того чтобы выяснить, как будет начинаться траектория движения окружности правящего AP после 1-го и последующих оборотов круга, необходимо длину окружности шлифовального круга разделить на шаг P . Определим, сколько полных шагов ϵ содержит траектория лежащая на окружности шлифовального круга при данном его обороте, это выражение будет выглядеть следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L^z}{P}; \quad (2.21)$$

Подставляя выражение (2.20) и (2.15) в (2.21) получим выражение определяющее число полных шагов P :

$$\varepsilon = \frac{[D_{кр.} - 2 \cdot (z-1) \cdot S'_{вр.}] \cdot 60 \cdot f}{n_{кр.} \cdot D_{кр.}}; \quad (2.22)$$

где $D_{кр.}$ – диаметр шлифовального круга перед его правкой, мм; z – количество оборотов шлифовального круга при его правке, которое принимается численно равное – 1, 2, 3, $m+1$, где соответственно 1-й, 2-й, 3-й, ($m+1$)-й оборот круга; $S'_{вр.}$ – врезная подача правящего АР, мм/об; f – частота радиальных вибраций ролика, Гц.

Результат значения ε , всегда получается в виде десятичной дроби. Целая часть дроби показывает, сколько полных шагов имеет траектория движения окружности ролика на длине окружности шлифовального круга, а дробная (остаток ΔP) – показывает какую часть от шага P она содержит. Таким образом, при последующих оборотах круга синусоида будет начинаться не с полного шага, а с части от шага, то есть $P - \Delta P$.

Следует определить изменение фазы φ данной траектории, которую можно получить из соотношения:

$$\varphi = \Delta P \cdot 2 \cdot \pi; \quad (2.22)$$

В данном случае, траектория после первого и последующих оборотах круга будет смещена на величину фазы φ . Но траектория движения ролика не только смещается она еще перемещается к центру шлифовального круга, то есть, как показано выше, она располагается по спирали. Следовательно, уравнения (2.7) и (2.17) требуют дополнения, то есть смещения на фазу φ и смещение к центру круга $(D_{кр.} - D_{кр.}^z)/2 \cdot 10^3$. Тогда уравнение окружности ролика будет выглядеть следующим образом:

$$L_{\text{кр}} = \left(\frac{d_{\text{р.}}}{2} - A \right) - \left(\frac{D_{\text{кр.}} - D_{\text{кр.}}^z}{2 \cdot 10^3} \right) - \sqrt{\left(\frac{d_{\text{р.}}}{2} \right)^2 - \left[\lambda - \frac{n_{\text{кр.}} \cdot D_{\text{кр.}} \cdot \{\pi \cdot (k \cdot 4 + 3) - 2 \cdot \varphi\}}{2,4 \cdot 10^5 \cdot f} \right]^2}; \quad (2.23)$$

Подставим в уравнение (2.23) выражение (2.19) и (2.18) получим:

$$L_{\text{кр}} = \left(\frac{d_{\text{р.}}}{2} - A \right) - \left(\frac{(z-1) \cdot S_{\text{вр.}}}{n_{\text{кр.}} \cdot 1 \cdot 10^3} \right) - \sqrt{\left(\frac{d_{\text{р.}}}{2} \right)^2 - \left[\lambda - \frac{n_{\text{кр.}} \cdot D_{\text{кр.}} \cdot \{\pi \cdot (k \cdot 4 + 3) - 2 \cdot \varphi\}}{2,4 \cdot 10^5 \cdot f} \right]^2}; \quad (2.24)$$

где $d_{\text{р.}}$ – диаметр окружности правящего ролика, м; A – амплитуда колебания правящего инструмента, м; $D_{\text{кр.}}$ – диаметр шлифовального круга перед его правкой, мм; z – количество оборотов шлифовального круга при его правке, которое принимается численно – 1, 2, 3, $m + 1$, где соответственно 1-й, 2-й, 3-й, $(m + 1)$ -й оборот круга; $S_{\text{вр.}}$ – врезная подача правящего АР, мм/мин; f – частота радиальных вибраций ролика, Гц; $n_{\text{кр.}}$ – частота вращения шлифовального круга, об/мин;

под параметром k понимается k -е положение окружности ролика на заданном интервале участка λ шлифовального круга, которое численно принимается $k = 1, 2, 3, m + 1$; соответственно 1-е, 2-е, 3-е, $(m + 1)$ -е положение окружности ролика; φ – фаза смещения траектории и окружности ролика, рад.

Уравнение траектории выглядит следующим образом:

$$F(\lambda) = A \cdot \sin \left(\frac{1,2 \cdot 10^5 \cdot f}{n_{\text{кр.}} \cdot D_{\text{кр.}}} \cdot \lambda + \varphi \right) - \left(\frac{D_{\text{кр.}} - D_{\text{кр.}}^z}{2 \cdot 10^3} \right); \quad (2.25)$$

Подставим в уравнение (2.25) выражение (2.19) и (2.18) получим:

$$F(\lambda) = A \cdot \sin \left(\frac{1,2 \cdot 10^5 \cdot f}{n_{\text{кр.}} \cdot D_{\text{кр.}}} \cdot \lambda + \varphi \right) - \left(\frac{(z-1) \cdot S_{\text{вр.}}}{n_{\text{кр.}} \cdot 1 \cdot 10^3} \right); \quad (2.26)$$

где A – амплитуда колебания правящего инструмента, м; $D_{\text{кр.}}$ – диаметр шлифовального круга перед его правкой, мм; z – количество оборотов шлифовального круга при его правке, которое принимается численно – 1, 2, 3, $m, m + 1$, где соответственно 1-й, 2-й, 3-й, m -й, $(m + 1)$ -й оборот круга; $S_{\text{вр.}}$ – врезная подача правящего АР, мм/мин; f – частота радиальных вибраций ролика, Гц; $n_{\text{кр.}}$ – частота вращения шлифовального круга, об/мин; φ – фаза

смещения траектории и окружности ролика, рад; λ – заданный интервал участка шлифовального круга, м.

В окончательном виде уравнение траектории движения окружности ролика и само уравнение окружности ролика, которое полностью зависит от первого, представлены выше под номерами (2.26) и (2.24) соответственно.

Рассмотрим пример по формированию микрорельефа круга на основе полученных выражений (2.26) и (2.24).

Исходные данные процесса вибрационной правки шлифовального круга:

Частота колебаний правящего АР: $f = 20000, 22000$ Гц;

Амплитуда колебания правящего АР: $A = 20 \cdot 10^{-6}$ м;

Диаметр шлифовального круга: $D_{кр.} = 400$ мм;

Скорость шлифовального круга при его правке: $V_{кр.} = 40$ м/с;

Частота вращения шлифовального круга при его правке: $n_{кр.} = 1910$ об/мин;

Диаметр окружности правящего АР: $d_p = 100 \cdot 10^{-3}$ м;

Врезная минутная подача правящего АР: $S_{вр.} = 1$ мм/мин;

Врезная подача правящего ролика

на оборот шлифовального круга: $S'_{вр.} = 5,236 \cdot 10^{-4}$ мм/об;

Построение траекторий перемещения окружности ролика в программной среде MathCAD 11 с использованием уравнения (2.26), показано на рисунке 2.6.

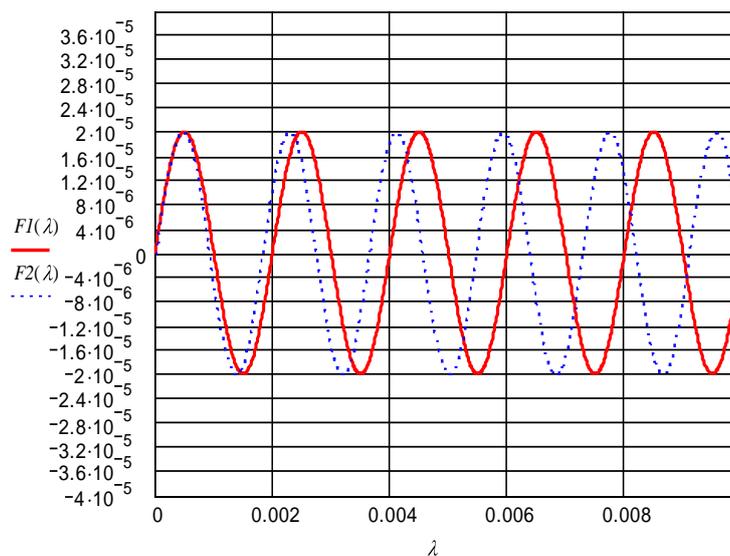


Рисунок 2.6 - График траекторий при разной частоте вибрации АР

На рисунке 2.6 видно, что чем больше частота вибрации АР, тем больше следов (дуга контакта АР со шлифовальным кругом) оставит окружность ролика, следовательно, максимальная высота стабильного микрорельефа будет меньше.

Для построения траектории перемещения окружности ролика и перемещение окружности АР в MathCAD 11, используем уравнения (2.26) и (2.24), получим график формирования рельефа РПК при первом обороте круга (см. рисунок 2.7).

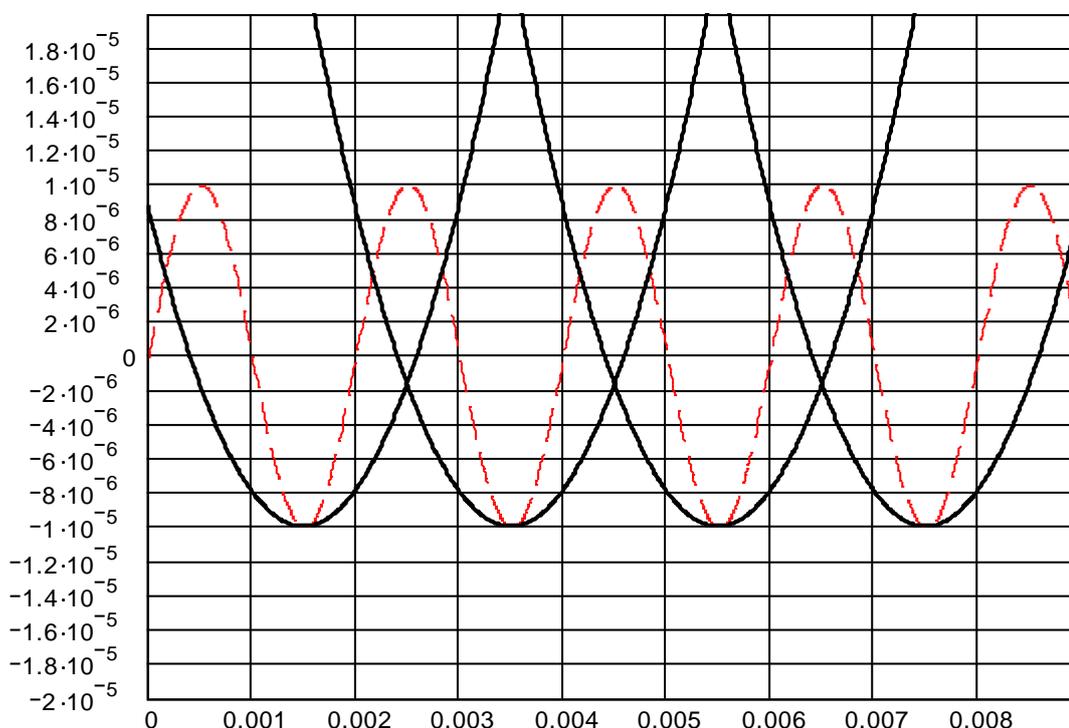


Рисунок 2.7 - Формирование рельефа РПК при 1-м обороте круга

Как видно из рисунка 2.7 перемещение окружности ролика полностью зависит от его траектории перемещения, как и говорилось ранее. Черной утолщенной линией показана окружность ролика, а тонкой штриховой его траектория перемещения. Пересечение окружностей ролика дает возможность оценить, какой микрорельеф получается при правке шлифовального круга. То есть в нижней части рисунка 2.7, это микрорельеф шлифовального круга после

1-го поворота.

Такое формирование рельефа, как показано на рисунке 2.7, возможно лишь в том случае, когда частота вибрации ролика превышает ультразвуковую частоту, то есть от 20 кГц и выше, но не надо забывать об условии (2.30), которое будет рассмотрено ниже.

Если частота вибрации ролика ниже ультразвуковой частоты, то есть $f_p < 12$ кГц, то уравнение окружности (2.24) будет несколько изменено. Когда выполняются условие, если шаг P траектории движения ролика, больше длины контакта окружности ролика с окружностью шлифовального круга $l_{кон.}$, то вместо параметра d_p в уравнении (2.24), необходимо ввести параметр $d_{обк.}$, который определяется таким образом:

$$d_{обк.} = \frac{P^2 - (2 \cdot A)^2}{8 \cdot A}; \quad (2.27)$$

где P – шаг траектории движения ролика, м; A – амплитуда колебательного движения ролика, м.

Переход с параметра d_p на параметр $d_{обк.}$ необходим, так как при правке шлифовального круга в низкочастотном режиме колебания ролика, рельеф РПК формируется не за счет следа окружности ролика, а за счет обката окружности ролика по траектории на поверхности круга.

Условие для перехода на параметр $d_{обк.}$:

$$P > l_{кон.}; \quad (2.28)$$

где $l_{кон.}$ – длина контакта окружности ролика с окружностью шлифовального круга, м; $l_{кон.} = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot (A \cdot d_p - 2 \cdot A^2)}$; A – амплитуда колебательного движения ролика, м; d_p – диаметр окружности ролика, м; P – шаг траектории движения ролика, м; A – амплитуда колебательного движения ролика, м.

На рисунке 2.8 схематично показано формирование РПК при низкочастотных вибрациях ролика. Формирование рельефа круга происходит, не по отпечатку окружности ролика, а за счет обката окружности ролика по его

траектории движения. Это связано с тем, что дуга контакта окружности ролика меньше, чем шаг P его траектории движения.

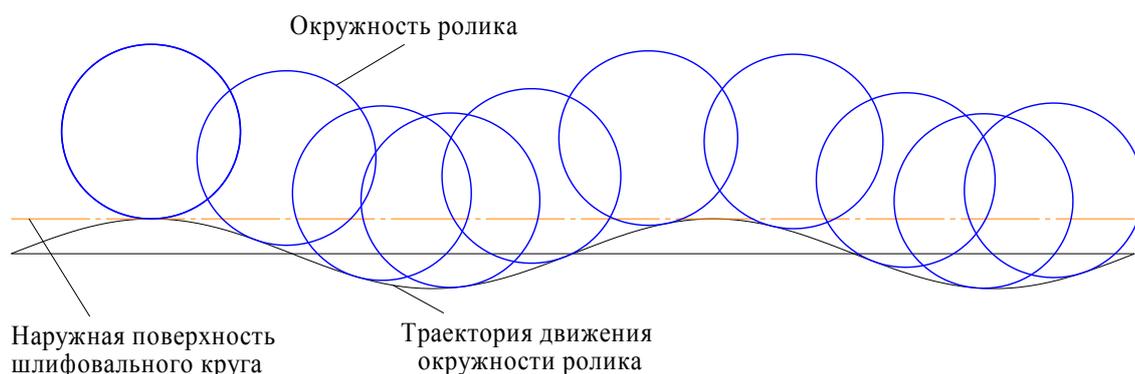


Рисунок 2.8 - Формирование рельефа РПК при низкочастотных колебаниях ролика

2.3 Механизм вибрационной правки алмазным роликом

При вибрационном резании, в частности вибрационной правки шлифовального круга, существует проблема, которую необходимо рассмотреть. Проблема, связанная с выбором режимов правки круга, то есть необходимо правильно выбрать скорость вращения шлифовального круга $V_{кр.}$ для правки и частоту радиальных колебаний правящего инструмента f , в данном случае ролика. Существует условие, при котором происходит процесс вибрационного резания (правки). Это условие связано со скоростью вращения шлифовального круга $V_{кр.}$ и частотой колебания правящего инструмента (АР) f . То есть скорость вращения шлифовального круга должна быть больше, чем скорость колебательного движения ролика. Если скорость вращения шлифовального круга $V_{кр.}$ оказывается равной $A \cdot 2 \cdot \pi \cdot f$ (где A – амплитуда колебания, м; f – частота собственных колебаний ролика, Гц), то окружность ролика будет постоянно контактировать с поверхностью шлифовального круга. При этом механизм характерный для вибрационной правки, полностью исчезает, и действует механизм обычной правки. Такая скорость вращения шлифовального круга при правке называется критической и может быть определена по формуле:

$$V_{\text{крит.}} = 2 \cdot \pi \cdot A \cdot f ; \quad (2.29)$$

Анализируя выше приведенную формулу (2.29) можно получить условие для вибрационной правки:

$$V_{\text{кр.}} > V_{\text{вibr.}} ; \quad (2.30)$$

где $V_{\text{кр.}}$ – скорость вращения шлифовального круга при правке, м/с; $V_{\text{вibr.}}$ – скорость колебательного движения ролика, м/с; $V_{\text{вibr.}} = 2 \cdot \pi \cdot A \cdot f$.

На рисунка 2.9 показан график зависимости скорости колебательного движения ролика $V(f)$ от частоты его вибрации f при разной амплитуде. По этому графику можно определить скорость колебательного движения ролика $V_{\text{вibr.}}$ по частоте колебаний ролика f , при разной амплитуде и заранее проверить условие (2.30), при котором осуществляется вибрационная правка. Следовательно, чем больше амплитуда колебания ролика A и его частота f , тем больше скорость колебательного движения ролика $V_{\text{вibr.}}$.

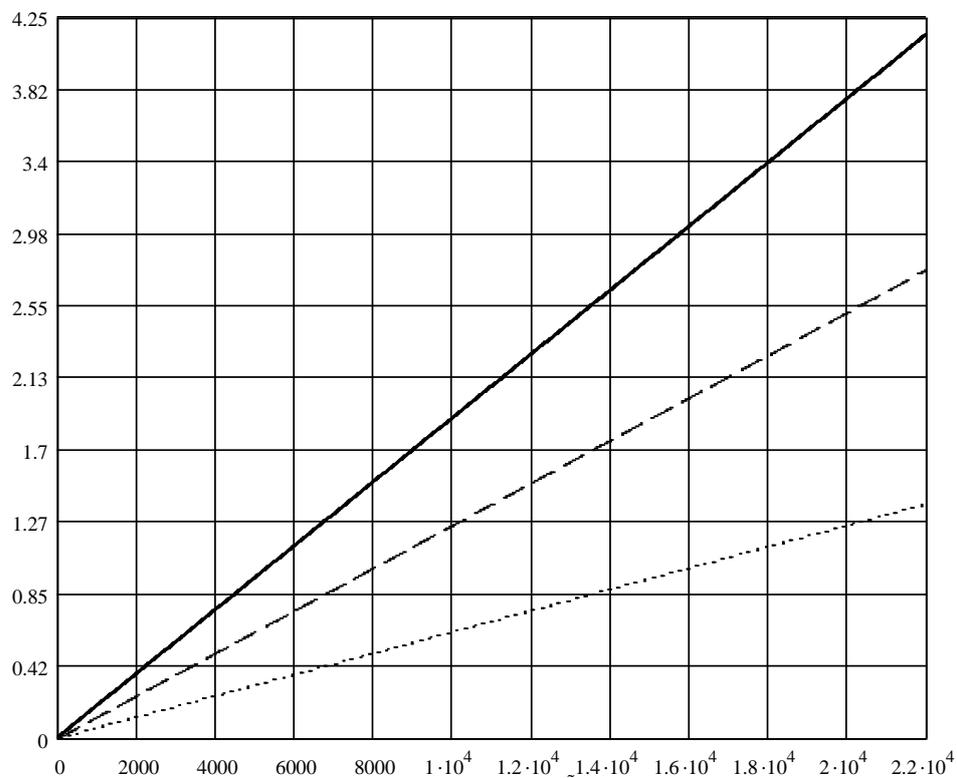


Рисунок 2.9 - График зависимости скорости колебательного движения ролика $V(f)$ от частоты его вибрации f при разной амплитуде

2.4 Исследование микрорельефа РПК при вибрационной правке алмазными роликами

Проведем анализ формирования рабочей поверхности шлифовального круга, при правке роликом с врезной подачей и наложением радиальных вибрационных полей. Для этого зададим, режимы правки, подходящие к реальным условиям операции абразивной обработки. Исследуем процесс правки шлифовального круга, при различных колебаниях правящего инструмента АР.

Исходные данные для проведения исследования правки шлифовального круга в вибрационном режиме:

Частота колебаний правящего АР: $f = 400, 2000, 10000, 20000$ Гц;

Амплитуда колебания правящего АР: $A = 15 \cdot 10^{-6}$ м;

Диаметр шлифовального круга: $D_{кр.} = 400$ мм;

Скорость шлифовального круга при его правке: $V_{кр.} = 40$ м/с;

Частота вращения шлифовального круга при его правке: $n_{кр.} = 1910$ об/мин;

Диаметр окружности правящего АР: $d_p = 100 \cdot 10^{-3}$ м;

Врезная минутная подача правящего АР: $S_{вр.} = 1$ мм/мин;

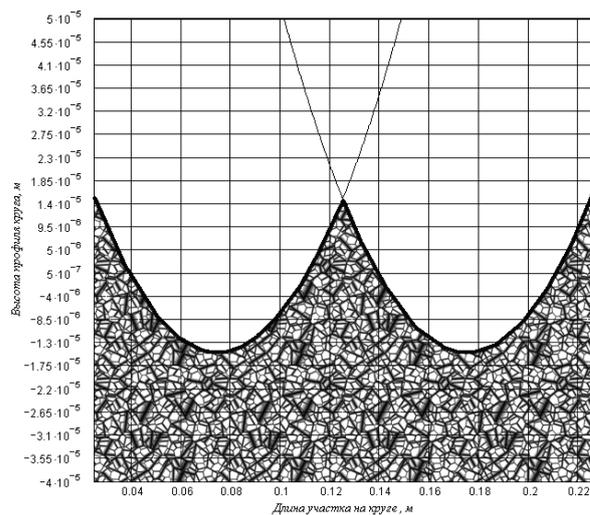
Врезная подача правящего ролика
на оборот шлифовального круга: $S'_{вр.} = 5,236 \cdot 10^{-4}$ мм/об;

Цель исследования:

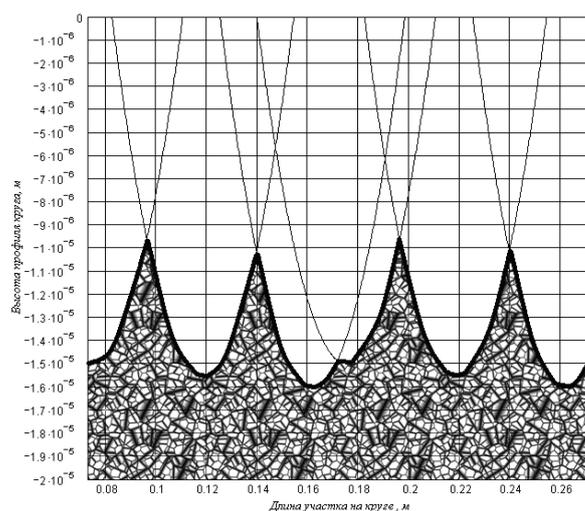
1) Понять механизм правки шлифовального круга, роликом в вибрационном режиме;

2) Выявить для каждой исследуемой частоты колебания ролика, число оборотов круга, при котором будет формироваться стабильный микрорельеф круга.

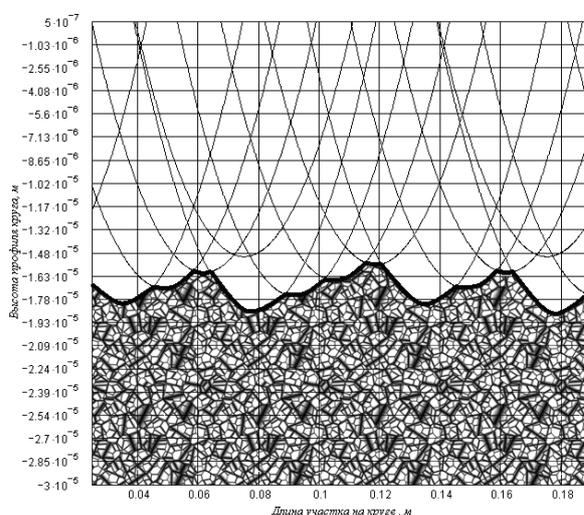
3) Определить максимальную высоту микронеровностей h_{max} РПК за первый оборот круга, за третий оборот круга и максимальную высоту при установившемся процессе правки (формирование стабильного микрорельефа на РПК);



а



б

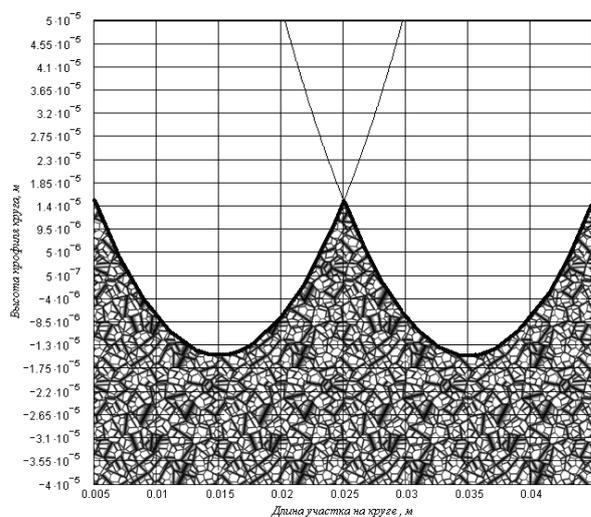


в

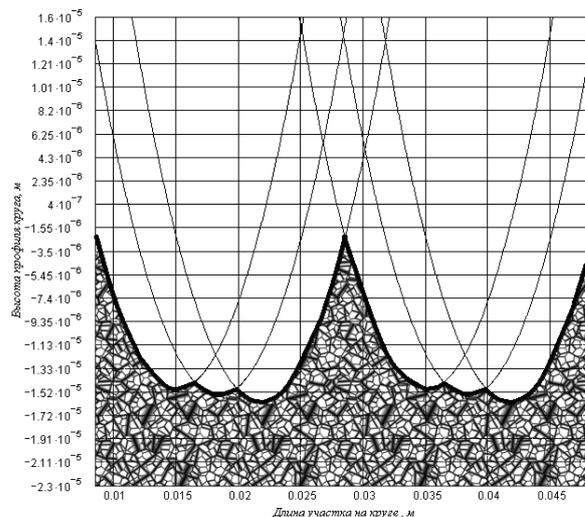
Рисунок 2.10 - Микрорельеф шлифовального круга при правке роликом с частотой радиальных колебаний равной 400 Гц; а – рельеф круга после 1-го оборота, б - рельеф круга после 3-го оборота, в - рельеф круга после 8-го оборота

На рисунке 2.10 видно, что после первого оборота шлифовального круга, максимальная высота рельефа круга равна 30 мкм, после третьего оборота круга 7 мкм, после восьмого оборота круга 3 мкм. Формирование рабочей поверхности круга (РПК) происходит медленно. До стабильного профиля РПК, шлифовальный круг должен совершить более 7 оборотов. Ширина микронеровностей после 8-го оборота круга составляет 60 мкм. Число

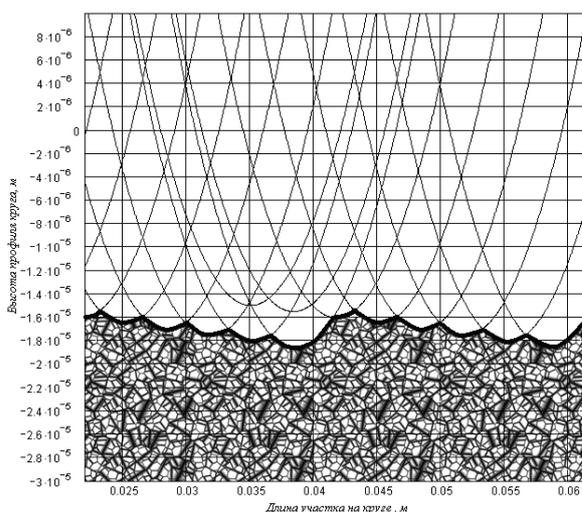
микронеровностей на поверхности круга после 8-го оборота круга равно 12.



а



б

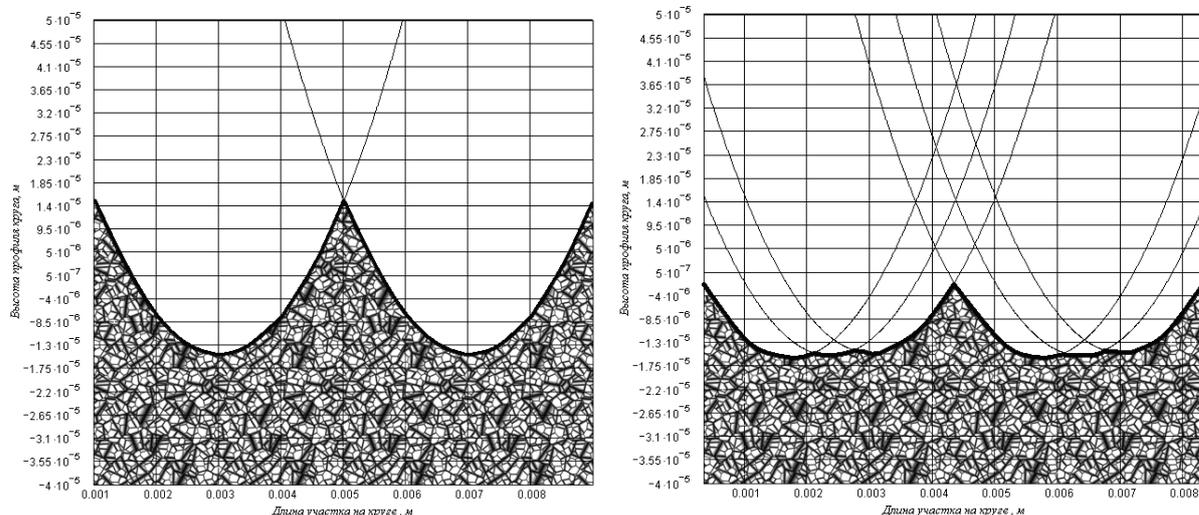


в

Рисунок 2.11 - Микрорельеф шлифовального круга при правке роликом с частотой радиальных колебаний равной 2000 Гц; а – рельеф круга после 1-го оборота, б - рельеф круга после 3-го оборота, в - рельеф круга после 8-го оборота

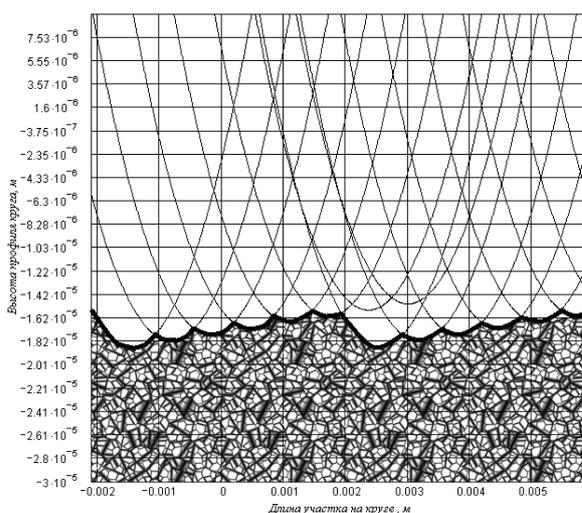
На рисунке 2.11 видно, что после первого оборота шлифовального круга, максимальная высота рельефа круга равна 30 мкм, после третьего оборота круга 15 мкм, после восьмого оборота круга 3 мкм. Формирование рабочей

поверхности круга (РПК) происходит медленно. До стабильного профиля РПК, шлифовальный круг должен совершить более 6 оборотов. Ширина микронеровностей после 8-го оборота круга составляет 20 мкм. Число микронеровностей на поверхности круга после 8-го оборота круга равно 62.



а

б

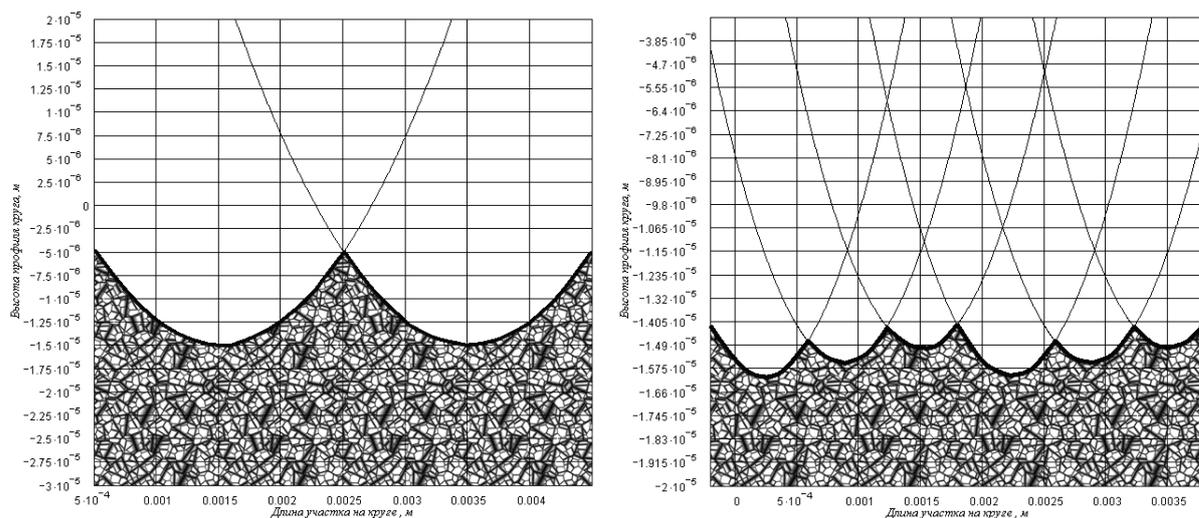


в

Рисунок 2.12 - Микрорельеф шлифовального круга при правке роликом с частотой радиальных колебаний равной 10000 Гц; а – рельеф круга после 1-го оборота, б - рельеф круга после 3-го оборота, в - рельеф круга после 8-го оборота

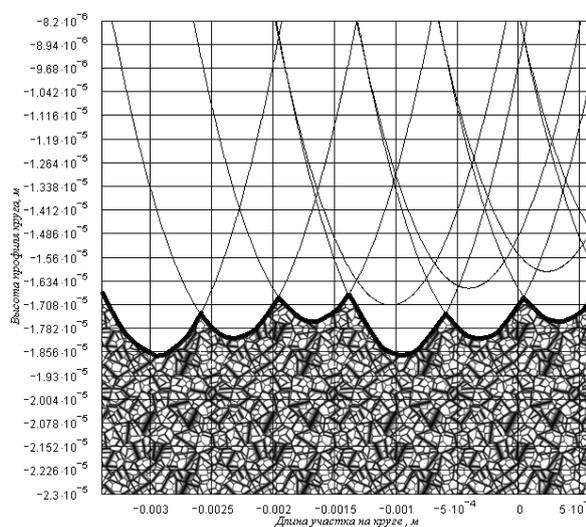
На рисунке 2.12 видно, что после первого оборота шлифовального круга,

максимальная высота рельефа круга равна 30 мкм, после третьего оборота круга 15 мкм, после восьмого оборота круга 3 мкм. Формирование рабочей поверхности круга (РПК) происходит средне. До стабильного профиля РПК, шлифовальный круг должен совершить более 6 оборотов. Ширина микронеровностей после 8-го оборота круга составляет 4 мкм. Число микронеровностей на поверхности круга после 8-го оборота круга равно 314.



а

б



в

Рисунок 2.13 - Микрорельефы шлифовального круга при правке роликом с частотой радиальных колебаний равной 20000 Гц; а – рельеф круга после 1-го оборота, б - рельеф круга после 3-го оборота, в - рельеф круга после 8-го оборота

На рисунке 2.13 видно, что после первого оборота шлифовального круга, максимальная высота рельефа круга равна 10 мкм, после третьего оборота круга 2 мкм, после восьмого оборота круга 2 мкм. Формирование рабочей поверхности круга (РПК) происходит быстро. До стабильного профиля РПК, шлифовальный круг должен совершить около 3 оборотов. Ширина микронеровностей после 8-го оборота круга составляет 2 мм. Число микронеровностей на поверхности круга после 8-го оборота круга равно 628.

По данным исследования, формирования микрорельефа шлифовального круга, то есть по максимальным высотам микронеровностей РПК в зависимости от числа оборотов шлифовального круга, построим графики рис. 2.14.

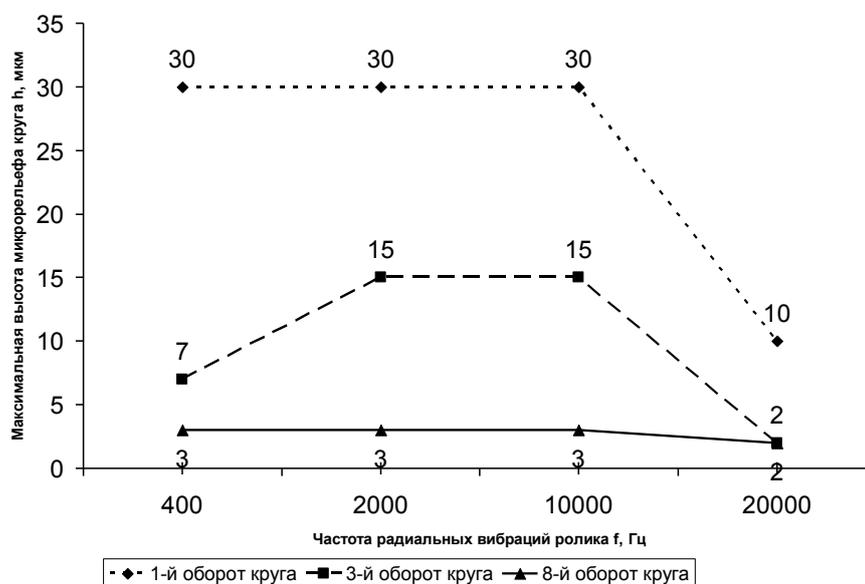


Рисунок 2.14 - График максимальных высот микрорельефа РПК при заданных числах оборота круга

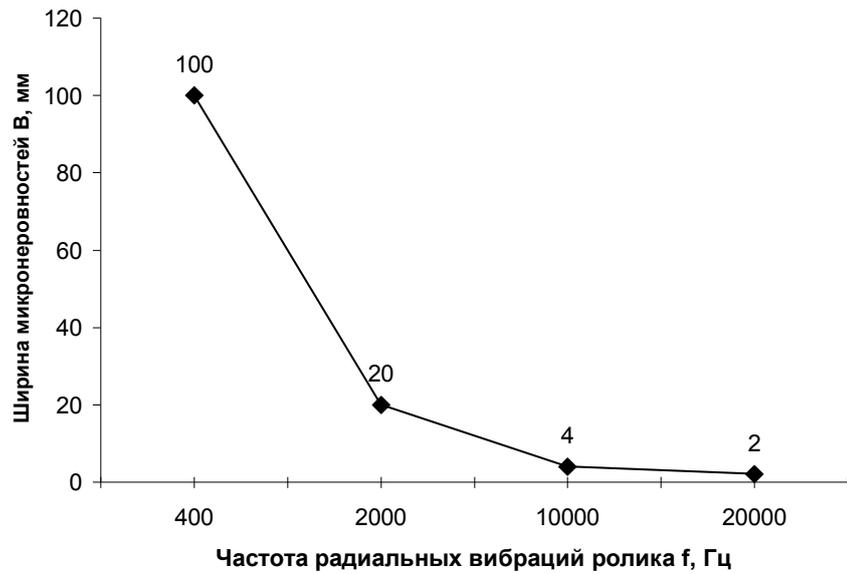


Рисунок 2.15 - График ширины микронеровностей на РПК после восьмого оборота круга

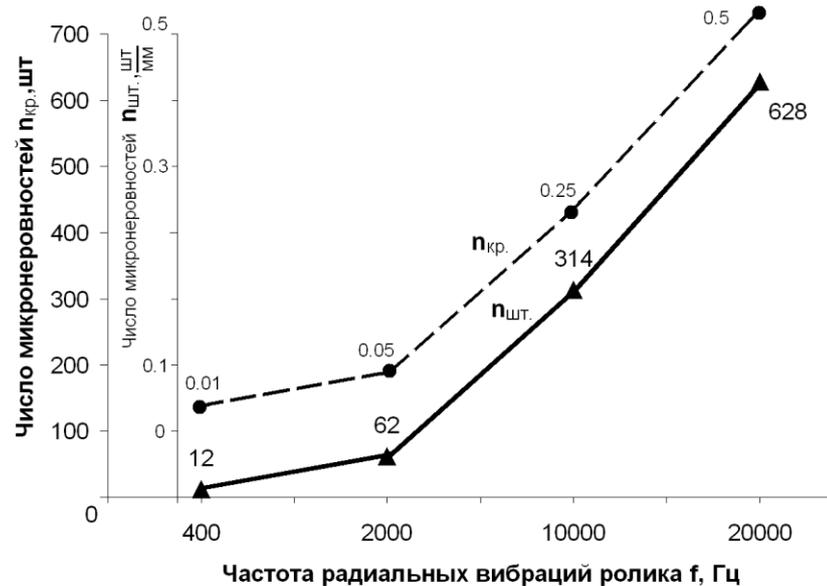


Рисунок 2.16 - График числа микронеровностей на длине окружности шлифовального круга после восьмого оборота круга

Из рисунка 2.14 следует, что максимальная высота микрорельефа рабочей поверхности круга полученная при разных числах оборота круга, зависит от частоты колебания правящего ролика. Следовательно, чем больше частота колебания правящего ролика f , тем меньше величина максимальной высоты

h_{\max} микронеровностей шлифовального круга.

На рисунке 2.15 показан график, который отражает, изменение ширины микронеровностей на РПК в зависимости от частоты радиальных колебаний ролика после восьмого оборота круга. Видно, что чем больше частота радиальных колебаний ролика, тем меньше ширина микрорельефа круга.

На рисунке 2.16 показан график, который позволяет оценить, как изменяется число микронеровностей на РПК в зависимости от частоты радиальных колебаний ролика после восьмого оборота круга. Следовательно, чем больше частота радиальных колебаний ролика, тем больше число микронеровностей на рабочей поверхности круга.

Результаты исследования формирования рабочей поверхности круга, при вибрационной правке сведем в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Результаты исследования вибрационной правки шлифовального круга роликом

Основные характеристики при правке круга роликом	Частота вибрации ролика f , Гц			
	400	2000	10000	20000
Максимальная высота микрорельефа круга h_{\max} , МКМ:				
После 1-го оборота круга	30	30	30	10
После 3-го оборота круга	7	15	15	2
После 8-го оборота круга	3	3	3	2
После установившегося процесса правки круга	3	3	3	2
Число оборотов круга, при котором будет формироваться стабильный микрорельеф круга z :	7	6	6	3
Ширина микронеровностей на РПК после восьмого оборота круга B , мм	60	20	4	2
Число микронеровностей на РПК после восьмого оборота круга	12	62	314	628
Время от начала формирования рельефа до образования стабильного микрорельефа круга t , с:	0,2	0,18	0,18	0,09

Применение вибрационной правки шлифовального круга роликом, существенно влияет на повышение стойкости круга, за счет формирования на его рабочей поверхности стабильного микрорельефа. Доказано [8], что при вибрационной правке шлифовального круга роликом, из-за переменной тангенциальной составляющей силы при правке, снижается температура в зоне правки.

Основная задача проведенного выше исследования, формирования рабочей поверхности круга, заключалась в том, чтобы аналитически показать процесс вибрационной правки и определить частоту колебания правящего ролика, при которой достигается наилучший результат ВП. Следовательно, при высокой скорости вращения шлифовального круга $V_{кр.} = 40$ м/с, наилучшим результатом характеризуется правка с частотой колебания правящего ролика равной $f = 20$ кГц, а наиболее плохим результатом – $f = 400$ Гц. Значит, при низкочастотных колебаний ролика скорость вращения круга должна быть меньше, чем при высокочастотных (ультразвуковых) колебаниях.

Из выше сказанного следует, что процессом вибрационной правки можно управлять, то есть заранее просчитывать, какой микрорельеф необходимо получить. Ведь стойкость шлифовального круга, зависит от того, какой микрорельеф получен при правке. Чем более развит микрорельеф круга после правки, тем выше его стойкость. После ВП некруглость шлифовального круга уменьшается. Круги правленные после вибрационной правки, дают лучший результат при шлифовании деталей, то есть шероховатость обработанных деталей ниже и стабильней.

2.5 Оптимизация режимов вибрационной правки шлифовальных кругов алмазным роликом

Оптимальный выбор режима вибрационной правки, дает возможность получить требуемые параметры микрорельефа РПК, которые в дальнейшем положительно отразятся на стойкости круга и шероховатости обрабатываемой детали. К таким параметрам следует отнести количество, ширину и высоту

микронеровностей получившихся в результате вибрационной правки. Для возможного оптимального выбора режима правки составим комплекс графиков, которые бы в целом определяли эффективность вибрационной правки. На рис. 2.17 изображен график оптимизации скорости шлифовального круга и частоты радиальных колебаний ролика. График поделен на зоны эффективности правки. Зона 1 пригодна для осуществления нормального процесса ВП шлифовального круга. Зона 2 позволяет осуществлять ВП шлифовального круга, на рабочих скоростях круга. Зона 3 не рекомендуемая для ВП.

Скорость вращения шлифовального круга, которая необходима для правки роликом с заданной частотой колебания, можно вычислить по формуле:

$$V_{кр.} = 1,989 \cdot 10^{-3} \cdot (f - 400) + 1; \quad (2.31)$$

где f – частота колебания ролика, Гц.

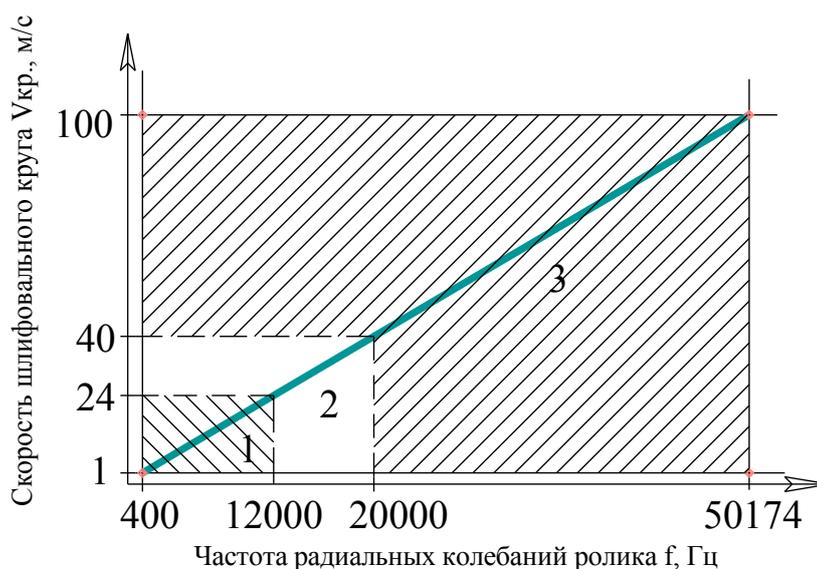


Рисунок 2.17 - График оптимизации скорости шлифовального круга и частоты радиальных колебаний ролика

Врезную подачу ролика, которая необходима для правки шлифовального круга при заданной скорости вращения, можно вычислить по формуле:

$$S_{вр.} = 2,4359 \cdot 10^{-2} \cdot (V_{кр.} - 1) + 0,05; \quad (2.32)$$

где $V_{кр.}$ – скорость шлифовального круга, м/с.

Объемный график по оптимизации режимов правки можно представить в виде рисунка 2.19.

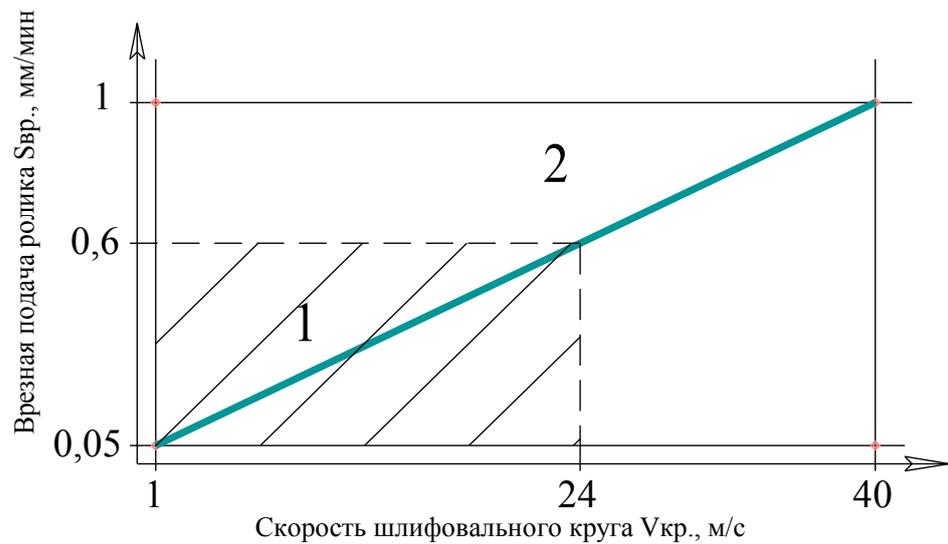


Рисунок 2.18 - График оптимизации врезной подачи ролика и скорости шлифовального круга

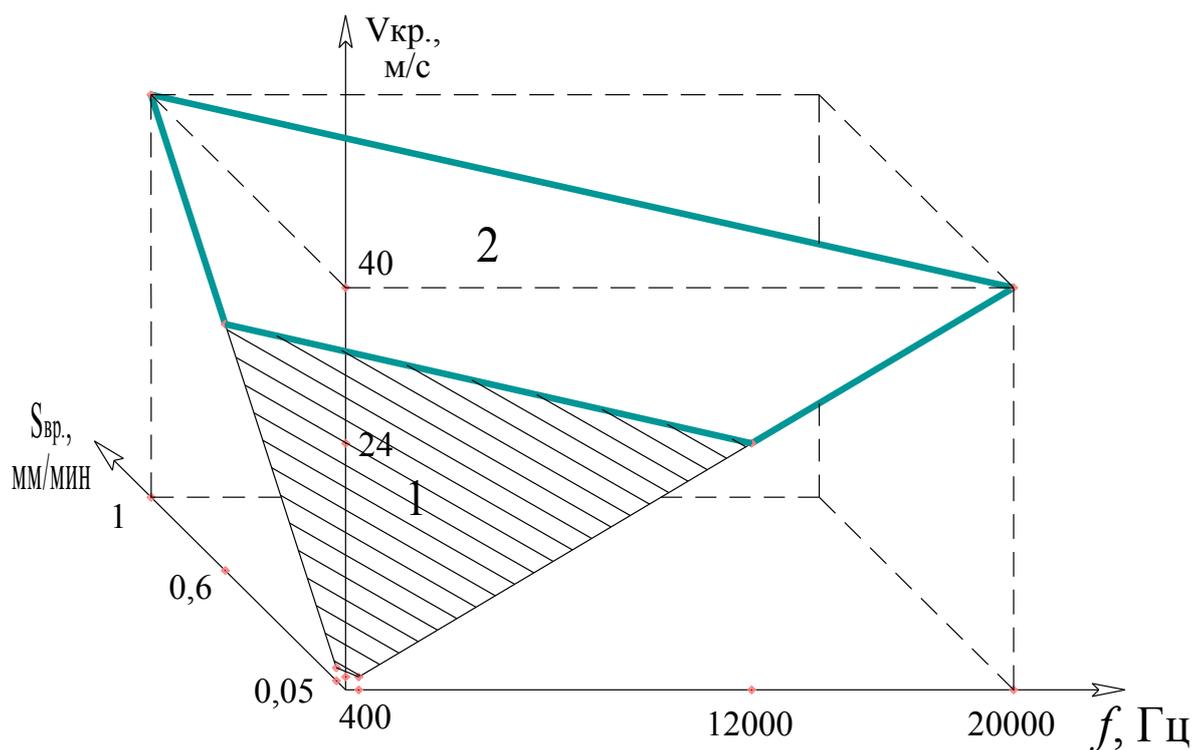


Рисунок 2.19 - Объемный график оптимизации режимов правки

Все параметры необходимые для осуществления процесса вибрационной

правки сведем в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 Режимы вибрационной правки алмазным роликом

Режим вибрационной правки алмазным роликом	Интервалы скорости шлифовального круга $V_{кр.}$, м/с				
	1 ÷ 10	11 ÷ 20	21 ÷ 30	31 ÷ 40	41 ÷ 100
Амплитуда колебаний ролика A , мкм	10	15	25	30	30
Скорость вращения правящего ролика $V_{р.}$, м/с	4	5	6	7	10
Диаметр наружной окружности правлящего ролика $d_{р.}$, мм	120	100	80	60	60
Глубина правки роликом t , мм	0,05	0,025	0,02	0,02	0,02

Алгоритм подбора режимов вибрационной правки алмазным роликом показан на рисунке 2.20.

В результате оптимизации режимов вибрационной правки был составлен комплекс графиков, по определению скорости шлифовального круга и врезной минутной подачи для правки. Предложен алгоритм по подбору режимов вибрационной правки шлифовальных кругов алмазным роликом.

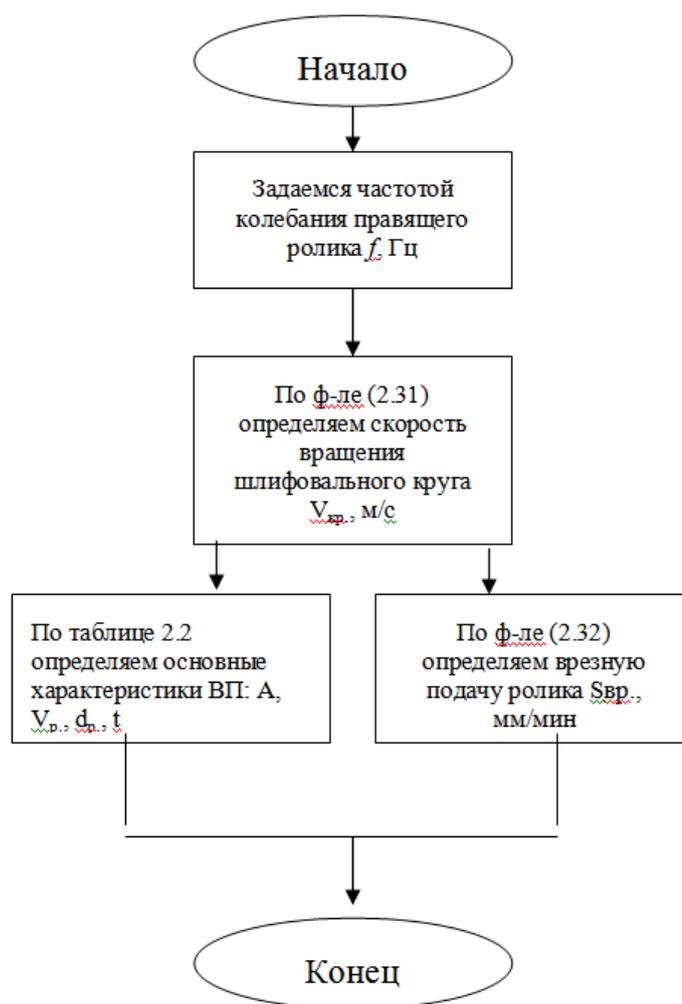


Рисунок 2.20 - Алгоритм подбора режимов вибрационной правки шлифовальных кругов алмазным роликом

3 Разработка конструкции устройств для вибрационной и прерывистой правки шлифовального круга алмазным роликом

3.1 Устройство для вибрационной правки кругов с механическим возбуждением вибраций

3.1.1 Описание устройства

Проанализировав недостатки известных устройств для вибрационной правки шлифовальных кругов алмазными роликами, разработано устройство позволяющее вести правку шлифовального круга независимо от подачи при правке (в отличие от а.с. №1684001, №1585130, №1484669) и не требующее дополнительного источника энергии (а.с. №1038209, №1502281) на основе положительного решения по заявке 2003 г. №114565/02. Схема устройства изображена на рисунке 3.1.

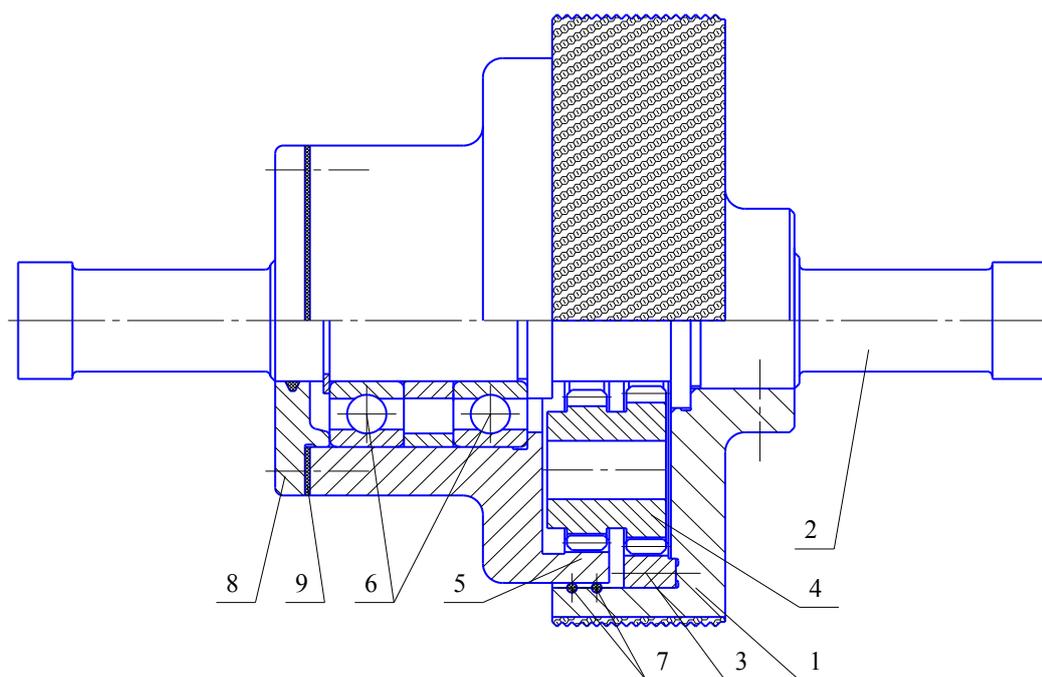


Рисунок 3.1 - Устройство для вибрационной правки

Устройство содержит правящий ролик 1, имеющий на рабочей поверхности алмазоносный слой, ведущую оправку 2. Зубчатое колесо 3, жестко соединенное с роликом 1, находится в зацеплении с блоком сателлита 4, который в свою очередь находится в зацеплении с неподвижным зубчатым

колесом 5. Так как блок сателлита никак не закреплен, то зазор между оправкой 2 и вершинами зубьев наибольшего сателлита не должен превышать 0,5 высоты зуба для того, чтобы предотвратить выпадения блока, при отсутствии вращения оправки. Устройство имеет также систему подшипников 6 и уплотнений 7. Зазор в подшипниках регулируется, за счет подкладывания между корпусом зубчатого колеса 5 и крышкой подшипника 8, регулировочных прокладок 9 (см. чертеж 05.36.472.СБ.9). Исследовательский вариант устройства устанавливается в центрах вместо заготовки, в производстве возможна установка ролика в специальное приспособление для правки.

3.1.2 Проектирование устройства

Работа устройства основана на принципе работы планетарного редуктора. Правящий ролик 1, получая вращение от ведущей оправки 2, приводит в движение блок сателлита 4, который, находясь в зацеплении с неподвижным зубчатым колесом 5, начинает вращаться вокруг оси ведущей оправки. Для определения орбитальной частоты вращения блока сателлита, изобразим кинематическую схему зацепления шестерен в предложенном устройстве (см. рисунок 3.2).

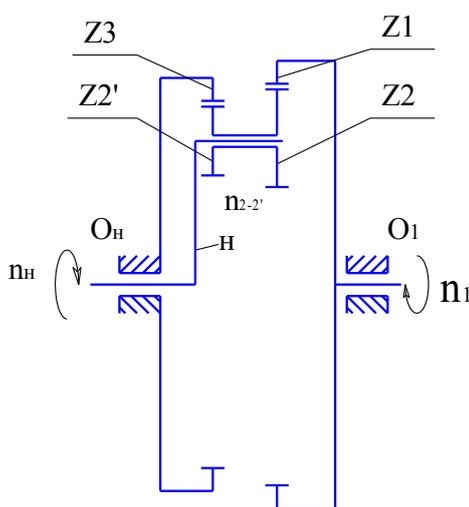


Рисунок 3.2 - Кинематическая схема предложенного устройства

Проведем кинематический анализ предложенного устройства для вибрационной правки шлифовального круга. Для определения передаточного

отношения $i_{1H}^{(3)}$ при закреплённом колесе 3 устройства, воспользуемся формулой Виллиса [18]. Передаточное отношение числа зубьев $Z2$ большей шестерни сателлита к числу зубьев $Z1$ внутреннего колеса 1 равно:

$$\frac{Z2}{Z1} = \frac{n_1 - n_H}{n_{2-2'} - n_H}; \quad (3.1)$$

где n_1 – частота вращения оправки, об/мин; $n_{2-2'}$ – частота вращения блока сателлита вокруг своей оси, об/мин; n_H – частота вращения водила (вращение блока сателлита вокруг оправки), об/мин.

Передаточное отношение числа зубьев $Z3$ неподвижного внутреннего зубчатого колеса 3, к числу зубьев $Z2'$ меньшего колеса сателлита 2' равно:

$$\frac{Z3}{Z2'} = \frac{n_{2-2'} - n_H}{-n_H}; \quad (3.2)$$

где $n_{2-2'}$ – частота вращения блока сателлита вокруг своей оси, об/мин; n_H – частота вращения водила (вращение блока сателлита вокруг оправки), об/мин.

В знаменателе формулы (3.2) не указана частота вращения n_3 внутреннего колеса 3 потому, что она равна нулю, так как внутреннее колесо закреплёно.

Перемножим выражения (3.1) на (3.2) получим:

$$\frac{Z2}{Z1} \cdot \frac{Z3}{Z2'} = \frac{n_1 - n_H}{-n_H}; \quad (3.3)$$

Упростим выражение (3.3) получим:

$$n_1 = n_H \cdot \left(1 - \frac{Z2}{Z1} \cdot \frac{Z3}{Z2'} \right); \quad (3.4)$$

Найдем передаточное отношение $i_{1H}^{(3)}$ при закреплённом колесе 3 устройства:

$$i_{1H}^{(3)} = \frac{n_H}{n_1} = \frac{1}{1 - \frac{Z2}{Z1} \cdot \frac{Z3}{Z2'}}; \quad (3.5)$$

Необходимо подобрать числа зубьев колес: $Z1$, $Z2$, $Z2'$, $Z3$ так, чтобы передаточное отношение $i_{1H}^{(3)}$ было как можно большим.

Расчет частоты вынужденных колебаний f устройства:

$$f = \frac{n_{\text{опр.}} \cdot i_{1H}^{(3)}}{60}; \quad (3.6)$$

где $n_{\text{опр.}}$ – частота вращения оправки, об/мин; $i_{1H}^{(3)}$ – передаточное отношение устройства.

Для подбора чисел зубьев такого планетарного механизма, необходимо чтобы выполнялись следующие условия [18]:

Условие соосности (когда геометрические оси ведущего и ведомого звеньев совпадают): $m \cdot (Z1 - Z2) = m \cdot (Z3 - Z2')$; $Z3 < Z1$, $Z2 > Z2'$;

Условие соседства. Проверять не надо, так как сателлит один;

Условие сборки (когда зубья каждого сателлита зашли в зацепление с обоями центральными колесами) $\frac{Z1+Z3}{k} = C$, где C – целое число, k – количество сателлитов.

Условие возможности размещения сателлита в устройстве.

$$\frac{m \cdot Z3}{2} - 2,125 \cdot m - \frac{D_{\text{опр.}}}{2} \geq m \cdot (Z2' + 2)$$

где m – модуль передач, мм; Принимаем $m=1,5$ мм; $Z3, Z2'$ – числа зубьев 3 и 2' колес соответственно; $D_{\text{опр.}}$ – диаметр оправки, мм.

$$\text{Условие, явления интерференции: } Z1 \geq \frac{(Z2)^2 - 34}{2 \cdot (Z2) - 34}; \quad Z3 \geq \frac{(Z2')^2 - 34}{2 \cdot (Z2') - 34};$$

Произведем подбор чисел зубьев $Z1, Z2, Z2', Z3$, таким образом, чтобы передаточное отношение $i_{1H}^{(3)}$ устройства увеличивалось, учитывая все выше приведенные условия. Рассчитаем для каждого передаточного отношения $i_{1H}^{(3)}$, частоту вынужденных колебаний f , полученные данные занесем в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Результаты подбора чисел зубьев устройства

№	Z1	Z2	Z2'	Z3	$i_{1H}^{(3)}$	n_p , об/мин	f , Гц	$D_{\text{рол.}}$, мм
1	62	21	20	61	30,24	1000	504	126
2	75	23	22	74	31,73	1000	530	155
3	87	26	25	86	35,66	1000	594	174
4	107	37	36	106	55	1000	917	206

3.1.3 Расчет упругих элементов

Упругими элементами в данной конструкции являются проточки, выполненные на оправке по обе стороны от основной конструкции рисунке 3.1. На рисунке 3.3 показана схема колебательной системы соответствующей конструкции.

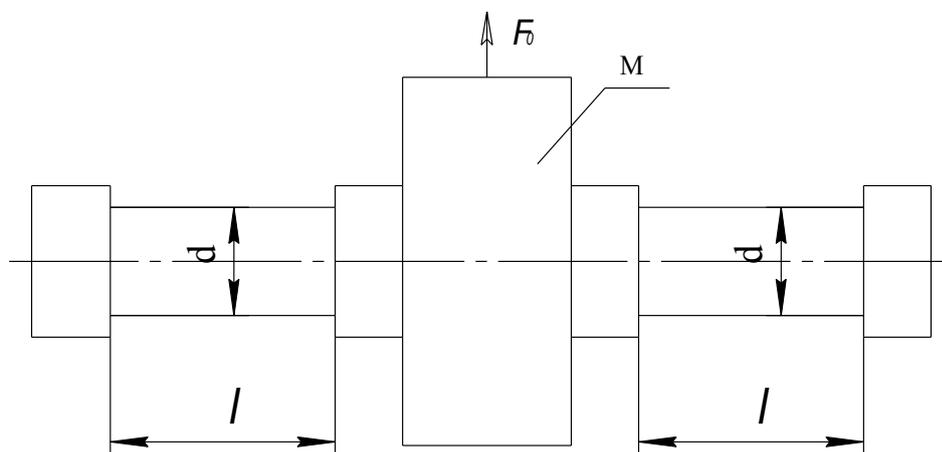


Рисунок 3.3 - Схема колебательной системы устройства для вибрационной правки роликом

Рассчитаем жесткость упругого элемента устройства [19] C по формуле:

$$C = \frac{3 \cdot E \cdot J}{l^3}; \quad (3.7)$$

где E – модуль упругости материала, Н/м^2 ; Принимаем модуль упругости для стали $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$; l – длина упругого элемента, м; J – осевой момент инерции сечения упругого элемента, м^4 ;

Для круглого сечения осевой момент инерции равен:

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{64}; \quad (3.8)$$

где d – диаметр упругого элемента, м.

Так как упругих элементов два, тогда в формуле (3.7) ее левую часть необходимо удвоить. Подставим в формулу (3.7) выражение (3.8) получим:

$$C' = \frac{6 \cdot \pi \cdot E \cdot d^4}{64 \cdot l^3}; \quad (3.9)$$

Определение частоты собственных колебаний системы f_0 по формуле:

$$f_0 = \sqrt{\frac{C'}{M}}; \quad (3.10)$$

где C' – жесткость двух упругих элементов, Н/м; M – масса колебательной системы, кг.

Амплитуда колебания A правящего ролика равна:

$$A = \frac{F_0}{M \cdot (\omega_0^2 - f^2)}; \quad (3.11)$$

где F_0 – возбуждающая сила, Н; M – масса колебательной системы, кг; f_0 – частота собственных колебаний системы, Гц; f – частота вынужденных колебаний системы, Гц.

Возбуждающая сила системы F_0 рассчитывается по формуле:

$$F_0 = D \cdot f^2; \quad (3.12)$$

где D – дисбаланс, образующийся в результате обращения блока сателлита вокруг оси оправки, кг·м; f – частота вынужденных колебаний сателлита, c^{-1} .

Расчет дисбаланса D , образующийся в результате обращения блока сателлита вокруг оси оправки:

$$D = m_c \cdot r; \quad (3.13)$$

где m_c – масса блока сателлита, кг; r – расстояние от оси блока сателлита до оси оправки, м.

Конструктивно принимаем модуль передач равный $m = 1,5$ мм; Чтобы уменьшить возбуждающую силу F_0 , необходимо уменьшить массу блока сателлита, путем сверления сквозного отверстия в центре блока (рисунок 3.1). Рассчитаем амплитуду колебания системы A по формулам приведенным выше и полученные результаты занесем в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 - Результаты расчета устройства для вибрационной правки

Название рассчитываемого параметра	Комбинации расчета			
	1	2	3	4
Числа зубьев устройства:				
Z1	62	75	87	107
Z2	21	23	26	37
Z2'	20	22	25	36
Z3	61	74	86	106
Передаточное отношение $i_{1n}^{(3)}$ устройства	30,24	31,73	35,66	55
Частота вынужденных колебаний f , Гц	504	530	594	917
Длины упругих элементов l , м	$40 \cdot 10^{-3}$	$40 \cdot 10^{-3}$	$40 \cdot 10^{-3}$	$40 \cdot 10^{-3}$
Диаметры упругих элементов d , м	$21 \cdot 10^{-3}$	$20 \cdot 10^{-3}$	$20 \cdot 10^{-3}$	$28 \cdot 10^{-3}$
Жесткость упругих элементов C' , Н/м	$1,6 \cdot 10^8$	$1,6 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^8$	$5,5 \cdot 10^8$
Масса колебательной системы M , кг	2,5	3	3,5	5
Частота собственных колебаний f_0 , Гц	8118	7337	6417	10550
Масса блока сателлита m_c , кг	0,2	0,22	0,27	0,5
Расстояние от оси блока сателлита до оси оправки r , м	$32,3 \times 10^{-3}$	$39 \cdot 10^{-3}$	$45 \cdot 10^{-3}$	$52,5 \times 10^{-3}$
Возбуждающая сила системы F_0 , Н	1641	2410	4287	22073
Амплитуда колебания правящего ролика A , м	$10 \cdot 10^{-6}$	$15 \cdot 10^{-6}$	$30 \cdot 10^{-6}$	$40 \cdot 10^{-5}$

В таблице 3.2 предложены результаты расчета основных геометрических и кинематических характеристик предложенного устройства для вибрационной правки абразивного круга. Анализируя выше приведенные результаты расчета, можно сказать, что наиболее подходящими комбинациями являются комбинации под номерами 1,2,3; так как амплитуда A и частота вынужденных колебаний f подходят для реальных условий правки, о которых говорилось в разделе 2. Но для проверки выбираем комбинацию 1.

Чтобы правильно выбрать соответствующий режим для вибрационной правки роликом, необходимо провести расчет по алгоритму, который предложен в конце главы 2. Входом в алгоритм служит частота вибрации ролика f .

Итак, частота вибрации правящего инструмента $f = 504$ Гц, тогда скорость вращения абразивного круга $V_{кр.}$ определим по формуле (2.31), получим $V_{кр.} = 1,2$ м/с. По формуле (2.32) определяем врезную подачу $S_{вр.} = 0,05$ мм/мин. По скорости круга $V_{кр.}$ выбираем основные параметры ВП:

Амплитуда колебания ролика $A = 10$ мкм;

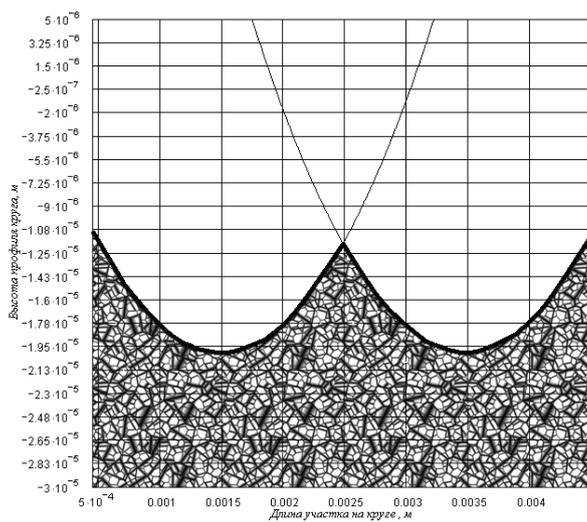
Скорость вращения правящего ролика $V_{р.} = 3$ м/с;

Диаметр правящего ролика $d_{р.} = 120$ мм;

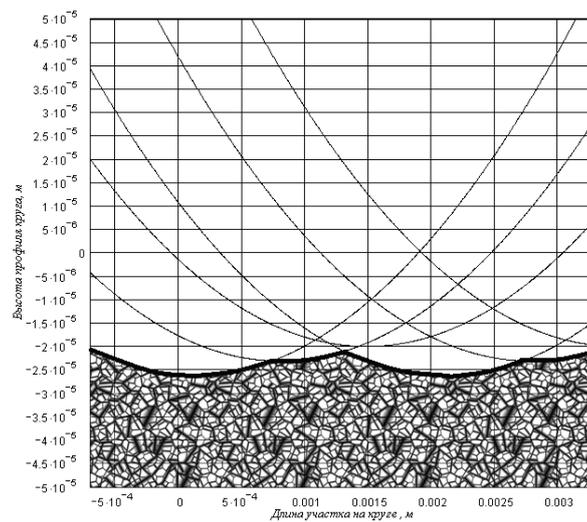
Глубина правки роликом $t = 0,05$.

Подставляя полученные параметры в программу MathCAD 11 по расчету рельефа круга, получаем результат (см. рисунок 3.4).

На рис. 3.4 видно, что после первого оборота абразивного круга, максимальная высота рельефа круга равна 8,5 мкм, после третьего оборота круга 4 мкм. Формирование рабочей поверхности круга (РПК) происходит быстро. До стабильного профиля РПК, абразивный круг должен совершить около 3 оборотов. Ширина микронеровностей после 3-го оборота круга составляет 2 мм. Количество микронеровностей на поверхности круга после 3-го оборота круга равно 628.



а



б

Рисунок 3.4 - Микрорельеф шлифовального круга при правке роликом с частотой радиальных колебаний равной 504 Гц; а – рельеф круга после 1-го оборота, б - рельеф круга после 3-го оборота

3.2 Устройство для прерывистой правки шлифовальных кругов

3.2.1 Описание устройства

Кроме описанного выше устройства для вибрационной правки, предложено другое устройство, которое в отличие от первого, позволяет получать рельеф на рабочей поверхности круга за счет периодического воздействия роликов на шлифовальный круг. Предложенное устройство не требует врезной подачи, то есть для правки шлифовального круга необходимо задаться: глубиной правки, частотой вращения круга и частотой вращения устройства.

На рисунке 3.5 изображено устройство, которое может быть представлено, как устройство для прерывистой правки шлифовального круга.

Устройство для правки шлифовального круга содержит неподвижный шпиндельный вал 1, на котором располагаются подшипники 13 для шкива 2 и подшипники 12 для корпуса 6. Подшипники 13 шкива 2 защищены, от проникновения грязи и СОЖ, крышкой 3. Корпус устройства 6 соединен со

шкивом 2 при помощи пальцев 10 и упругого элемента 9. На шпindelном валу 1 также располагается зубчатое колесо 7, вокруг которого перемещаются вал-шестерни 5. Вал-шестерни 5 располагаются в подшипниках 11 находящиеся в специальных отверстиях корпуса 6. На каждой вал-шестерни 5 (всего 6) располагаются правящие ролики 4. Правая часть устройства защищена от проникновения грязи и СОЖ кожухом 8.

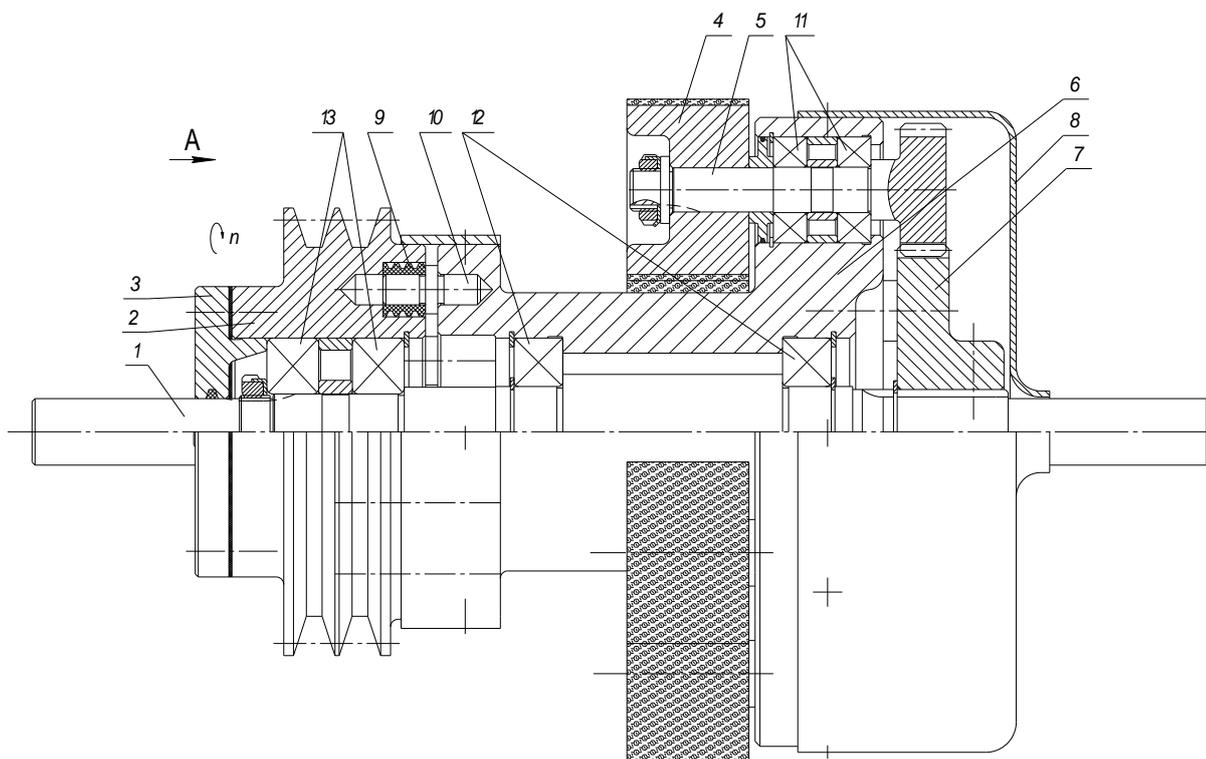


Рисунок 3.5 - Устройство для прерывистой правки шлифовального круга

Устройство работает следующим образом.

Шпindelный вал 1 правящего устройства, закрепляется с двух концов зажимными приспособлениями шлифовального станка и находится в покое. Шкиву 2 посаженного на подшипники 13 сообщают, с помощью ременной передачи, вращательное движение. Частота вращения устройства должна быть меньше и противоположна частоте вращения шлифовального круга. Шкив 2 через упругий элемент 9 и пальцы 10 передает вращение и крутящий момент корпусу 6 устройства. Вместе с корпусом 6 вращаются правящие ролики 4. Правящие ролики 4 находящиеся на вал-шестерни 5, получают также

дополнительное принудительное вращение, обкатываясь по зубчатому колесу 7, которое неподвижно, как и шпиндельный вал 1. Правящее устройство может работать с продольной подачей по отношению к периферии шлифовального круга. Правящему устройству необходимо задать глубину правки t и таким образом, правка осуществляется за счет периодического воздействия правящих роликов на шлифовальный круг.

3.2.2 Проектирование устройства

Работа устройства основана на принципе работы планетарного редуктора. На рисунке 3.6 изображена кинематическая схема устройства с роликами.

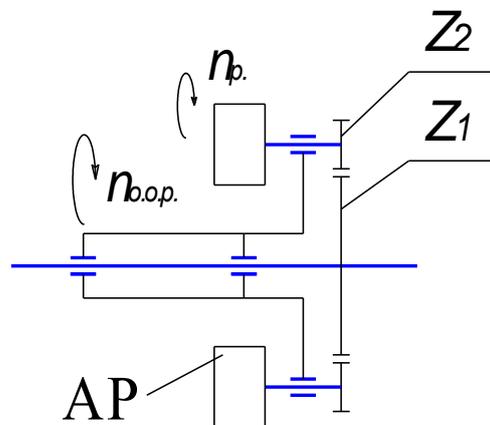


Рисунок 3.6 - Кинематическая схема правящего устройства

Принимаем конструктивно:

- Модуль зубчатой передачи $m = 2$ мм;
- Число зубьев колеса $Z_1 = 60$;
- Число зубьев вал-шестерен $Z_2 = 20$;
- Диаметры роликов $d_p = 60$ мм;
- Высота роликов $H = 40$ мм.

Расчет передаточного отношения i_y правящего устройства с алмазными роликами числа зубьев колеса Z_1 к числу зубьев вал-шестерни Z_2 равно:

$$i_y = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{60}{20} = 3; \quad (3.14)$$

Следовательно, частота вращения алмазных роликов n_p в 3 раза больше, чем частота вращения устройства $n_{o.o.p.}$.

Расчет частоты вращения роликов n_p , об/мин:

$$n_p = n_{o.o.p.} \cdot i_y; \quad (3.15)$$

Определение скорости вращения роликов V_p , м/с:

$$V_p = \frac{\pi \cdot d_p \cdot n_p}{1000 \cdot 60}; \quad (3.16)$$

где d_p – диаметр окружностей роликов, мм; $d_p = 60$ мм; n_p – частота вращения роликов, об/мин;

Определение скорости вращения устройства на окружности обката $V_{o.o.p.}$, м/с:

$$V_{o.o.p.} = \frac{\pi \cdot d_{o.o.p.} \cdot n_{o.o.p.}}{1000 \cdot 60}; \quad (3.17)$$

где $d_{o.o.p.}$ – диаметр окружности обката роликов, мм; $d_{o.o.p.} = 220$ мм; $n_{o.o.p.}$ – частота вращения устройства, об/мин;

Определение общей скорости вращения $V_{общ.}$, м/с:

$$V_{общ.} = V_p + V_{o.o.p.}; \quad (3.18)$$

Пусть частота вращения устройства равна $n_{o.o.p.} = 400$ об/мин, тогда общая скорость вращения устройства равна $V_{общ.} = 8,35$ м/с.

3.2.3 Кинематика правящего устройства с алмазными роликами

Рассмотрим процесс правки с применением разработанного нового правящего устройства с роликами для прерывистой правки шлифовального круга.

На рисунке 3.7 показана схема взаимодействия правящего устройства с роликами и круга при врезании.

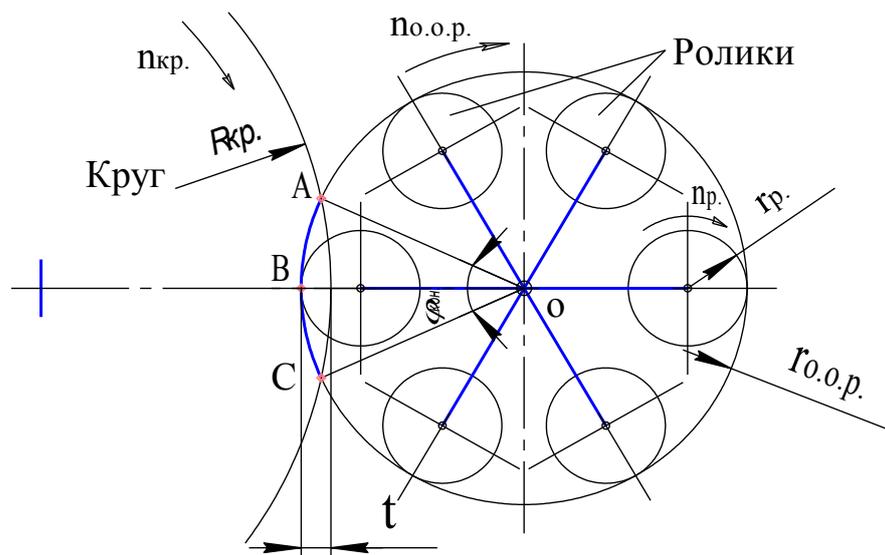


Рисунок 3.7 - Схема взаимодействия правящего устройства с роликами при врезании шлифовальный круг

Расчет кинематики данного устройства сводится к тому, чтобы определить угол поворота шлифовального круга ψ_c (угол среза поверхности круга) при врезании роликом в окружность шлифовального круга от начала его входа до выхода из зоны резания.

Исходными данными для расчета угла ψ_c служат: $R_{кр.}$ – радиус окружности шлифовального круга, мм; $r_{о.о.р.}$ – радиус окружности обката роликов, мм; r_p – радиус окружности ролика, мм; $n_{кр.}$ – частота вращения шлифовального круга, об/мин; $n_{о.о.р.}$ – частота вращения устройства с роликами по окружности обката, об/мин; n_p – частота вращения ролика, об/мин; t – глубина врезания окружности обката роликов в окружность шлифовального круга, мм.

Для определения угла контакта $\varphi_{кон.}$, который определяет дугу контакта ABC, необходимо рассмотреть рисунок 3.8.

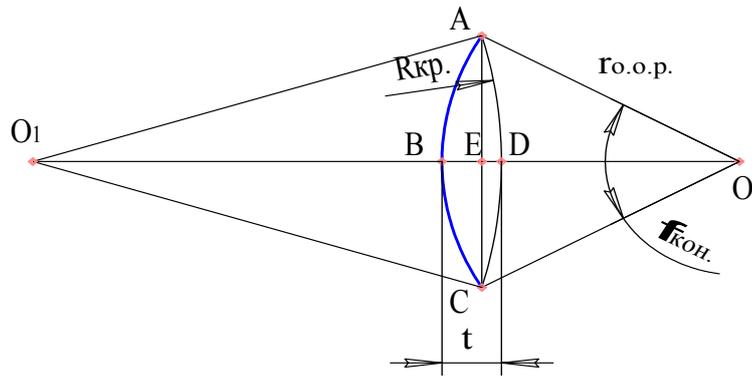


Рисунок 3.8 - Дуга контакта ABC

Рассмотрим треугольники ΔO_1AC и ΔAOC . У этих треугольников есть одна общая сторона AC. Тогда получим выражения:

$$AC^2 = 2 \cdot (R_{кр.}^2 - O_1E^2); \quad (3.19)$$

$$AC^2 = 2 \cdot (r_{о.о.р.}^2 - EO^2); \quad (3.20)$$

Приравняв выражения (3.19) и (3.20) получим:

$$R_{кр.}^2 - O_1E^2 = r_{о.о.р.}^2 - EO^2 \quad (3.21)$$

Как видно из рисунка 3.8, что межосевое расстояние O_1O (расстояние от центра окружности шлифовального круга O_1 и центра окружности правящего устройства O) может быть представлено в виде выражении:

$$O_1O = R_{кр.} + r_{о.о.р.} - t; \quad (3.22)$$

$$O_1E = O_1O - EO; \quad (3.23)$$

Подставляя выражение (3.23) в (3.21) получим:

$$R_{кр.}^2 - (O_1O - EO)^2 = r_{о.о.р.}^2 - EO^2; \quad (3.24)$$

Преобразовывая выражение (3.24) и выражая из него EO получим:

$$EO = \frac{r_{о.о.р.}^2 - R_{кр.}^2 + O_1O^2}{2 \cdot O_1O}; \quad (3.25)$$

Подставляя выражение (3.22) в (3.25) получим:

$$EO = \frac{r_{о.о.р.}^2 - R_{кр.}^2 + (R_{кр.} + r_{о.о.р.} - t)^2}{2 \cdot (R_{кр.} + r_{о.о.р.} - t)}; \quad (3.26)$$

Угол контакта $\varphi_{кон.}$ определяется из выражения:

$$\varphi_{\text{кон.}} = 2 \cdot \arccos\left(\frac{EO}{r_{\text{o.o.p.}}}\right); \quad (3.27)$$

Подставляя выражение (3.26) в (3.27) получим:

$$\varphi_{\text{кон.}} = 2 \cdot \arccos\left(\frac{r_{\text{o.o.p.}}^2 - R_{\text{кр.}}^2 + (R_{\text{кр.}} + r_{\text{o.o.p.}} - t)^2}{2 \cdot (R_{\text{кр.}} + r_{\text{o.o.p.}} - t) \cdot r_{\text{o.o.p.}}}\right); \quad (3.28)$$

Следующим этапом определим угол поворота шлифовального круга ψ_c (угол среза поверхности круга) при врезании роликом в окружность шлифовального круга от начала его входа до выхода из зоны правки (рисунок 3.9):

$$\psi_c = k \cdot \varphi_{\text{кон.}}; \quad (3.29)$$

где $\varphi_{\text{кон.}}$ – угол контакта окружности обката роликов с окружностью шлифовального круга, рад; k – коэффициент отношения частоты вращения шлифовального круга к частоте вращения устройства с роликами по окружности обката, который определяется из выражения. Коэффициент k действителен тогда, когда шлифовальный круг и устройство вращаются в разных направлениях.

$$k = \frac{n_{\text{кр.}}}{n_{\text{o.o.p.}}}; \quad (3.30)$$

Частоту вращения шлифовального круга $n_{\text{кр.}}$ и частоту вращения устройства $n_{\text{o.o.p.}}$ следует выбирать таким образом, чтобы коэффициент k был дробным, тогда будет происходить интерференция (наложение) последующего профиля на предыдущий. Например, пусть $n_{\text{кр.}} = 1600$ об/мин, $n_{\text{o.o.p.}} = 545$ об/мин, тогда результат $k = 2,93577$. Чем больше чисел после запятой в десятичной дроби, тем чаще и быстрее будет происходить интерференция (наложение) последующего профиля на предыдущий.

Определение промежуточного угла между углами контакта смежных роликов $\varepsilon_{\text{пр.р.}}$, рад:

$$\varepsilon_{\text{пр.р.}} = \frac{2 \cdot \pi}{z} - \varphi_{\text{кон.}}; \quad (3.31)$$

где z – количество роликов в устройстве; $\varphi_{\text{кон.}}$ – угол контакта окружности обката роликов с окружностью шлифовального круга, рад.

Определение угла поворота шлифовального круга при повороте правящего устройства на промежуточный угол $\mu_{\text{пов.кр.}}$, рад:

$$\mu_{\text{пов.кр.}} = k \cdot \varepsilon_{\text{пр.р.}}; \quad (3.32)$$

где k – коэффициент отношения частоты вращения шлифовального круга к частоте вращения устройства с роликами по окружности обката, который определяется из выражения; $\varepsilon_{\text{пр.р.}}$ – промежуточный угол между углами контакта смежных роликов, рад.

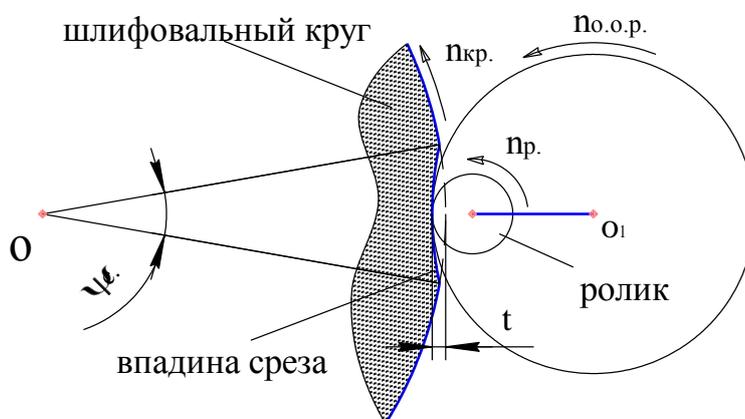


Рисунок 3.9 - Образование впадины среза на поверхности шлифовального круга

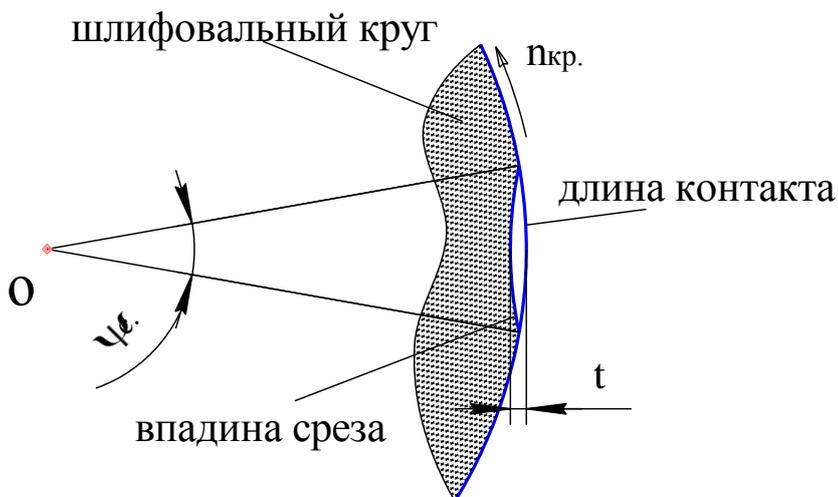


Рисунок 3.10 - Длина контакта среза на шлифовальном круге

Определение длины контакта на окружности шлифовального круга (см. рисунок 3.10) $L_{кр.}^{кон.}$, мм:

$$L_{кр.}^{кон.} = \psi_c \cdot R_{кр.}; \quad (3.33)$$

где ψ_c – угол поворота шлифовального круга (угол среза поверхности круга) при врезании роликом в окружность шлифовального круга от начала его входа до выхода из зоны резания, рад; $R_{кр.}$ – радиус окружности шлифовального круга, мм.

Из выше приведенного кинематического анализа правящего устройства с АР следует, что правка шлифовального круга осуществляется за счет периодического воздействия окружностей роликов на круг. Поэтому на рабочей поверхности круга образовывается рельеф в виде впадин среза (см. рисунок 3.11), где показаны цифрами контакты роликов на шлифовальном круге, с последующим их наложением друг на друга (см. рисунок 3.12).

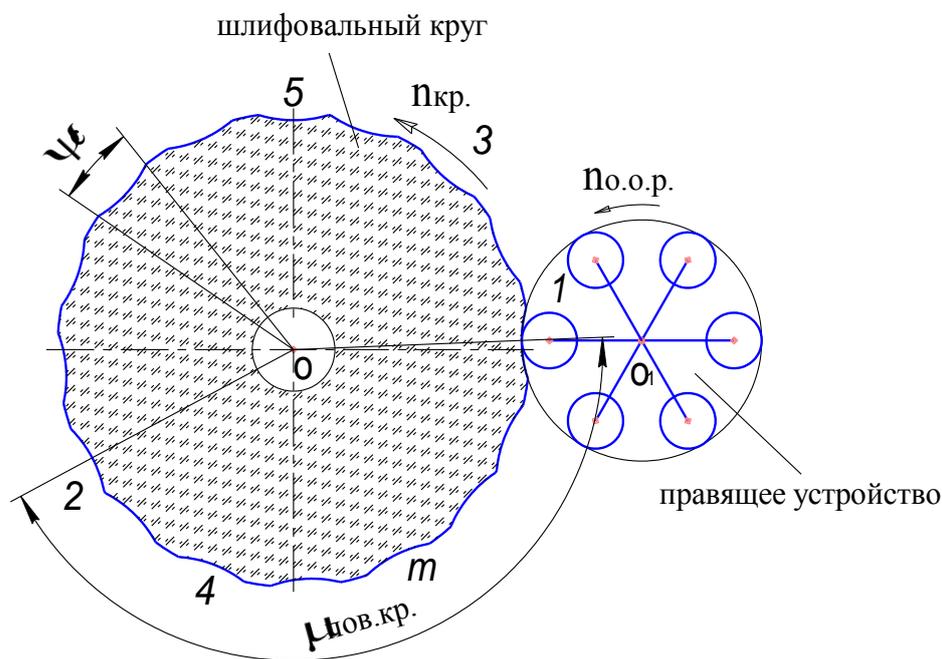


Рисунок 3.11 - Формирование рельефа без наложения на РПК

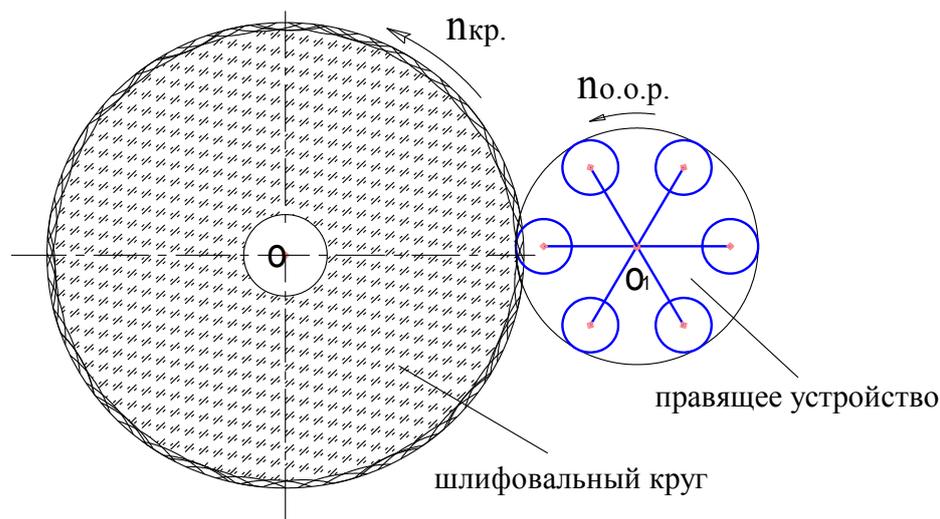


Рисунок 3.12 - Формирование рельефа с наложением впадин среза друг на друга на РПК

Рассмотрим пример по формированию рельефа круга на основе полученных выше выражений (3.28), (3.29), (3.31) и (3.32).

Исходные данные процесса прерывистой правки шлифовального круга:

Частота вращения устройства $n_{o.o.p.} = 460$ об/мин;

Частота вращения шлифовального круга $n_{кр.} = 1910$ об/мин;

Радиус шлифовального круга $R_{кр.} = 200$ мм;

Глубина правки $t = 0,03$ мм;

Радиус окружности обката роликов $r_{o.o.p.} = 220$ мм.

Проверка условие прерывистой правки (3.30): $k = 4,15217$ условие соблюдается.

Угол контакта $\varphi_{кон.}$ равен: $\varphi_{кон.} = 2,2792 \cdot 10^{-2}$ рад;

Угол среза ψ_c на шлифовальном круге $\psi_c = 9,4637 \cdot 10^{-2}$ рад;

Промежуточный угол $\varepsilon_{пр.р.}$ равен: $\varepsilon_{пр.р.} = 1,0244$ рад;

Угол поворота шлифовального круга $\mu_{пов.кр.}$ равно: $\mu_{пов.кр.} = 4,25351$ рад;

Необходимое число оборотов шлифовального круга для правки $z = 200$.

Исследования проводилось в программе КОМПАС - 3D. Затрата времени на правку $t = 7$ с.

Проводя анализ выражений (3.29), (3.30) и (3.33), можно сказать, что чем больше частота вращения шлифовального круга $n_{кр.}$, тем больше угол среза поверхности круга ψ_c и длина контакта на окружности шлифовального круга $L_{кр}^{кон.}$. Следовательно, чем больше длина контакта на окружности шлифовального круга $L_{кр}^{кон.}$, тем менее развит будет рельеф РПК, и количество микронеровностей будет меньше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования выполнены следующие основные работы.

Выполнен анализ влияния вибрационной правки на эффективность шлифования, а также известных способов, устройств и инструмента для ее осуществления;

Аналитически рассмотрен механизм формирования рельефа РПК при вибрационной правке и выведена система уравнений: уравнение траектории движения окружности алмазного ролика, уравнение окружности ролика зависящее от первого;

Проведено исследование по формированию РПК при разных частотах колебания алмазного ролика;

По полученным результатам исследования составлен объемный график по оптимизации вибрационной правки;

Предложен алгоритм по расчету оптимальных режимов вибрационной правки шлифовальных кругов;

Разработаны устройства для вибрационной правки и для прерывистой правки шлифовальных кругов, позволяющие проводить научно-исследовательские работы с целью изучения процессов правки. Устройство для прерывистой правки можно применять не только для правки кругов, но и для шлифования деталей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Покладий, Г.Г. Исследование микрорезания стали алмазным зерном в виде усеченного конуса [Текст]. – Синтетические алмазы, 1978, № 6, с. 56.
- 2 Перевод с японского языка статьи Т. Суто и Т. Ваида, «Ультразвуковая правка шлифовальных кругов» [Текст], 1973, т. 27, № 1, с.28.
- 3 Шлифование фасонных поверхностей [Текст] / Исаев А.И., Филин А.Н, Злотников М.С., Совкин В.Ф. – М.: Машиностроение, 1980. – 152 с.
- 4 Jokogawa, K. Einfluss der Abricht – und Schleifbedingungen auf die Rauheit und Rundheit geschliffener Oberfächen. Werstatt und Betrib [Text], 1974, № 9, s. 513 – 525.
- 5 Байкалов, А.К., Сукенник И.Л. Алмазный правящий инструмент на гальванической связке [Текст]. – Киев: Наукова думка, 1976. – 203.
- 6 Малкин, С., Мюррей Т. Механизм ротационной правки шлифовальных кругов [Текст]. – Тр. Амер. о-ва инж.–мех. Сер.Б., 1978, № 1, с. 295.
- 7 Киселев, Е.С. Силовое взаимодействие контактирующих объектов при правке шлифовальных кругов [Текст] / Вестник УлГТУ, 1999, №3, с. 59.
- 8 Пилинский, В.И., Малышев В.И. Оптимизация процесса правки и параметров правящих инструментов при скоростном шлифовании [Текст]. Ленинград, В кн.: “Оптимшлифабразив - 81”. Тез. докл. 2 всесоюзного Научно-технического семинара, ВНИИАШ, 1981, с. 56.
- 9 Королев, А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке [Текст]. – Саратов. Изд–во Саратов. Ун–та, 1975. – с.191.
- 10 Березняк, Р.А. Исследование влияния относительных колебаний шлифовального круга и правящего инструмента на шероховатость шлифованной поверхности [Текст].– В кн.: Чистовая обработка деталей машин: Межвузовский научн. сб. № 3, Саратов: СПИ, 1977, с. 79.
- 11 Насса, Х., Харада, Т. Способы правки шлифовальных кругов с наложением ультразвуковых и низкочастотных вибраций [Текст]. – Сэймицу

Китай, 1968. т.34, №3.

12 А.с. 1254684 (США) Устройство для правки шлифовальных кругов [Текст] L. Balamuth, A.Kuris, Опубл. БИ, 1981, № 20.

13 А.с. 1484669 (СССР) Устройство для правки шлифовальных кругов [Текст]/А.И. Глейзер и В.И. Малышев, Опубл. БИ, 1982, № 21.

14 А.с. 1684001 (СССР) Устройство для правки шлифовальных кругов [Текст]/А.И. Глейзер и В.И. Малышев, Опубл. БИ, 1988, № 38.

15 А.с. 1585130 (СССР) Устройство для правки шлифовальных кругов [Текст]/А.И. Глейзер и В.И. Малышев, Опубл. БИ, 1987, № 30.

16 А.с. 1502281 (СССР) Устройство для правки шлифовальных кругов [Текст]/А.И. Глейзер, В.И. Малышев и С.А. Штереншус, Опубл. БИ, 1976, № 31.

17 Дьяконов, В.П. Справочник по MathCAD 7 PRO [Текст] – М.: СК Пресс, 1998, с.352.

18 Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин [Текст], М.: 1975, с. 640.

19 Биргер, И.А. Прочность, устойчивость, колебания [Текст] 1968, с. 568.

20 Резников, А.Н. Абразивная и алмазная обработка материалов [Текст]. Справочник. М.: «Машиностроение», 1977, с. 391.

21 Фридман, Я.Б. Механические свойства металлов. Изд. 3-е перераб. И доп. В двух частях. Часть вторая. Механические испытания. Конструкционная прочность [Текст]. М., «Машиностроение», 1974. 368 с. с. ил.

22 Харада, Н. Способы правки кругов с наложением ультразвуковых и низкочастотных вибраций [Текст].//Сеймицу Кикай. 1968. №3.

23 Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки [Текст]: Библиотека технолога – М.: Машиностроение, 2005 – 232 с.

24 Якимов, А.В., Ларшин, В.П., Скляр, А.М., Ковальчук Е.Н. Расчет глубины дефектного слоя при шлифовании [Текст]. //Станки и инструмент, 1986. - № 9. С. 26-27.

25 Fedoseev, O.B., Malkin S. Analysis of Tempering and Rehardening for Grinding of Hardened Steels [Text]. // Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 113, Nov. 1991, pp. 388-394.

26 Malkin, S., Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives [Text], Ellis Horwood Ltd., Chichester, England and John Wiley & Sons, New York, 1989.

27 Панин, В.Е., Гриняев Ю.В. Физическая мезомеханика – новая парадигма на стыке физики и механики деформируемого твердого тела [Текст] // Физическая мезомеханика. 2003. Т. 6, № 4. С. 9–36.

28 Решетов, А.Г. Автоматизация шлифования и размерного контроля деталей. – СПб. Политехника. 2003-170 с.

29 Salje, E. Grinding of cylindrical blanks with controlled workspeed [Text]. / E. Salje, W. Horsemann, M. Klyk

30 3.212.491 Patented Okt. 19. 1965 (США) Method and Apparatus for trueing and forming the working surface of a grinding wheel [Text]. Lewis Balamut and Arthur Kuris. Filed Aug. 21.1961, Ser. No. 132, 685 15 claims. С. 125-11.

31 Kumabe, J.: Vibration Cutting – Fundamentals and Applications [Text], Jikkyo Shuppan, 1979.

32 Kumabe, J., Sabuzawa, T., Saotome, T.: Study on the Precision Drilling of Wood (3rd Report) [Text], Trans.Japan Soc.Prec.Eng., Vol.43, №6, pp.683-689 (1977).

33 Малышев, В.И. Особенности правки шлифовальных кругов с ультразвуковыми колебаниями правящего инструмента [Текст]/ В.И. Малышев, С.В. Мурашкин/ Вектор науки в ТГУ – Тольятти, Тольяттинский государственный университет, 2009, №1 – с. 24-31.

34 Алямовский, А.А. Инженерный анализ методом конечных элементов [Текст]. М.: ДМК Пресс, 2004. – 432 с.

35 Киселев, Е.С., Теплофизика правки шлифовальных кругов с применением СОЖ [Текст] / Е.С. Киселев. – Ульяновск: УлГТУ, 2001 – 170 с.