

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

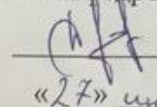
"Псковский государственный университет"

ФАКУЛЬТЕТ ИНЖЕНЕРНЫХ И СТРОИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Допустить к защите

Зав. кафедрой, к.т.н., доцент

 Дмитриев С.И.
«27» июня 2018.


ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

На тему: Повышение стойкости шлифовальных кругов на основе
разрешения технических противоречий

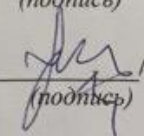
Направление: 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств

Магистерская программа: Технология машиностроения

Магистрант

/  / _____ Максимов Д.А.
(подпись) (Ф.И.О.)

Руководитель работы
д.т.н. _____ доцент
уч. степ. _____ уч. звание

/  / _____ Никифоров И.П.
(подпись) (Ф.И.О.)

Псков
2018

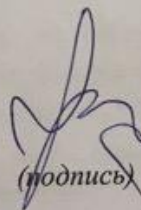
ПСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Направление 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»

ЗАДАНИЕ
на выпускную квалификационную работу магистра

1. Тема работы: Повышение стойкости шлифовальных кругов на основе разрешения технических противоречий.
2. Цель работы: Поиск путей повышения стойкости шлифовальных кругов.
3. Основные требования и исходные данные: Системный подход при поиске путей решения проблем. Типовые схемы разрешения технических противоречий.
4. Научная и практическая ценность ожидаемых результатов: Обнаружение резервов повышения стойкости на основе системного подхода. Повышение эффективности шлифования, снижение себестоимости выпускаемой продукции.
5. Способ реализации результатов работы: Изготовление устройств и приспособлений на основе выработанных рекомендаций, применение в условиях реального промышленного производства.
6. Перечень (примерный) основных вопросов, которые должны быть рассмотрены в диссертации: Обзор имеющихся способов повышения стойкости, их критический анализ. Выработка рекомендаций по повышению стойкости, с учётом обнаруженных резервов.
7. Перечень (примерный) графического и иллюстративного материала: Разветвлённая схема поиска технических решений, схемы устройств, классификация способов.

Руководитель работы
д.т.н. доцент
уч. степень, уч. звание



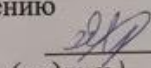
(подпись)

Никифоров И.П.
(Ф.И.О.)

Дата выдачи задания «15» Мая 2018 г.

Задание принял к исполнению

Студент гр. 052-011



(подпись)

И.М.Михайлов
(Ф.И.О.)

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. Этапы повышения стойкости шлифовального круга на основе разветвлённой схемы получения технических решений	6
1.1. Этап 1. Определение вредных свойств технической системы.....	6
1.2. Этап 2. Определение прямых решений	6
1.3. Этап 3. Определение полезных свойств технической системы	9
1.5. Этап 5. Формулирование идеальных решений	11
1.6. Этап 6. Формулирование физических противоречий	12
1.7. Этап 7. Получение технических решений.....	14
ПР1. Повышение стойкости шлифовального круга с помощью уменьшения нагрузки на абразивное зерно	17
ТР11. Шлифование с непрерывно изменяющейся скоростью резания.....	17
ТР12. Шлифование с постоянно управляемой глубиной резания	23
ТР13. Шлифование с применением кругов переменной зернистости	26
ТР14. Шлифование с применением вложенных друг в друга зерен по типу «матрешки».....	28
ПР2. Повышение стойкости шлифовального круга с помощью увеличения режущих кромок, воспринимающих нагрузку.....	30
ТР21. Подбор геометрической формы абразивного зерна	31
2.1.1. Классификация абразивных зерен произвольной формы	36
2.1.2. Пространственная ориентация абразивных зерен.....	43

2.1.3. Зависимость эксплуатационных параметров шлифовальных кругов от формы и ориентации абразивных зерен	47
2.1.4. Перспективы и дальнейшие направления оптимизации геометрии абразивных зерен	51
ТР22. Специальный абразивный инструмент с «активной» пористостью ..	62
ПР3. Повышение стойкости шлифовального круга с помощью увеличения износостойкости зерен.....	63
ТР32. Модификация поверхности абразивных зерен	64
ТР33. Создание прерывистой поверхности абразивного инструмента.....	67
ПР4. Повышение стойкости шлифовального круга с помощью уменьшение адгезии (молекулярного взаимодействия).....	69
ТР41. Совмещенный способ очистки СОТС,	70
рекуперации и классификации абразивных зерен в процессе шлифования	70
ТР42. Электронно-ионные технологии, основанные на подаче в зону резания ионизированного и озонированного воздуха.....	73
ТР43. Импрегнирование шлифовальных кругов	76
Заключение	80
Список литературы	82

ВВЕДЕНИЕ

Технический прогресс в современном машиностроении обусловлен быстро возрастающими требованиями к точности размеров и геометрической формы сложных по конструкции деталей, а также к высокому качеству их поверхности, особенно, если речь идет о труднообрабатываемых и дорогостоящих материалах. В основном, такие сложные задачи решает только абразивная обработка. Однако из-за большого числа переменных параметров абразивного инструмента, появляются большие трудности в изучении теоретических и экспериментальных закономерностей данного процесса обработки.

В этой ситуации появляется актуальность дальнейшего изучения возможностей повышения экономических и качественных показателей шлифования. Совершенствование любой технической системы, как и всякой системы, требует системного анализа, согласно которому этот процесс должен осуществляться системно, упорядоченно, путем последовательного выполнения определенных шагов [1]. Поэтому в выпускной квалификационной работе рассматривается такая проблема, как повышение стойкости абразивного инструмента с помощью методов технического творчества, где применяется сложная разветвленная схема поиска решений. Разветвленная схема предполагает на отдельных этапах получение нескольких вариантов решения с оценкой их по определенным критериям и выбором оптимального варианта, который принимают за базу для выполнения следующих этапов. Совершенствование технической системы (ТС), т.е. процесса абразивной обработки будет проходить в следующие этапы: определение вредных свойств (ВС), влияющих на период стойкости абразивного инструмента; решение задачи напрямую (ПР), без применения методов технического творчества; определение полезных свойств (ПС) системы, которые следует сохранить; формулируются технические противоречия (ТП); формулируются идеальные решения (ИР); формулируются физические противоречия (ФП); получение технических решений (ТР); выбор оптимального технического решения [1].

1. Этапы повышения стойкости шлифовального круга на основе разветвлённой схемы получения технических решений

1.1. Этап 1. Определение вредных свойств технической системы

Одни из главных ограничивающих факторов повышения периода стойкости абразивного инструмента являются: истирание или скалывание режущих кромок зерен, вырывание целых зерен из связки круга, налипание частичек металла на вершинах кромок и заполнение пор круга металлической стружкой [2]. Эти явления и будут определяться как вредные свойства – ВС. Рассмотрим теперь ход решения этой задачи по разветвленной схеме согласно рисунку 1.

1.2. Этап 2. Определение прямых решений

Можно предложить следующие варианты прямых решений «ПР» задачи:

- 1) ПР1 – уменьшение нагрузок;
- 2) ПР2 – увеличение количества кромок, воспринимающих нагрузку;
- 3) ПР3 – увеличение износостойкости абразивных зерен;
- 4) ПР4 – уменьшение адгезии (молекулярного взаимодействия).

При этом ухудшаются следующие свойства системы:

- 1) Нагрузка на единичное зерно зависит от режимов резания и характеристик применяемых материалов в шлифовальных инструментах. От глубины среза a_z зависит сила резания, развиваемая одним зерном. В свою очередь, a_z определяется режимами резания, в частности, отношением окружных скоростей детали и круга $V_d / V_{кр}$. При постоянной $V_{кр}$ увеличение скорости детали V_d приводит к увеличению подачи одним зерном S_z . (83) Но с уменьшением глубины резания уменьшается и производительность обработки. Влияние скорости V на силы резания имеет неоднозначный характер. Повышение скорости, с одной стороны, увеличивает производительность процесса. С другой стороны, при

повышение скорости абразивного инструмента $V_{кр}$, радиальная составляющая P_y будет возрастать практически прямо пропорционально [3]. В результате абразивное зерно пластически деформирует металл в процессе обработки.

- 2) Механическая нагрузка, выдержанная абразивным зерном в ходе процесса шлифования до момента выкрашивания, также зависит от твёрдости (сопротивление зёрен вырыванию из связки), и от величины зернистости шлифовального круга. Чем выше твёрдость, тем меньше пор в круге и больше связки [4]. Однако степень засаливаемости шлифовального инструмента возрастает, а значит, есть вероятность появления прижогов на поверхности заготовки. Чем выше зернистость, тем меньшую нагрузку на абразивное зерно можно приложить. Но стоит отметить, что увеличение номера зернистости способствует ухудшению качества обрабатываемой поверхности.
- 3) Количество кромок, участвующих в резании, зависит, прежде всего, от геометрии абразивного зерна и структуры шлифовального круга. Геометрия абразивных зерен характеризуется: пространственной ориентацией в теле инструмента; формой, т.е. соотношением длины, высоты и ширины между собой, а также характер микронеровностей на поверхности зерна. Плотная структура кругов характеризуется тем, что режущие кромки одних абразивных зерен перекрывают режущие кромки других абразивных зерен, ввиду их неупорядоченного расположения в теле шлифовального инструмента. По этой причине, эти абразивные инструменты лишь частично используют свои потенциальные возможности.
- 4) Структура шлифовального круга также оказывает влияние на количество режущих кромок, участвующих в процессах резания. Применение высокопористых кругов обуславливает их применяемость на станках жесткой конструкции.

- 5) Увеличение износостойкости зерен заключается в частности в выборе абразивного материала. Наибольшее распространение среди абразивных материалов имеет искусственный корунд (электрокорунд), являющийся кристаллической окисью алюминия, углеродистые соединения (карбиды) некоторых элементов — карбиды кремния, бора, вольфрама. Эльборовые круги на керамической связке отличаются высокой стойкостью, которая намного превышает стойкость кругов, изготовленных из карбидов кремния и электрокорундов. Но стоит отметить, что внедрение в производство относительно дорогостоящих шлифовальных инструментов из алмазов и кубического нитрида бора (КНБ), вместо обычных абразивных материалов, стоимость которых сравнительно низкая, требует четкого знания показателей эффективности обработки инструмента и методики их расчета.
- б) Также износостойкость абразивного зерна в определенной степени обуславливается высокой температурой, образующейся в зоне его контакта с обрабатываемой поверхностью. В свою очередь температура имеет зависимость от величины коэффициента внешнего трения. Значение этого коэффициента обуславливается состоянием трущихся поверхностей, а также от объема, накопленных во время обработки, отходов на поверхностях тел, которые вступают в контакт. Абразивные зерна, полученные традиционной технологией в виде плавления абразивной шихты с последующим дроблением и отсева, имеют сложную для представления поверхность. На такой поверхности зерна в процессе обработки накапливается шлам, от которого необходимо избавляться, например, при помощи смазочного охлаждающего технологического средства (СОТС). Но наличие СОТС под давлением, которое подается непосредственно в зону резания, указывает на сложность изготовления применяемого оборудования.

- 7) Минимуму адгезионного взаимодействия металла и абразива соответствует применение смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС). Вместе с тем, применение СОТС требует использования специальных очистных сооружений, необходимых для их утилизации, организацию их приготовления, транспортировки, регенерации.
- 8) При этом следует указать на одно из важных обстоятельств применения СОТС, особенно на масляной основе. В результате попадания СОЖ в зону резания, воздушная среда, окружающая ее, загрязняется химическими веществами типа масляных аэрозолей и шламом, что повлияет на возникновение различных химических реакций в зоне резания.

1.3. Этап 3. Определение полезных свойств технической системы

Следовательно, полезными свойствами «ПС» технической системы «ТС» являются:

- 1) ПС11 – высокая производительность обработки;
- 2) ПС12 – высокое качество поверхностного слоя;
- 3) ПС21 – высокая эффективность применения абразивного материала;
- 4) ПС22 – отсутствие в потребности использования оборудования повышенной жесткости;
- 5) ПС31 – отсутствие в потребности дефицитных и дорогостоящих абразивных материалах;
- 6) ПС32 – простота конструкции оборудования;
- 7) ПС41 – простота конструкции очистительных станций для СОТС;
- 8) ПС42 – отсутствие использования дорогостоящей СОТС.

1.4. Этап 4. Формулирование технических противоречий

Это позволяет нам сформулировать технические противоречия «ТП» для каждого варианта:

- 1) ТП11 – ТС имеет высокую производительность обработки, но не обеспечивает длительного периода стойкости шлифовального инструмента;
- 2) ТП12 – ТС обеспечивает высокое качество поверхностного слоя заготовки, но не обеспечивает длительного периода стойкости шлифовального инструмента;
- 3) ТП21 – ТС высокоэффективна в применении абразивного материала, но не обеспечивает длительного периода стойкости шлифовального инструмента;
- 4) ТП22 – ТС не использует оборудование повышенной жесткости, но не обеспечивает длительного периода стойкости шлифовального инструмента;
- 5) ТП31 – ТС использует дешевые абразивные материалы, но не обеспечивает повышение периода стойкости шлифовального круга;
- 6) ТП32 – ТС проста по конструкции в зоне резания, но не обеспечивает повышение периода стойкости шлифовального круга;
- 7) ТП41 – ТС проста по конструкции очистительных станций для переработки СОТС, но не обеспечивает повышение периода стойкости шлифовального круга;
- 8) ТП42 – ТС не требует дорогостоящей СОТС, но не обеспечивает повышение периода стойкости шлифовального круга.

1.5. Этап 5. Формулирование идеальных решений

На основании этих ТП мы можем сформулировать идеальные решения «ИР» для каждого варианта:

- 1) ИР11 – ТС обеспечивает длительный период стойкости абразивного инструмента, сохраняя высокую производительность обработки;
- 2) ИР12 – ТС обеспечивает длительный период стойкости абразивного инструмента, обеспечивая высокое качество поверхностного слоя заготовки;
- 3) ИР21 – ТС обеспечивает длительный период стойкости абразивного инструмента, применяя высокоэффективно абразивный материал;
- 4) ИР22 – ТС обеспечивает длительный период стойкости абразивного инструмента, применяя оборудование обычной жесткости;
- 5) ИР31 – ТС обеспечивает длительный период стойкости абразивного инструмента, используя дешевые абразивные материалы;
- 6) ИР32 – ТС обеспечивает длительный период стойкости абразивного инструмента, сохраняя простоту конструкции оборудования в зоне резания;
- 7) ИР41 – ТС обеспечивает длительный период стойкости абразивного инструмента, сохраняя простоту конструкции очистительных станций для переработки СОТС;
- 8) ИР42 – ТС обеспечивает длительный период стойкости абразивного инструмента, не требуя при этом дорогостоящей СОТС.

1.6. Этап 6. Формулирование физических противоречий

Для указанных выше «ИР» выявляем физические противоречия «ФП»:

- 1) ФП111 – чтобы обеспечить длительный период стойкости, скорость шлифовального круга в системе должна быть высокой; чтобы сохранить высокую производительность обработки, скорость шлифовального круга в системе должна быть низкой (скорость шлифовального круга должна быть высокой и низкой; скорость шлифовального круга должна быть переменной или постоянной);
- 2) ФП112 – чтобы обеспечить длительный период стойкости абразивного инструмента, глубина резания шлифовального круга в системе должна быть невысокой; чтобы сохранить высокую производительность обработки, глубина резания шлифовального круга в системе должна быть большой (глубина резания круга должна быть высокой и низкой; глубина резания шлифовального круга должна быть переменной или постоянной);
- 3) ФП12 – чтобы обеспечить длительный период стойкости абразивного инструмента, зернистость шлифовального круга в системе должна быть высокой; чтобы обеспечить высокое качество поверхностного слоя обработки, зернистость шлифовального круга в системе должна быть низкой (зернистость шлифовального круга должна быть высокой и низкой; зернистость шлифовального круга должна быть переменной или постоянной);
- 4) ФП21 – чтобы обеспечить длительный период стойкости абразивного инструмента, шлифовальный круг на его периферии должен иметь максимальное количество режущих кромок; использование максимальное количество режущих кромок природных абразивных зерен в составе инструмента подразумевает отсутствие максимально эффективного их использования в процессе резания, (малоэффективное и высокоэффективное применение абразивных зерен);

- 5) ФП22 – чтобы обеспечить длительный период стойкости абразивного инструмента, круги должны иметь высокопористую структуру; чтобы использовать оборудование обычной жесткости, круги должны иметь плотную структуру (шлифовальный круг должен иметь плотную структуру и высокопористую);
- 6) ФП31 – чтобы обеспечить длительный период стойкости абразивного инструмента, шлифовальные круги должны иметь в своем составе дорогостоящие материалы, из КНБ и алмазов; чтобы процесс шлифовальной обработки был не дорогостоящим, шлифовальные круги должны состоять из карбида кремния или электрокорунда (дешевый и дорогостоящий абразивный материал);
- 7) ФП32 – чтобы обеспечить длительный период стойкости абразивного инструмента, СОТС должна подаваться непосредственно в контакт шлифовального круга с деталью; чтобы сохранить простоту конструкции станка, СОТС не должна подаваться в контакт (СОТС должна подаваться в зону контакта и не должна подаваться в зону контакта);
- 8) ФП41 – чтобы обеспечить длительный период стойкости абразивного инструмента, СОТС должна быть без частиц шлама; чтобы сохранить простоту конструкции станка, СОТС может иметь частицы шлама (СОТС должна иметь частицы шлама и не должна иметь частицы шлама);
- 9) ФП42 – чтобы обеспечить длительный период стойкости абразивного инструмента, СОТС должна подаваться непосредственно в зону резания; чтобы сохранить простоту конструкции станка, СОТС не должна подаваться в зону резания (СОТС подаваться в зону резания и не должна подаваться в зону резания).

1.7. Этап 7. Получение технических решений

Разрешая указанные противоречия с помощью известных методов [1], получаем следующие технические решения «ТР»:

- 1) ТР11 – скорость резания шлифовального круга должна непрерывно изменяться при заданных периоде и амплитуде колебаний [6];
- 2) ТР12 – глубина резания шлифовального круга должна постоянно управляться с помощью программы в соответствии с математической зависимостью [7];
- 3) ТР13 – применять круги с переменной зернистостью, имеющие ступицу и периферийную рабочую часть, выполненная в виде концентрических слоев с образованием комплектов, при этом зернистость абразива в комплекте последовательно убывает в радиальном направлении, а число слоев – равно числу переходов для конкретных условий шлифования заготовок [8];
- 4) ТР14 – применять шлифовальные зерна, вложенные друг в друга по типу «матрешки», и композицию для их крепления к жесткой или гибкой основе [9];
- 5) ТР21 – применять специальный абразивный инструмент с ориентированными зёрнами дисковой или пластинчатой форм, в осевом направлении рабочего движения с помощью технологии совместной ориентации магнитным и ультразвуковым полями;
- 6) ТР22 – применять специальный абразивный инструмент с «активной» пористостью, т.е. путем введения в инструмент в качестве наполнителя абразивного зерна значительно меньшего размера по сравнению с основной фракцией [11];
- 7) ТР31 – применять сборные композиционные шлифовальные круги (СКШК), сочетающих основные преимущества сборных, прерывистых

и импрегнированных¹;

- 8) TP32 – модификация поверхности абразивных зерен
- 9) TP33 – создание прерывистой поверхности абразивного инструмента
- 10) TP41 – совмещенный способ очистки СОТС центрифугированием², рекуперации³ и классификации абразивных зерен [5];
- 11) TP42 – применять электронно-ионные технологии, основанные на подаче в зону резания ионизированного и озонированного воздуха [13];
- 12) TP43 – импрегнирование шлифовальных кругов.

Мы видим, что благодаря применению системного анализа получено 12 технических решений по решению только одной проблемы – повышение стойкости шлифовального круга при шлифовании. С помощью сопоставительного анализа преимуществ и затрат мы можем выбрать оптимальное для данных производственных условий TP. Учитывая, что затраты на выявление противоречий и получение вариантов TP малы по сравнению с возможными преимуществами в производственных условиях, можно сделать вывод об эффективности разветвленной схемы решения творческих технических задач. Далее в работе рассматриваются подробнее 4 прямых решения повышения стойкости шлифовального оборудования с соответствующими 11 техническими решениями, которые составлены и сформулированы на основе современного обширного теоретического и экспериментального научного материала сфере абразивной обработки. Одно техническое решение будет составляться самостоятельно на основе творческой мысли и показано более подробно.

¹ Импрегнирование – это особый вид пропитки, который применяется для абразивного материала.

² Центрифугирование — это разделение грубодисперсных систем (продукты отходов при абразивной обработке), состоящих из жидких и твердых компонентов с разными плотностями, при помощи специальных аппаратов, называемых центрифугами.

³ Рекуперация - это восстановление, возобновление абразивных зерен для повторного (многократного) использования.

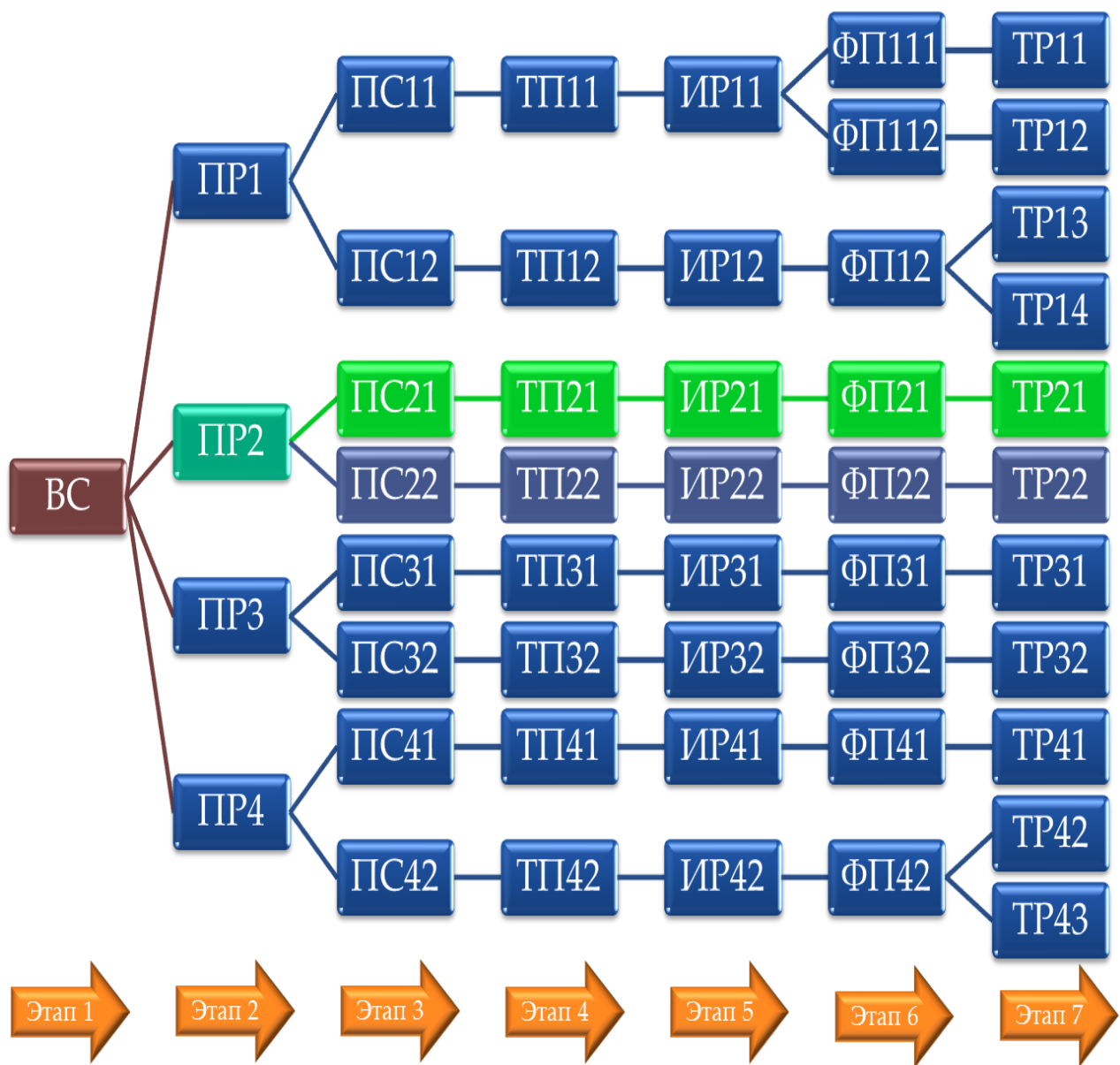


Рис. 1. Разветвленная схема совершенствования технической системы – процесса шлифовальной обработки: ВС – вредное свойство; ПР – прямое решение; ПС – полезное свойство; ТП – техническое противоречие; ИР – идеальное решение; ФП – физическое противоречие; ТР – техническое решение

ПР1. Повышение стойкости шлифовального круга с помощью уменьшения нагрузки на абразивное зерно

ТР11. Шлифование с непрерывно изменяющейся скоростью резания

Традиционное применение шлифовальных операций при обработке жаропрочных материалов является весьма сложным и трудно прогнозируемым процессом. Это связано со многими факторами: свойствами сплавов, особенностями шлифовальной обработки, требованиями к качеству изготовления и др. На сегодняшний день существуют достаточно качественные абразивные материалы и шлифовальное оборудование, предназначенные для обработки труднообрабатываемых материалов, но их применение в промышленности дает лишь незначительный эффект, поскольку режимы резания остаются классическими: $V=25...30$ м/с, $S_{\text{прод}}=5...20$ м/мин, $t=0,005...0,01$ мм/дв. ход [1].

При обычном абразивном обработке с повышением производительности существенно уменьшается стойкость T кругов и возрастает износ абразивных зерен. Особенно это заметно при обработке труднообрабатываемых материалов, когда период стойкости круга уменьшается в 15...20 раз по сравнению с обработкой углеродистой стали, а затраты времени и расход абразива, связанные с правкой круга, достигают до 60...70% всех затрат на операцию обработки. Показатели процесса абразивной обработки некоторых металлов [2], представлены в таблице 1. Из таблицы видно, что абразивная обработка характеризуется весьма малым периодом стойкости круга, особенно при обработке хромистых и быстрорежущих сталей. Влияние правки кругов на производительность и себестоимость шлифовальных операций для различных металлов [2] показано в таблице 2. Кроме того, при абразивной обработке, в результате затупления круга и роста упругих отжатий в технологической системе, не удается обеспечить стабильные показатели качества обработанной поверхности.

При обработке абразивными кругами из карбида кремния или электрокорунда происходит их быстрое засаливание – процесс, при котором снимаемая со шлифуемой детали стружка вместе с истертыми абразивными зернами и связкой попадает в поры шлифовального круга и заполняет их, в результате чего режущая способность круга резко снижается. Сверхтвердые синтетические материалы – алмазы и эльбор (кубический нитрид бора) расширяют область применения плоского шлифования в широких масштабах и обеспечивают его эффективность. Но практика использования таких кругов при шлифовании жаропрочных сталей и сплавов свидетельствует о том, что область их применения ограничена высокой стоимостью изготовления.

Таблица 1

Значение стойкости шлифовального круга при обработке различных сталей

Марка обрабатываемой стали	Сталь 45	Сталь 45 (закалка)	12ХНЗА (цементация, закалка)	ШХ15	4Х13	ЭИ417	Р18 (закалка)	Р9Ф5
Период стойкости T , мин	85	45	40	35	15	2,9	2,8	1,2

Таблица 2

Затраты на правку при шлифовании различных металлов

Шлифование	Обрабатываемый материал	Время правки, % машинного времени	Затраты на правку, % себестоимости операции
Черновое	Сталь 45 (Закаленная)	50	30...40
Чистовое	Сталь 45 (Закаленная)	10	3...8
–	ЭИ417	50	30...40
–	Р9Ф5	80	60...70

Необходимо разработать новые технологически обоснованные решения, направленные на повышение стойкости абразивного инструмента. На кафедре «Технология машиностроения» Псковского государственного университета ведутся работы по исследованию влияния параметров непрерывно изменяющейся скорости резания (периода и амплитуды колебаний) на стойкость шлифовального круга из электрокорунда белого.

При проведении экспериментальных исследований использовались: плоскошлифовальный станок 3Г71, шлифовальный круг марки 1 250x20x76 WA F30 L6V 50 2 из электрокорунда белого; режимы резания: скорость резания – 30 м/с, продольная подача стола – 16 м/мин, вертикальная подача – 5 мкм/дв. ход стола; материал заготовки – жаропрочная сталь X18H9T. Стойкость шлифовального круга оценивалась по моменту интенсивного появления видимых прижогов на поверхности заготовки, которые выявлялись визуально. Правка круга проводилась перед каждым опытом. Температура заготовки (вне зоны шлифования) измерялась при помощи бесконтактного инфракрасного термометра Infrared Thermometers 56X.

Подбор оптимальных периода и амплитуды достигалась с использованием симплексного метода [4]. Критическими значения параметров считались те, когда устройство управления не справлялось с их обработкой.

Полученные значения периода стойкости являются целевой функцией в симплексном методе. Для достоверности результатов каждый опыт при выставленных параметрах проводился в трехкратной повторности. В каждом опыте из полученных значений стойкости выводили среднее, которое являлось одной из вершин первого симплекса в координатах «амплитуда-период». Далее согласно правилам симплексного метода выставляли следующие значения параметров на устройстве, используя выбранный коэффициент варьирования.

После получения вершин первого симплекса выявлялось наихудшее (меньшее) значение стойкости. Для движения к оптимуму ставили следующие

ший опыт в новой точке, являющейся зеркальным отображением точки с наихудшим результатом относительно противоположной грани симплекса. Для определения новой координаты вершины использовали известные формулы. Согласно описанному алгоритму выстраивали последующие симплексы, записывая значения целевой функции – периода стойкости шлифовального круга.

В таблице 3 представлены результаты определения целевой функции симплексным методом – стойкости шлифовального круга в зависимости от изменяющейся скорости резания.

На основании полученных значений построен график подбора периода и амплитуды симплексным методом (рисунок 1).

На рисунке 1 представлена зависимость изменения целевой функции – периода стойкости круга, в зависимости от двух влияющих факторов (амплитуды и периода). В вершинах симплексов лежат полученные в результате опытов значения периода стойкости (они обведены в кружки). Темная область значений амплитуды и периода, при которых устройство управления не успевало обрабатывать входной сигнал. Это связано с мощностными возможностями двигателя ускорять и притормаживать вращение шпинделя за короткое время, а также проскальзыванием ременной передачи в приводе главного движения станка.

Результаты экспериментальных исследований

№ п/п	Номер измерения			Среднее	Значение параметра	
	1	2	3		Амплитуда А, об/мин	Период Т, с
1	36	27	25	26	±0	5,7
2	30	32	22	28	±50	5,7
3	34	26	33	31	±25	5,2
4	35	31	35	34	±75	5,2
5	36	26	44	35	±50	4,7
6	58	35	63	52	±100	4,7
7	46	75	63	61	±75	4,2
8	45	41	34	40	±125	4,2
9	16	22	22	20	±100	3,7
10	25	30	24	26	±50	3,7

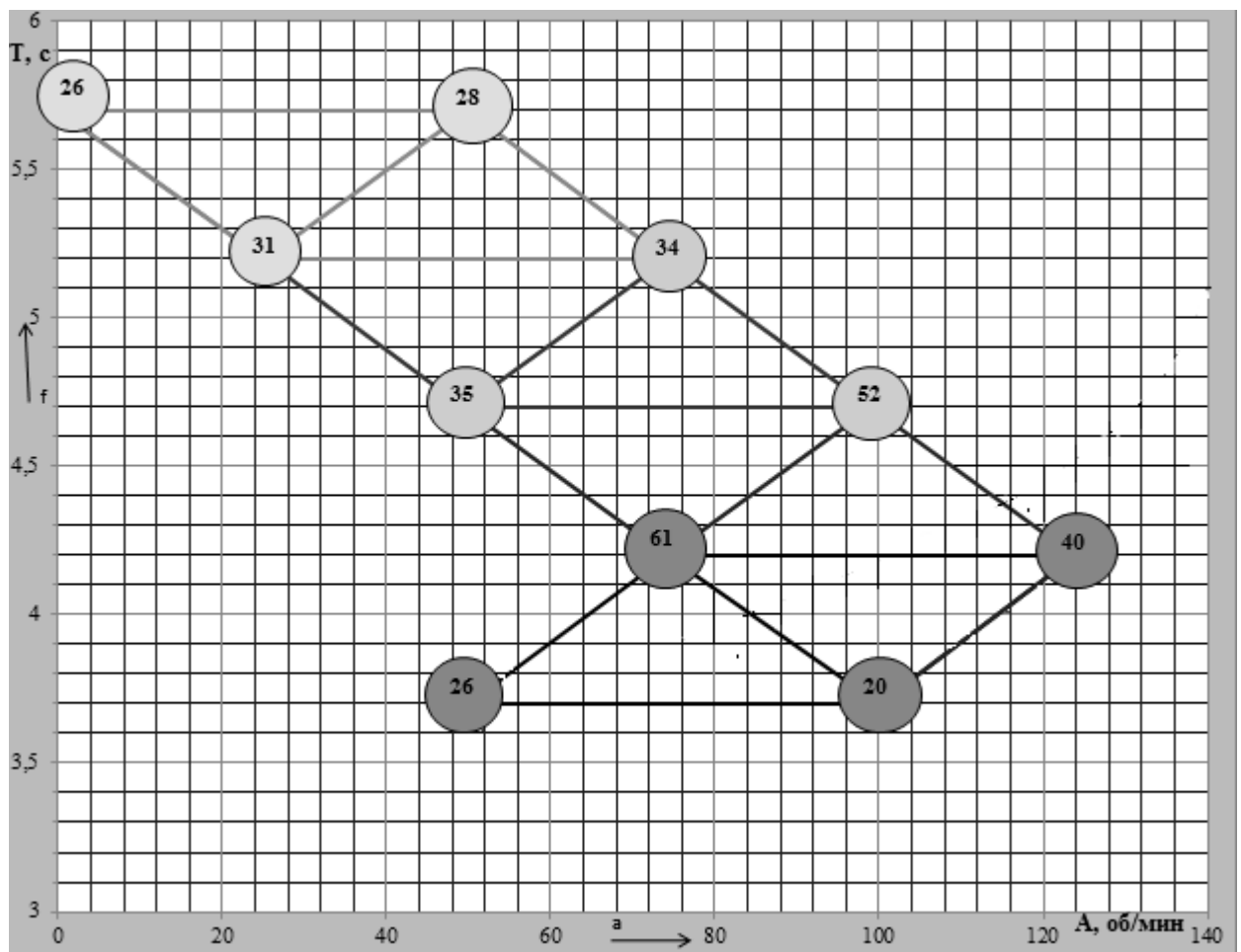


Рис. 2. Графическая интерпретация оптимизации стойкости круга симплексным методом

Из таблицы 3 и рисунка 1 видно, что опыт под номером 7 является наилучшим по значению целевой функции. При изменении скорости вращения вала с амплитудой ± 75 об/мин и соответствующем периоде 4,2 с, стойкость шлифовального круга является максимальным и составляет около одной минуты (61 с). Что в свою очередь более чем в 2 раза превышает значение 1 опыта, когда применялись условия традиционного шлифования (скорость резания не изменялась).

При движении к оптимуму целевой функции можно уменьшить шаг варьирования и получить более точные оптимальные значения изменяемых параметров. В любом случае определение оптимальных значений периода и амплитуды изменения скорости резания должно проводиться с учётом кон-

кретных условий обработки: применяемого оборудования, абразивного инструмента, режимов резания.

Вывод:

- 1) Непрерывно изменяющаяся скорость резания позволяет повысить стойкость инструмента более чем в 2 раза.
- 2) Получены оптимальные параметры обработки в конкретных условиях при шлифовании жаропрочной стали X18H9T: период изменения скорости резания – 4,2 с, амплитуда изменения скорости резания (относительно номинального значения) – ± 75 об/мин.
- 3) Между значениями температуры и стойкостью инструмента корреляции не обнаружено.
- 4) При увеличении амплитуды до ± 125 об/мин устройство управления и привод станка не успевали обрабатывать входные сигналы.

ТР12. Шлифование с постоянно управляемой глубиной резания

На сегодняшний день существует три возможных способа увеличения стойкости шлифовального круга с помощью управления основными параметрами режимов резания, с учетом снижения режущей способности данного инструмента и его производительности:

- 1) изменение во времени скорости круга V_k ;
- 2) изменение во времени фактической глубины шлифования t_ϕ ;
- 3) одновременное изменение скорости круга V_k и глубины t_ϕ .

Как указано ранее, первый и второй способы известны и могут быть реализованы на современных шлифовальных станках. Использование третьего (одновременного изменения скорости V_k и глубины шлифования t_ϕ) ограничено возможностями существующего технологического оборудования и представляет интерес при проектировании новых конструкций шлифоваль-

ных станков с ЧПУ с увеличенным количеством управляемых параметров и режимов обработки.

Путём изменения глубины шлифования поддерживается постоянной составляющая силы резания P_y , обеспечивающая отсутствие фазово-структурных превращений в материале заготовки. На таком основании рассмотрим такой способ, как изменение во времени фактической глубины шлифования t_ϕ . Этот способ имеет возможность согласовать фактическую производительность процесса шлифования с режущей способностью круга, тем самым рационально увеличивая период стойкости. Закономерность изменения во времени обработки τ глубины алмазного шлифования по упругой схеме описывается экспоненциальным выражением:

$$t_\phi(\tau) = t_{уст} + \Delta t \cdot \exp(\alpha\tau),$$

где $t_{уст}$ – установившаяся глубина шлифования;

t_0 – исходная глубина шлифования рельефом, который сформирован после правки круга;

$\Delta t = t_0 - t_{уст}$ – амплитуда снижения глубины шлифования;

α – эмпирический коэффициент.

Эта закономерность, представленная уравнением, является проявлением экспоненциального характера снижения режущей способности алмазного шлифовального круга во время обработки (рис. 3). Стабилизация в процессе шлифования заготовки через определённый промежуток времени (период стабилизации $\tau_{уст}$) режущей способности круга на уровне, соответствующем установившейся глубине шлифования $t_{уст}$, вынуждает устанавливать в качестве режима обработки по жёсткой схеме именно это значение глубины резания. Даже незначительное его превышение по истечении времени обработки, равного $\tau_{уст}$, может привести к появлению фазово-структурных изменений в поверхностном слое заготовки (прижогов).

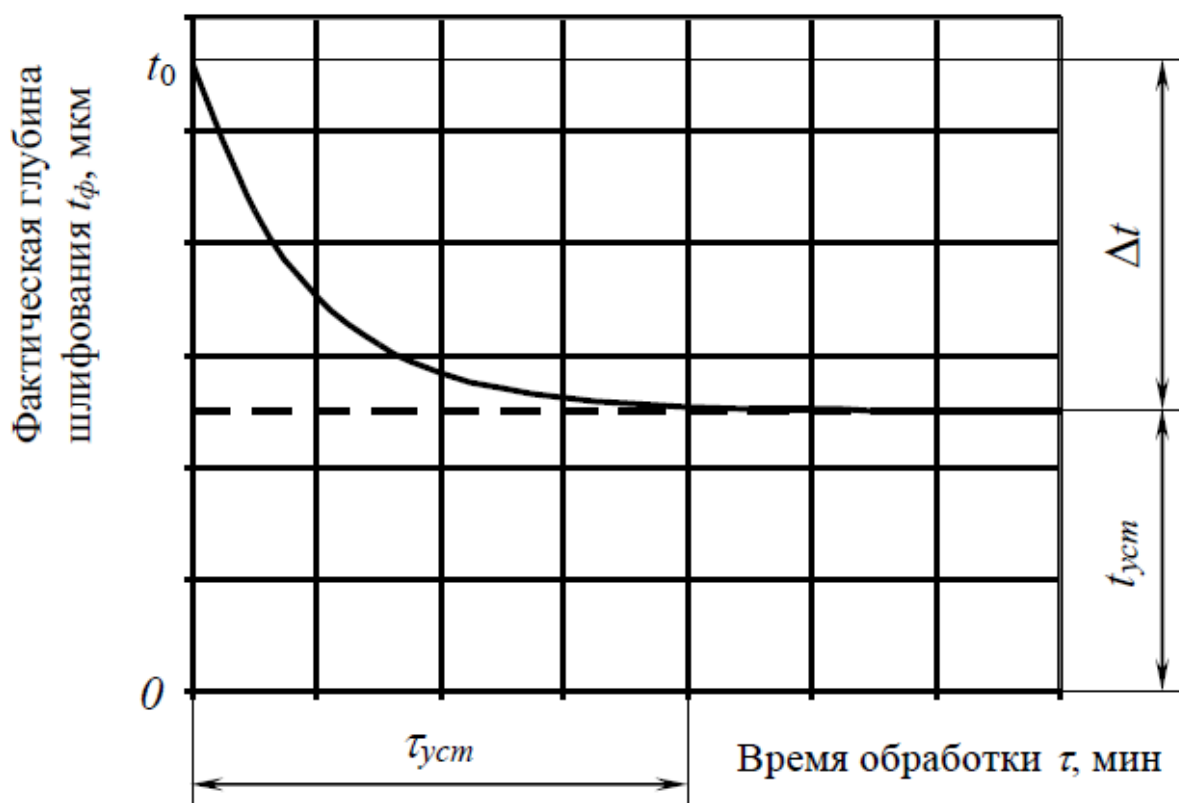


Рис. 3. Изменение глубины шлифования во время обработки по упругой схеме

Это приводит к существенному недоиспользованию режущей способности круга при $\tau < \tau_{уст}$ для случая обработки по жёсткой схеме с постоянной глубиной резания.

Управлять фактической глубиной шлифования t_ϕ и достигнуть наиболее полного использования режущих свойств круга и, соответственно, максимальной периода стойкости инструмента позволяют два способа обработки. Первый хорошо известен – это шлифование по упругой схеме с постоянной радиальной силой P_y , когда изменение фактической глубины резания происходит автоматически в процессе обработки. Второй – это шлифование по жёсткой схеме на шлифовальном станке с ЧПУ, когда глубина шлифования изменяется по программе в соответствии с зависимостью вида.

Параметры уравнения, описывающего изменение глубины шлифования в результате процесса изнашивания зёрен, определяются с помощью разработанной математической модели процесса плоского шлифования по упругой схеме. Параметры этого же уравнения, отражающего совместное влияние на глубину шлифования процессов засаливания межзёренного пространства и изнашивания зёрен на РПК, находятся экспериментальным путём при обработке опытного образца по упругой схеме.

В результате выполненных исследований установлено, что удобным параметром управления для выравнивания фактической производительности шлифования и режущей способности круга, влекущее за собой и повышение периода стойкости инструмента, является фактическая глубина шлифования. Полученные результаты будут использованы при разработке методики определения оптимальных режимов обработки по критерию режущей способности круга.

ТР13. Шлифование с применением кругов переменной зернистости

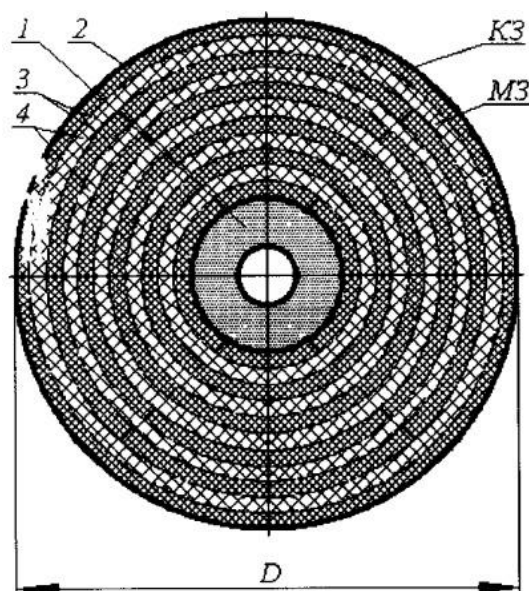


Рис. 4. Конструкция алмазно-абразивного круга

Задача изобретения – расширение технологических возможностей изготовления и восстановления шлифовальных кругов на вулканитовых, бакелитовых и глифталевых связках, снижение себестоимости изготовления кругов, не требующее дорогого специального технологического оборудования, повышение производительности обработки и стойкости круга.

Поставленная задача решается с помощью предлагаемого алмазно-абразивного круга с комбинированной зернистостью, имеющего ступицу и периферийную рабочую часть, причем периферийная рабочая часть выполнена в виде комплектов концентрических слоев с зернистостью абразива в комплекте, последовательно убывающей в радиальном направлении, при этом число слоев в комплекте равно числу переходов (черновой, получистовой, чистовой) для конкретных условий шлифования заготовок.

Особенности конструкции предлагаемого алмазно-абразивного круга поясняются чертежом.

На рисунке 4 представлена конструкция предлагаемого алмазно-абразивного круга, у которого пять комплектов концентрических слоев по два слоя с крупной и мелкой зернистостью абразива в комплекте, вид сбоку, условно принято: темные слои – крупнозернистые, светлые слои – мелкозернистые;

Предлагаемый алмазно-абразивный круг имеет ступицу 1 и периферийную рабочую часть 2, последняя состоит из концентрических слоев 3, 4 и т.д. с различной зернистостью, например слой 3 – выполнен из крупнозернистого (КЗ) абразива, слой 4 – из мелкозернистого (МЗ) абразива. Слои 3, 4 и т.д. образуют комплект концентрических слоев с зернистостью абразива в комплекте, последовательно убывающей в радиальном направлении от периферии к центру. Число слоев 3, 4 и т.д. в комплекте равно числу переходов (черновой, получистовой, чистовой и т.д.) для конкретных условий шлифования заготовок. Таким образом, если заготовки будут подвергаться шлифованию в три перехода, например черновое, получистовое и чистовое шлифо-

вание, то число слоев в комплекте – должно быть три, это крупнозернистый, среднезернистый (СЗ) и мелкозернистый слой.

Таким образом, имеет место объединение при двух различных зернистостях по диаметру круга чернового и чистового шлифования в однооперационное. При трех зернистостях – в один прием реализуется черновое, получистовое и чистовое шлифование и т.д.

Выбор количества слоев с различной зернистостью и соотношение их толщин может быть рассчитано по известным зависимостям, либо определено экспериментально для конкретных условий обработки.

Конструктивно круг с комбинированной зернистостью может быть выполнен на установке, основанной на наращивании алмазно-абразивных слоев на жидкой консистентной связке с последующим затвердеванием в сушильной камере, где возможно получение обычных, прерывистых и с аксиально-смещенным режущим слоем шлифовальных кругов.

ТР14. Шлифование с применением вложенных друг в друга зерен по типу «матрешки»

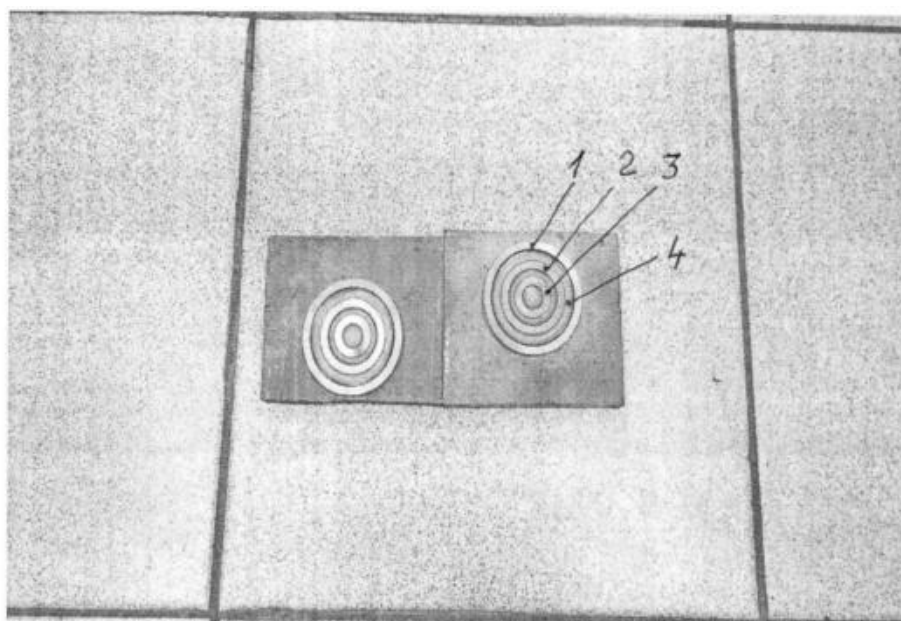


Рис. 5. Конструкция абразивного зерна

Технически поставленная цель достигается путем использования «принципа матрешки», при котором одно наружное зерно имеет вставленные в него несколько внутренних зерен равной высоты, которые стандартными способами (например, связующим из эпоксидной композиции) прочно крепятся к жесткой или гибкой основе. Это позволяет утверждать, что заявленный вариант соответствует критерию «новизна», отвечает изобретательскому уровню, решает поставленные задачи/цели и имеет большое практическое значение.

Сущность изобретения поясняется чертежом, на котором в макромасштабе представлен демонстрационный натурный вариант изготовленного шлифовально-абразивного устройства. В частности, у изображенных двух схожих по сути, но разных по твердости, вариантов имеются по три режущие кромки 1–3 зерен. При этом каждое зерно вставлено по типу матрешки одно в другое. В кольцевых пазах 4 видно связующее, прочно скрепляющее между собой в горизонтальной плоскости как сами зерна, так и прикрепляющее их к основе. Форма таких зерен, как показала практика, может быть любая, например прямоугольная, квадратная и др. Наружная поверхность каждого собираемого в единый блок такого зерна может иметь цилиндрическую форму или, например, конусную, сужающуюся, в направлении к основе. Если крепящая такие зерна композиция имеет высоту несколько меньшую, чем высота зерен, то оставшееся до верха зерна пространство может быть заполнено, например, смазочно-охлаждающей технологической средой (СОТС), скажем, пластичной смазкой, для охлаждения устройства в процессе работы. При этом смазочный материал оказывается в замкнутой с боков нише, что не позволяет ему свободно разлетаться в стороны.

Изготовление и работа заявленного устройства. На станке-автомате изготавливаются предложенные режущие-шлифовальные зерна, которые роботом одно в другое укладываются по принципу собираемых матрешек и располагаются на жесткую или гибкую основу. Для прочного соединения таких

зерен с основой, как и прочного соединения зерен между собой за счет наличия между ними кольцевых пазов, используется вводимая застывающая композиция. После заполнения основы такими зернами и отверждения крепящей композиции устройство готово к работе. При этом начинают резать или шлифовать только наружные зерна «матрешки». Остальные (внутренние) зерна первоначально не работают, резервируя тем самым постепенно выходящие из строя (скалывающиеся или износившиеся) наружные зерна. Тем самым заметно продлевается срок службы таких шлифовально-абразивных устройств, улучшается качество обработки поверхностей, так как внутренние зерна имеют одинаковую высоту с наружными зернами.

Результаты расчетов: стойкость шлифовального круга разработанного варианта устройства возрастает в 3 раза по сравнению с любым известным в мире вариантом. Для проведения экспериментов на плоскошлифовальном станке использовались два варианта изготовления такой «матрешки» из зерен, имеющих режущую часть разной твердости. Обрабатывались поверхности стальной детали. В том случае, если использовать одно зерно вместо трех, ресурс работоспособности устройства снижался практически ровно в три раза. Форма вкладываемых друг в друга зерен может быть различной, например прямоугольной, квадратной, кольцевой или иной, при этом и наружная форма каждого зерна может соответствовать его внутренней форме либо отличаться, например, имея конусообразный вид, сужающийся в сторону основы.

ПР2. Повышение стойкости шлифовального круга с помощью увеличения режущих кромок, воспринимающих нагрузку

Одним из прямых решений задачи по повышению стойкости шлифовального инструмента является увеличение количества кромок, воспринимающих нагрузку. В свою очередь их количество зависит от качества абразивного материала, а именно правильность формы кристаллов, их изометрично-

стью и размерами, что обусловлено условиями кристаллизации. Существующие в настоящее время технологии производства абразивных материалов таковы, что формы отдельных зерен в пределах стандартной фракции абразивного материала весьма различаются друг от друга. Такая неоднородность форм зерен внутри стандартных фракций абразивов в целом оказывает сильное влияние на период стойкости шлифовального инструмента.

Анализ эффективности применения шлифовальных кругов показывает, что, несмотря на широкое распространение, они лишь частично используют свои потенциальные возможности. Одной из основных причин такого положения является неупорядоченность формы и ориентации абразивных зерен в теле данных инструментов. Произвольная форма и расположение зерен в теле кругов, как следствие, формируют произвольную и неблагоприятную геометрию их режущих микроклиньев.

В результате часть зерен не участвует вообще, либо принимает слабое участие в совокупном процессе микрорезания. Неупорядоченная форма и ориентация зерен формируют также дефекты структуры шлифовальных кругов и, как следствие, снижают их прочность и допустимую скорость работы. Ориентация зерен в шлифовальных кругах открывают перспективу повышения физико-механических и режущих свойств этих инструментов и, поэтому, являются актуальной проблемой.

ТР21. Подбор геометрической формы абразивного зерна

Актуальность проблемы является варьированием величины передних углов шлифовальных зерен, значение которых влияет на возникновение скалывающих напряжений в единичном зерне, и на соотношение сил резания P_y и P_z в процессе микрорезания (Рис. 6). Из рисунка видно, что сила P_z срезает стружку, а сила P_y прижимает зерно к обрабатываемой поверхности (оказывает пластическое деформирование). В результате действия этих сил на пе-

редней поверхности зерна будут действовать реактивные силы, результирующие которых нормальная N и касательная T (сила трения), приложенная в точке X .

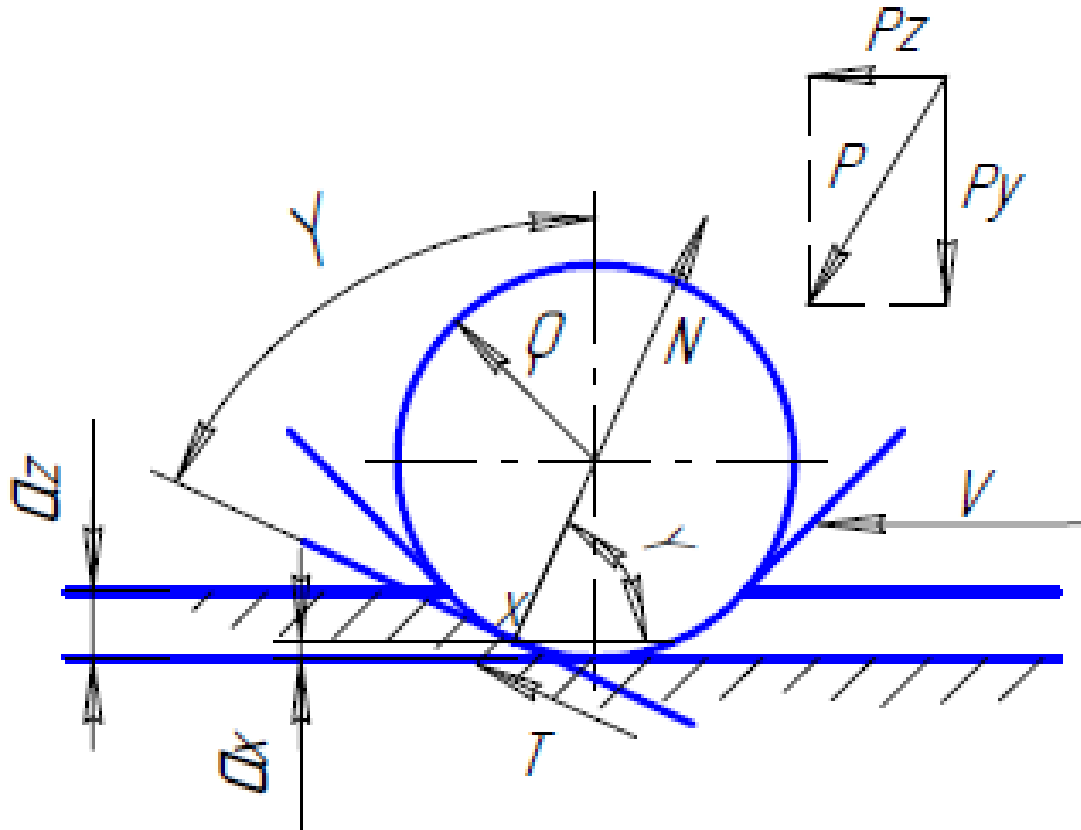


Рис. 6. Система сил при микрорезании

На рис. 7 приведён график зависимости P_y/P_z от γ при различных значениях μ' , где μ' – коэффициент внутреннего трения деформируемого слоя металла в направлении плоскости скалывания. Как видно из графика, P_y/P_z возрастает с увеличением фактического переднего угла $(-\gamma)$, а при $(-\gamma) \approx 60^\circ$ $P_y/P_z \rightarrow \infty$.

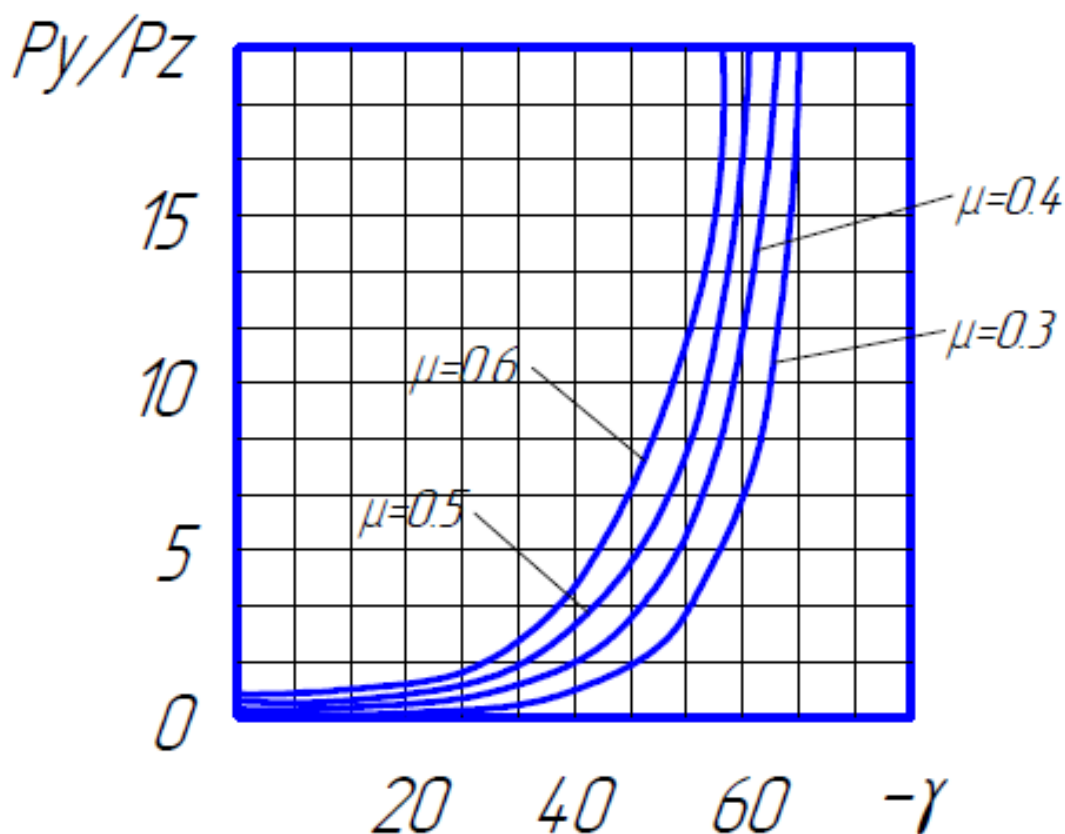


Рис. 7. Зависимость P_y / P_z от γ и коэффициента трения μ при микрорезании

Скалывание элементов металла произойдёт в направлении, где величина силы N будет минимальной.

Как известно, влияние толщины срезаемого слоя a_z на силы резания выражается через фактический передний угол γ (см. схему на рис. 7). При прочих равных условиях увеличение a_z приводит к уменьшению γ , а, следовательно, к снижению:

- 1) степени деформации металла;
- 2) условного напряжения резания и силы резания, необходимой для отделения стружки.

В зоне же особо тонких слоёв, для которых фактический угол резания (в том числе $-\gamma$) является максимальным, происходит смятие слоёв движущимся зерном.

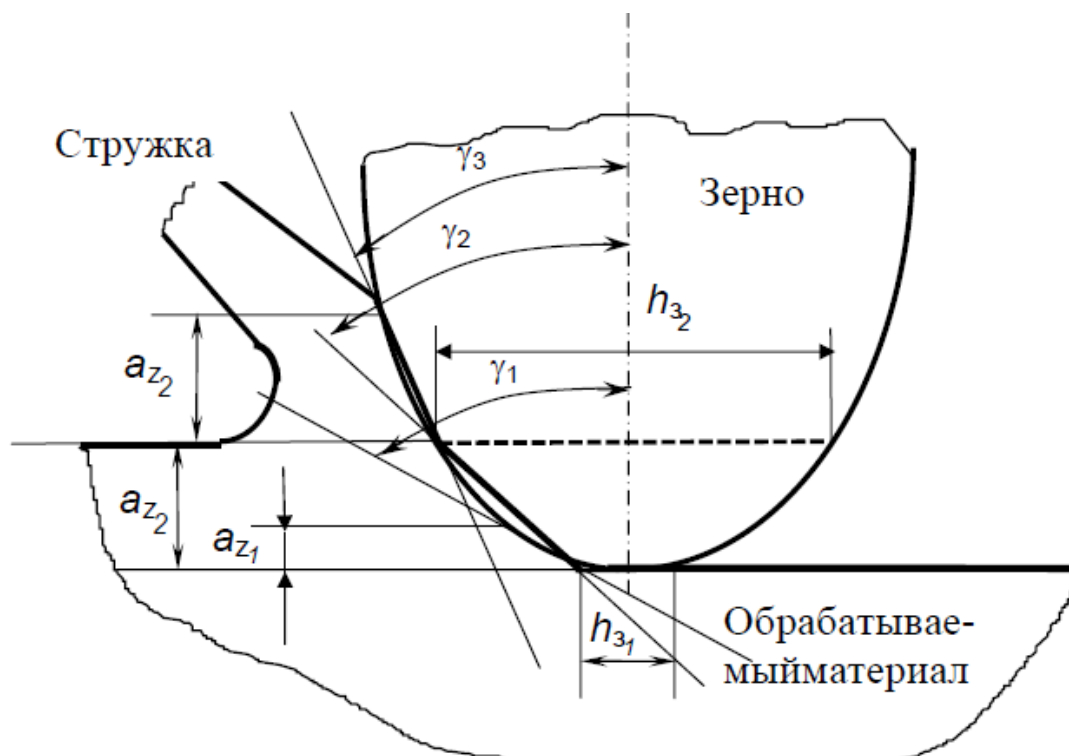


Рис. 8. Схема влияния глубины среза a_z , величины площадки износа h_s на зерне на передний угол γ

Закключение: Накопленный на сегодняшний день опыт в абразивной обработке не позволяет выдать общие рекомендации по оптимизации и повышению эффективности процесса шлифования, заключающегося по подбору геометрической формы зерна и его ориентации в связке. Необходимо искать новые корреляционные взаимосвязи между формой зерна и его пространственной ориентации в теле инструмента, а также учитывать различные углы, взаимодействующие с обрабатываемым материалом.

Для повышения режущих свойств и износостойкости круга должны применяться классификации по форме, имеющие более точные оценки формы проекции зерна с применением современных устройств ЭВМ и получать

на выходе расширенные группы форм, которые будут в дальнейшем определяться для конкретных условиях обработки. Для дальнейшего изучения этой проблемы предлагается изучить все способы по управлению геометрией зерен и составить общую схему их взаимодействия и перспективы их эффективности (рисунок 10), выявить достоинства и недостатки всех способов, возможность их реализации на практике.



Рис. 9. Методы оптимизации геометрии абразивного зерна

2.1.1. Классификация абразивных зерен произвольной формы



Рис.10. Оценки формы абразивного зерна

Принцип оценки формы зерна по качественным методам основан на отнесении зерна по некоторым признакам в соответствующую группу форм. В качестве примера рассмотрим два способа качественной оценки формы шлифовального зерна. Существует классификация, принцип которой заключается в том, что по форме проекции абразивного зерна, исследуемое зерно относится в одну из групп форм согласно таблице 4.

Таблица 4

Форма абразивных зерен

Название группы форм	Изометрические	Промежуточные	Пластинчатые, мечевидные
Вид проекции зерна			

По другой методике, для определения формы зерна необходимо измерить его габариты по длине (l), ширине (b) и высоте (h). Затем по их соотношению зерно относится в одну из групп (табл. 5).

Таблица 5

Группы зерен

Соотношение $l:b:h$	1:1:1	1:1:0,33	1:0,33:0,33
Название групп форм	изометрические	пластинчатые	игольчатые

Следует отметить недостатки методов качественной оценки: субъективность классифицирования, а также оценка формы зерна по одной проекции, тогда как само зерно является объемным телом, нестрогое определение габаритных размеров зерна и малое число групп, не затрагивающих весь спектр форм зерен. Однако нельзя не отметить и достоинство методов качественной оценки – быстрота.

Таким образом, методы качественной оценки могут применяться при первоначальном анализе форм абразивных зерен.

Для исследования влияния формы шлифовальных зерен на эксплуатационные характеристики шлифовальных инструментов более предпочтительны методики количественной оценки.

Все существующие способы количественной оценки формы зерна имеют общую методику расчета и основаны на проекции зерна, то есть:

- 1) определить геометрические размеры по 3-м координатам;
- 2) вычислить реальный объем зерна;
- 3) определить особенности рельефа поверхности зерна;
- 4) использовать количественную меру классификации всего многообразия форм отдельных зерен с помощью определенного числового ряда.

Последнее особенно важно, т.к. позволяет перейти от грубой качественной оценки форм зерен (изометричные, неизометричные, пластинчатые и игольчатые) к более точной и адекватной к сфере применения количественной оценке «формы» отдельного зерна.

Логично предположить, что методика расчета коэффициента формы, наиболее точно отражающего форму абразивного зерна, должна основываться на геометрических характеристиках самого зерна.

Поэтому для каждой проекции абразивного зерна целесообразно определить свой коэффициент формы. Естественно, что сама методика оценки формы абразивного зерна будет иметь усложненную форму по сравнению с традиционными методиками. Количественную характеристику формы зерна можно записать в виде:

$$K_{\phi}^o = \frac{K_{\phi}^r}{K_{\phi}^b},$$

где K_{ϕ}^o – объемный коэффициент формы;

K_{ϕ}^r – коэффициент формы горизонтальной проекции;

K_{ϕ}^b – коэффициент формы боковой проекции.

В таблице 3 приводятся диапазоны величин K_{ϕ}^r и K_{ϕ}^b , а так же названия групп форм. Существуют различные методики определения коэффициента формы зерна:

- 1) $K_{\phi}^o = \frac{l}{b}$, – коэффициент формы рассчитывается как отношение максимальной длины проекции (l) к ее ширине (b);
- 2) $K_{\phi}^o = \frac{D}{d}$, – коэффициент формы определяется как отношение описанной вокруг проекции зерна окружности (D) к вписанной в нее окружности (d);

- 3) $K_{\phi}^o = \frac{d}{D}$, – коэффициент формы рассчитывается как отношение вписанной в проекцию зерна окружности (d) к описанной вокруг проекции зерна окружности (D);
- 4) $K_{\phi}^o = \frac{r}{R}$, – коэффициент формы рассчитывается как отношение радиуса вписанной в проекцию зерна окружности (r) к радиусу описанной вокруг проекции зерна окружности (R);
- 5) $K_{\phi}^o = \frac{S_{0,0}}{S_{п.з}}$, – коэффициент формы оценивается как отношение площади описанной вокруг проекции зерна окружности ($S_{0,0}$) к площади проекции зерна ($S_{п.з}$). По этому коэффициенту рассчитывались отдельные проекции зерен в табл.3(прилагается и пояснительный рисунок 12)

Таблица 6.

Названия групп форм и диапазоны величин K_{ϕ}^r и K_{ϕ}^b

Изометрические $K_{\phi}^r \in [1;0,8)$ $K_{\phi}^b \in [1;0,8)$	Уплощенные $K_{\phi}^r \in [1;0,8)$ $K_{\phi}^b \in [0,8;0,5)$	Дисковидные $K_{\phi}^r \in [1;0,8)$ $K_{\phi}^b \in [0,5;0,0)$
Удлиненные $K_{\phi}^r \in [0,8;0,5)$ $K_{\phi}^b \in [1;0,8)$	Промежуточные $K_{\phi}^r \in [0,8;0,5)$ $K_{\phi}^b \in [0,8;0,5)$	Широкопластинчатые $K_{\phi}^r \in [0,8;0,5)$ $K_{\phi}^b \in [0,5;0,0)$
Игольчатые $K_{\phi}^r \in [0,5;0,0)$ $K_{\phi}^b \in [1;0,8)$	Узкопластинчатые $K_{\phi}^r \in [0,5;0,0)$ $K_{\phi}^b \in [0,8;0,5)$	Мечевидные $K_{\phi}^r \in [0,5;0,0)$ $K_{\phi}^b \in [0,5;0,0)$

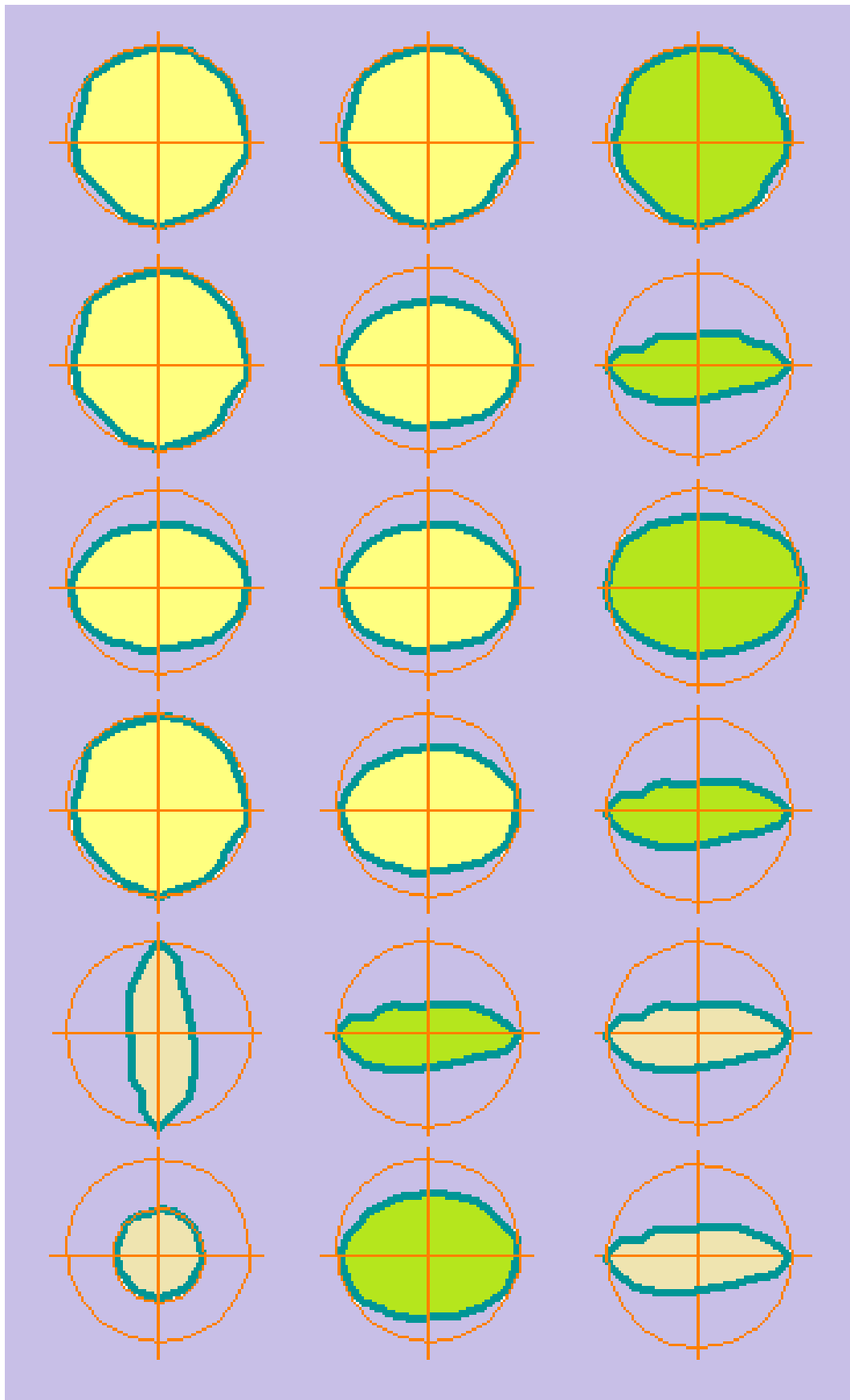


Рис.11. Основные формы абразивного зерна

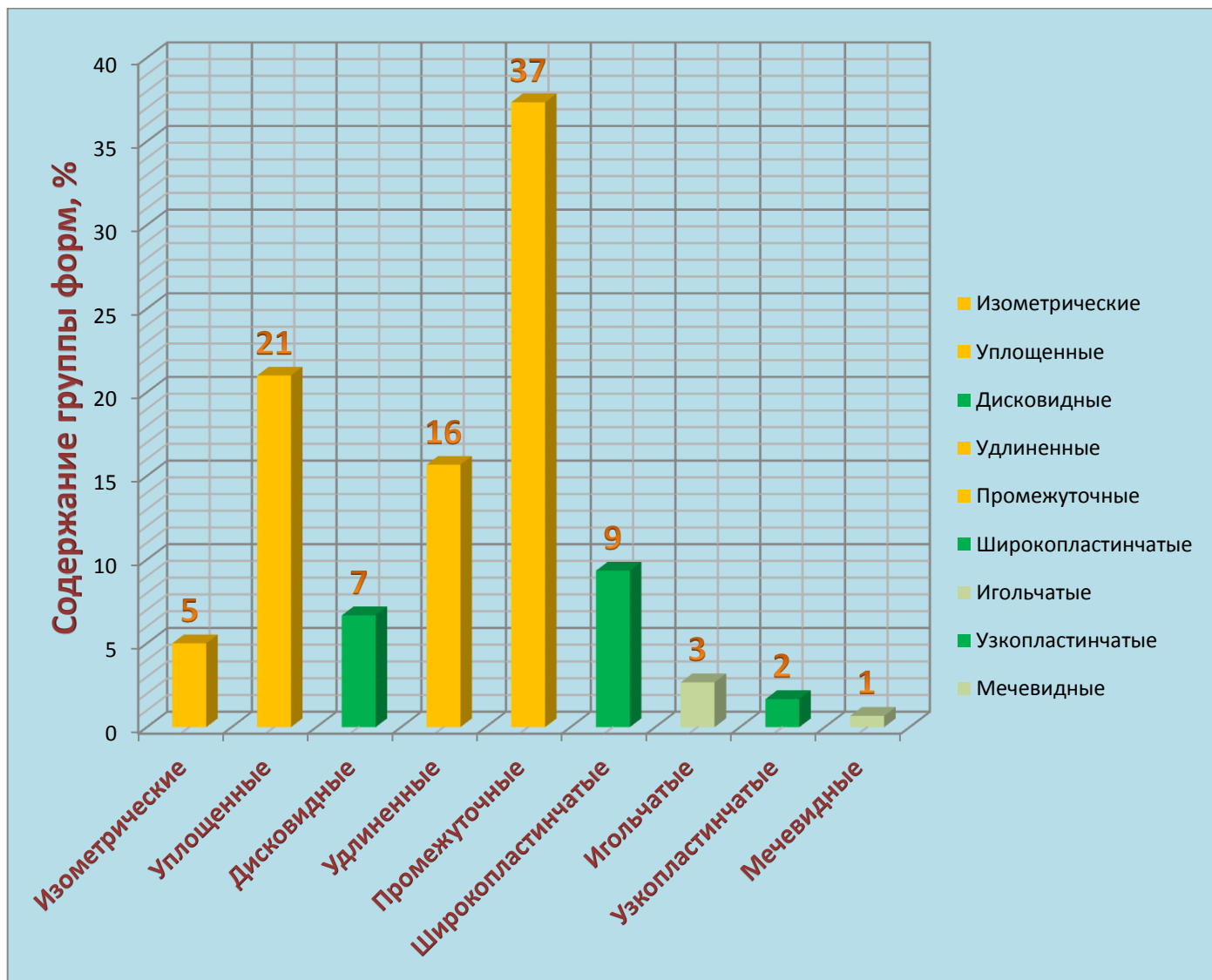


Рис.12. Среднее процентное соотношение форм абразивных зерен в теле шлифовального инструмента

В электрокорунде и других абразивных материалах среднезернистые (размер зерна 200 – 800 мкм) и мелкозернистые (размер зерна 50 – 160 мкм) фракции содержат соответственно 50 – 65 % и 25 – 45 % изометричных зерен. Можно сделать вывод, что зернистость абразива оказывает влияние на распределение форм зерен, причем прослеживается зависимость процентного содержания тех или иных форм зерен от номера зернистости. С увеличением размера зерна уменьшается содержание дисковидных, удлиненных, широкопластинчатых, узкопластинчатых и мечевидных форм, а содержание изометрических, уплощенных, промежуточных и игольчатых увеличивается. Таким образом, можно рекомендовать для исследования формы абразивных зерен:

- методы качественной классификации при первоначальном анализе спектра форм зерен;
- метод оценки формы зерна по боковой проекции для обработки значительных объемов абразивных зерен;
- метод количественной оценки формы зерна по объемному коэффициенту формы для исследований, связанных с высокими требованиями по точности;
- количественную оценку формы зерна целесообразно рассчитывать при помощи специальной программы для ЭВМ, которая является более точной и адекватной к различным сферам применения этого показателя. Рассчитать количественные характеристики зерен различных геометрических форм с целью уточнения теории вибросепарации, прогнозирования траектории частицы на виброплоскости и, как следствие, для осуществления классификации частиц одновременно и по размеру, и по форме.

2.1.2. Пространственная ориентация абразивных зерен

Пространственная ориентация абразивных зерен в теле инструментов также существенно влияет на геометрию зерен и эффективность процесса шлифования. Ориентация зерен при изготовлении шлифовальных инструментов может быть реализована различными способами. Также в настоящее время существуют различные методы покрытия абразивных зерен магнитным материалом: химический, карбонильный, вакуумного распыления, но наибольшее распространение получил способ электролитического осаждения никеля на абразивные зерна. Однако электролитическая металлизация абразивных зерен сглаживает их микрорельеф, что снижает прочность удержания зерен в инструменте на полимерных связках. Основные способы ориентирования представлены ниже.

Способ изготовления твердотельных шлифовальных инструментов, при котором металлизированные шлифовальные зерна ориентируют воздействием электромагнитного поля в сочетании с ультразвуковыми колебаниями. Недостатком известного способа является то, что для его реализации необходимо предварительно производить металлизацию шлифовальных зерен, что требует дополнительных затрат времени и увеличивает стоимость изготовления инструмента. Кроме того, шлифовальные инструменты, включающие металлизированные зерна, имеют ряд недостатков. Так, при работе шлифовальных инструментов из металлизированных зерен наблюдается более активное, чем при работе шлифовальных инструментов из неметаллизированных зерен, появление эффекта «засаливания», т.е. покрытия его рабочей поверхности пленкой обрабатываемого материала. В результате повышается температура в зоне резания, появляются прижоги и возникает необходимость дополнительной правки инструмента для удаления «засаленного» слоя, что ограничивает использование шлифовальных инструментов, изготовленных согласно данному известному способу, для обработки металлов.

Способ изготовления шлифовальных инструментов, при котором обычные неметаллизированные шлифовальные зерна, предварительно покрытые пленкой клея, помещают в ферромагнитную жидкость и ориентируют электромагнитным полем, клеевое покрытие полимеризуется, после чего ферромагнитную жидкость удаляют. Недостатком известного способа является то, что данным способом возможно изготавливать только пористые шлифовальные инструменты. Причина этого состоит в том, что в процессе изготовления на месте удаленной ферромагнитной жидкости образуются поры, объемная доля которых в инструменте не может быть изменена, поскольку в способе отсутствует операция прессования. Недостатком способа также является необходимость применения специального клея, способного полимеризоваться в присутствии ферромагнитной жидкости, при этом с целью обеспечения производительности процесс полимеризации клея должен осуществляться в короткий промежуток времени.

Способ изготовления твердотельных шлифовальных инструментов на основных типах связующих (бакелитовой, керамической, вулканитовой и других связках), при котором зерна ориентируют воздействием электростатического поля. Таким образом, данный известный способ является технически сложным, требует применения специального клея и ферромагнитной жидкости, а номенклатура инструментов, изготавливаемых указанным способом, ограничена пористыми шлифовальными инструментами, в качестве связующего в которых может использоваться только специальный клей.

Способ изготовления шлифовальных инструментов с ориентированными зернами, который включает приготовление абразивной смеси, укладку полученной смеси через сито в пресс-форму и ориентацию шлифовальных зерен воздействием на них электростатического поля. Недостатком известного способа является то, что шлифовальные инструменты, изготавливаемые по этому способу, обладают малой прочностью, что определяет их невысокие максимальные рабочие скорости. Это обусловлено тем, что связку, использу-

емую для приготовления абразивной смеси, в данном способе приготавливают в виде клинкера, т.е. частиц, размеры которых соизмеримы с размерами шлифовальных зерен, а также тем, что в процессе приготовления абразивной смеси не предусмотрено смешивание зерен с увлажнителями. Недостаток данного известного способа также состоит в том, что использование связки, приготовленной в виде клинкера, т.е. частиц, соизмеримых со шлифовальными зернами, ограничивает номенклатуру шлифовальных инструментов, которые возможно изготовить данным способом. Так, например, связка в виде клинкера не используется при изготовлении шлифовальных инструментов на бакелитовой и глифталевой связках.

Существует способ изготовления шлифовальных инструментов с ориентированными зернами, включающий приготовление абразивной смеси, укладку ее в пресс-форму через вибрирующее сито, ориентирование шлифовальных зерен с воздействием на них электростатическим полем, формование шлифовального инструмента и его термическую обработку. В процессе приготовления абразивной смеси шлифовальные зерна смешивают с увлажнителями, связующими и наполнителями и протирают полученную смесь через сито, после чего непосредственно в пресс-форме располагают вертикально электроды в виде тонкостенных металлических пластин с обеспечением требуемого направления ориентации шлифовальных зерен и созданием между электродами электростатического поля. Укладку абразивной смеси производят через вибрирующее сито до образования в пресс-форме слоя абразивной смеси требуемого уровня, после чего вибрацию сита, укладку абразивной смеси и действие электростатического поля прекращают. Далее извлекают электроды из пресс-формы с перемещением их строго вверх, разравнивают наружную поверхность слоя абразивной смеси в пресс-форме с удалением ее излишка, после чего производят формование шлифовального инструмента путем сжатия абразивной смеси и извлечение его из пресс-формы. Недостатком этого метода является наличие в рабочей полости электродов, которые

увеличивает время приготовления абразивного инструмента, а также нарушается цельность инструмента, необходимость аккуратного извлечения электродов носит человеческий характер, значит есть риск появления погрешностей о брака в изготавливаемом инструменте. Конструкция пресс-формы усложняется из-за наличия электродов.

На сегодняшний день проведены исследования и эксперименты [21,22,23,24] по ориентированию абразивных зерен под различными углами к периферии инструмента со значениями: $\Theta = 0^\circ$, $\Theta = 22^\circ 30'$, $\Theta = 45^\circ$ (135°), $\Theta = 67^\circ 30'$, $\Theta = 75^\circ$, $\Theta = 90^\circ$. Существуют два основных значения углов: радиальной ориентацией зерен, т.е. их пространственным расположением вдоль радиусов, в направлении от центра к периферии круга ($\Theta \approx 90^\circ$); тангенциальной ориентацией зерен ($\Theta \approx 0^\circ$), при которой наибольшие оси симметрии зерен располагаются параллельно плоскости резания (рисунок 13).

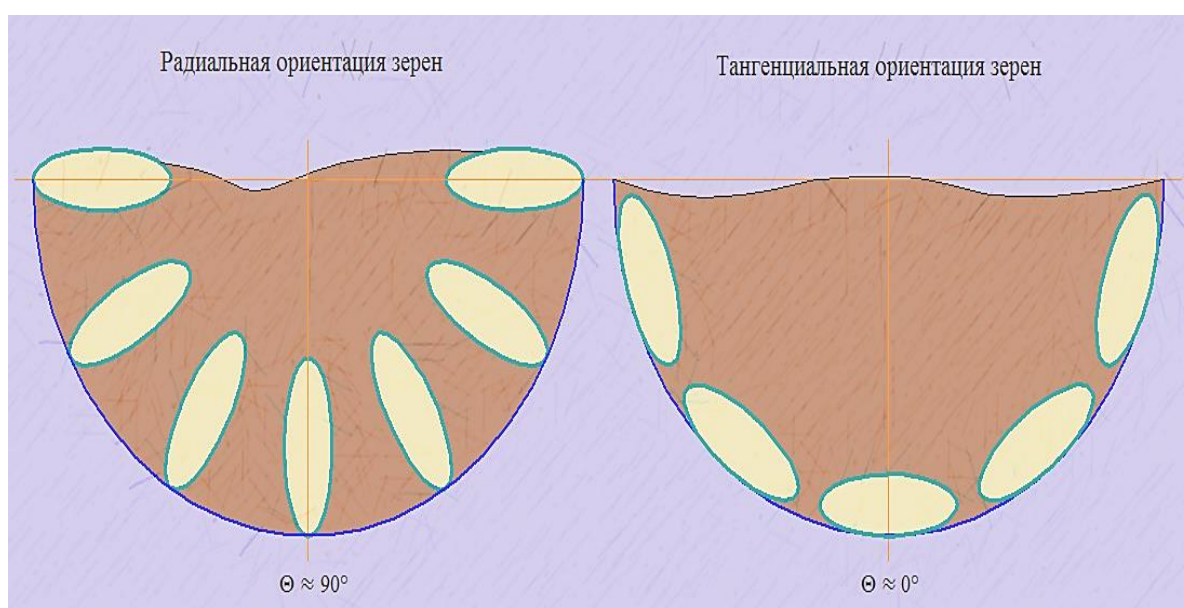


Рис.13. Основные виды ориентации абразивных зерен

Схема процесса пространственной ориентации абразивных зерен представлена на рисунке 14

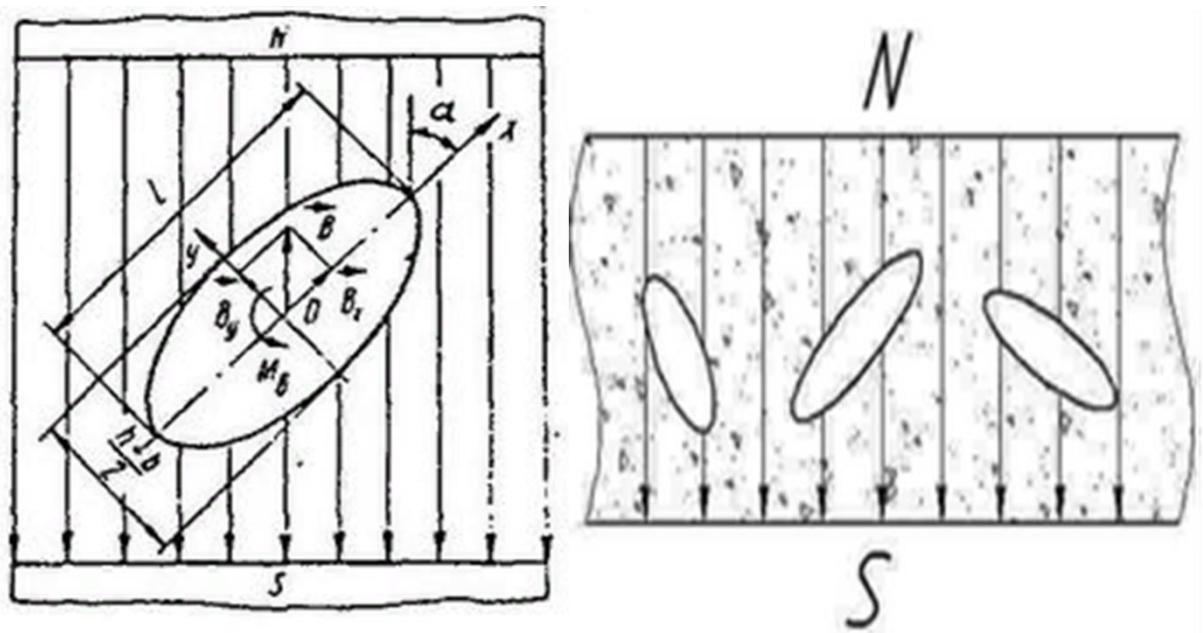


Рис. 14. Схема процесса пространственной ориентации абразивных зерен

2.1.3. Зависимость эксплуатационных параметров шлифовальных кругов от формы и ориентации абразивных зерен

В качестве рассматриваемых эксплуатационных показателей приняты следующие параметры:

- 1) Режущая способность (Q , г/мин), называемая также производительностью шлифования и определяемая как отношение массы снятого материала заготовки за определенный период времени;
- 2) Коэффициент шлифования ($K_{ш}$), вычисляемый как отношение массы снятого материала заготовки к израсходованной массе круга;
- 3) Эффективная мощность резания ($W_{эф}$, Вт), характеризующая уровень энергозатрат при работе шлифовального круга и выражаемая через разницу мощностей рабочего и холостого ходов;
- 4) Температура в зоне резания (T , $^{\circ}\text{C}$);
- 5) Шероховатость обработанной поверхности (Ra , мкм).

Результаты различных исследований и испытаний [21, 22, 23, 24] показывают, что:

- Значение режущей способности абразивного инструмента возрастает от применения зерен изометрической формы с тангенциальной ориентации, к зернам игольчатой формы с радиальной ориентацией. Так, режущая способность кругов с изометричными зернами примерно на 7,5 % ниже, чем у стандартных кругов. У кругов с игольчатой формой зерен, напротив, режущая способность на 17% выше, чем у стандартных инструментов. Причиной роста режущей способности при переходе от изометрической формы зерен к игольчатой является различие величин углов резания. Так, игольчатые зерна имеют более острые передние и большие задние углы, по сравнению с изометричными зернами. Соответственно, они при одинаковых режимах резания более глубоко внедряются в обрабатываемый материал и срезают стружку большего сечения, по сравнению с изометричными зернами. Другой причиной является то, что количество режущих кромок, находящихся на рабочей поверхности шлифовальных кругов, с зернами игольчатой формы несколько превышает количество режущих кромок, чем у зерен изометричной формы.
- Коэффициент шлифования абразивного инструмента возрастает от применения зерен изометрической формы с тангенциальной ориентации, к зернам игольчатой форм с радиальной ориентацией. Так, коэффициенты шлифования кругов с изометричными зернами примерно на 27 % выше, чем у стандартных кругов. У кругов с игольчатой формой зерен, напротив, коэффициенты шлифования на 26,7% ниже, чем у стандартных инструментов. Причиной снижения коэффициентов шлифования шлифовальных кругов при переходе от изометричной к игольчатой форме является то, что последние воспринимают нагрузку заостренными режущими клиньями и имеют максимальные напряжения вблизи своих вершин, что способствует откалыванию небольших частиц, тем самым появлению эффекта самозатачивания. Зерна изомет-

ричной формы имеют точечный характер приложения нагрузки, что может привести к вырыванию и разрушению самого зерна. Такие зерна обладают большей прочностью по сравнению с зернами других форм.

- Эффективная мощность, затрачиваемая на резание, повышается при переходе от кругов с изометричной формой и тангенциальной ориентацией зерен к кругам с игольчатой формой радиальной ориентацией (в 1,12 – 1,16 раза). Эффективная мощность резания при работе шлифовальными кругами с изометричными зернами на 4,8% ниже, чем у стандартных инструментов. При эксплуатации шлифовальных кругов с игольчатыми зернами, напротив, эффективная мощность резания примерно на 8,5 % выше, чем у стандартных инструментов. Полученных данных показывают [21, 22, 23, 24], что прослеживается одинаковая взаимосвязь между ростом режущей способности отрезных кругов и увеличением эффективной мощности резания.
- Температура резания (с помощью искусственной закладной термопары [21], или анализ цветов побежалости, возникающих при нагреве на поверхности металла [23]) при работе шлифовальными кругами с игольчатыми зернами радиальной ориентацией выше температуры в зоне резания стандартной инструментов на 11÷15%, а с зернами изометрической формы и тангенциальной ориентацией – ниже на 10÷13%.
- Шероховатость поверхности, получаемая шлифовальными кругами с игольчатыми зернами радиальной ориентацией выше шероховатости, получаемой стандартной лентой на 20÷30%, а с зернами изометрической формы тангенциальной ориентацией – ниже на 15÷20%.

Для общего представления зависимости эксплуатационных показателей шлифовальных инструментов от формы и ориентации абразивных зерен приводится схематический рисунок 15.



Рис.15. Зависимость эксплуатационных показателей шлифовальных инструментов от формы и ориентации абразивных зерен

Выводы и рекомендации по применению: для обеспечения максимальной стойкости шлифовальных инструментов, при прочих равных условиях, целесообразно использовать зерна, близкие к изометрической формы тангенциальной ориентацией с значениями $K_{\phi}^r \in [1 \div 0,5)$ и $K_{\phi}^b \in [1 \div 0,5)$; для достижения максимальной режущей способности шлифовальных инструментов, снижения деформаций обрабатываемого материала и температуры резания необходимо применять зерна, близкие к игольчатой формы радиальной ориентации с значениями $K_{\phi}^r \in [1 \div 0,5)$ и $K_{\phi}^b \in [0 \div 0,5)$.

Из этого вывода можно предложить следующие направления по оптимизации формы абразивных зерен. Не изучен широко вопрос о свойствах абразивных зерен дисковой и пластинчатой форм. Зерна этих форм могут иметь большой спектр оптимизации их геометрии, так как они обладают комбинированными свойствами изометрических и игольчатых форм. Такие формы зерен могут обеспечивать все эксплуатационные параметры в процессе обработки с максимальными оптимизированными показателями, если их ориентировать в теле инструмента под другими углами, нежели, чем ориентировали зерна других форм в различных экспериментах [21,22,23,24]. Так же эти формы зерен позволяют производить пространственную ориентацию в нескольких направлениях по отношению к плоскости резания.

2.1.4. Перспективы и дальнейшие направления оптимизации геометрии абразивных зерен

Оптимизация геометрии абразивных зерен будет проводиться следующими этапами, представленные на рисунке 16



Рис. 16. Этапы оптимизации геометрии абразивных зерен

Предлагается метод разделения частиц одновременно по размеру и по форме – вибросепарация сыпучих материалов на наклонной вибрирующей поверхности. На основе САПР процесса виброклассификации абразивных материалов бесситовым способом на виброклассификаторах типа ВДК предлагается применить компьютерную программу для вычисления коэффициента формы шлифзерна. Эта программа, используя информацию о трех проекциях зерна, на первом этапе определяет «похожесть» зерна на соответствующую «идеальную» геометрическую фигуру (многогранник или диск) и устанавливает принадлежность частицы к той или иной форме. На 2-м этапе рассчитывается коэффициент формы зерен с использованием изображений 3-х

проекций зерна, размер отдельных зерен, процентное содержание фракции. Эта программа поможет для прогнозирования траектории частицы на виброплоскости [29]. На этапе разделения зерен по форме необходимо отобрать зерна дисковой и пластинчатой форм.

Цель в достижении прогрессивного ориентировании абразивных зерен и повышения прочности закрепления абразивных зерен является метод покрытия абразивных зерен магнитным материалом. Суть метода заключается в твердофазном спекании магнитного материала с абразивными зернами. Основой для использования этого процесса, служит принцип печати документов на лазерных принтерах. В основе опыта лежит непосредственно процесс фиксации и последующее спекание частиц красящего тонера с другими материалами, в частности бумаги. В качестве магнитного материала предлагается печатный тонер [26].

Классифицированные зерна по форме предлагается засыпать в керамическую емкость и подвергать нагреванию до температуры приблизительно 200 – 300⁰С. Такая температура выбрана с учетом, что зерна будут транспортироваться к форме с тонером, и их температура снизится до необходимой для спекания, т.е. 180 – 200⁰С. После нагревания зерна будут высыпаться в керамическую емкость с тонером, где будет проходить процесс спекания зерен с магнитным материалом, после процедуры перемешивания и остывания, смесь представляет собой черный комок. Для разделения спекшихся частиц будет проводиться процесс дробления кома и сортировки покрытых зерен на ситах с размером ячеек, соответствующим номеру зернистости. Результаты показывают, что частица в среднем покрывается слоем тонера в средний размер 8 – 10 мкм [26].

Первоначально готовят абразивную смесь, для чего берут шлифовальные зерна требуемой марки и зернистости и последовательно смешивают их с увлажнителями, связующими и наполнителями. После этого, с целью получения однородной массы без комков, полученную смесь протирают

через сито. После чего абразивную смесь через вибрирующее сито начинают укладывать в пресс-форму и делают это до того момента, когда образующийся в пресс-форме слой абразивной смеси достигнет требуемого уровня (рис. 17). Абразивную смесь 7 подают в пресс-форму через вибрирующее сито 8, расположенное над пресс-формой, благодаря чему шлифовальные зерна попадают в пресс-форму в виде множества свободно падающих гранул 6, постепенно заполняют пресс-форму до требуемого уровня, образуя в пресс-форме слой 9 абразивной смеси 9 (рис. 17). Размер отверстий в сите выбирают таким, чтобы абразивная смесь укладывалась в пресс-форму не в виде сплошной массы, а в виде множества отдельных гранул (отдельных шлифовальных зерен, покрытых связующим). Пресс-форма состоит из основания 1, выталкиватель 2, сердечник 3, нижней формовочной плиты 4, двух полуобойм 5.

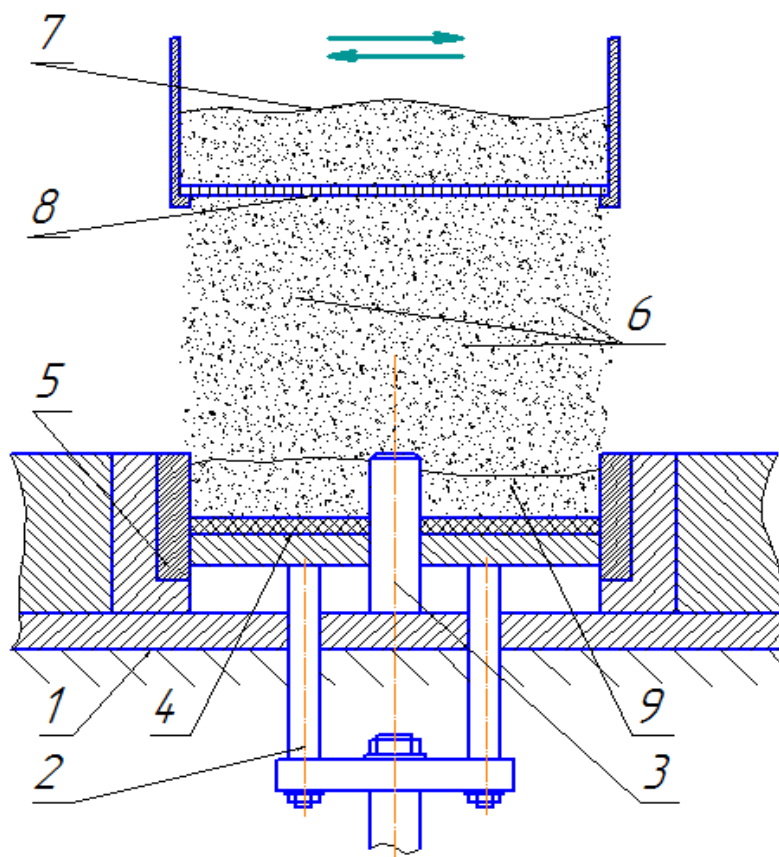


Рис. 17. Укладка абразивной смеси в пресс-форму

Абразивную смесь укладывают до момента, когда образующийся в пресс-форме слой абразивной смеси достигает требуемого уровня. После этого наружную поверхность слоя 10 абразивной смеси 9, уложенной в пресс-форму, разравнивают и удаляют излишки абразивной смеси, например, с помощью разравнивающего устройства 11 (рис.18).

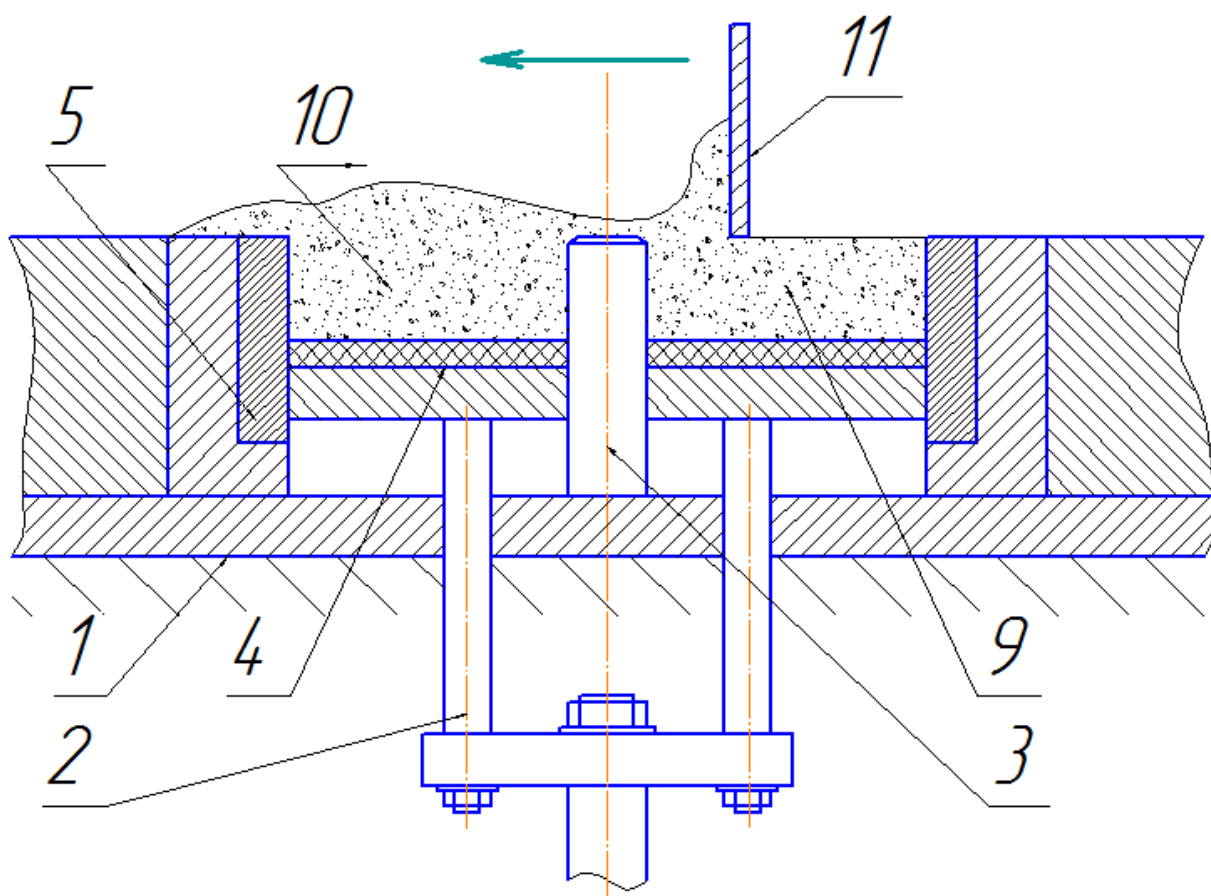


Рис. 18. Выравнивание абразивной смеси

После выравнивания абразивной смеси в пресс-форме между нижней 4 и верхней 14 формовочными плитами создают регулируемое магнитное поле с регулируемой напряженностью. Нижняя формовочная плита 4 состоит из магнита, разделенного слоем немагнитного материала по отношению к полости пресс-формы. Между торцами полуобойм 5 установлены две упругие С-образные пружины, закрепленные в основании 1. Такая конструкция

позволяет передавать колебания к периферии на абразивную массу 9 в поперечном направлении от ультразвуковых генераторов 12 и 13. (рис. 19)

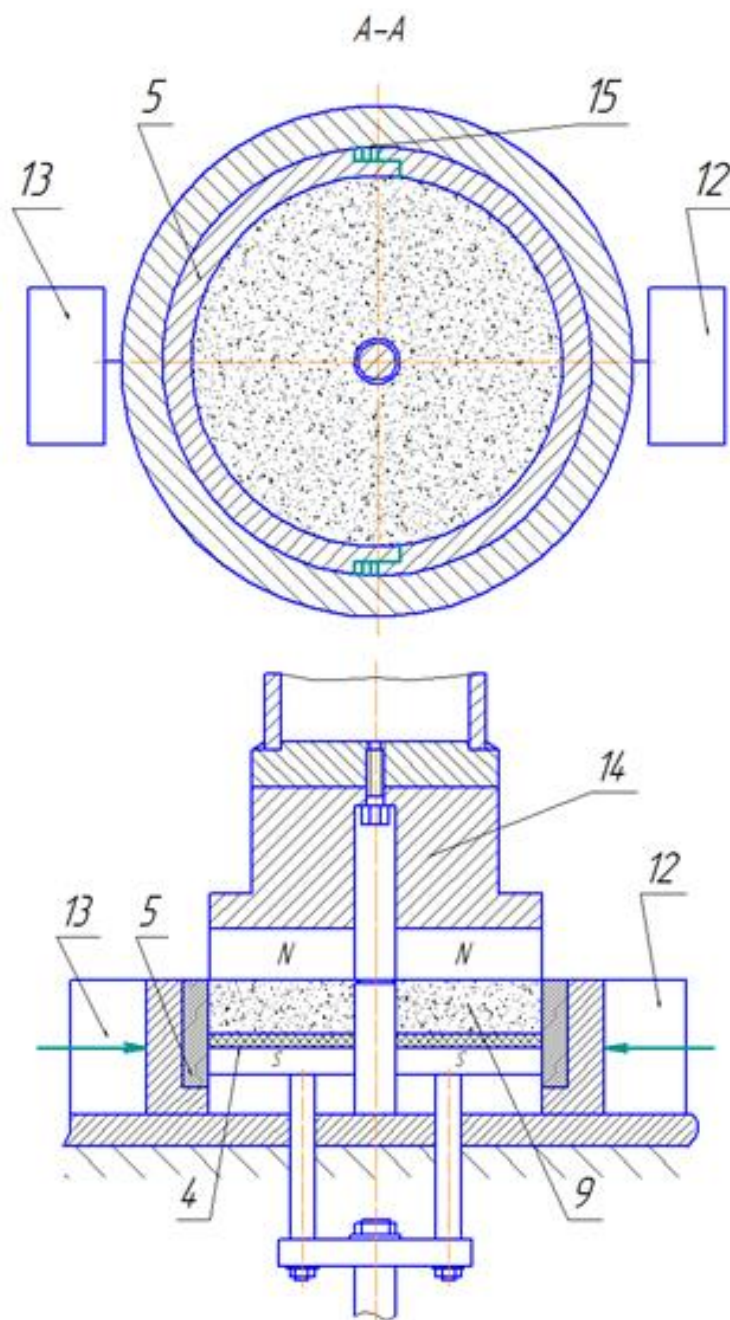


Рис. 19. Ориентирование абразивных зерен

Затем, производят формование путем сжатия слоя абразивной смеси 9 в пресс-форме, путем приложения сжимающего усилия F к верхней формовочной плите 14 (рис.20).

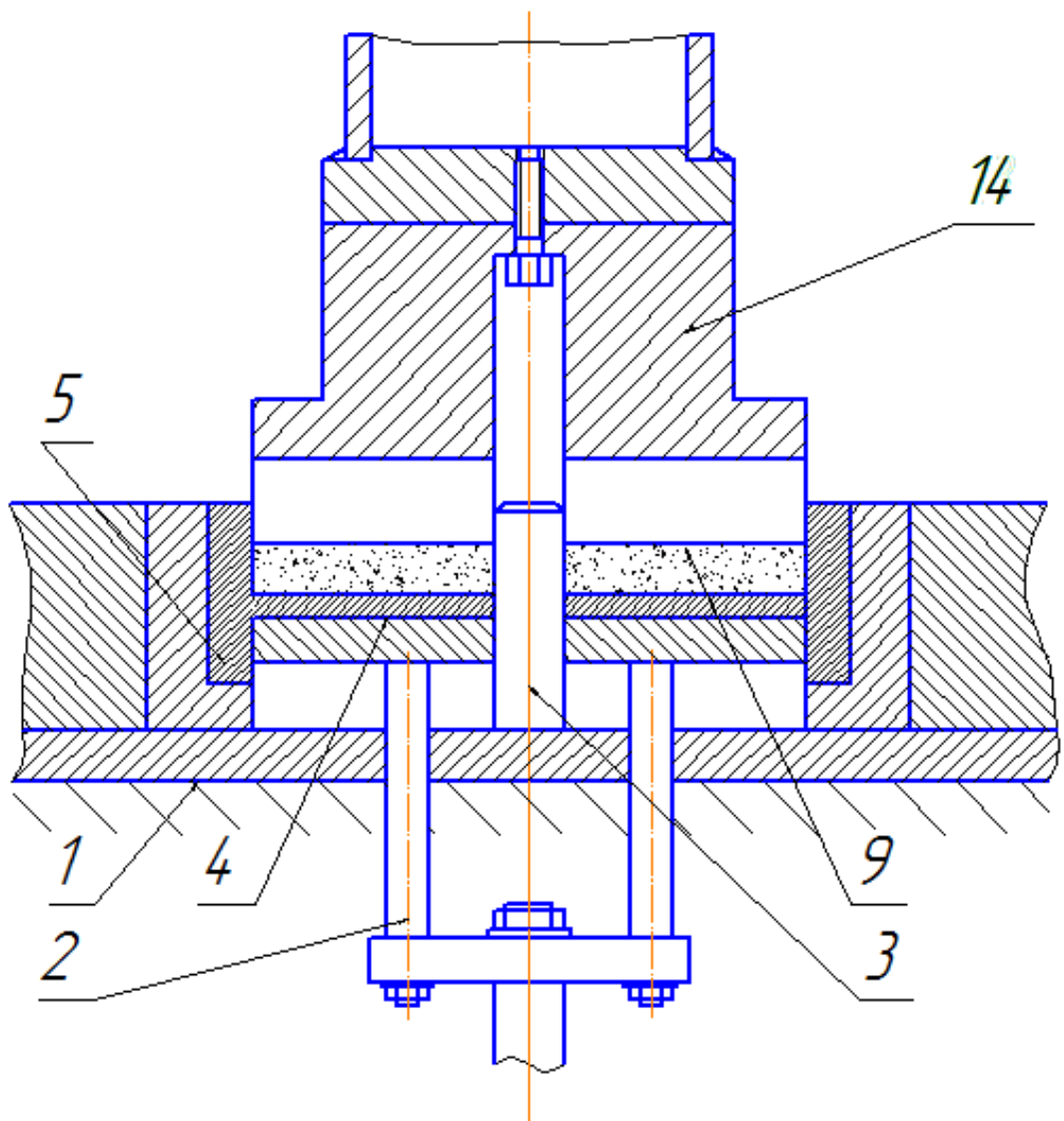


Рис. 20. Формование слоя абразивной смеси в пресс-форме

После этого, заформованный шлифовальный инструмент 16 извлекают из пресс-формы путем перемещения нижней формовочной плиты 4, при помощи выталкивателя 2 (рис.21).

После извлечения шлифовального инструмента из пресс-формы его подвергают термообработке. Режим термообработки выбирают в зависимости от типа связующего, примененного при изготовлении шлифовального инструмента, размеров и формы изготавливаемого шлифовального инструмента.

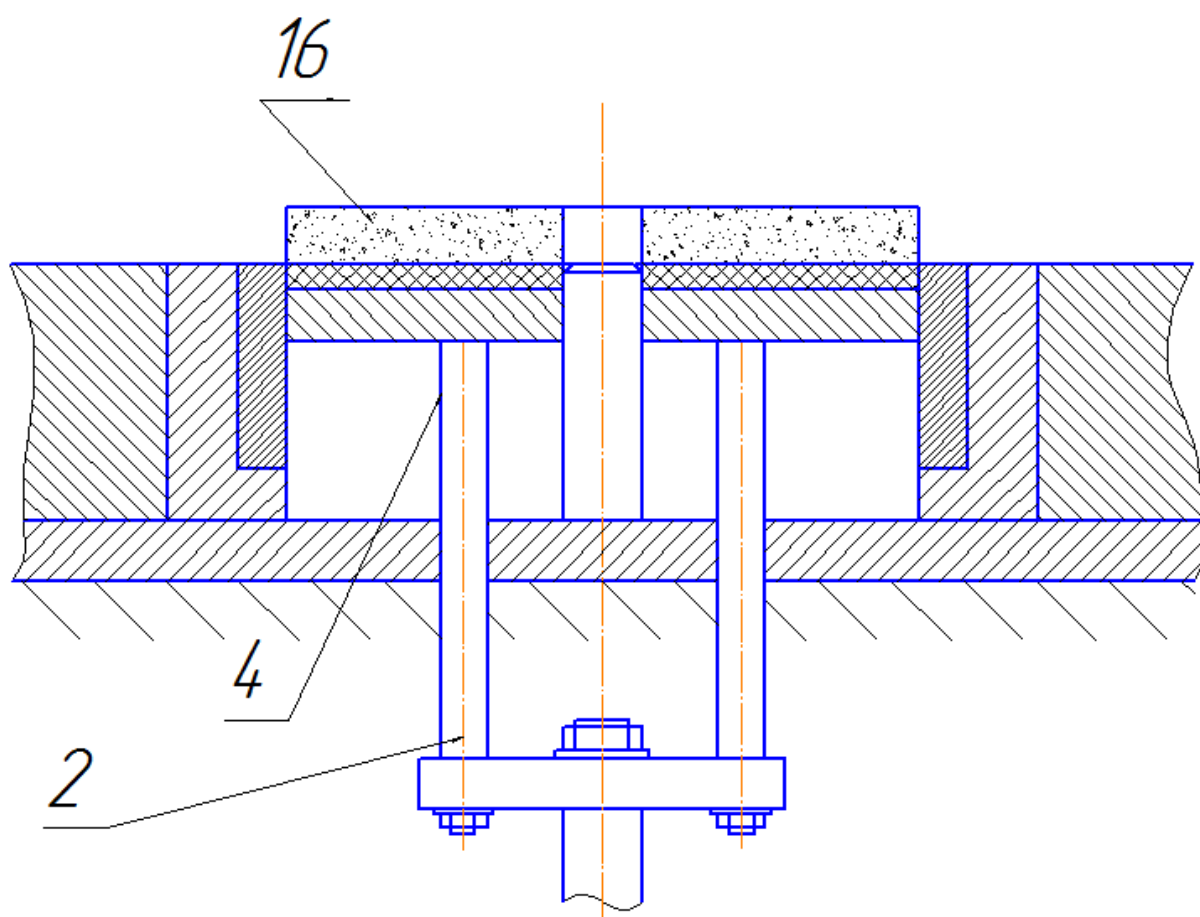


Рис. 21. Извлечение из пресс-формы абразивной смеси

Напряженность магнитного поля и амплитудно-частотной характеристики колебаний подбираются в зависимости от материала абразивной массы и размеров будущего инструмента. Преимущество такой конструкции заключается в том, что ультразвук действует как ускоритель, облегчает поворот абразивного зерна своей наибольшей осью вдоль магнитных силовых линий.

Увеличенное изображение методов ориентирования абразивных зерен представлено на рис. 22

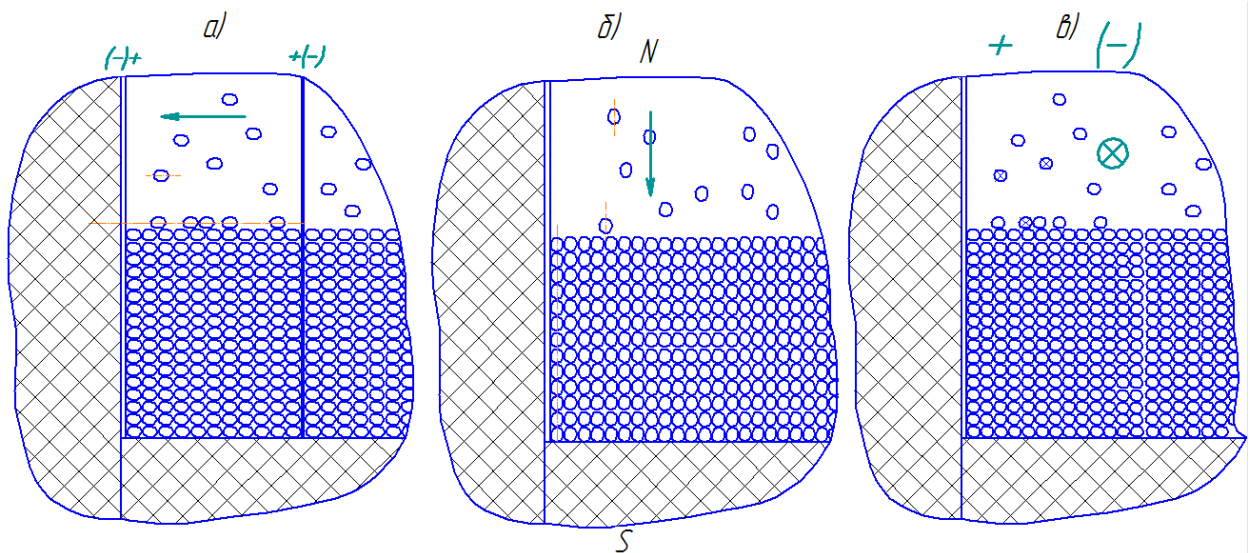


Рис. 22. Изображение методов ориентирования абразивных зерен: а – радиальная ориентация игольчатых зерен; б – осевая ориентация дисковых и пластинчатых зерен; в – тангенциальная ориентация изометрических зерен

У зерен дисковой формы осевой ориентации будут по отношению к другим видам оптимизации следующие преимущества в виде:

- Повышенной режущей способностью (Q , г/мин), так зерна дисковой и пластинчатой форм расположены большей осью параллельно к периферии круга. Поэтому и их режущие микроклинья будут иметь большую длину, соотношение выступающих микронеровностей будет сводиться к минимуму, а значения передних углов, благоприятных для достижения максимального показателя режущей способности, остаются аналогичными, как и при радиальной ориентации игольчатый зерен (рис. 23)

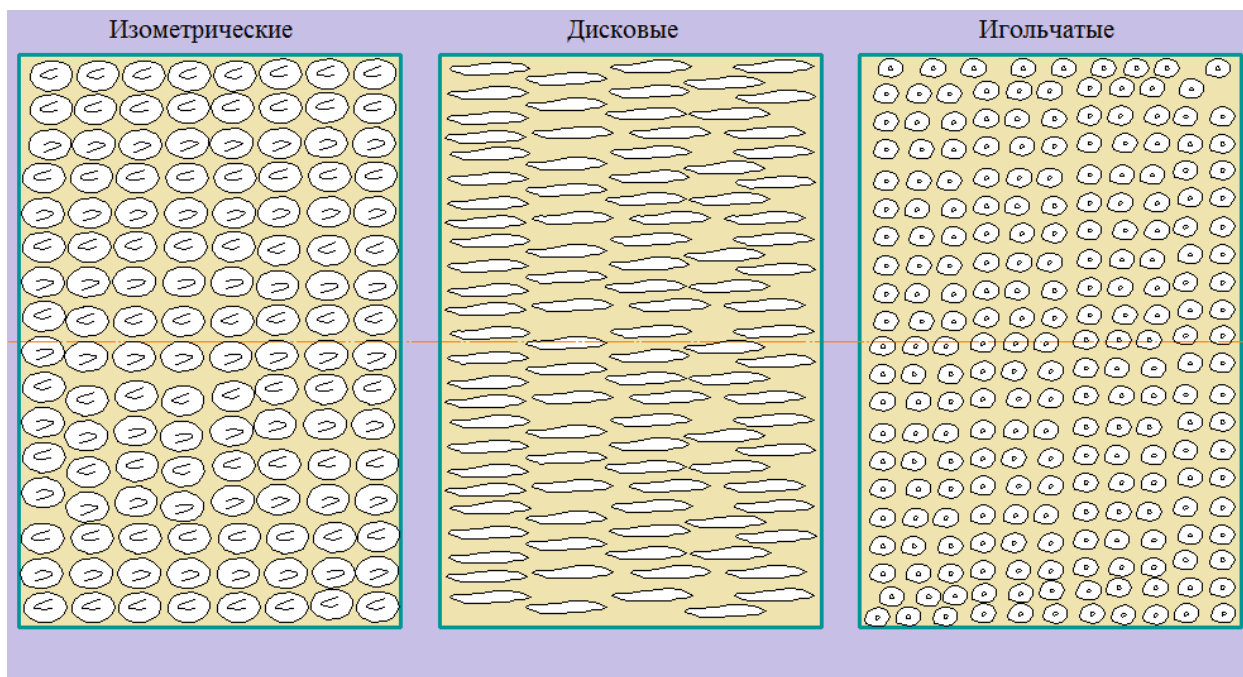


Рис. 23. Сравнение положения режущих кромок абразивных зерен в периферии инструмента при различных методах их оптимизации геометрии

- Коэффициент шлифования ($K_{ш}$). Так как уровень износа абразивных зерен, целесообразно оценить через величины и характер напряжений. При осевой ориентации зерен дисковой и пластинчатой форм снижение максимальных напряжений происходит в результате равномерного их распределения в объеме зерна вдоль линий режущей кромки. Но зерна, которые воспринимают нагрузку заостренными участками, имеют максимальные напряжения вблизи своих вершин, что, способствует откалыванию небольших частиц и, соответственно, самозатачиванию. Поэтому в предлагаемом варианте будет присутствовать повышенный износ, но меньший, чем при радиальной ориентации игольчатых зерен. Коэффициент шлифования в данном случае будет иметь среднее значение, по отношению к другим видам оптимизации.
- Эффективная мощность резания ($W_{эф}$, Вт), затрачиваемая на резания в предложенном варианте будет большей, так зерна дисковой и пластин-

чатой форм будут снимать большие объемы припуска ввиду их развитой режущей кромки, по отношению к другим способам оптимизации.

- Температура в зоне резания ($T, ^\circ\text{C}$) в предложенном варианте будет иметь промежуточное значение между радиальной и тангенциальной ориентации. Температура максимальна там, где большие значения коэффициентов трения. Зерна изометричной формы при тангенциальной ориентации располагаются меньшими передними углами и более плоской поверхностью по отношению к обрабатываемой поверхности. Следовательно, здесь наблюдается высокая температура резания. При радиальной ориентации игольчатой формы зерен присущи благоприятные передние углы резания и малые площадки поверхностей зерен, расстояние между режущими клиньями соседних зерен превышает их собственные размеры. Следовательно, температура здесь будет иметь минимальные значения. В предложенном варианте температура в зоне резания будет выше, чем при радиальной ориентации игольчатых зерен, ввиду того, что при таких же благоприятных углах резания, у зерен дисковой формы больше площадка режущей кромки. Но по отношению к изометричным зернам с тангенциальной ориентации температура в предложенном варианте будет меньшей из-за разницы передних углов.
- Шероховатость обработанной поверхности ($R_a, \text{мкм}$) при осевой ориентации дисковых и пластинчатых зерен будет наименьшей по отношению к игольчатым зернам с радиальной ориентации, но большей, чем при тангенциальной ориентации изометричных зерен.

ТР22. Специальный абразивный инструмент с «активной» пористостью

Одним из путей повышения эффективности абразивной обработки является управление структурным строением абразивного инструмента. Для этого, как правило, используются наполнители различных видов. На сегодняшний день известны следующие виды наполнителей: разрушающиеся при термообработке инструмента, разрушающиеся в процессе работы инструмента и наполнители с высокой собственной пористостью (полые частицы). Однако технологии изготовления инструмента с использованием указанных наполнителей не лишены недостатков, часть из них чрезвычайно дороги, другие низкотехнологичны.

Существует технология получения «активной» пористости путем введения в инструмент в качестве наполнителя абразивного зерна значительно меньшего размера по сравнению с основной фракцией. Идея применения такого наполнителя заключается в том, что зерна более мелкой фракции находясь внутри черепка инструмента, будут исполнять роль упорядочивающих и армирующих частиц, а при выходе на поверхность абразивного инструмента будут выкрашиваться с образованием поверхностной поры.

Таким образом, возрастает твердость круга и уменьшается неравномерность распределения зерен по объему, не уменьшая при этом поверхностной пористости инструмента. Размер частиц наполнителя выбирается с условием, что они должны размещаться в межзерновом пространстве, образуемом зернами основной фракции. Для расчета размера зерен наполнителя была создана физическая пространственная модель, описывающая межзерновое пространство. В качестве исходных данных используются:

- 1) параметры распределения исходного зерна основной фракции;
- 2) параметры изометричности зерна основной фракции;
- 3) номер структуры абразивного круга (по классической технологии).

Шлифовальные круги, изготовленные по предлагаемой технологии, имеют следующие преимущества по сравнению с аналогичными кругами, изготовленными по классической технологии:

- 1) твердость инструмента возрастает на 23 – 27% (по пескоструйному методу измерения);
- 2) снижается неравномерность твердости инструмента на 19 – 21%;
- 3) увеличивается на 35 – 40% съем металла на проход без образования прожогов.

При этом поверхностная пористость инструмента будет эквивалентна "классическому" абразивному инструменту. Следовательно, область применения инструмента, изготовленного по предлагаемому принципу, совпадает с "классическим" инструментом, но при этом возможна эксплуатация с более жесткими режимами обработки. Основной проблемой при создании предлагаемого инструмента является выбор размера и количества зерен наполнителя.

Вопрос количества зерен наполнителя решается исходя из принципа рассмотрения структуру абразивного инструмента как массива неправильных тетраэдров с центрами масс в вершинах, поскольку при прессовании абразивной массы на стадии производства инструмента зерна будут стремиться образовывать наиболее устойчивые геометрические структуры.

ПР3. Повышение стойкости шлифовального круга с помощью увеличения износостойкости зерен

ТР31. Применение сборных композиционных шлифовальных кругов (СКШК), сочетающих основные преимущества сборных, прерывистых и импрегнированных

В связи с существенным повышением в последние годы стоимости абразивных инструментов, а так же приготовления, эксплуатации и утилизации смазочно–охлаждающих жидкостей (СОЖ), используемых на операциях

шлифования, вопросы, связанные с разработкой новых эффективных технологий шлифования, становятся особенно актуальными. Одним из перспективных путей повышения эффективности операций шлифования является применение сборных композиционных шлифовальных кругов (СКШК), сочетающих основные преимущества сборных, прерывистых и импрегнированных кругов. При шлифовании композиционными кругами твёрдый смазочный материал (ТСМ) гарантированно доставляется в зону обработки, появляется возможность использования на операциях шлифования относительно недорогих водных СОЖ простейшего химического состава. Кроме того, сборная конструкция кругов позволяет использовать металлический корпус многократно, заменяя лишь абразивные сегменты (АС) и смазочные элементы (СЭ).

ТР32. Модификация поверхности абразивных зерен

Опыт эксплуатации абразивных инструментов показывает, что в отходах шлифования содержится 30 – 80% зерен первоначального размера, т.е. такое их количество заранее выкрашивается из инструмента, не совершая полезной работы. Причина – низкая прочность удержания зерен связкой. Степень закрепления абразивного зерна связкой при прочих равных условиях зависит от физико-химических свойств его поверхности, в частности, от ее адгезионной активности к материалу связки. Одним из способов повышения износостойкости абразивных зерен, является нанесение различного рода покрытий на его поверхность. Эффективность покрытия зависит от:

- 1) Применяемого способа его нанесения и массы (толщины);
- 2) Свойств металлов, сплавов и неметаллических материалов, используемых для покрытия;
- 3) Адгезионной активности материала покрытия по отношению к зернам абразива;

- 4) Характера адгезионного взаимодействия с материалом зерна и компонентами связки;
- 5) Вида шлифования и обрабатываемых материалов

Металлические покрытия

Нанесение металлического покрытия (металлизация) на порошки синтетических алмазов обеспечивает лучшее удержание зерен связкой благодаря наличию металлической пленки на их поверхности, которая предохраняет зерна от сколов и разрушения, повышает их прочность, улучшает условия теплоотвода из зоны шлифования. В результате снижается удельный расход алмазов и повышается производительность инструмента.

В качестве материалов для металлизации алмазных порошков используется медно-оловянно-титановый сплав или медно-серебряно-титановый. Наиболее эффективным способом нанесения этих покрытий является спекание свободно насыпанной смеси алмазных и металлических порошков в вакууме в присутствии жидкой фазы. После затвердевания металла получают пористый продукт, который дробят до полного или частичного отделения металлизированных зерен друг от друга. В результате дробления могут быть получены агрегаты, состоящие из нескольких спаянных друг с другом алмазных зерен. При таком способе нанесения покрытий за счет проникновения паров металла в трещины зерен проявляется эффект «залечивания», что повышает прочность зерен алмазов в 1,5 – 3 раза.

Агрегированные зерна (до 10 штук в одном агрегате) имеют большую развитость поверхности (независимо от зернистости исходных зерен). Такие зерна–агрегаты лучше удерживаются связкой (органической) и могут выдерживать большие нагрузки. Круги, изготовленные из таких зерен, обладают повышенной режущей способностью.

Существуют и другие методы металлизации алмазов: электролитическое осаждение никеля; карбонильный метод (вольфрам, молибден, ванадий

и другие переходные металлы с образованием пленки из их карбидов) – растворение карбониллов в тлеющем разряде; метод транспортных реакций (титан, тантал); электронно-плазменное испарение и конденсация в вакууме (покрытие толщиной 0,2 мкм); комбинированные методы. Кроме того, для покрытий применяют медь, олово, титан, никель, марганец, серебро, золото, кобальт, ванадий, тантал, цирконий, железо и др. Толщина металлической пленки составляет $3 \div 8$ мкм – для зернистостей $100 \div 250$ мкм и $13 \div 16$ мкм – для зернистостей $400 \div 800$ мкм.

Неметаллические покрытия

Для заточки инструментом без охлаждения целесообразно применять инструмент на органической связке с порошками из сверхтвердых материалов с неметаллическим покрытием. Нанесение таких покрытий осуществляется за счет применения адгезионно-активных расплавов оксидов металлов, например, SiO_2 . Это покрытие химически взаимодействует со смолой связки после высокотемпературной обработки инструментов (выше температуры стеклования) и обеспечивает прочное сцепление покрытых зерен и связки. Работоспособность инструментов при этом повышается до 2 раз.

Разработано несколько типов оксидных покрытий, в частности, железисто-оксидные с использованием фосфатных связок и фосфорной кислоты. Кислота активирует поверхность абразивного зерна, а мелкие частицы оксида железа обволакивают поверхность смоченных фосфатом зерен и спекаются с ними в процессе термообработки при температуре $973 - 1073^{\circ}\text{K}$. Таким способом можно покрывать зерна корундов, гранатов, кремниев, карбидов кремния.

Другим способом модификации поверхности является обработка их летучими хлоридами и оксихлоридами титана, алюминия, железа, хрома, ванадия, для чего зерна обрабатываются попеременно парами воды и хлоридов металлов (AlCl_3 , FeCl_3 , $\text{CrO}_2 \text{Cl}_2$, VOCl_3 и т.п.) при температуре $453 -$

535⁰К. Прочность удержания покрытых таким образом зерен в связке повышается на 20 – 50 %, а режущая способность инструментов из таких зерен повышается до 2 раз. Промышленность выпускает алмазные инструменты, изготовленные из порошков с карбидным покрытием (К), металлизированных порошков (НТ) и агрегированных алмазных порошков А1, А2 и А3, при этом порошки А1 и А3 используют для кругов на металлической связке, а А2 – для кругов на органических связках.

ТР33. Создание прерывистой поверхности абразивного инструмента

Обеспечение прерывистости процесса шлифования является важным направлением повышения работоспособности АИ и улучшения качества обработанной поверхности. Особенно при работе кругами из СТМ (алмаз, КНБ), пористость которых очень невелика. Стружка при работе низкопористыми кругами не может разместиться в межзерновом пространстве, налипает на поверхность связки и зерен и круг засаливается. В результате растет сила отжатия круга от детали, интенсивность трения возрастает – возрастает и тепловыделение и, как следствие, растет температура шлифования. Т.к. обычное шлифование – процесс непрерывный, то непрерывно и тепловыделение. Отсюда рост температуры в зоне шлифования и в детали, появление прижогов. Температуру шлифования в ряде случаев можно существенно снизить, если обеспечить перерывы в подводе тепла, и тем самым, использовать преимущества нестационарного режима. Кроме того, прерывистость процесса создает дополнительные возможности удаления шлама и стружки и уменьшения засаливания круга. Практическое применение нашли следующие способы обеспечения прерывистости: за счет выполнения пазов и отверстий на рабочей поверхности круга.

Подвод СОТС через наклонные открытые отверстия обеспечивает теплоотвод от режущих элементов, лучший отвод шлифовальной пыли, и создаёт эффект смазки зоне контакта. Кромки отверстий соскребают стружку, и она смывается СОТС, не забивая поры, интенсивность процесса засаливания резко снижается, режущие свойства круга сохраняются в течение длительного времени.

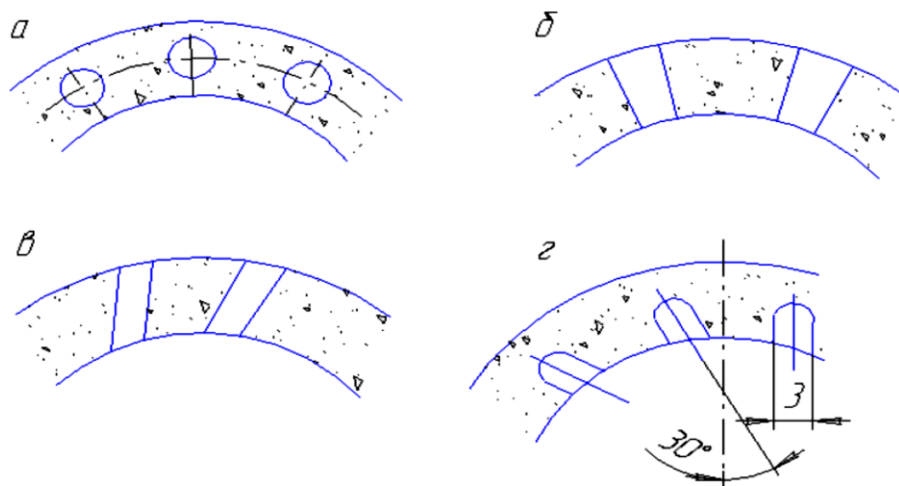


Рис. 24. Рабочие части кругов: а) с радиальными отверстиями; б) с наклонными открытыми отверстиями; в) с закрытыми отверстиями; г) с пазами

На рис. 25 представлена конструкция абразивного круга 1 со вставками 2 (смесь графита ГЛ1 и фенолформальдегидной смолы СФ-342, спрессованную при давлении $P=150$ Мпа), сочетающего в себе прерывистость и смазку 2. Круги с алмазосносным слоем, расположенным эксцентрично к оси вращения инструмента (рис. п.) Температура уменьшается в 2 раза.

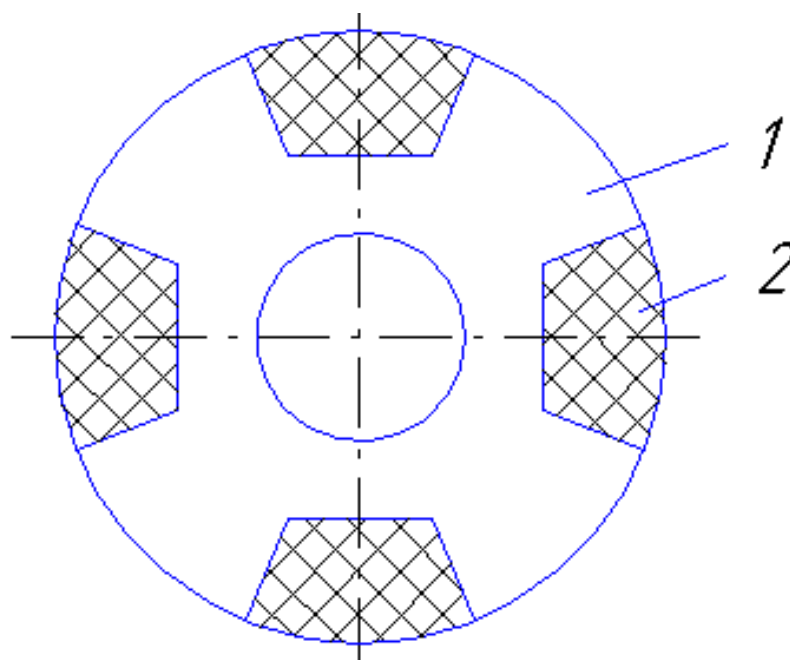


Рис. 25. Абразивный круг (1) со вставками (2) из твердой смолы

ПР4. Повышение стойкости шлифовального круга с помощью уменьшение адгезии (молекулярного взаимодействия)

Установлено, что при шлифовании труднообрабатываемых материалов шлифовальным инструментом имеет место адгезионного взаимодействия микростружек с абразивным зерном. Налипание микростружки на абразивное зерно происходит вследствие адгезии в условиях недостаточного смазывания фрикционного контакта СОТС и продуктами ее термического разложения.

Молекулярное взаимодействие (прилипание) стружки с абразивными зернами оказывает, например, наличие на их поверхностях, так называемых выступов микро и субмикрорельефа. Именно выступы и впадины микропрофиля поверхности шлифовальных зерен являются начальными источниками зарождения очагов «засаливания» круга. При высоких температурах, присущих для шлифования, происходит адгезия образовавшихся продуктов

при обработке с абразивными зёрнами, что приводит к снижению производительности процесса и снижает качество поверхности заготовок. Для восстановления режущей способности круга необходимо сокращать время между правками, а это снижает время эксплуатации шлифовальных инструментов.

Тем не менее, взаимодействие абразивного и обрабатываемого материалов имеет не только механический характер. В зоне контакта единичного абразивного зёрна с обрабатываемым материалом протекает несколько разнородных процессов, некоторые из них близки к микрометаллургическим:

- 1) Взаимная диффузия химических элементов обрабатываемого и абразивного материала;
- 2) Адгезия, приводящая к местному схватыванию отдельных площадок рабочей поверхности зёрна с частицами шлифуемого материала;
- 3) Химическое взаимодействие, приводящее к интенсивному образованию третьих соединений;
- 4) Шлам (продукты износа абразивного инструмента и частиц обрабатываемого материала) в составе смазочно-охлаждающего технологического средства, поддерживающий адгезионные процессы при абразивной обработке.

ТР41. Совмещенный способ очистки СОТС, рекуперации и классификации абразивных зёрен в процессе шлифования

Данные этапы обработки ведутся, как правило, на одном оборудовании, имеющем замкнутую систему очистки и подачи смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) в зону обработки, входящую в состав станка. В результате такой обработки, особенно при высокоскоростном и глубинном шлифовании, происходит повышенный износ шлифовальных кругов, усиленная зашлакованность применяемых СОТС, оказывающих существенное

влияние на качество обработанных поверхностей и стойкость инструмента. Отсюда весьма важным технологическим фактором, определяющим качество обработанной поверхности, является очистка СОТС от шлама. Кроме того, в последнее время остро стоит проблема рекуперации (извлечения из шлама с целью повторного использования) абразивных зерен.

Применяемые в промышленности методы очистки СОТС и способы разделения шлама (химический, магнитный и др.) используются как отдельные самостоятельные процессы. Причем последние применяются в основном при исследованиях износа алмазно-абразивных инструментов, что вызвано технической сложностью обеспечения этих процессов в производстве изделий, большим объемом работ, низкой производительностью и, следовательно, значительными затратами людских и материальных ресурсов.

Существует совмещенный процесс очистки СОТС, рекуперации и классификации абразивных зерен непосредственно в составе технологического оборудования, исключающий переработку шлама и связанные с этим трудоемкие операции вне станка, а также обеспечивающий более высокие показатели качества и производительности обработки. Усовершенствованная система совмещенной очистки СОТС с использованием нового устройства центробежного типа (УЦТ) для рекуперации и классификации абразивных зерен представлена на рис.п. УЦТ состоит из вращающегося конического ротора и приемника (неподвижная платформа с кольцевыми перегородками). Работа УЦТ основана на методе жидкостной классификации, в результате которого происходит извлечение абразивных зерен из СОТС и разделение их на фракции по размерам с последующей выгрузкой и использованием по назначению.

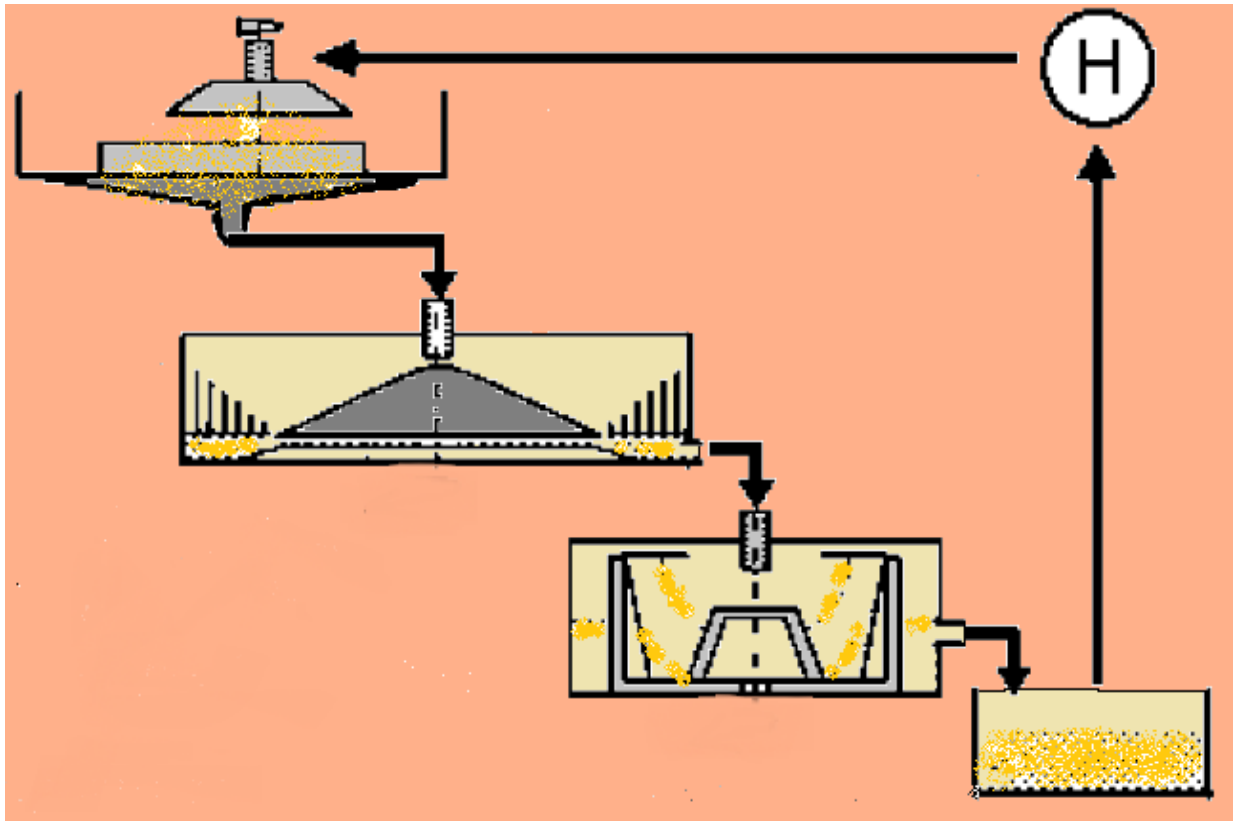


Рис. 26. Технологическая схема совмещенного процесса очистки СОТС, рекуперации и классификации абразивных зерен при шлифовании

Технологический процесс регенерации СОТС и абразивных зерен состоит из следующих этапов:

- 1) Подача СОТС из зоны обработки в УЦТ
- 2) Извлечение из СОТС и классификация зерен в поле центробежных сил
- 3) Окончательная очистка СОТС от шлама центрифугированием
- 4) Разгрузка центрифуги и удаление частиц обрабатываемого материала в отвал
- 5) Подача очищенной СОТС в зону обработки

ТР42. Электронно-ионные технологии, основанные на подаче в зону резания ионизированного и озонированного воздуха

В современной машиностроительной отрасли повышение эффективности процессов шлифовальной обработки тесно связано с использованием эффективных смазочно-охлаждающих технологических жидкостей (СОЖ).

Применяются СОЖ на масляных и водоземulsionных основах с различными присадками поверхностно-активных веществ, использование которых положительно влияет на производительность обработки деталей и качество их поверхностного слоя.

В настоящее время в мировой практике расходуется довольно большое количество различных типов СОЖ. Вместе с тем, применение СОЖ требует использования специальных очистных сооружений, необходимых для их утилизации, организацию их приготовления, транспортировки, регенерации, а также необходимость обезжиривания продуктов обработки и обработанных поверхностей, что существенно влияет на стоимостные показатели производственных процессов изготовления деталей.

При этом следует указать на одно из важных обстоятельств применения СОЖ, особенно на масляной основе, – их влияние чрезвычайно вредно для здоровья человека в результате попадания СОЖ в зону резания, воздушная среда, окружающая ее, загрязняется химическими веществами типа масляных аэрозолей, что негативно влияет на здоровье человека, вызывая различные заболевания.

По такой причине за последние годы проводятся исследования по замене традиционных СОЖ на масляной и водоземulsionных основах применяемых при металлообработке на более чистые технологии с использованием СОЖ, минимизирующих вредное воздействие на окружающую среду. Результатами проведенных исследований являются модификации СОЖ, содержащих нетоксичные элементы, применение твердых смазок на органической основе, создание систем, минимизирующих количество СОЖ, подаваемых в

зону резания, процессы с полным отказом от применения СОЖ, представляющие собой пример сухого резания, а также использующие комбинированные методы воздействия на зону резания, обеспечивая эффекты охлаждения зоны резания и уменьшения трения в зоне контакта обрабатываемого материала и инструмента.

Одной из разновидностей примера использования сухого резания взамен традиционных СОЖ являются экологически чистые электронно-ионные технологии, основанные на подаче в зону резания ионизированного и озонированного воздуха.

Минимуму адгезионного взаимодействия металла и абразива соответствует применение смазочно-охлаждающего технологического средства с ионизационным потенциалом. Увеличение ионизационного потенциала происходит в ряду от водных СОТС к масляным. При этом в той же последовательности происходит повышение смачивающей способности и, как следствие, улучшение транспортирования СОТС в контакте «зерно-металл». Экспериментальные исследования показали, что увеличение такого средства, подаваемого в зону шлифования, способствует уменьшению количества микростружек, налипающих на абразивное зерно, и это объясняется повышением ионизационного потенциала жидкости вследствие термоактивации.

Физико-химический механизм действия ионизированных газовых сред (ИГС) обусловлен изменением условий взаимодействия контактных поверхностей режущего инструмента с обрабатываемым материалом, что проявляется в снижении изнашивания режущих поверхностей инструмента. В процессе резания активные в химическом отношении поверхности инструмента и стружки вступают в химическую реакцию с компонентами ИГС, в результате чего образуются защитные пленки, которые экранируют адгезию между поверхностями обрабатываемого и инструментального материалов.

Защитные свойства образуемых пленок обнаруживаются в тех случаях, когда они выдерживают удельные нагрузки, не разрушаются и блокируют адгезионные связи.

Как известно, газовая атмосфера наиболее благоприятна с точки зрения ускорения химических реакций и образования защитных пленок. Более активная, по сравнению с СОЖ, проникающая способность газовой среды приводит к облегчению пластического деформирования в зоне основных пластических деформаций и дискретного контакта обрабатываемого и инструментального материалов, что, в свою очередь, и обуславливает уменьшение внутренних напряжений в обработанном поверхностном слое.

Наблюдается снижение сил резания P_x , P_y , P_z на 10 – 30 %, при этом традиционное их соотношение сохраняется. Наряду со снижением сил резания, снижается степень деформации, выраженная коэффициентом усадки стружки, и, как следствие, шероховатость обработанной поверхности в пределах 15 – 30 %. Так же отмечается, повышение стойкости инструмента в 2 – 2,5 раза по сравнению с применением СОЖ в виде эмульсии и работой всухую.

Как показали проведенные наблюдения, использование ИГС оказывает существенное влияние не только на процесс изнашивания инструмента, но и на процесс стружкообразования, изменяя тип стружки от сливной к стружке скалывания или элементной. Это весьма благоприятно сказывается на отводе стружки из зоны резания, что особенно важно для работы инструмента в автоматизированном производстве.

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что использование ИГС, заключающееся в подаче в зону резания воздуха, ионизированного и озонированного коронным разрядом, является весьма перспективным в решении задач повышения эффективности работы инструмента, замены вредных СОЖ, создания экологически чистых производств в металлообработке, и повышение стойкости шлифовального инструмента.

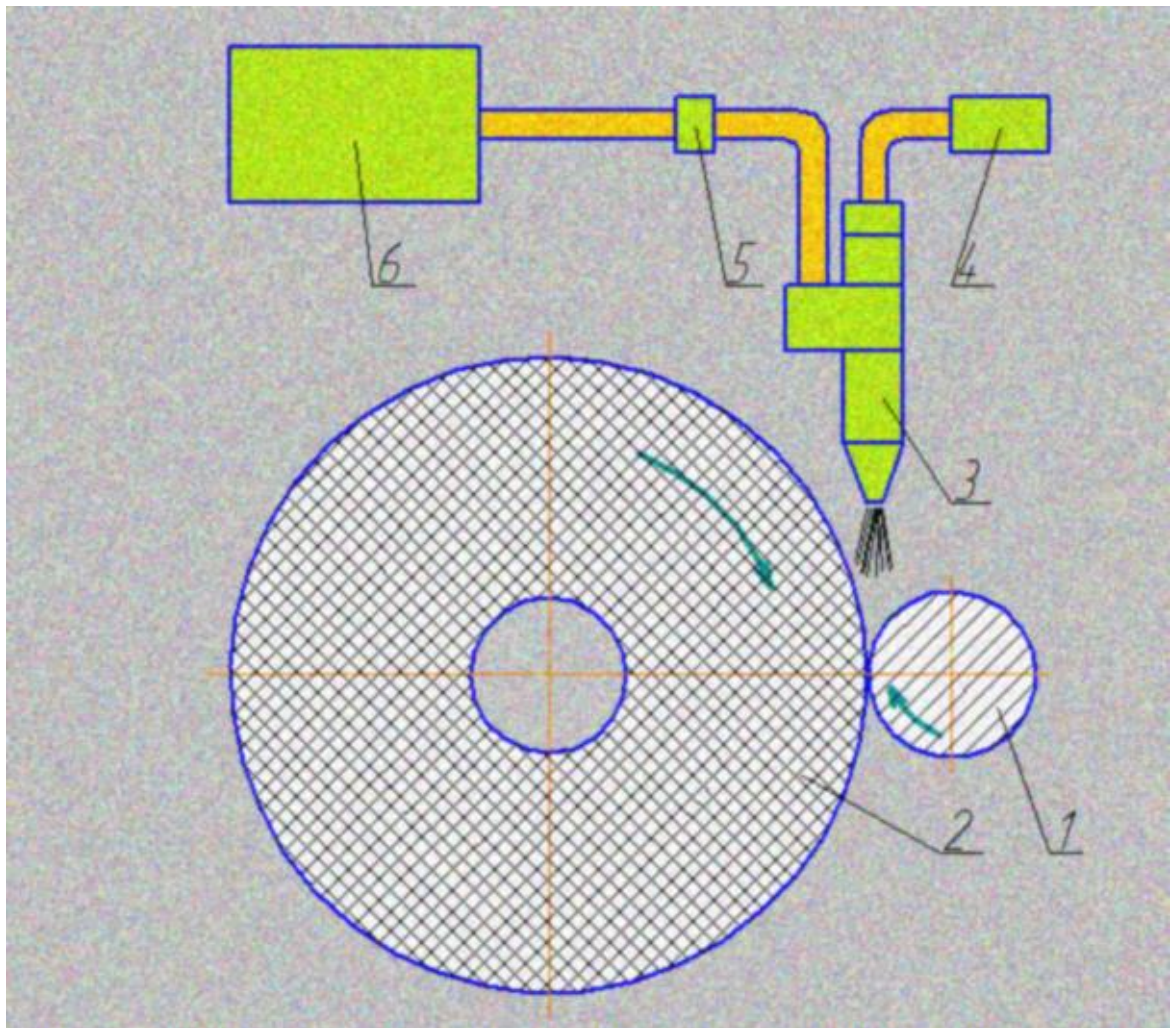


Рис. 27. Схема подачи ионизированной газовой среды в зону резания: 1 – заготовка; 2 – шлифовальный круг; 3 – плазмотрон-сопло; 4 – система питания плазмотрона; 5 – регулятор давления газовой среды; 6 – компрессор

ТР43. Импрегнирование шлифовальных кругов

Суть метода состоит в том, что перед эксплуатацией круга его поры заполняют специальным технологическим веществом – импрегнатором (рис. 28). Благодаря этой операции улучшают работоспособность абразивного инструмента за счет проявления во время шлифования физико-химических свойств импрегнаторов (смазывающие, теплофизические и т.п.). Эффективность этой операции зависит от условий эксплуатации круга.

После пропитки:

- 1) прочность кругов возрастает до 6 – 50%;
- 2) твердость увеличивается на 1 – 2 степени;
- 3) модуль упругости повышается на 30–50%;
- 4) демпфирующая способность увеличивается до 10 раз;
- 5) теплопроводность – до 2 раз;
- 6) коэффициент трения уменьшается в 1,2 – 1,5 раз;

В таблице и перечислены некоторые из наиболее распространенных веществ, используемых в качестве импрегнаторов, их составы и свойства.

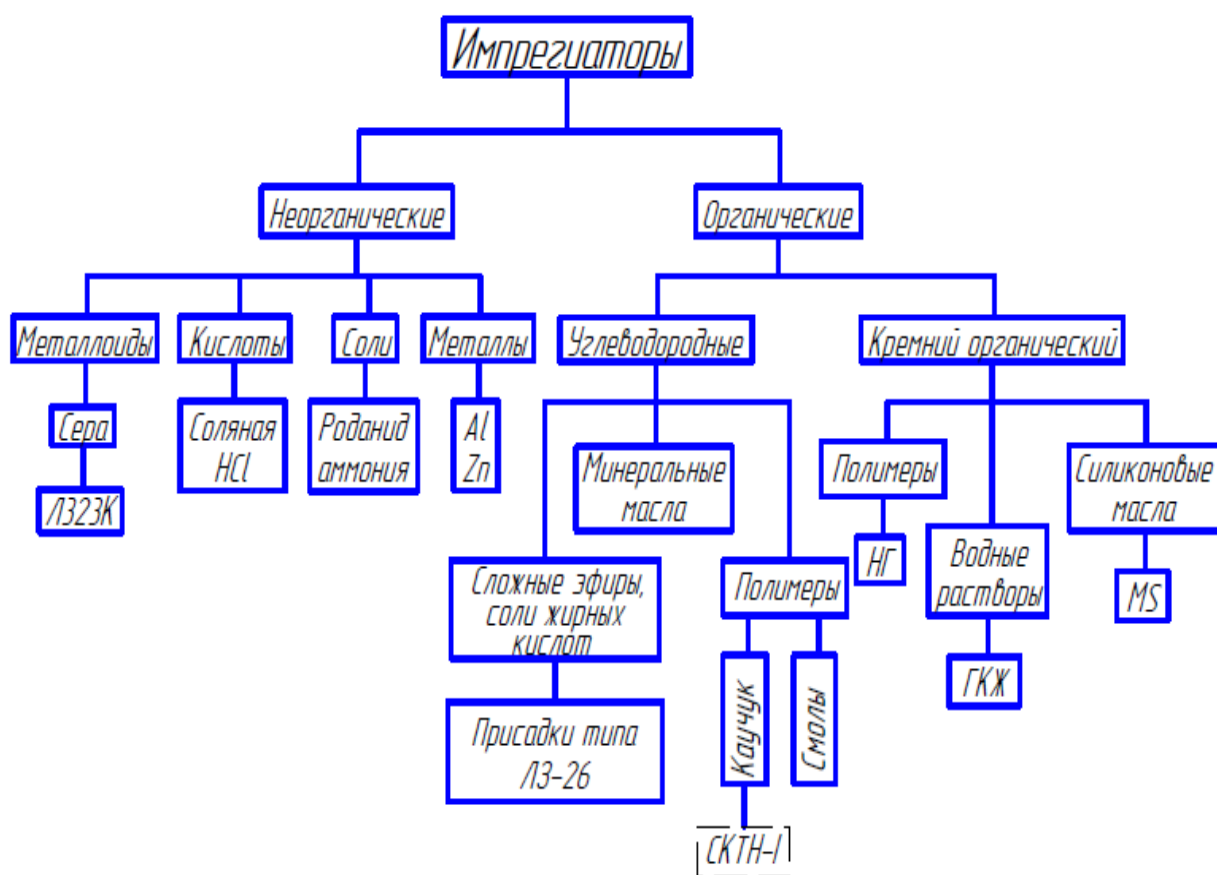


Рис. 28. Классификация импрегнаторов

Таблица 1

Наименование импрегнаторов	Обозначение	Содержание активных компонентов				Температура плавления/ резания, °С
		сера	хлор	фосфор	азот	
Сера	S	100	–	–	–	120/100
Диизопропил- ксанат этилена	ЛЗ 32К	43	–	–	–	50/185
Алкилсанти- трихлорпентан	ЛЗ 27	15	25	–	–	
Хлор, фосфор	ЛЗ 309/2	15	27	2,5		
	ЛАНИ – 317	6	-	2,9		39
	ЛЗ 318	17	30	–	4	
	ЛЗ 26/1	17	28	–		70/105
Бариевая соль	ДФ – 1					
	НАМИ-Т-122 (ТУ 2250-50)		40			
Хлорид пара- фин	ДФ-11 ГОСТ 12062-66	9		4,5		
	Хлорэф-40	–	–	–	–	112/250
	ХСПЭ	2	25- 30			150/170
	РА	5				
Латекс	АММА					110/140

Импрегнатор оказывает полифункциональное действие. С одной стороны, повышая твердость, жесткость и прочность круга, он способствует лучшему закреплению абразивных зерен. С другой стороны, выступая в роли внутренней смазки, охлаждения и демпфера он автоматически превращает круг в самосмазывающийся, высокотеплопроводный и хорошо демпфирующий колебания инструмент, что снижает интенсивность фрикционных, адгезионных, тепловых и колебательных процессов при шлифовании. Используют импрегнаторы в виде твердых брусков для нанесения смазки на рабочую поверхность круга непосредственно в процессе шлифования. В качестве твердых смазок применяют: неорганические материалы типа дисульфида молибдена, графита, гексагонального нитрида бора; органические материалы типа политетрафторэтилена и др. Нанесение твердых смазок на рабочую поверхность круга в процессе шлифования требует разработки и изготовления брусков, а также специальных приспособлений для их закрепления на станке. Технология заполнения пор абразивных инструментов жидкими импрегнаторами определяется физическими свойствами последних, а эффективность инструментов при эксплуатации определяется химическими свойствами импрегнаторов. Ниже приведены рекомендации и пример применения.

Заключение

Анализ полученных технических решений показывает, что наиболее оптимальным вариантом повышение стойкости абразивного инструмента является: TP21 – применение абразивного инструмента с зернами дисковой и пластинчатой форм осевой ориентации. Перспективным путем совершенствования этого технического решения является разработка и проектирование абразивных инструментов с изменением углового положения абразивных зерен дисковой и пластинчатых форм в осевом направлении, в зависимости от режимов обработки, обрабатываемого материала, эксплуатационных характеристик используемого режущего инструмента.

Технические решения, как TP11 – абразивная обработка с непрерывно изменяющейся скоростью резания при заданных периоде и амплитуде колебаний и TP12 – абразивная обработка с постоянно управляемой глубиной резания с помощью управляющей программы, могут стать совместно основой для разработки новой управляющей программы процесса абразивной обработки. Эти технические решения имеют большие перспективы для дальнейшего их изучения, в области корреляционных зависимостей между скоростью круга и глубиной резания, а также от эксплуатационных характеристик применяемого инструмента и свойств обрабатываемого материала.

Технические решения TP13 – применение кругов с переменной зернистостью, имеющие ступицу и периферийную рабочую часть, и TP14– применение шлифовальных зерен, вложенные друг в друга по типу «матрешки», и композицию для их крепления к жесткой или гибкой основе имеют узкую специализацию применяемых инструментов и высокую трудоёмкость их изготовления.

Техническое решение TP22 – применение специального абразивного инструмента с «активной» пористостью применительно больше для высокопористых кругов. Кроме того применение такого абразивного зерна в из электрокорунда и карбида кремния способствует увеличению массы круга,

что может негативно сказаться на динамике процесса шлифования и дополнительных нагрузках на привод главного движения станка. Также, при применении такого инструмента, может произойти несвоевременное выкрашивания абразивных зерен мелкой фракции, что ухудшает его режущие свойства. Особенно это касается твердых абразивных кругов.

Техническое решение ТР31 – применение сборных композиционных шлифовальных кругов (СКШК), не смотря на сложность конструкции и повышенной вибрации в технологической системе, имеет перспективы для дальнейшего изучения новых совокупностей композиционных абразивных материалов, которые смогут повысить стойкость абразивного инструмента.

Технические решения ТР32 – модификация поверхности абразивных зерен и ТР43 – импрегнирование шлифовальных кругов требуют обширные исследования на влияние экологическую среду и переработку материалов, применяемых для повышения стойкости абразивного инструмента.

Техническое решение ТР33 – создание прерывистой поверхности абразивного инструмента требует специальных технологических операций, предназначенных для получения специальных поверхностей в конструкции абразивного инструмента, что увеличивает сроки изготовления и стоимость.

Техническое решение ТР42 – подача в зону резания ионизированного и озонированного воздуха, имеет хороший экологический аспект и повышение стойкости абразивного инструмента, но применение такой технологии повлечет за собой проектирование новых конструкций и компоновок шлифовальных станков с ЧПУ, поэтому эта реализация требует большие технико-экономические затраты.

Список литературы

1. Гордеев А.В. Линейная и разветвленная схемы получения технических решений. М.: Вектор науки ТГУ № 3 –1 , 2015. 42 – 46 с.
2. Кашук В.А. Справочник заточника. М.: Машиностроение, 1982. 232 с.
3. Курдюков В.И. Основы абразивной обработки: учебное пособие. М.: Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2014. – 195 с.
4. Кузнецов И.П. Основы скоростного шлифования и пути его внедрения в производство. М.: ЭНИИПП, 1954. 68 с
5. [Электронный ресурс]/ Материаловед / Учебные пособия / Повышение эффективности отделочной обработки деталей из медных сплавов свободными абразивами на основе исследования состава технологической среды. – Режим доступа: <http://материаловед.рф/>
6. [Электронный ресурс]/ Резание металла без применения СОЖ. Режим доступа: http://texinfo.inf.ua/razdeli/texn_obr/stati/suhoe_rezanie.html
7. Мальцев П.Н., Никифоров И.П. кинематический анализ кривошипно-коромыслового изменения скорости резаниях. М.: Вестник СГТУ. 2013. № 2 (70). Выпуск 1
8. [Электронный ресурс]/Полтавец В.В./Достижение максимальной производительности шлифования с учетом изменения режущих свойств круга. Режим доступа :<http://kniga.lib-i.ru/>
9. Степанов Ю.С. , Киричек А.В., Бурнашов М. А., Афанасьев Б. И. круги с неравномерной твердостью; круги, содержащие различные абразивные материалы. Пат. 2358853 заявл. 02.01.08; опубл. 20.06. 09
10. Войнов К.Н. Физические свойства абразивных тел или листов, например абразивных поверхностей особого рода; абразивные тела или листы, отличающиеся по своей структуре. Пат. 2572912 заявл. 06.10.14; опубл. 20.01.16

- 11.[Электронный ресурс]/Ищенко А.Л/Разработка конструкции устройства для ориентирования абразивных зерен.- Режим доступа: <http://masters.donntu.org/>
12. Рябцев С.А. Разработка абразивного инструмента с повышенной структурностью и управляемой пористостью для высокопроизводительного шлифования фасонных поверхностей деталей из труднообрабатываемых материалов. М.:МГТУ «Станкин» , 2011. Автореферат 45с
- 13.Курушин Д.А. Проектирование и применение сборных композиционных шлифовальных кругов при плоском шлифовании. М.:УлГТУ , 2007. Автореферат 18с
- 14.Иванова Т.Н., Свитковский Ф.Ю. Прогрессивные технологии и системы в машиностроении. М.: Международный сб. научных трудов.- Донецк: Дон ГТУ, 2002. 266 с.
- 15.Аверков, К.В. Шероховатость шлифованных поверхностей жаропрочного сплава ЖС – 6К и стали 12Х2МБФ / К.В. Аверков, Д.С.
16. Реченко, А.Ю. Попов, В.А. Сергеев / Материалы XIV-я Международной научно-технической конференция «Новые материалы и технологии в машиностроении – 2011». Омск 2011 г. – Омск: Изд-во ОмГТУ.
- 17.Филимонов, Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов. М.: Машиностроение, 1973. – 136 с.
- 18.Никифоров, И.П. Методология научных исследований в машиностроении / И.П. Никифоров. – Псков: Изд-во ПсковГУ, 2014. – 84 с.
- 19.Курдюков В.И. Основы абразивной обработки: учебное пособие. М.: Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2014. – 195 с.
- 20.Люкшин В.С. Сравнение методов оценки форм шлифовальных зерен. М.: Международная научно-техническая конференция «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири» СИБРЕСУРС 2016. 19 с.

21. Люкшин В.С. Повышение работоспособности шлифовальных лент путем использования зерен с контролируемой формой и ориентацией. М.: Автореферат Томск 2007. 8 – 16 с.
22. Коротков В.А. Геометрия и напряженное состояние ориентированных шлифовальных зерен с контролируемой формы. М.: Обработка металлов N 2(63), 2014. – 62–77с.
23. Коротков, В. А. Исследование геометрических и прочностных характеристик ориентированных шлифовальных зерен. В. А. Коротков, Е. М. Минкин // Обработка металлов. – 2012. – № 3. – С. 42–47.
24. Б.Н. Бирюков, И.М. Буюкли, Л.В. Попова и др. Способ изготовления абразивного инструмента /. – № 4281271/31-08; заявл. 13.07.87; опубл. 23.07.89, Бюл. № 27. – 3 с.
25. Байдакова Н.В., Назаренко В.А., Крюков С.А., Байдакова Т.А. Повышение производительности и качества обрабатываемых деталей при использовании шлифовальных инструментов с зерном контролируемой формы. «Материаловедение и технология конструкционных материалов – важнейшие составляющие компетенции современного инженера. Проблемы качества технологической подготовки». Оpubл. в ВИ-СТех (филиал) ВолгГАСУ, 2007 г. 15 – 19 с.
26. Зайцев А. Г. Проектирование абразивного инструмента с ориентированными зернами на неметаллической связке. – Вестн. машиностроения, 2007, № 8, 2 с.
27. Патент на изобретение № 2369474. Способ изготовления шлифовальных инструментов с ориентированными зернами / В.А. Коротков. – № 2008105086; заявл. 11.02.08; опубл. 10.10.09. Бюл. № 28.
28. Зубов А.В. Проектирование абразивного инструмента с ориентированными зернами на неметаллической связке. Оpubл. в ДонТУ 2007
29. Назаренко В. А. , Субботина Т. П. Разработка количественной меры оценки формы частиц шлифовальных материалов. М.: Процессы абра-

зивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2011 : сборник статей Международной научно-технической конференции /под общ. ред. В.М. Шумячера. – Волгоград : ВолгГАСУ,2012. 32 – 36с.