

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Факультет машиностроения и транспорта
Кафедра «Компьютерное проектирование технологического оборудования»

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

на тему

*Повышение эффективности формообразования профильных
алмазных кругов электроэрозионным воздействием*

ПГУ 15.04.05.01.00.00 ПЗ

Квалификация магистр

Направление 15.04.05 Конструкторско-технологическое
обеспечение машиностроительных
производств

Профиль Металлообрабатывающие станки

Автор — студент группы 18ММм2

подпись и дата

Д.А. Баландин
инициалы, фамилия

Руководитель:

подпись и дата

Н.А. Миронычев
инициалы, фамилия

Нормоконтролер:

подпись и дата

Г.С. Большаков
инициалы, фамилия

Рецензент:

к.т.н., нач. конструкторского бюро
АО "ПО "Электроприбор"

подпись и дата

М.В. Белашов
инициалы, фамилия

Работа допущена к защите в ГЭК (протокол заседания кафедры от 11.06.2020г. № 10)

Заведующий кафедрой

подпись и дата

А.В. Липов
инициалы, фамилия

Работа защищена с оценкой хорошо (протокол ГЭК от 25.06.2020г. № 10)

Секретарь ГЭК

подпись и дата

Ю.В. Истомина
инициалы, фамилия

УТВЕРЖДАЮ

Зав.кафедрой, к.т.н., профессор

Липов А.В.

15 06 2020 г.

ЗАДАНИЕ на выпускную квалификационную работу магистра

Студент гр.18ММм2 факультета машиностроения и транспорта **Баладин Даниил Алексеевич**,
направление подготовки 15.04.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных
производств программа "Металлообрабатывающие станки".

1 Руководитель ВКР : к.т.н., доцент Миронычев Н.А.

2 Время работы над ВКР: с 10.06.2020 г. по 08.07.2020 г.

3 Место практики: кафедра «Компьютерное проектирование технологического оборудования» ПГУ г. Пенза.

**Тема ВКР: «Повышение эффективности формообразования профильных алмазных кругов
электроэрозионным воздействием»**

Тема утверждена приказом №1162а/о от 16 ноября 2019г.

Исходные данные для выполнения ВКР (диссертации)

3.1 Тема предложена кафедрой «Компьютерное проектирование технологического оборудования»
Пензенского государственного университета г. Пенза.

3.2 В работе рассмотреть вопросы обеспечения заданных точностных характеристик алмазного
инструмента при электроэрозионном формировании профиля круга

4 Объем и содержание ВКР

4.1 Текстовая часть

4.1.1 Краткий анализ существующих методов формирования рельефа рабочей поверхности
алмазного шлифовального круга при различных методах профилирования.

4.1.2 Обоснование выбранного направления работы

4.1.3 Экспериментальное исследование влияния технологических факторов на показатели
процесса правки, расчет частоты генератора технологических импульсов и их скважности

4.1.4 Разработка конструкции специального приспособления для профилирования алмазных
шлифовальных кругов

4.1.5 Технология изготовления детали привода

4.2 Иллюстративный материал к защите ВКР

4.2.1 Схема правки и профилирования алмазных кругов на установке и конструкция редуктора

4.2.2 Цель и задачи исследования.

4.2.3 Планирование эксперимента и обработка экспериментальных данных.

4.2.4 Построение частных зависимостей точности и производительности правки от технологических
параметров.

4.2.5 Конструкция и рабочие чертежи червячного редуктора для кинематической цепи правки.

4.2.6 Основные выводы и результаты работы

УТВЕРЖДАЮ

: Зав. кафедрой, к.т.н., профессор

Липов А.В.

15 06 2020 г.

ЗАДАНИЕ
на выпускную квалификационную работу магистра

Студент гр.18ММм2 факультета машиностроения и транспорта **Баладин Даниил Алексеевич**, направление подготовки 15.04.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств программа "Металлообрабатывающие станки".

1 Руководитель ВКР : к.т.н., доцент Миронычев Н.А.

2 Время работы над ВКР: с 10.06.2020 г. по 08.07.2020 г.

3 Место практики: кафедра «Компьютерное проектирование технологического оборудования» ПГУ г. Пенза.

Тема ВКР: «Повышение эффективности формообразования профильных алмазных кругов электроэрозионным воздействием»

Тема утверждена приказом №1162а/о от 16 ноября 2019г.

Исходные данные для выполнения ВКР (диссертации)

3.1 Тема предложена кафедрой «Компьютерное проектирование технологического оборудования» Пензенского государственного университета г. Пенза.

3.2 В работе рассмотреть вопросы обеспечения заданных точностных характеристик алмазного инструмента при электроэрозионном формировании профиля круга

4 Объем и содержание ВКР

4.1 Текстовая часть

4.1.1 Краткий анализ существующих методов формирования рельефа рабочей поверхности алмазного шлифовального круга при различных методах профилирования.

4.1.2 Обоснование выбранного направления работы

4.1.3 Экспериментальное исследование влияния технологических факторов на показатели процесса правки, расчет частоты генератора технологических импульсов и их скважности

4.1.4 Разработка конструкции специального приспособления для профилирования алмазных шлифовальных кругов

4.1.5 Технология изготовления детали привода

4.2 Иллюстративный материал к защите ВКР

4.2.1 Схема правки и профилирования алмазных кругов на установке и конструкция редуктора

4.2.2 Цель и задачи исследования.

4.2.3 Планирование эксперимента и обработка экспериментальных данных.

4.2.4 Построение частных зависимостей точности и производительности правки от технологических параметров.

4.2.5 Конструкция и рабочие чертежи червячного редуктора для кинематической цепи правки.

4.2.6 Основные выводы и результаты работы

Содержание

Введение.....	5
1 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ РЕЖИМОВ И УСЛОВИЙ ПРОФИЛИРОВАНИЯ.....	6
1.1 Исследование технологии электроэрозионного формообразования алмазных шлифовальных кругов	6
1.1.1 Формирование рельефа рабочей поверхности алмазно-абразивных инструментов при различных методах профилирования	6
1.1.2 Технологические схемы электроэрозионного профилирования алмазных кругов.....	10
1.1.3 Технологические методы достижения заданной точности при электроэрозионном профилировании алмазных шлифовальных кругов.....	14
1.2 Расчёт частоты генератора технологических импульсов и их скважности	20
1.3 Экспериментальное исследование интенсивности съёма связки при электроэрозионном профилировании	27
1.4 Методика экспериментальных исследований и описание оборудования.....	35
1.5 Выводы по результатам исследований.....	42
2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ.....	43
2.1 Общие сведения	43
2.2 Технические характеристики	43
2.3 Конструкция и принцип работы	43
2.4 Расчет на прочность червячной передачи.....	44
3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛИ	49
3.1 Служебное назначение детали	49
3.2 Анализ технологичности конструкции детали	49
3.3 Определение типа производства	50
3.4 Выбор и обоснование способа получения заготовки	57
3.5 Разработка маршрутной технологии обработки деталей	58
3.6 Определение припусков расчетно-аналитическим способом	59
3.7 Проектирование операционной технологии.....	63
3.7.1 Расчет точности обработки на чистовой операции.....	63
3.7.2 Выбор станков, инструмента, средств измерения и технологического оснащения.....	65
3.7.3 Расчет режимов резания на основные операции.....	66
3.7.4 Расчёт технической нормы времени.....	72
Выводы и рекомендации.....	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	76
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	77
ПРИЛОЖЕНИЕ А Чертёж детали.....	83
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Технологическая документация.....	85
ПРИЛОЖЕНИЕ В Статья, опубликованная в научно-техническом сборнике.....	99
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Спецификации конструкции приспособления.....	107
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Ведомость выпускной квалификационной работы.....	113

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при изготовлении изделий из труднообрабатываемых материалов широкое применение находят алмазные шлифовальные круги. Эффективность алмазного шлифования в значительной степени определяется состоянием рельефа рабочей поверхности круга. В связи с этим большой практический интерес представляет исследование влияния технологических режимов профилирования и правки кругов, характеристик алмазосодержащего слоя на параметры рельефа рабочей поверхности. Рельеф рабочей поверхности круга формируется в процессе его правки. В настоящее время для правки алмазных шлифовальных кругов используются различные методы.

Проведение глубокого анализа методов правки позволит определить реальную картину состояния технологии и методик подготовки к работе алмазных шлифовальных кругов на металлических связках. Одако судя по известным информационным источникам и разработкам отечественных и зарубежных фирм наиболее эффективным и универсальным признается электроэрозионный метод, основанный на тепловом воздействии на поверхность круга. Формирование рельефа рабочей поверхности круга в значительной степени определяется прочностью закрепления алмазных зёрен в связке. Таким образом, представляет значительный интерес исследование параметров, оказывающих влияние на производительность электроэрозионного профилирования, критерием которой служит интенсивность съёма связки. Определенно можно отметить, что помимо интенсификации процесса удаления металлической связки, важным для исследований является также точность формирующегося профиля и экономичность использования алмазосодержащего слоя. Значительный вклад в развитие теории и технологии электроэрозионной правки алмазных кругов внес коллектив научной школы, руководимой д.т.н., профессором Дорофеевым В.Д.

1 Исследование технологии электроэрозионного формообразования алмазных шлифовальных кругов и определение эффективных режимов и условий профилирования

1.1 Исследование технологии электроэрозионного формообразования алмазных шлифовальных кругов

1.1.1 Формирование рельефа рабочей поверхности алмазно-абразивных инструментов при различных методах профилирования

Широкому внедрению профильного алмазного шлифования в промышленности препятствует высокая сложность изготовления профильного алмазного инструмента. Получение нужного профиля на таком инструменте затруднено в связи с высокой твёрдостью алмазов входящих в состав этих инструментов. Из-за чрезвычайно высокой твердости алмаза создание рабочего профиля круга, при известных методах профилирования, возможно лишь путем удаления металлической связки поверхностного алмазоносного слоя без изменение размеров алмазных компонентов круга.

Применение в инструментальном производстве, изготовлении основной продукции нашли следующие основные физические приемы изменения состояния поверхности и связки круга: механический, тепловой, химический и комбинированный [1,2,3]. Они служат базовыми методами существующих в промышленности разновидностей создания рабочего профиля алмазного шлифовального инструмента, см. рисунок 1.1.

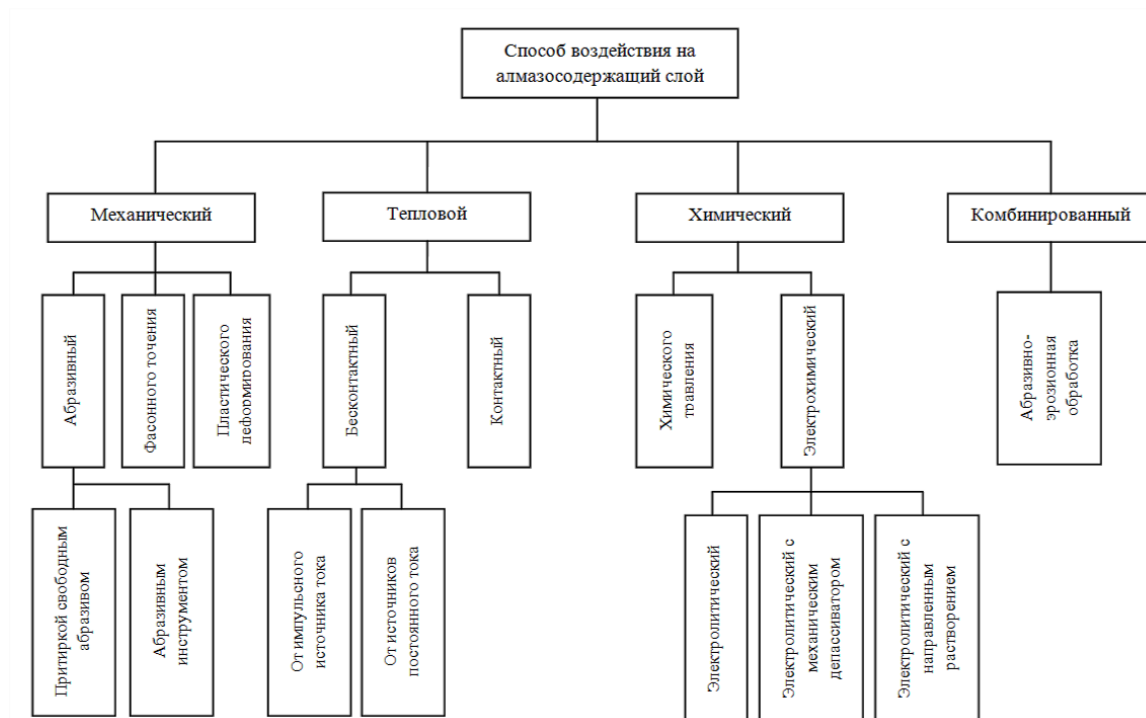


Рисунок 1.1 – Разновидности и приемы создания рабочих профилей алмазного инструмента

К механическому способу изменения состояния алмазоносного слоя относят: способ абразивного воздействия, обработки фасонным инструментом и пластическое деформирование. Абразивный метод достаточно прост, универсален и технологически осуществляется свободным абразивом и абразивными инструментами (кругами, брусками и т.д.) [4,5]. Недостатками данных методов являются ограниченность применения этих методов и низкая размерная стойкость профилирующего абразивного инструмента.

Точение металло- и минералокерамическим фасонным инструментом обладает рядом достоинств, и обычно используется только при черновом профилировании алмазного шлифовального инструмента благодаря высокой производительности, но невысокой точности и удовлетворительной размерной стойкости инструмента.

Технология механического пластического деформирования находит применение в производстве однослойных кругов и кругов на гальванической связке. Использование пластического деформирования допустимо только лишь в случае осуществления деформирования связки без разрушения алмазных зерен.

Формирование профиля алмазоносного слоя круга обеспечивается путем пластического деформирования металла связки вращающимся инструментом при статическом воздействии усилия накатки [1,2,6,7,8,9].

Электроэрозионный способ относится к способу теплового воздействия на материал связки алмазного круга. Разработаны бесконтактный и контактные

методы [10]. По бесконтактному методу последовательность правки отражена в исследованиях [1,2,11]. Рабочее напряжение с клемм источника постоянного тока или импульсного генератора подается, с учетом полярности, на фасонный электрод и алмазный инструмент. Зона проведения процесса электроэрозионной правки погружается в жидкость, обладающую диэлектрическими свойствами. Затем, для создания условий возникновения ионизированного канала с высокой проводимостью и электрического разряда в нем, электрод и круг, с минимальной дискретностью перемещения, сближают вплоть до наступления момента искрообразования. В это время наблюдаются искры от импульсных разрядов. При этом, вследствие массовости прохождения разрядов, происходит оплавление и испарение металлической связки в зонах возле алмазных зерен и затвердевание в диэлектрической жидкости. Вследствие этого процесса обнажаемые алмазные зёрна выступают из металлической связки, формируется рабочий профиль, а освобожденные на значительно большую, чем половина их размера зерна выпадают.

Физическая сущность, процесса правки алмазных кругов электроэрозионным методом заключается в разрушении и извлечении связки при электрических разрядах и механическом выпадении зерен из связки из-за ненадежного их удержания.

Современные технологии позволяют изготавливать сложнопрофильные алмазные круги для высокопроизводительной - до 300 мм³/мин обработки с высокой точностью как линейных, диаметральных, так и угловых размеров, а износ профилирующего инструмента при этом наблюдается весьма несущественный - 6-50% .

Контактный метод электроэрозионного профилирования осуществляется при кратковременном контакте участков движущихся шлифовального круга и фасонного электрода путем переноса формы электрода на круг с использованием технологических приемов процесса шлифования на круглошлифовальных и плоскошлифовальных станках с большой глубиной резания [11,12]. Недостатком данного метода является неспособность его обеспечить получение сложнопрофильного шлифовального инструмента

Для профилирования и правки алмазных кругов на металлической электропроводной связке применяется химический способ.

При этом способе применяются разновидности: химическое травление и электрохимическое профилирование.

Повышение режущих свойств, очистка кругов на металлической связке обеспечивается травлением металла связки и формирования, таким образом нового режущего профиля открыто выступающими из связки алмазными зернами.

Химическое травление применяется значительно редко из-за невозможности исправить профиль изношенного при использовании круга.

Электролитический метод, электролитический с механическим депассиватором и метод электролитический с направленным растворением являются разновидностями электрохимического метода правки. Они основаны на разрушении металлической связки алмазосодержащего слоя воздействием на неё постоянного тока в ванне с электролитом [1,2,5,13,14,15]. Электролит представляет собой раствор различных солей с нейтральным показателем pH.

В ходе выполнения процесса электролиза, при электролитическом методе, не обеспечивается производительность выше $20\text{мм}^3/\text{мин}$ из-за пленкообразования на аноде. Вследствие чего снижается ионная проводимость и процесс замедляется.

Снижение влияния пленкообразования на аноде можно добиться путем введения в технологическую схему депассиватора в виде абразивного круга или бруска, который должен быть прижат локально к месту выполнения профилирования или правки алмазного круга [16,17].

Электролитический метод и электролитический с механическим депассиватором не находят применения в случае экономичного профилирования кругов с минимизацией удаляемого слоя связки с алмазными зернами. Разрешение задачи минимизации съема металла связки связывают с изоляцией диэлектрическими покрытиями электрода-инструмента с целью создания условий улучшающих показатели избирательности электрохимической реакции. При этом обеспечивается однонаправленное протекание процесса растворения металла алмазного круга благодаря растворению электрода и его самокоррекции [18].

Электролитический метод с направленным растворением повышает избирательность процесса профилирования и обеспечивает получение профиля при минимальном съёме алмазосодержащего слоя.

К комбинированному способу воздействия на алмазосодержащий слой можно отнести абразивно-эрозионную обработку. Профилирование по этому методу в отличие от электроэрозионного осуществляется металлоабразивным электродом-инструментом, абразивные зёрна которого удаляют продукты эрозии и потерявшие устойчивость зёрна, а разряды разрушают металлическую связку.

В результате анализа методов профилирования, можно обозначить, что каждый из этих методов имеет свою оптимальную область применения. Однако наиболее перспективным методом профилирования алмазных шлифовальных кругов является электроэрозионный. Поскольку этот метод обладает высокой производительностью и вместе с тем низким износом профилирующего инструмента, а также позволяет получать круги с высокими требованиями к профилю поверхности.

1.1.2 Технологические схемы электроэрозионного профилирования алмазных кругов.

Профилирование алмазно-абразивных инструментов электроэрозионным методом может выполняться двумя основными способами: фасонным и непрофильным электродом.

При обработке фасонным электродом происходит копирование формы последнего на алмазно-абразивном инструменте. Профилирование может осуществляться по различным технологическим схемам.

На рисунке 1.2, а, представлена схема профилирования шлифовального круга 1 по принципу круглого врезного шлифования [16,18,19,20,21]. Обработка выполняется дисковым профилирующим электродом 2, конфигурация которого образуется и восстанавливается при помощи фасонного мастер-резца 3.

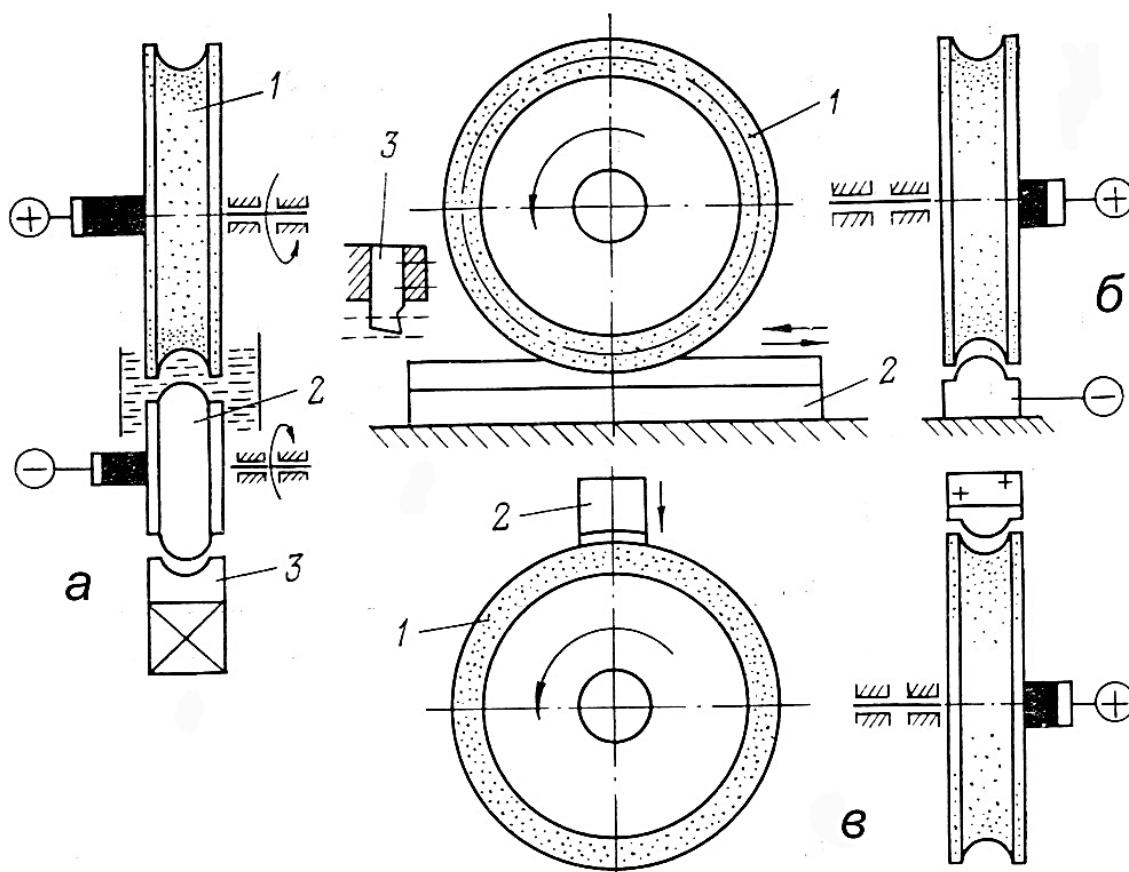


Рисунок 1.2 - Технологические схемы электроэрозионной обработки шлифовальных кругов профилированным электродом

При профилировании по схеме, приведенной на рисунке 1.2,б обработка выполняется призматическим электродом 2 по принципу плоского врезного шлифования. Получение и восстановление конфигурации профиля профилирующего электрода производится строганием резцом 3 и шлифованием [19].

Достоинствами данных технологических схем являются простота реализации и возможность профилирования алмазно-абразивных инструментов со сложной геометрией рабочей поверхности. Применение вращающегося или поступательно перемещающегося профилирующего инструмента позволяет снизить его износ и обеспечить сравнительно высокую точность профилирования (в пределах 0,02...0,03 мм).

По схеме, представленной на рисунке 1.2,в [16,18,19,20,22] алмазно-абразивный инструмент профилируется призматическим электродом по принципу фасонного точения. Получение и восстановление необходимой конфигурации электрода производится одним из методов механической обработки. Данная

технологическая схема характеризуется большим износом электрода, что не позволяет обеспечить высокую точность профилирования. Существенным недостатком является также сложность восстановления профиля профилирующего электрода непосредственно на рабочем месте.

Обеспечение точности профилирования фасонного алмазного инструмента затрудняется из-за интенсивного износа электрода, связанного с его эрозионным и механическим повреждением. Разработана схема получения точности заданного профиля, получившая название - глубинная схема профилирования [24,25].

Правка производится в два этапа: вначале производится процесс электроэрозионного резания на заданную глубину профиля H_0 электродом без его вращения (рисунок 1.3, а). Вследствие механического и эрозионного износа профилирующего электрода профиль шлифовального круга получается искажённым и имеет глубину $H_k < H_0$ (рисунок 1.3, б).

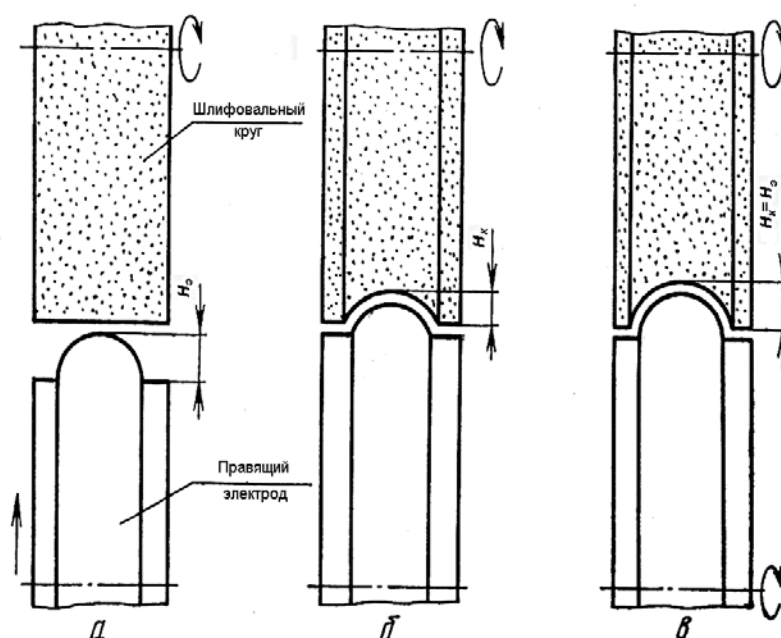


Рисунок 1.3 – Этапы электроэрозионного профилирования алмазных кругов с применением глубинной схемы

Второй этап происходит при медленном вращении электрода со скоростью угловой подачи. Во время профилирования в контакт с алмазным кругом

приходят ранее неконтактировавшие периферийные фасонные поверхности, при этом происходит обновление условий процесса и повышение точности (рисунок 1.3, в).

Применение глубинной схемы является наиболее оптимальным и универсальным приемом при создании сложного фасонного профиля алмазных кругов повышенной точности. В то же время необходимо отметить следующее. Электроэрозионная обработка производится на "мягких" режимах разрядного процесса, т.е. щадящих технологических режимах с целью исключения грубого воздействия разрядов на металлическую связку и искажение профиля. Поэтому съём материала с поверхности алмазных кругов незначителен.

Попытки интенсифицировать процесс правки за счет увеличения энергии импульсов привели к нежелательному эффекту - точность снизилась вследствие нарушения оптимальных условий искрообразования и, как следствие, изменения размеров электрода.

Для проведения электроэрозионной обработки непрофильным электродом отпадает необходимость создания сложного фасонного электрода. Перемещение простого по форме электрода-инструмента с заданием точки контакта по нужному контуру обеспечивает получение рабочего профиля круга. Инструмент может иметь форму диска или конического стержня. Широко применяется электроэрозионная проволока от электроэрозионных станков [16,18,22,].

Точность при использовании дисков или стержней в зависимости от формы профиля варьируется, для несложного (рисунок 1.4, а, б) - 0,005...0,01 мм. Для повышенных по точности алмазных кругов и кругов со сложным профилем применение таких электродов-инструментов не практикуется.

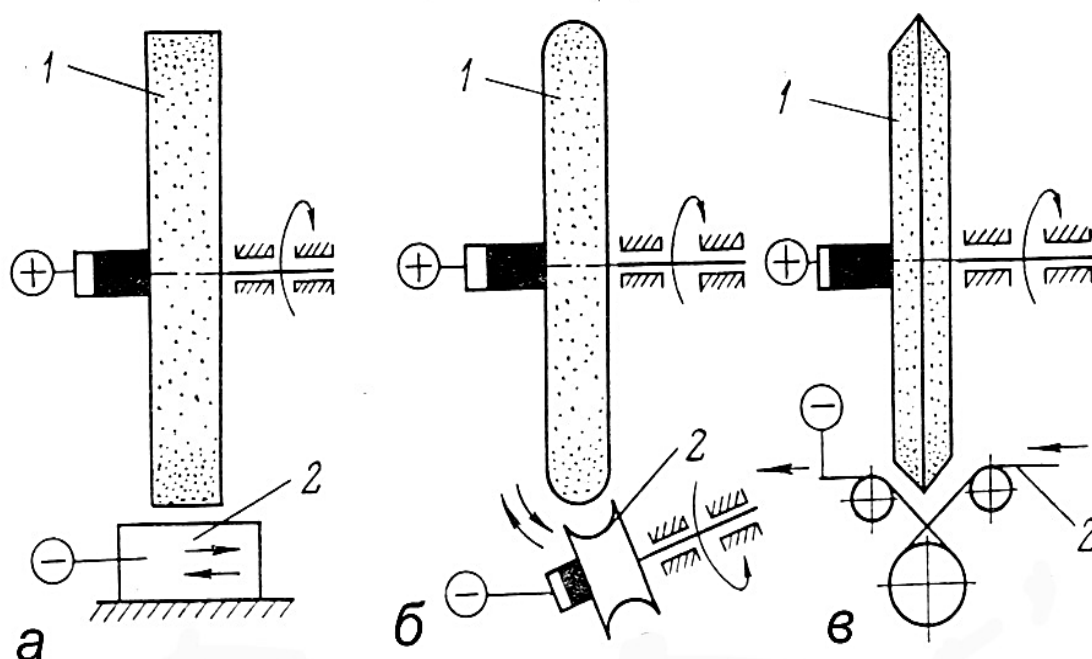


Рисунок 1.4 Технологические схемы электроэрозионной обработки шлифовальных кругов непрофильным электродом

Достоинство схемы обработки электродом-проволокой (рисунок 1.4,в) заключается в том, что практически исключается влияние износа профилирующего электрода на точность профилирования. Приведенная схема не обеспечивает необходимой производительности и применяется сравнительно редко.

Из-за отсутствия полного контакта профили инструмента и круга не идентичны, вследствие чего электроэрозионная обработка может быть отнесена к процессам бесконтактного формообразования. А это требует особого подхода к использованию технологическим приемов и конструирования электродов. В связи с этим представляет большой интерес изучение влияния различных факторов на точность данного вида профилирования.

1.1.3 Технологические методы достижения заданной точности при электроэрозионном профилировании алмазных шлифовальных кругов

Технология профилирования методом прямого копирования не всегда обеспечивает заданную точность из-за ряда производственных факторов [26]:

- значительный износ и, как следствие, искажение профиля электрода-инструмента;
- неравномерность зазора в контакте профилирующего электрода и алмазного шлифовального круга;
- разновысотность над уровнем связки алмазных зёрен;

- нагрев и искажения формы электрода-инструмента и алмазного круга;
- погрешности установки мастер-резца, электрода-инструмента и алмазного круга.

Анализ показал, что наиболее значимое влияние на точность профилирования имеют первые три фактора.

Причиной искажением профиля электрода является его износ и износ мастер-резца при профилировании.

На величину износа электрода влияют следующие факторы:

- механические и электрические режимы обработки;
- материал электрода;
- абразивное воздействие алмазных зёрен круга;
- геометрические характеристики профиля электрода-инструмента.

Режимы механической обработки в процессе электроэрозионного профилирования включают направление вращения и численное значение скоростей вращения электрода-инструмента и алмазного круга. При медленном вращении и малых окружных скоростях электрода-инструмента и алмазного круга процесс процесс профилирования оптимален, а попытки увеличить производительность путем увеличения скорости приводит к интенсификации износа электрода-инструмента.

Параметры импульсного генератора для электроэрозионного профилирования и полярность включения относятся к электрическим режимам профилирования. Прямая полярность включения приводит к повышенной эрозии обоих электродов, обратная – сопровождается стабильной эрозионной стойкостью электрода-инструмента. Величина рабочего тока прямо пропорционально влияет на износ электрода-инструмента. Рекомендуется проводить профилирование с соблюдением условия $I \leq 0.5 \cdot I_{к.з.}$, где $I_{к.з.}$ - величина тока короткого замыкания. выполнение этого условия позволяет минимизировать износ электрода.

Свойства материала электрода-инструмента играют важную роль в процессе профилирования: наиболее значимыми считаются свойства хорошей электропроводности, эрозионной стойкости и абразивостойкости.

Кроме этого, материал электрода-инструмента не должен иметь повышенные механические свойства, т.к. это может осложнить его профилирование мастер-резцом на стадии, предшествующей электроэрозионной правке алмазного круга.

Указанным требованиям в достаточной мере отвечает специальный графит марки ЭЭГ. Он имеет хорошую износостойкость при механическом и электроэрозионном воздействии и позволяет получать заданную точность рабочей поверхности алмазных кругов при электроэрозионном профилировании.

Сложности обеспечения заданной точности размеров по всем участкам профиля алмазного круга заключаются в неравномерности износа электрода-инструмента. Причиной неравномерности является разная величина удаляемого слоя-припуска с разных участков профиля алмазного круга, иначе - разная массовая доля припуска на участках электрода-инструмента и приходящийся на эту процедуру износ.

Полученные данные износа электрода-инструмента [27,28] подтверждают его прямую связь с величиной удаляемого припуска. Найденная зависимость выражается в виде формулы [26]:

$$\Delta h_{\text{эл}} = \frac{D_{\text{эл}} - d_{\text{эл}}}{2} = \frac{D_{\text{эл}} - \sqrt{D_{\text{эл}}^2 - \gamma(D_{\text{кр}}^2 - d_{\text{кр}}^2)}}{2},$$

где $\Delta h_{\text{эл}}$ - размерный износ электрода-инструмента; $D_{\text{эл}}$ - диаметр электрода на данном участке до профилирования; $d_{\text{эл}}$ - диаметр электрода по окончании профилирования; γ - относительный объёмный износ электрода; $D_{\text{кр}}$ - диаметр алмазного шлифовального круга до профилирования; $d_{\text{кр}}$ - диаметр спрофилированного алмазного шлифовального круга.

Относительный объёмный износ можно определить по формуле:

$$\gamma = \frac{V_{\text{эл}}}{V_{\text{кр}}} \cdot 100\%,$$

где $V_{\text{эл}}$ и $V_{\text{кр}}$ - соответственно объёмные значения износа материала электрода и алмазного круга в единицу времени.

Выполненный анализ показал, что что вышеперечисленные факторы существенно влияют на величину износа профиля электрода-инструмента, что приводит к искажению профиля и внесению погрешностей в процесс обеспечения точности алмазных профильных резцов. С целью поддержания заданной точности профиля электрода применяется его периодическая правка.

Число правок электрода определяется в зависимости от величины относительного износа электрода-инструмента, припусков, снимаемых с алмазного шлифовального круга, допусков на размер. Для нахождения числа правок электрода используется формула:

$$n = \frac{\log \frac{\delta}{2\Delta h_{кр}}}{\log \gamma_r} - 1,$$

где δ - допуск на размер.

Износ мастер-резца вносит погрешность и искажает профиль электрода-инструмента во время восстановления его профиля. Для сохранения точности профиля проводят периодическую заточку мастер-резца, а также разделяют правку электрода-инструмента на предварительную и окончательную.

Величина коррекции мастер-резца может быть найдена по известным методикам [25,29].

По первому способу профилирование алмазного круга производится электродом-инструментом с рабочим профилем детали. Корректирование осуществляют, сравнивая профиль детали с профилем мастер-резца.

Достоинство - можно оперативно найти значение поправки для мастер-резца. Однако при этом происходит неэкономичное использование алмазоносного слоя профилируемого круга.

Следующий способ профилирования состоит в том, алмазный круг правится электродом-инструментом, имеющим отклонение профиля от профиля мастер-резца. Погрешность при этом способе должна находиться в пределах допустимого искажения профиля. После чего рассчитывается поправка на размеры мастер-резца

с использованием оптического проектора, на котором проверяется совпадение профилей детали и профиля электрода-инструмента.

Сложности осуществления на практике этого способа связаны с привлечением дорогостоящей аппаратуры, техники и высококвалифицированного персонала.

Третий способ заключается в назначении начальной поправки на профиль мастер-резца после профилирования безалмазного или бронзового круга. В последующем значение поправки определяется, сравнивая профиль алмазного круга и предварительно скорректированного мастер-резца.

Использование четвёртого способа позволяет получить точный профиль мастер-резца путем его прецизионным алмазным мастер-кругом, с соответствующим рабочему чертежу детали профилем.

Наладка в случае использования мастер-круга исключает коррекцию электродов, однако получается достаточно трудоемкой.

Максимальную погрешность обработки, зависящую от таких факторов, как наличие межэлектродного зазора и выступание над уровнем связки алмазных зёрен, можно рассчитать по формуле [26]:

$$\Delta S_{max} = 2(S - h_p),$$

где S - межэлектродный зазор; h_p - высота выступления зёрен над уровнем связки.

Как видно из формулы погрешность обработки становится минимальной, когда величина межэлектродного зазора приближается к высоте выступления зёрен над связкой.

Поскольку эти факторы взаимно вносят искажения по всему профилю, то для компенсации влияния этих факторов на точность профилирования, размеры электрода-инструмента должны быть скорректированы.

Величина коррекции мастер-резца в общем случае может быть найдена по формуле [29]:

$$\Delta = \delta_T - b,$$

где δ_T – текущий зазор между электродами; b – высота алмазных зёрен, выступающих над уровнем связки.

Выступление алмазного зерна над связкой можно определить по формуле [30]:

$$b = 0.18D_{max},$$

где D_{max} – большая ось алмазного зерна эллипсоидной формы

Методика расчета предельных значений касательных напряжений от сил, действующих на зерна [30], позволяет построить эпюры распределения наибольших касательных напряжений по выступающему контуру зерна. Полученные максимальные значения напряжений дают возможность оценить размеры, предельно допустимые с точки зрения удержания зерен в связке, выступления алмазных зерен из металлической связки. Сформированный рабочий рельеф алмазных зерен имеет высоту, определяемую по формуле:

$$b = C_P \left(A - \frac{110}{A} P_Y \right) \text{ мкм},$$

где C_P – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств материала связки в момент соприкосновения с алмазным зерном; A – средневероятностный диаметр зерна, мкм; P_Y – радиальная сила, действующая на зерно, г.

Согласно вышеизложенной методики возможно определение лишь предельной рабочей высоты зёрен. Это положение не совсем удобно, т.к. реально на стадии приработки алмазного круга в течение 5...20 мин, происходит выкрашивание максимально выступающих зерен и выравнивание по высоте рабочего профиля.

Сложность строгого учета погрешностей от температурных деформаций электрода-инструмента и алмазного круга, заключается в том, что у материалов электрода и металла связки алмазоносного слоя различные температурные коэффициенты. Погрешности из-за нагрева определяют по формуле [26]:

$$\Delta T = (\alpha_{эл} - \alpha_a) L_{эл} T_n,$$

где $\alpha_{эл}$ и α_a - температурные коэффициенты материалов электрода и алмазоносного слоя, 1/К; $L_{эл}$ - соответствующий размер профиля инструмента, мм; T_n - прирост температуры рабочих электродов, град.

Как показали исследования значения погрешности вследствие нагрева круга и электрода-инструмента не превышают 0,008 мм.

1.2 Расчёт частоты генератора технологических импульсов и их скважности

Частота прямоугольных технологических импульсов является одним из важнейших параметров технологических режимов электроэрозионного профилирования и правки алмазных шлифовальных кругов на металлической связке. От частоты генератора технологических импульсов в значительной степени зависит как производительность профилирования, так и качество поверхности алмазного инструмента, и точность его профиля.

Известно, что максимальный эффект электроэрозионного процесса при профилировании алмазоносного слоя достигается на режимах, при которых параметры электрического разряда создают на поверхности алмазного круга лунки с диаметрами, соизмеримыми со средними расстояниями между алмазными зёрнами, следовательно, диаметр лунки после разряда на свободной поверхности электрода должен быть меньше среднего расстояния между алмазными зёрнами.

Необходимо отметить, что разряд может возникнуть в любой точке на поверхности связки, но вследствие его миграции образование лунки в конечном счёте происходит в промежутке между алмазными зёрнами [19,20].

Таким образом, в общем виде частота технологических импульсов рассчитывается следующим образом:

$$f_{\Gamma} = n_{max} * n_{кр}, \quad (1.1)$$

где n_{max} - количество технологических импульсов, необходимых для покрытия лунками алмазного круга по диаметру; $n_{кр}$ - частота вращения алмазного круга.

В свою очередь количество импульсов, необходимых для покрытия лунками алмазного круга по диаметру можно представить как отношение длины окружности алмазного круга к диаметру лунки:

$$n_{max} = \frac{\pi \cdot D}{d_l} \cdot \quad (1.2)$$

Поскольку диаметр лунки, как выше уже было сказано, должен быть меньше или равен среднему расстоянию между алмазными зёрнами, то этот диаметр будет равняться среднему шагу алмазных зёрен, уменьшенному на его средний эквивалентный диаметр

$$d_l = l_3 - d_{cp} \quad (1.3)$$

Исследованию среднего шага между зёрнами на поверхности алмазных кругов различной зернистости посвящена работа [31,32] из которой видно, что данный параметр зависит как от зернистости, так и от концентрации зёрен.

Таким образом, средний шаг между алмазными зёрнами можно рассчитать по формуле

$$l_3 = 191 \frac{A^{0.97}}{K^{0.98}}, \quad (1.4)$$

где A – зернистость алмазного порошка; K – концентрация алмазов в алмазосодержащем слое шлифовального круга.

В свою очередь средний эквивалентный диаметр алмазных зёрен рассчитывается исходя из предположения, что алмазное зерно имеет сферическую форму, диаметральный размер которой вычисляется из условия сохранения массы абразивного вещества и числа зерен, заложенных фактически в объём абразивной матрицы [18]:

$$d_{cp} = \frac{6,1}{\sqrt[3]{N}} \quad (1.5)$$

где N – число абразивных частиц в навеске, равной 1 карату, шт.

В таблице 1.1 приведены значения среднего эквивалентного диаметра зёрен для алмазного порошка марки АС 6.

Таблица 1.1 – Значения среднего эквивалентного диаметра

Зернистость алмазного порошка, мкм	Среднее число зёрен в 1 карате алмазного порошка N , тыс. шт.	Средний эквивалентный диаметр зерна d_{cp} , мкм
400/315	2,44	453

Зернистость алмазного порошка, мкм	Среднее число зёрен в 1 карате алмазного порошка N , тыс. шт.	Средний эквивалентный диаметр зерна $d_{ср}$, мкм
315/250	4,53	368
250/200	8,41	300
200/160	15,6	244
160/125	29,1	198
125/100	54,0	161
100/80	100	131
80/63	186	106
63/50	346	86
50/40	644	70

Важным параметром при расчёте частоты технологических импульсов является относительная частота рабочих импульсов λ , учитывающая количество рабочих импульсов, т.е. импульсов при которых происходит разряд между алмазным кругом и электродом-инструментом. Относительная частота рабочих импульсов представляет собой отношение частоты рабочих импульсов к частоте генератора

$$\lambda = \frac{f_p}{f_r}.$$

Величина λ объективно характеризует степень реализации импульсов при различных значениях межэлектродного зазора.

В работе [33] в ходе экспериментальных исследований установлено, что с уменьшением межэлектродного зазора параметр λ медленно растёт, пока при определённом значении межэлектродного зазора, характеризующимся такими электрическими параметрами технологических импульсов как амплитуда U и ток I , не станет равным λ_{max} . При дальнейшем уменьшении межэлектродного зазора относительная частота рабочих импульсов λ некоторое время остаётся на прежнем уровне (λ_{max}), а затем резко падает до нуля вследствие роста импульсов, при которых происходит короткое замыкание.

Следовательно, для поддержания максимальной производительности электроэрозионного профилирования относительную частоту рабочих импульсов

необходимо поддерживать на максимальном уровне равном λ_{max} за счёт стабилизации межэлектродного зазора на соответствующем значении.

Экспериментальные исследования показали, что при электроэрозионной правке максимальная производительность процесса достигается, когда электрическая мощность, выделяемая в межэлектродном зазоре максимальна [34,35,36,37,38,39].

На рисунках 1.5 и 1.6 показаны экспериментальные зависимости электрической мощности, выделяемой в межэлектродном зазоре от межэлектродного зазора (рисунок 1.5) и интенсивность съёма материала от электрической мощности (рисунок 1.6). На рисунке 1.6 видно, что наибольшая интенсивность съёма материала происходит при максимальной электрической мощности, выделяемой в межэлектродном зазоре.

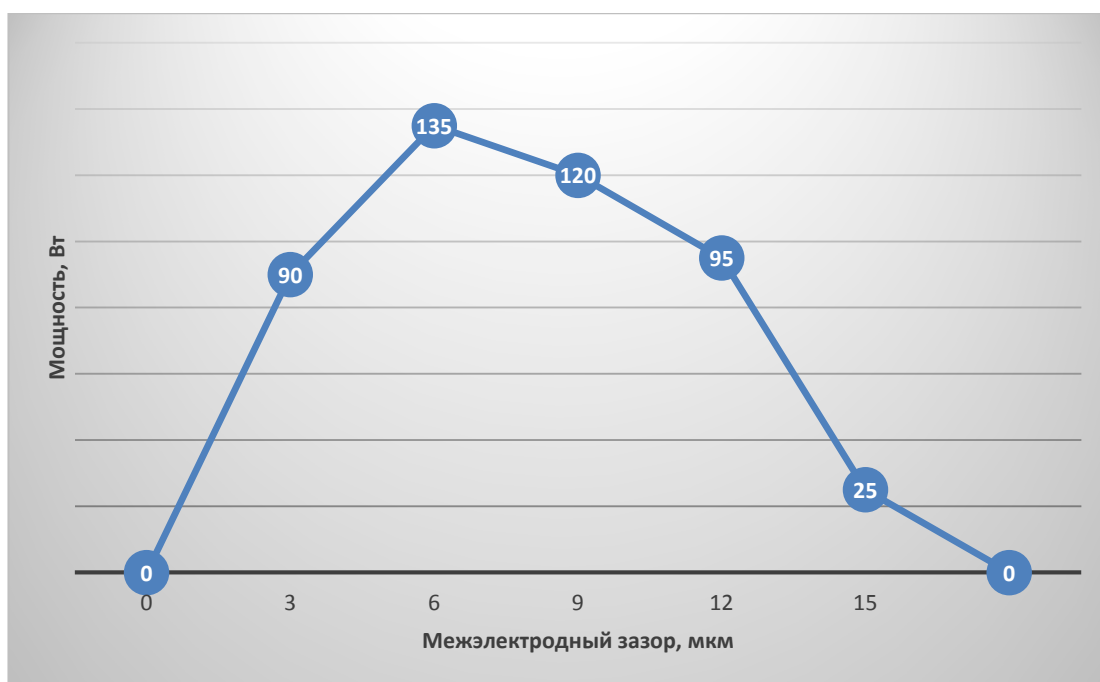


Рисунок 1.5 - Зависимость электрической мощности, выделяемой в межэлектродном зазоре от межэлектродного зазора

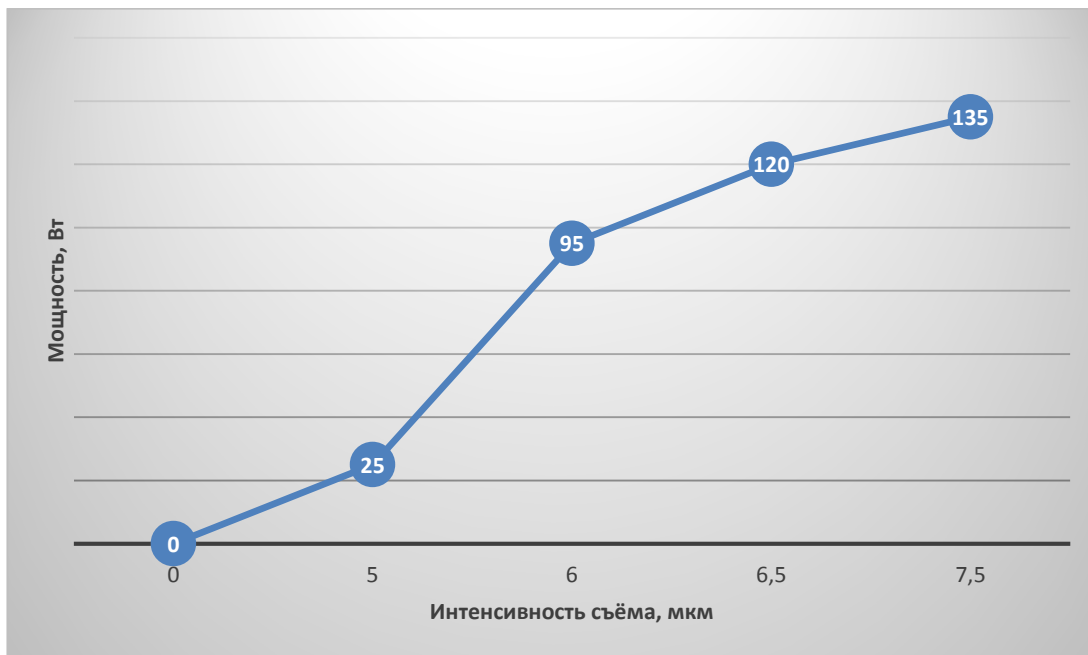


Рисунок 1.6 – Зависимость интенсивности съёма материала от электрической мощности

Таким образом, стабилизацию межэлектродного зазора, при котором достигается максимальная производительность, а следовательно и максимальная величина относительной частоты рабочих импульсов λ_{max} можно осуществлять контролируя мощность, выделяемую в межэлектродном зазоре, т.е. поддерживая величину этой мощности на максимальном уровне.

В виду выше описанного окончательная формула для расчёта частоты технологических импульсов примет вид:

$$f_{\Gamma} = \frac{C \cdot \lambda_{max} \cdot \pi \cdot D \cdot n}{11460 \frac{A^{0.97}}{K^{0.98}} - \frac{366}{\sqrt[3]{N}}}, \quad (1.6)$$

где D – диаметр алмазного круга; n – частота вращения алмазного круга; λ_{max} – относительная частота рабочих импульсов; C – коэффициент, учитывающий плоскостное распределение разрядов по поверхности алмазного круга и зависящий от зернистости алмазного круга; A – зернистость алмазного порошка; K – концентрация алмазов в алмазосодержащем слое шлифовального круга; N – число абразивных частиц в навеске, равной 1 карату.

В таблице 1.2 представлены расчётные значения частоты генератора технологических импульсов для различной зернистости 100% концентрации

алмазного порошка и различной частоты вращения алмазного круга диаметром 250 мм.

Таблица 1.2 - Расчётные значения частоты генератора технологических импульсов

Частота вращения алмазного круга, мин ⁻¹	3,5	18	38	56
Зернистость алмазного порошка, мкм	Частота генератора технологических импульсов, Гц			
50/40	1862	9500	20227	29807
100/80	1030	5294	11180	16477
200/160	570	2941	6210	9154
400/315	320	1638	3462	5103

На рисунке 1.7 представлены графические зависимости частоты генератора технологических импульсов от зернистости алмазного порошка при различных частотах вращения алмазного круга.

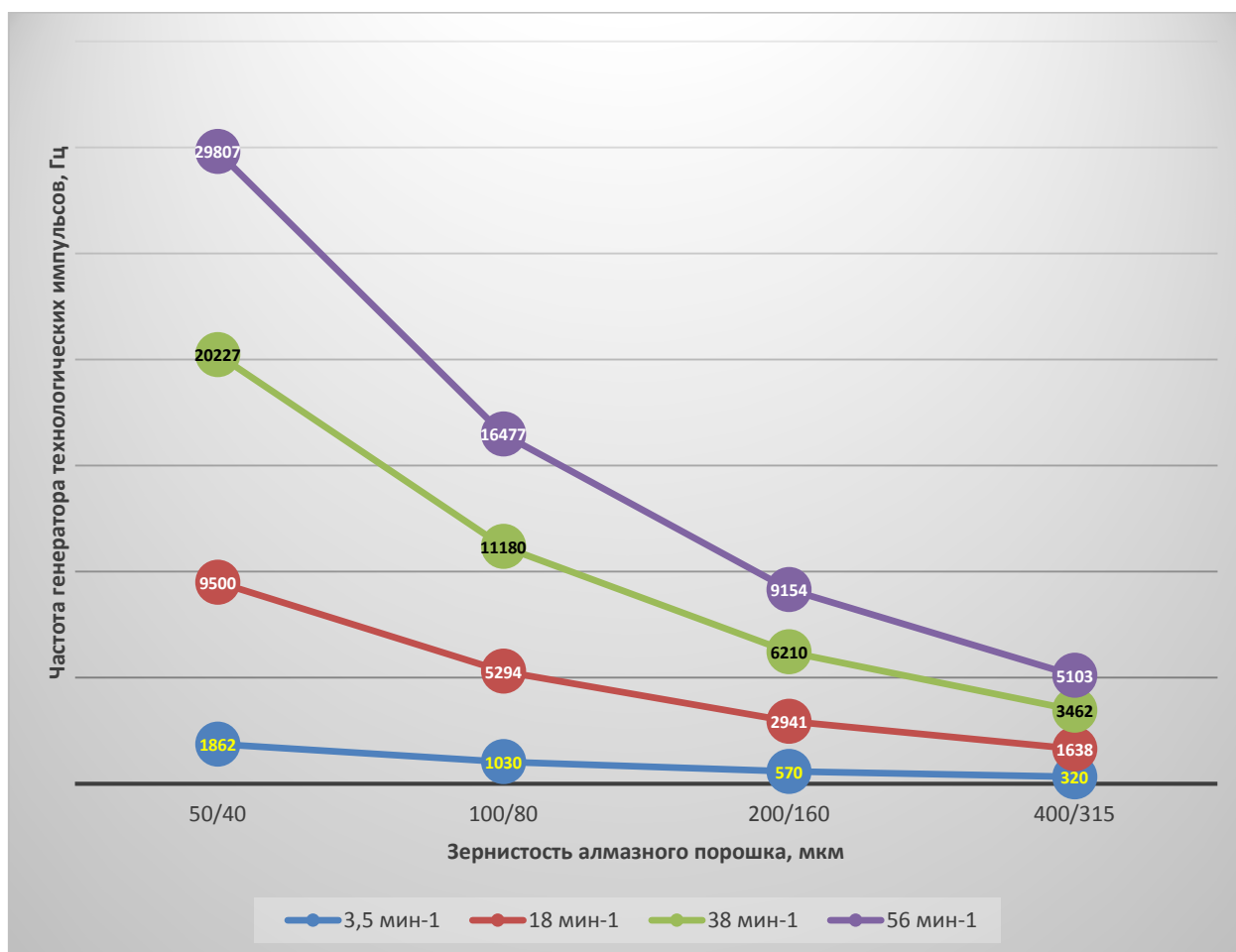


Рисунок 1.7 – Зависимость частоты генератора от зернистости алмазного порошка при различных частотах вращения алмазного круга

Из графиков видно, что при увеличении зернистости алмазного порошка требуемая частота генератора технологических импульсов снижается вследствие

увеличения среднего шага зёрен, а, следовательно, и диаметра лунок. Увеличение же частоты вращения алмазного круга ведёт к росту частоты технологических импульсов.

Ещё одним значимым параметром технологических импульсов является их скважность, поскольку она оказывает определяющее влияние на точность электроэрозионного профилирования при чистовых режимах обработки.

В общем виде скважность технологических импульсов можно рассчитать по формуле:

$$q = \frac{l_3}{d_l}, \quad (1.7)$$

где l_3 - средний шаг алмазных зёрен; d_l – диаметр лунки.

Таким образом, подставив в формулу (1.7) выражения (1.4) и (1.5), получим окончательную формулу для расчёта скважности технологических импульсов:

$$q = \frac{1}{1 - \frac{K^{0.98}}{31.3 \cdot \sqrt[3]{N} \cdot A^{0.97}}}, \quad (1.8)$$

где K – концентрация алмазов в алмазосодержащем слое шлифовального круга; N – число абразивных частиц в навеске, равной 1 карату, шт.; A – зернистость алмазного порошка.

В таблице 1.3 представлены расчётные значения скважности технологических импульсов для различной зернистости 100% концентрации алмазного порошка.

Таблица 1.3 - Расчётные значения скважности технологических импульсов

Зернистость алмазного порошка, мкм	Скважность технологических импульсов
50/40	1,8
100/80	1,8
200/160	2,18
400/315	2,14

На рисунке 1.8 представлена графическая зависимость скважности технологических импульсов от зернистости алмазного порошка.

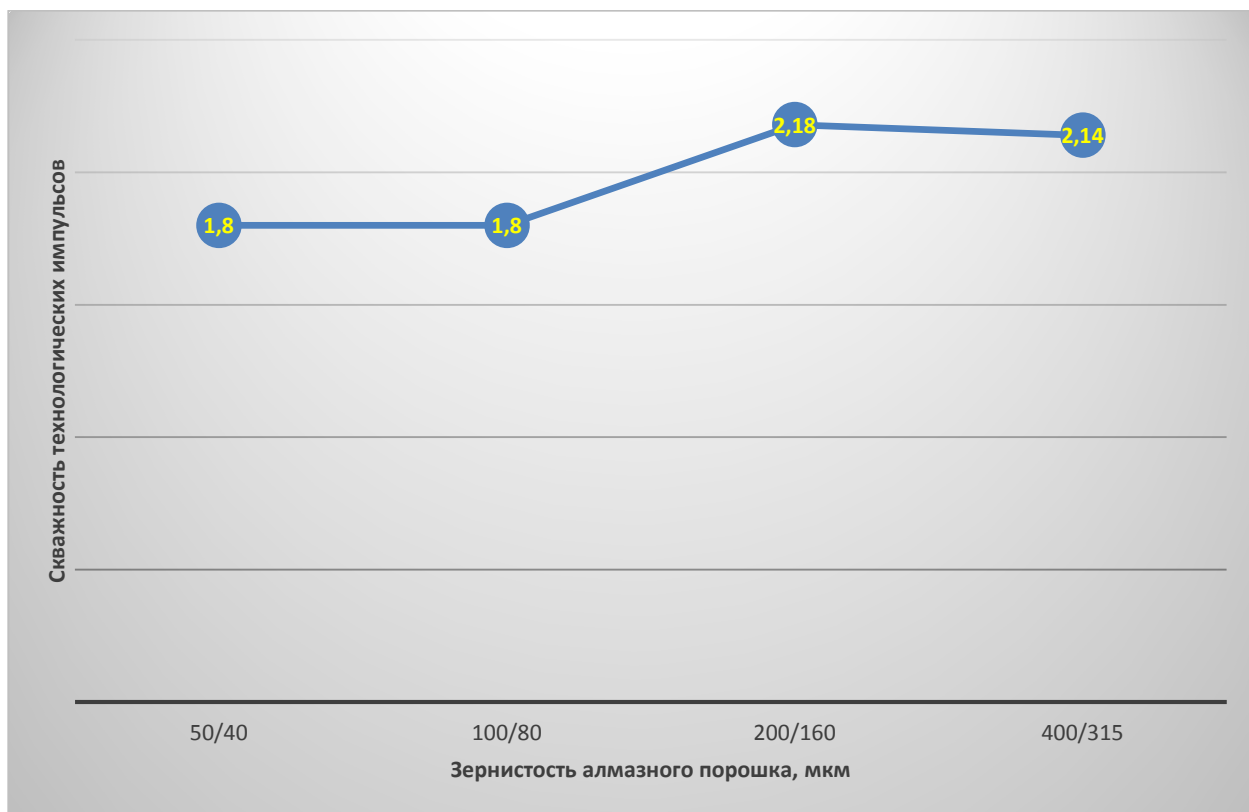


Рисунок 1.8 – Зависимость скважности технологических импульсов от зернистости алмазного порошка

Из графика видно, что с ростом зернистости алмазного порошка скважность в 1,2 раза увеличивается. Это связано с тем, что при росте зернистости отношение диаметра лунки к среднему шагу алмазных зёрен уменьшается.

Таким образом, определена зависимость частоты генератора технологических импульсов от частоты вращения алмазного круга, его зернистости и концентрации алмазного порошка. А также определена зависимость скважности технологических импульсов от зернистости алмазного круга и концентрации алмазного порошка.

1.3 Экспериментальное исследование интенсивности съёма связки при электроэрозионном профилировании

Производительность любой обработки является её важной характеристикой. При электроэрозионном профилировании алмазных шлифовальных кругов на токопроводящей связке производительность оказывает определяющее влияние на время обработки не только при черновых режимах, когда требуется удаление сравнительно большого объёма материала, но и при чистовых, когда съём

материала не большой, но и энергия технологических импульсов тоже невысока. Таким образом, представляет большой интерес исследование параметров влияющих на производительность электроэрозионного профилирования, критерием которой служит интенсивность съёма связки.

Рассмотрим эти параметры. Наибольшее влияние на интенсивность съёма оказывает энергия технологических импульсов и частота вращения алмазного круга. В свою очередь энергия технологических импульсов складывается из произведения мощности этих импульсов и их длительности:

$$W = U * I * t.$$

Как было сказано выше, для максимизации интенсивности съёма связки и точности, за счёт стабилизации межэлектродного зазора, необходимо вести электроэрозионную обработку так, чтобы мощность, выделяемая в межэлектродном зазоре, была максимальной, регулируя величину межэлектродного зазора.

Частота вращения алмазного круга определяется частотой генератора технологических импульсов соотношением n/f_{Γ} . Следовательно, время перемещения разрядного участка (расстояния между алмазными зёрнами) не должно превышать время образования лунки.

Таким образом, экспериментально были определены зависимости интенсивности съёма связки от максимальной мощности, выделяемой в межэлектродном зазоре, частоты вращения алмазного круга и частоты генератора технологических импульсов.

Поскольку при электроэрозионном профилировании происходит только эрозионное разрушение связки, а алмазные зёрна механически удаляются, входя в контакт с электродом-инструментом, то целесообразно интенсивность съёма определять на безалмазном образце. Поэтому, в качестве электрода инструмента и безалмазного круга применялись диски из латуни прямого профиля марки ЛС59-1 с размерами $\varnothing 125 \times 15$ мм и $\varnothing 138 \times 15$ мм. Экспериментальные исследования проводились на установке для электроэрозионного профилирования и правки алмазных кругов на токопроводящей связке амплитуда технологических импульсов $U = 60$ В, ток короткого замыкания $I_{KЗ} = 10$ А.

В таблице 1.4 приведены линейные и объёмные величины интенсивности съёма при частоте генератора технологических импульсов равной 1 кГц в зависимости от максимальной мощности, выделяемой в межэлектродном зазоре при различных длительностях технологических импульсов, а также от различных частот вращения безалмазного круга.

Таблица 1.4 – Экспериментальные данные

Длит. имп, мкс	Макс. мощ- ность, Вт	Интенсивность съёма							
		Скорость круга, мин ⁻¹							
		3,5		18		38		56	
		мкм/ мин	мкм ³ / мин	мкм/ мин	мкм ³ / мин	мкм/ мин	мкм ³ / мин	мкм/ мин	мкм ³ / мин
250	150	0,8	2,6	1	3,25	1,6	5,2	1,6	5,2
350	260	1	3,25	1,4	4,55	2	6,5	1,8	5,85
450	350	1,2	3,9	1,6	5,2	2,2	7,14	2	6,5
550	430	1,8	5,85	2	6,5	2,6	8,46	2,2	7,14
650	460	2,4	7,8	2,6	8,46	2,8	9,1	2,8	9,1

На рисунке 1.8 представлены графические зависимости объёмной величины интенсивности съёма при частоте генератора технологических импульсов равной 1 кГц в зависимости от максимальной мощности, выделяемой в межэлектродном зазоре при различных длительностях технологических импульсов, а также от различных частот вращения безалмазного круга.



Рисунок 1.8— Зависимость объёмной величины интенсивности съёма от различных технологических режимов обработки

В таблице 1.5 приведены линейные и объёмные величины интенсивности съёма при частоте генератора технологических импульсов равной 7 кГц в зависимости от максимальной мощности, выделяемой в межэлектродном зазоре при различных длительностях технологических импульсов, а также от различных частот вращения безалмазного круга.

Таблица 1.5 – Экспериментальные данные

Длит. имп, мкс	Макс. мощ- ность, Вт	Интенсивность съёма							
		Скорость круга, мин ⁻¹							
		3,5		18		38		56	
		мкм/ мин	мкм ³ / мин	мкм/ми н	мкм ³ / мин	мкм/ мин	мкм ³ / мин	мкм/ мин	мкм ³ / мин
50	150	2	6,5	1,8	5,85	1,6	5,2	2,2	7,15
60	200	2,2	7,15	2,2	7,15	2	6,5	2	6,5
70	250	1,6	5,2	2,4	7,8	2	6,5	1,8	5,85

Длит. имп, мкс	Макс. мощ- ность, Вт	Интенсивность съёма							
		Скорость круга, мин ⁻¹							
		3,5		18		38		56	
		мкм/ мин	мкм ³ / мин	мкм/ми н	мкм ³ / мин	мкм/ мин	мкм ³ / мин	мкм/ мин	мкм ³ / мин
80	280	1,8	5,85	2,8	9,1	2,8	9,1	2,4	7,8
90	300	2	6,5	3	9,75	3,6	11,7	3,8	12,3
100	250	1,6	5,2	1,6	5,2	4,2	13,65	3,2	10,4
110	150	1,8	5,85	5	16,25	6	19,5	5,4	17,5

На рисунке 1.9 представлены графические зависимости объёмной величины интенсивности съёма при частоте генератора технологических импульсов равной 7 кГц в зависимости от максимальной мощности, выделяемой в межэлектродном зазоре при различных длительностях технологических импульсов, а также от различных частот вращения безалмазного круга.



Рисунок 1.9 - Зависимость объёмной величины интенсивности съёма от различных технологических режимов обработки

На рисунке 1.10 представлена графическая зависимость объёмной интенсивности съёма от мощности, выделяемой в межэлектродном зазоре при частоте вращения безалмазного круга $n_{кр} = 3,5 \text{ мин}^{-1}$ и различной длительности технологических импульсов.

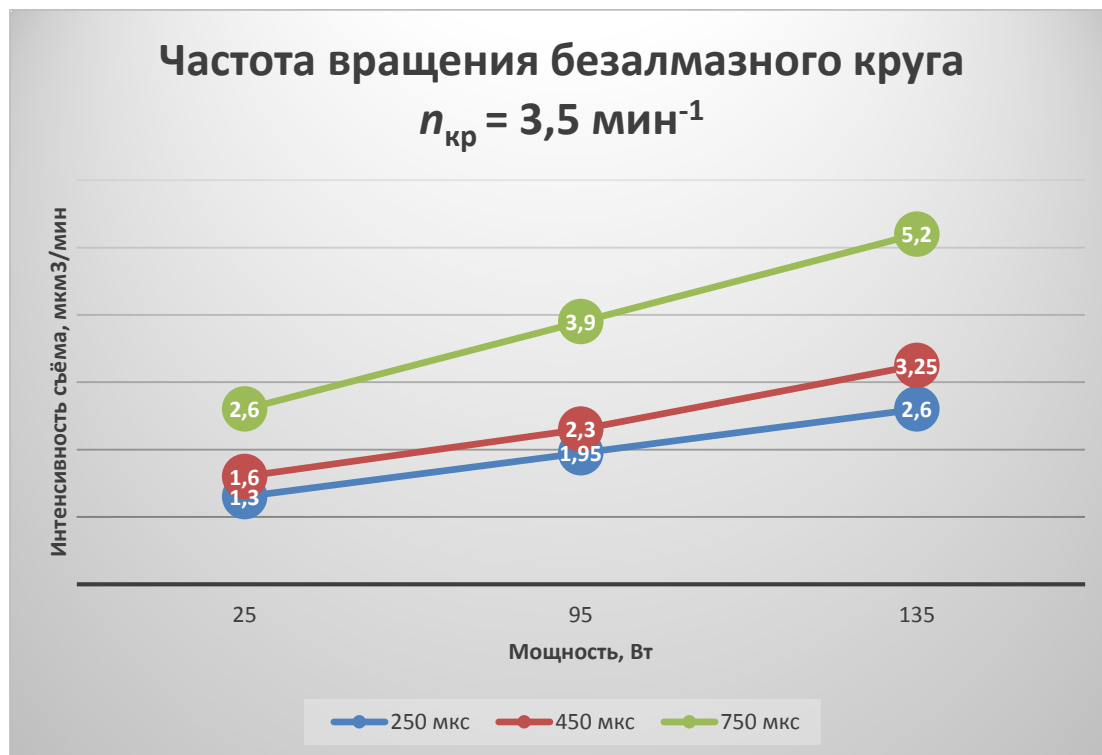


Рисунок 1.10 - Зависимость объёмной величины интенсивности съёма от величины мощности при частоте вращения безалмазного круга $n_{кр} = 3,5 \text{ мин}^{-1}$

На рисунке 1.11 представлена графическая зависимость объёмной интенсивности съёма от мощности, выделяемой в межэлектродном зазоре при частоте вращения безалмазного круга $n_{кр} = 18 \text{ мин}^{-1}$ и различной длительности технологических импульсов.



Рисунок 1.11 - Зависимость объёмной величины интенсивности съёма от величины мощности при частоте вращения безалмазного круга $n_{кр} = 18 \text{ мин}^{-1}$

На рисунке 1.12 представлена графическая зависимость объёмной интенсивности съёма от мощности, выделяемой в межэлектродном зазоре при частоте вращения безалмазного круга $n_{кр} = 38 \text{ мин}^{-1}$ и различной длительности технологических импульсов.

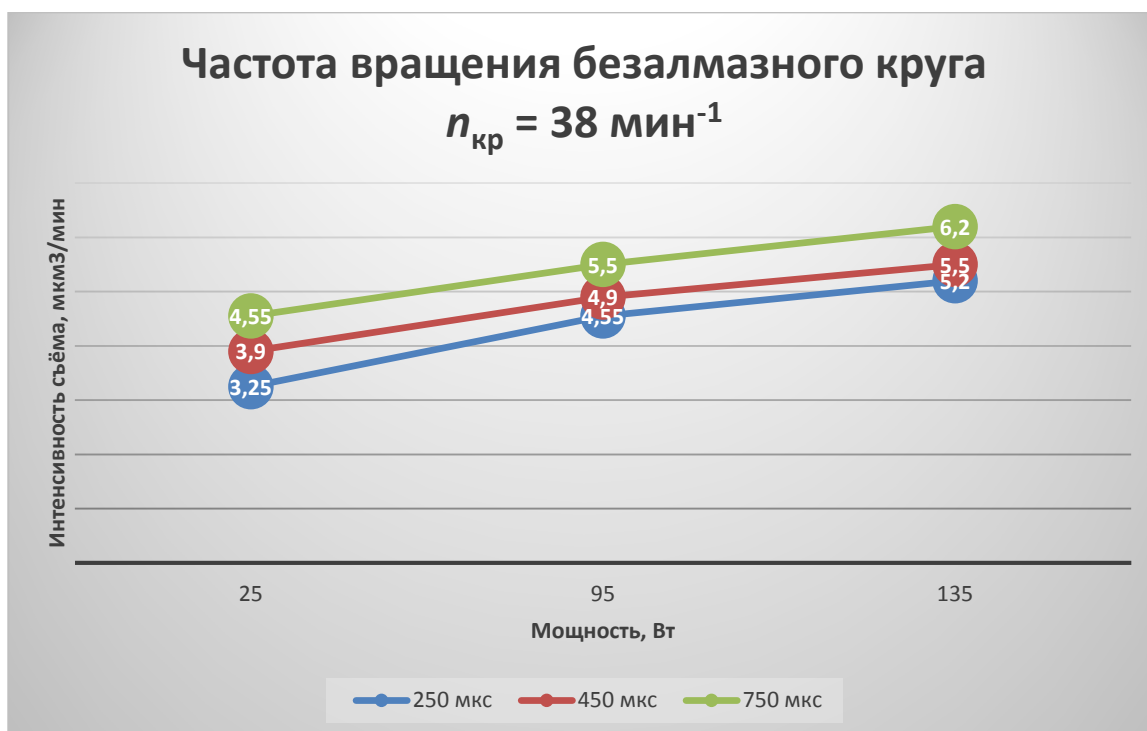


Рисунок 1.12 - Зависимость объёмной величины интенсивности съёма от величины мощности при частоте вращения безалмазного круга $n_{кр} = 38 \text{ мин}^{-1}$

Таким образом, из приведённых выше графиков видно, что интенсивность съёма связки увеличивается с ростом мощности, выделяемой в межэлектродном зазоре, а также с ростом длительности технологических импульсов, вследствие роста энергии этих импульсов. В связи с этим предварительное профилирование, когда требуется удаление большого объёма материала и не предъявляются требования к качеству обработки, необходимо проводить с минимальными значениями скважности.

С ростом частоты генератора технологических импульсов интенсивность съёма связки также растёт. Данный факт свидетельствует о том, что с повышением частоты, несмотря на меньший удаляемый объём одним импульсом, вследствие уменьшения энергии импульсов, на расстоянии между алмазными зёрнами образуется большее количество лунок и совокупный удаляемый объём связки растёт до определённого значения, характеризующегося соотношением n/f_{Γ} .

Интенсивность съёма связки, с ростом частоты вращения безалмазного круга, повышается до определённого значения (рисунок 1.13), также характеризующегося соотношением n/f_{Γ} .

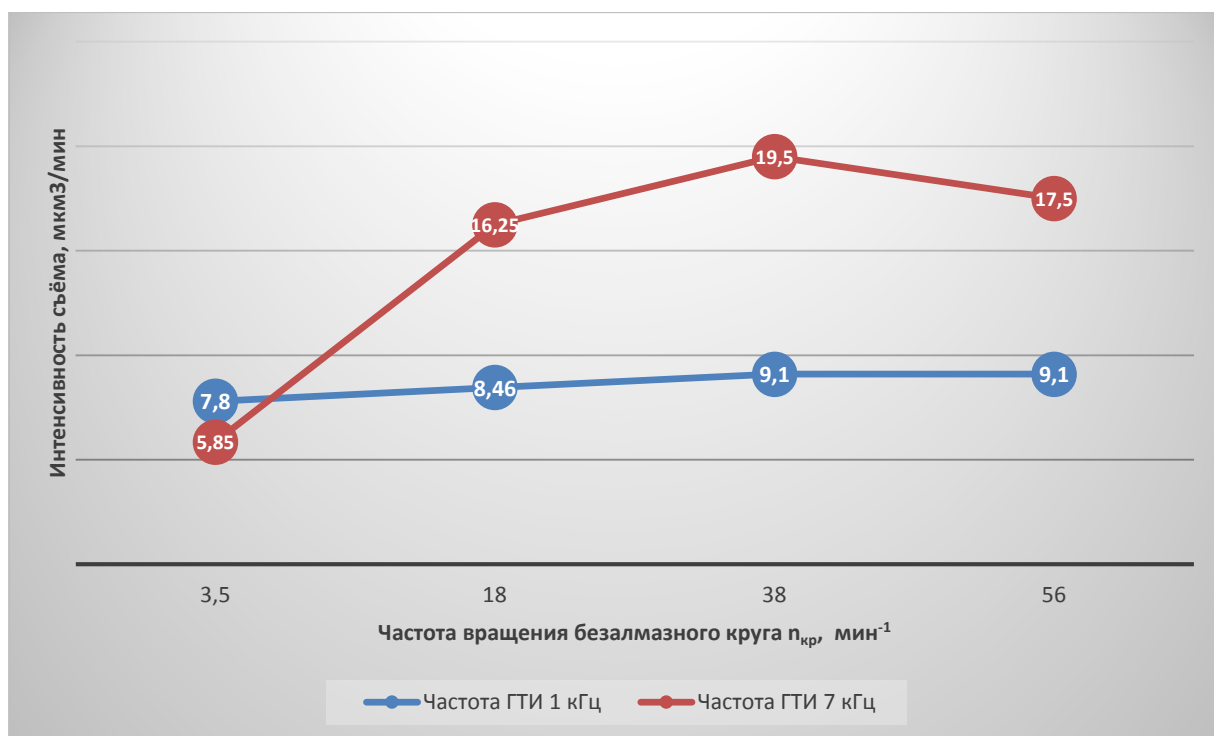


Рисунок 1.13 - Зависимость объёмной величины интенсивности съёма от частоты вращения безалмазного круга при различных частотах генератора технологических импульсов

В свою очередь, соотношение n/f_{Γ} определяется согласованностью скорости вращения алмазного круга с длительностью проходящих разрядов.

Таким образом, экспериментальные исследования показали, что для повышения производительности и точности электроэрозионного профилирования необходимо проводить обработку, так чтобы мощность, выделяемая в межэлектродном зазоре, была максимальной. Повышение частоты генератора технологических импульсов и частоты вращения алмазного круга также интенсифицирует процесс съёма связки, однако при этом необходимо выдерживать соотношение n/f_{Γ} так, чтобы время перемещения разрядного участка на величину расстояния между алмазными зёрнами не превышало времени образования лунки.

1.4 Методика экспериментальных исследований и описание оборудования

С целью повышения точности и производительности процесса электроэрозионного профилирования алмазных шлифовальных кругов на токопроводящих связках, необходимо установить влияние таких факторов, как мощность, выделяемая в межэлектродном зазоре, частота технологических импульсов, частота вращения алмазного круга на интенсивность съёма алмазосодержащего слоя, а также определить зависимость мощности, выделяемой в межэлектродном зазоре от межэлектродного зазора.

Измерение мощности, выделяемой в межэлектродном зазоре проводились при помощи ваттметра модели Д 5020 и трансформатора тока модели УТТ-5М. Подключение приборов реализовано согласно схеме, представленной на рисунке 1.14.

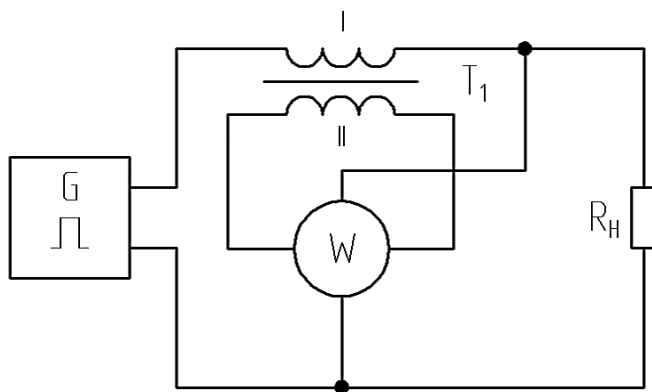


Рисунок 1.14 – Схема подключения приборов

Совмещение электродов фиксировалось при помощи D - триггера, схема которого представлена на рисунке 1.15.

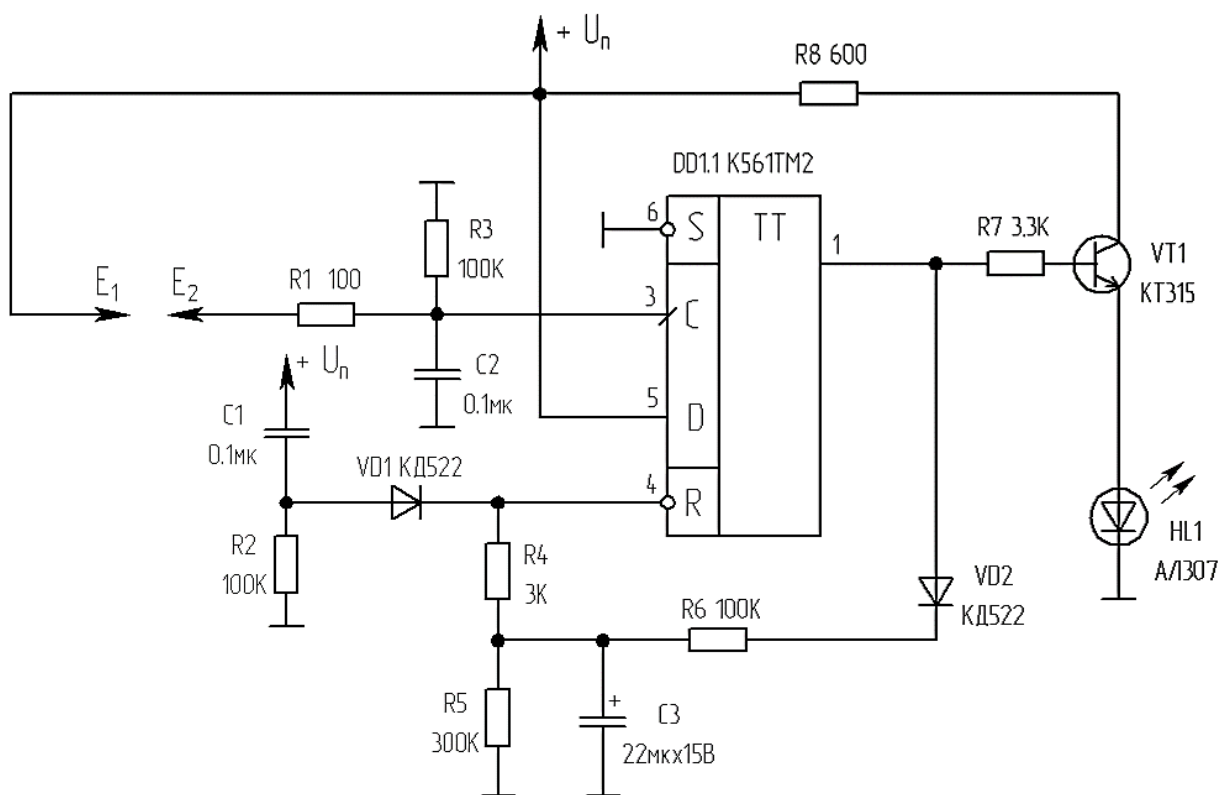


Рисунок 1.15 – Принципиальная схема D – триггера

Принцип работы D – триггера заключается в следующем. При включении питания на выходе триггера устанавливается нулевое состояние, так как вход C соединён с минусом питания через резистор $R3$, а информационный вход D соединён с плюсом питания. Так же для принудительного сброса служит цепочка $C1R2$, через которую в момент подачи питания проходит импульс на вход сброса R .

При замыкании контактов E_1 и E_2 через антидребезговую цепочку $R1C2$ импульс поступает на вход C триггера и он переключается. На выходе устанавливается логическая единица. Транзистор $T1$ открывается и загорается светодиод $HL1$. Время свечения светодиода заданно цепью $R6C3R5$. Одновременно логическая единица с выхода триггера поступает через $VD2R6$ на конденсатор $C3$. По мере заряда $C3$ и достижения порогового уровня на входе R происходит сброс триггера и светодиод гаснет. При следующем замыкании контактов процесс повторяется.

Поскольку при электроэрозионном профилировании происходит только эрозионное разрушение связки, а алмазные зёрна механически удаляются, входя в контакт с электродом-инструментом, то целесообразно интенсивность съёма определять на безалмазном образце. Поэтому, в качестве электрода инструмента и безалмазного круга применялись диски из латуни прямого профиля марки ЛС59-1 с размерами $\varnothing 125 \times 15$ мм и $\varnothing 138 \times 15$ мм.

Определение зависимости мощности, выделяемой в межэлектродном зазоре, от величины межэлектродного зазора происходило следующим образом. Контакты E_1 и E_2 D – триггера подключались к электроду-инструменту и безалмазному кругу. Затем электрод-инструмент с помощью вертикальной подачи подводился к безалмазному кругу до тех пор, пока не загорался светодиод $HL1$ на D – триггере, который свидетельствует об установлении между ними контакта. После чего микрометрическая индикаторная головка, установленная в магнитный штатив, закреплённый на станине станка, щупом касающаяся стола станка, на котором расположена ванна с находящимся в ней электродом-инструментом, выставлялась на нуль. Далее контакты D – триггера отсоединялись и электроды разводились на определённое расстояние, контроль которого производился по микрометрической индикаторной головке. Затем включалось вращение безалмазного круга и включался генератор технологических импульсов. В момент включения генератора по ваттметру фиксировалась максимальная рассеиваемая мощность в межэлектродном зазоре. Далее генератор отключался, вращение безалмазного круга останавливалось и процесс измерения мощности повторялся с уменьшающимся каждый раз межэлектродным зазором на 3 мкм. Результаты эксперимента представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 - Зависимость мощности от межэлектродного зазора

Межэлектродный зазор z , мкм	Мощность P , Вт
15	25
12	95
9	120
6	135
3	90

Определение интенсивности съёма связки при различных технологических режимах электроэрозионного профилирования осуществлялось по методике, представленной в [19].

Радиальный съём с безалмазного круга во время проведения опыта определялась специальным устройством (рисунок 1.16) [20], состоящего из скобы с основанием 1 и планки 2 с индикатором 3 модели 1МИГП с погрешностью 0,001 мм. В основании 1 монтируются три опорных штыря 4 и два базовых штифта 5. В безалмазном круге 6 расположены два отверстия 7, служащие измерительной базой при измерении радиального износа.

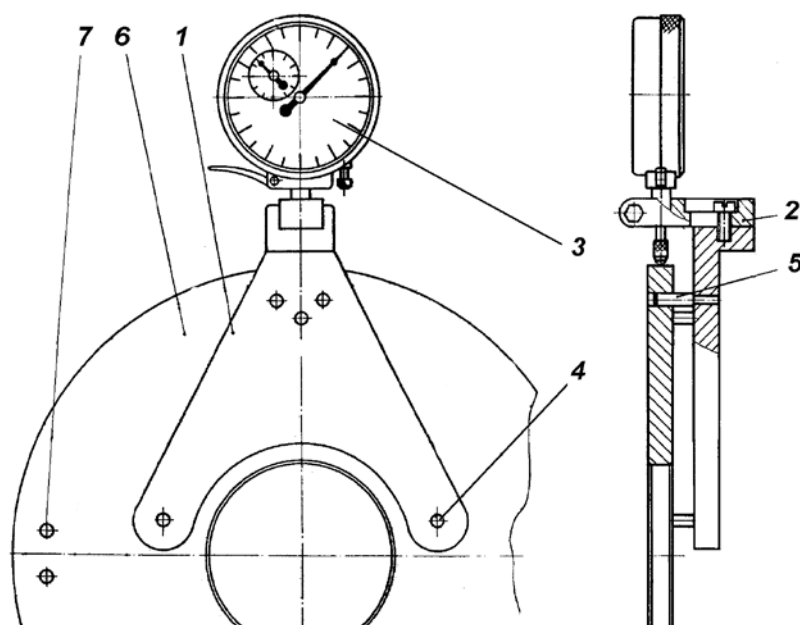


Рисунок 1.16 – К определению интенсивности съёма

Порядок измерения следующий. Устройство базируется штифтами 5 вводимыми в соответствующие отверстия 7, относительно безалмазного круга и присоединяется к нему с незначительным усилием. По индикатору снимаются показания поочередно устанавливая устройство по всем парным отверстиям. Получают необходимое число измерений износа круга по радиусу.

Линейная величина съёма с безалмазного круга Δh определяется по формуле

$$\Delta h = \frac{(h_1 - h'_1) + (h_2 - h'_2) + \dots + (h_n - h'_n)}{n},$$

где h_n и h'_n – показания индикатора в точке, отсчитанные до и после опыта; n – количество измеряемых точек.

Далее подсчитывается объёмная величина интенсивности съёма по формуле

$$Q = \frac{\pi \cdot D_{\text{ср}} \cdot \Delta h \cdot H}{t}$$

где $D_{\text{ср}}$ – средний диаметр безалмазного круга; Δh – линейная величина съёма; H – ширина безалмазного круга; t – время обработки.

Исследование интенсивности съёма проводилось на установке для электроэрозионного профилирования следующим образом. Вращение безалмазного круга устанавливалось на частоту 3,5 мин⁻¹. Затем включался генератор технологических импульсов, установленный на частоту 1кГц и скважность, соответствующую длительности импульса 250 мкс. После чего электрод-инструмент с помощью вертикальной подачи подводился к безалмазному кругу до тех пор, пока величина межэлектродного зазора не обеспечивала максимальную мощность, выделяемую в нём. Мощность контролировалась ваттметром, подключенным по схеме, представленной на рисунке 1.15. Максимальная мощность, выделяемая в межэлектродном зазоре, поддерживалась 10 минут путём регулирования межэлектродного зазора. По истечении 10 минут генератор технологических импульсов отключался и останавливалось вращение безалмазного круга. После чего по методике, приведённой выше определялся линейный съём.

Данная последовательность действий проводилась при скважностях, соответствующих длительностям импульсов 250, 350, 450, 550, 650 и при частоте вращения безалмазного круга равной 3,5, 18, 38 и 56 мин⁻¹. Затем менялась частота генератора технологических импульсов на 7 кГц и последовательность действий повторялась при скважностях, соответствующих длительностям импульсов 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110.

Определение зависимости мощности, выделяемой в межэлектродном зазоре, от величины межэлектродного зазора и определение интенсивности съёма связки при различных технологических режимах электроэрозионного профилирования осуществлялись при амплитуде технологических импульсов $U = 60\text{В}$ и токе короткого замыкания $IKЗ = 10\text{ А}$.

Измерения проводились на установке для электроэрозионного профилирования и правки алмазных кругов на токопроводящих связках, которая представляет собой модернизированный токарно-фрезерный станок АМ-171 [40, 41]. Модернизация состоит в изменении привода шпинделя. На шпинделе станка монтируется привода вращения профилируемого круга. В привод входят электродвигатель, червячный редуктор и электромагнитная муфта.

Редуктор устанавливается на плите, монтируемой в свободном пространстве возле шпинделя и стойки станка. Дополнительные конструктивные элементы позволяют увеличить рабочее пространство и устанавливать круги диаметром до 300 мм.

Для привода круга используется электродвигатель постоянного тока СЛ-621М с напряжением питания 110 В и мощностью 172 Вт. Максимальная частота вращения вала двигателя $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$. Электродвигатель установлен в стакане, к дну стакана закреплен червячный редуктор с передаточным отношением $i = 25$. Входной вал редуктора через резиновую муфту соединяется с валом электродвигателя. Использование электродвигателя постоянного тока и регулятора напряжения позволяет изменять частоту вращения шпинделя станка в пределах от $1,0 \text{ мин}^{-1}$ до 100 мин^{-1} .

На выходном валу редуктора установлена электромагнитная муфта с напряжением питания равным 24 вольта постоянного тока. Электромагнитная муфта позволяет отключать привод круга на время остановки работы станка для осмотра профиля круга и его измерения. Муфта включается одновременно с подачей напряжения на электродвигатель привода.

На плите основания слева от стойки смонтирован генератор импульсов с органами управления. Генератор выполнен в прямоугольном корпусе со съёмными стенками, что обеспечивает свободный доступ ко всем узлам генератора. Генератор состоит из трехфазного трансформатора питания силового блока с напряжением 380/36 В, трех трансформаторов питания цепей управления типа ТН-46 и трансформатора питания двигателя привода шпинделя типа ТАН-70, силового модуля, модуля выпрямителя питания цепей управления и платы задающего генератора и модуля управления электродвигателем привода шпинделя.

На корпусе генератора смонтирован автоматический выключатель $QF1$, для защиты электросхемы от перегрузок и скачков напряжения; жгуты и разъемы для подключения генератора к агрегатам станка.

Станок комплектуется насосной станцией для снабжения маслом рабочей зоны при профилировании, очистки и охлаждения циркулирующего масла.

Размеры компактного бака 230x470x300 мм, объем $0,06 \text{ м}^3$, что незначительно увеличивает рабочее место. На крышке бака выполнен монтаж оборудования.

Смонтирован насос типа ПА-22. Плавное регулирование подачи масла обеспечивается применением электродвигателя постоянного тока. Здесь также смонтированы отстойники с переливными трубами.

По мере заполнения первого отстойника масло через переливную трубку вытекает во второй отстойник и далее в третий и четвертый. Шлак и продукты пиролиза осаждаются на дно отстойников. По мере заполнения всех отстойников масло через сливную трубу, вмонтированную в последний отстойник, поступает в бак, разделенный перегородкой на два отсека для устранения волнения масла и осаждения оставшегося шлака и продуктов пиролиза.

Для полного слива масла в нижней части передней стенки бака предусмотрены два отверстия, закрытые резьбовыми пробками. Ванна в сборе устанавливается в каркас из стального уголка. Каркас закреплен с правой стороны на станине станка. В верхней части каркаса установлена плита, на которой закрепляется устройство для профилирования в транспортном положении.

При работе в режиме нарезания профиля включается асинхронный двигатель АИР 56В4 1081, который через зубчатую передачу с передаточным отношением равным двадцати восьми вращает шпиндель устройства с закрепленным на нем графитовым электродом. При этом шпиндель вращается с частотой около 50 оборотов в минуту. Нарезание профиля на электроде производится специальным профильным резцом, который закрепляется в резцедержателе, перемещающимся по направлению суппорта.

Суппорт закреплен на передней стенке. На ней же закреплен и отсчетный механизм, с помощью которого производится подача резцедержателя на необходимую величину, причем, фиксируемый лимб позволяет производить установку на ноль.

При профилировании алмазного круга электрод проворачивается вручную с помощью рукоятки, которая находится с правой стороны устройства для профилирования.

Вращательное движение от рукоятки через зубчатую передачу с передаточным отношением равным пяти передается на червячный вал с левой стороны с помощью электромагнитной муфты. Наличие последней обеспечивает блокировку отключения передачи при обточке электрода.

К передней стенке устройства невыпадающими винтами крепится ванна. Герметичность обеспечивается уплотнением, уложенным в паз передней стенки.

Конструктивно шпиндель выполнен так, что его выходной конец электрически изолирован от массы всего устройства.

Подача рабочей жидкости в зону обработки производится от насосной станции через наливное и поворотное сопло.

Уровень жидкости в ванне поддерживается за счет отверстий в сливной трубе. Для опорожнения ванны сливная труба вынимается из конического посадочного отверстия корпуса - слива и жидкость стекает через штуцер в сливной бак насосной станции.

При нарезании профиля на электроде ванна должна сниматься. Вся электропроводка подведена к разъему, установленному на корпусе редуктора.

Все вращающиеся части и редуктор покрыт кожухом, состоящим из верхней, задней крышек и боковых стенок.

Выводы по результатам исследований

Проанализированы используемые режимы и условия реализации процесса правки алмазных кругов с применением разрядов электрического тока, установлен механизм воздействия микродуги на металлическую связку, определены критерии повышения режущих свойств, точности профиля и стойкости инструмента.

Исследовано влияние режимов правки на состояние, размерные характеристики круга, точность профиля, распределение зерен в поверхностном слое и характеристики рабочего профиля.

Проведены экспериментальные исследования для установления точностных зависимостей, качественных и количественных характеристик рабочего профиля при изготовлении деталей со сложными фасонными поверхностями.

Разработаны рекомендации для внедрения в производство сложнопрофильных деталей по результатам исследований.

2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ

2.1 Общие сведения

В выпускной квалификационной работе спроектировано специальное приспособление для электроэрозионной правки алмазных шлифовальных кругов. Устройство предназначено для профилирования кругов из СТМ на металлических связках электроэрозионным методом графитовым электродом на универсально-заточном станке в комплекте с электроэрозионным генератором.

В основу работы комплекта положен метод теплового воздействия на алмазоносный слой шлифовального круга при электроэрозионной обработке.

2.2 Технические характеристики

Диаметр профилируемых кругов, мм	100...150
Диаметр графитового электрода, мм	100...150
Питание -	~3, 380 В, 50 Гц
Потребляемая мощность, кВт	0,180
Габаритные размеры, мм	580 x 290 x 280
Масса устройства без рабочей жидкости, кг	15
Объем рабочей ванны, л	 4

2.3 Конструкция и принцип работы

Устройство состоит из червячного редуктора, суппорта с отсчетным механизмом, ванны и двух приводных двигателей.

Устройство обеспечивает работу в двух режимах:

- 1) нарезание профиля на графитовом электроде мастер-резцом;
- 2) электроэрозионное профилирование алмазного круга.

Переключение режимов производится устройством управления, входящим в состав электроэрозионного генератора.

Графитовый электрод крепится на изолированном конце шпинделя редуктора с помощью разжимных шайб, стакана и двух гаек. При работе в режиме нарезания профиля на электроде мастер-резцом включается асинхронный двигатель АИР 56В4 1081 ГОСТ Р 54466 - 2011, $N = 0,18$ кВт, $n = 1310$ мин⁻¹, который через зубчатую

передачу с $i=1$ подключен к червячному валу с правой стороны редуктора с передаточным отношением $i=28$ [43,44,45,46]. При этом шпиндель с электродом вращается с частотой $n = 50 \text{ мин}^{-1}$. Нарезание профиля на электроде производится профильным резцом, который закрепляется в резцедержателе, перемещающемся по направляющим суппорта. Суппорт закреплен на передней стенке. На стенке также закреплен механизм подачи суппорта с лимбом отсчета, с помощью которого производится перемещение резцедержателя на необходимую величину, причем фиксируемый лимб позволяет производить установку на "0".

При профилировании кругов включается двигатель РД09-П2, управление которым производится блоком подачи, обеспечивающим поддержание заданного электрического режима профилирования. Вращение вала двигателя через зубчатую передачу с $i = 5$ передается на червячный вал редуктора с помощью электромагнитной муфты. Наличие электромагнитной муфты обеспечивает защиту электродвигателя медленного вращения электрода. Максимальная частота вращения электрода при профилировании составляет $0,043 \text{ мин}^{-1}$.

К передней стенке устройства невыпадающими винтами крепится ванна. Герметичность обеспечивается уплотнением, уложенным в паз передней стенки.

Подача рабочей жидкости в зону обработки производится от насосной станции через штуцер наливной и поворотное сопло. Уровень жидкости в ванне при работе поддерживается за счет отверстий в сливной трубе. Для полного слива жидкости из ванны сливная труба вынимается из конического посадочного отверстия корпуса слива и жидкость стекает через сливной штуцер по шлангу в бак.

При нарезании профиля на электроде ванна должна сниматься.

Вся электропроводка подведена к разъему, установленное на корпусе устройства. Все вращающиеся части и редуктор закрыты кожухом. Для переноски предусмотрены отверстия в боковых стенках. Базировка устройства осуществляется контактными площадками по угольнику, установленному на плите станка.

2.4 Расчёт на прочность червячной передачи

Червяк и колесо должны образовывать антифрикционную пару, обладать высокой прочностью, износостойкостью, сопротивляемостью заеданию и хорошей прирабатываемостью ввиду значительных скоростей скольжения в зацеплении.

Наименьшая интенсивность изнашивания в червячной паре обеспечивается при высокой твёрдости червяка, витки которого имеют шлифованные и полированные рабочие поверхности. В силовых передачах (мощность св. 1 кВт) наилучшую стойкость передач обеспечивают червяки из цементуемых сталей. Чаще всего применяют стали 18ХГТ, 20Х, 12ХНЗА, 15ХФ, имеющие после закалки твердость 56...63HRC. Применяются также червяки из сталей 40Х, 40Х11, 35ХГСА с объемной или поверхностной закалкой ТВЧ до твердости 45...55HRC. При этом червяки следует делать эвольвентными, т.к. после термообработки их необходимо шлифовать (шлифование осуществляется плоской стороной шлифовального круга).

Архимедовы и конволютные червяки обычно изготавливают из термически улучшаемых сталей 35, 45, 50 с твердостью поверхности менее 350НВ, не шлифуют. Такие червяки применяют во вспомогательных, тихоходных передачах малой мощности (до 1 кВт).

Удовлетворение требований к червячным передачам осуществляют в основном подбором материала венца червячного колеса. При скоростях скольжения $V_c \geq 4$ м/с используются бронзы и латуни различных марок. Учитывая высокую стоимость этих материалов, червячные колеса выполняют цельными, если их диаметр не превышает 100...120 мм, колеса большего диаметра - бандажированными: центр – из серого чугуна или из стали, зубчатый венец – из бронзы.

При $V_c \leq 2$ м/с червячные колеса изготавливают из чугуна с пластинчатым графитом СЧ15, СЧ18 в паре с термически улучшенными или нормализованными червяками [42,46].

Так как выбор материала для колес связан со скоростью скольжения, то предварительно определяют ожидаемое, ее значение, м/с:

$$V_c \approx \frac{4,5n_1}{10^4} \cdot \sqrt[3]{T_2} \quad (2.1)$$

где n_1 – частота вращения червяка, мин⁻¹;

T_2 – вращающий момент на валу колеса, Н·м.

$$T_1 = 9550 \frac{N_1}{n_1} = 9550 \frac{0,155}{1380} = 1,15 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.2)$$

$$T_2 = 9550 \frac{N_2}{n_2} = 9550 \frac{0,12}{50} = 21,5 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (2.3)$$

где N_1 – мощность на валу червяка, кВт;

N_2 – мощность на валу червячного колеса передачи, кВт;

n_1 – частота вращения на валу червяка, мин⁻¹;

n_2 – частота вращения на валу червячного колеса, мин⁻¹;

$N_1 = 0,155$ кВт;

$N_2 = 0,12$ кВт;

$n_1 = 1380$ мин⁻¹;

$n_2 = 50$ мин⁻¹;

$$V_c \approx \frac{4,5n_1}{10^4} \cdot \sqrt[3]{T_2} = \frac{4,5 \cdot 1380}{10^4} \cdot \sqrt[3]{21,5} = 1,85 \text{ м/с}.$$

В формулах для определения допускаемых напряжений:

C_V – коэффициент, учитывающий интенсивность изнашивания материала.

Его принимают в зависимости от скорости скольжения.

При $V_c = 1.85$ м/с $C_V = 1.21$.

Формулы для определения допускаемых напряжений имеют вид:

$$1) \text{ контактные } [\sigma_H] = C_V \cdot 0,75 \cdot \sigma_B \cdot K_{HL} \leq 4\sigma_T \quad (2.4)$$

$$2) \text{ изгиба } [\sigma_F] = (0,25\sigma_T + 0,8 \cdot \sigma_B) \cdot K_{FL} \leq 0,8\sigma_T \quad (2.5)$$

где σ_B – предел прочности при растяжении,

σ_T – предел текучести,

K_{HL} и K_{FL} – коэффициенты долговечности. $\sigma_B = 275$ МПа,

$\sigma_T = 200$ МПа,

$$K_{HL} = \sqrt[8]{\frac{10^7}{N_{HE_2}}}, \quad (2.6)$$

$$K_{FL} = \sqrt[9]{\frac{10^6}{N_{FE_2}}}, \quad (2.7)$$

где N_{HE_2} и N_{FE_2} – эквивалентное число циклов нагружения зуба колеса

$$N_{HE_2} = 60n_2L_h(\alpha_1 + \alpha_2\beta_1^4 + \alpha_3\beta_2^4) = 60 \cdot 50 \cdot 20000(0,2 + 0,5 \cdot 0,4 + 0,3 \cdot 0,13) = 2,6 \cdot 10^7$$

$$N_{HE_2} = 60n_2L_h(\alpha_1 + \alpha_2\beta_1^9 + \alpha_3\beta_2^9) = 60 \cdot 50 \cdot 20000(0,2 + 0,5 \cdot 0,13 + 0,3 \cdot 0,01) = 16 \cdot 10^6,$$

где L_h – требуемый ресурс передачи 20000 ч.;

n_2 – частота вращения червячного колеса, мин⁻¹;

при переменном режиме нагружения:

$$\alpha_1 = 0,2; \alpha_2 = 0,5; \alpha_3 = 0,3; \beta_1 = 0,8; \beta_2 = 0,6$$

$$K_{HL} = \sqrt[8]{\frac{10^7}{N_{HE_2}}} = \sqrt[8]{\frac{10^7}{2,6 \cdot 10^7}} = 0,88$$

$$K_{FL} = \sqrt[9]{\frac{10^6}{N_{FE_2}}} = \sqrt[9]{\frac{10^6}{16 \cdot 10^6}} = 0,73.$$

$$1) \text{ контактные } [\sigma_H] = C_V \cdot 0,75 \cdot \sigma_B \cdot K_{HL} = 1,21 \cdot 0,75 \cdot 275 \cdot 0,88 = 230 \text{ МПа};$$

$$2) \text{ изгиба } [\sigma_F] = (0,25\sigma_T + 0,08 \cdot \sigma_B) \cdot K_{FL} = (0,25 \cdot 200 + 0,08 \cdot 275) \cdot 0,73 = 63 \text{ МПа}.$$

Угол подъема витков червяка на начальном диаметре:

$$\gamma_W = \arctg \frac{z_1}{q+2x} = \arctg \frac{1}{4+2 \cdot 0} = 14^\circ, \quad (2.8)$$

где x – смещение (0);

q – коэффициент диаметра червяка, при модуле $m = 1$, $q = 4$;

Расчётное контактное напряжение:

$$\sigma_H = \frac{5300(q+2x)}{z_2} \sqrt{\left[\frac{z_2+q+2x}{a_w(q+2x)}\right]^3 \cdot K_H \cdot T_2} \leq [\sigma_H], \quad (2.9)$$

где z_2 – количество зубьев червячного колеса $z_2 = 45$;

a_w – межосевое расстояние $a_w = 40$ мм.

$$\sigma_H = \frac{5300(4 + 2 \cdot 0)}{45} \sqrt{\left[\frac{45 + 4 + 2 \cdot 0}{40(4 + 2 \cdot 0)}\right]^3 \cdot 1,22 \cdot 21,5} = 235 \text{ МПа},$$

Т.к. $\sigma_H > [\sigma_H]$ менее чем на 5%, то оставляем все параметры без изменения.

Напряжения изгиба в зубьях червячного колеса:

$$\sigma_F = \frac{2000K_F Y_F T_2 \cos \gamma_W}{1,31 m^2 d_2 (q+2x)} \leq [\sigma_F], \quad (2.10)$$

где Y_F – коэффициент формы зуба, принимают в зависимости от z_V ,

K_F – коэффициент нагрузки,

d_2 – диаметр начальной окружности,

m – модуль ($m = 1$).

Эквивалентное число зубьев:

$$z_v = \frac{z_2}{\cos^3 \gamma_w} = \frac{45}{0,91} = 50. \quad (2.11)$$

При $z_v = 50$, принимаем $Y_F = 1.45$.

Коэффициент нагрузки:

$$K_F = K_{H\beta} \cdot K_{HV} = 1.2 \cdot 1.02 = 1.22, \quad (2.12)$$

где $K_{H\beta}$ – коэффициент концентрации нагрузки,

K_{HV} – коэффициент динамической нагрузки (выбирается в зависимости от степени точности и окружной скорости колеса).

$$K_{H\beta} = 1 + \left(\frac{z_2}{\Theta}\right)^3 (1 - X) = 1 + \left(\frac{45}{46}\right)^3 (1 - 0,78) = 1,2. \quad (2.13)$$

Θ – коэффициент деформации червяка (при коэффициент диаметра червяка $q = 4$) $\Theta = 46$;

$$X = \alpha_1 + \alpha_2 \beta_1 + \alpha_3 \beta_2 = 0,2 + 0,5 \cdot 0,8 + 0,3 \cdot 0,6 = 0,78 \quad (2.14)$$

Окружная скорость червячного колеса:

$$V_2 = \frac{\pi m z_2 n_2}{60000} = \frac{3,14 \cdot 1 \cdot 45 \cdot 50}{60000} = 0,1 \text{ мин}^{-1}. \quad (2.15)$$

При $V_2 = 0,1 \text{ мин}^{-1}$, $K_{HV} = 1,02$

Диаметр начальной окружности:

$$d_2 = m \cdot z_2 = 1 \cdot 45 = 45 \text{ мм} \quad (2.16)$$

Таким образом напряжения изгиба в зубьях червячного колеса по формуле (2.10):

$$\sigma_F = \frac{2000 \cdot 1,22 \cdot 1,45 \cdot 21,5 \cdot 0,97}{1,3 \cdot 1^2 \cdot 45(4 + 2 \cdot 0)} = 60 \text{ МПа},$$

Т.к. $\sigma_F < [\sigma_F]$, то оставляем все параметры без изменения.

3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛИ

3.1 Служебное назначение детали

Данная деталь “Колесо червячное”, находящаяся в червячном редукторе устройства для электроэрозионного профилирования, в зацеплении с червяком служит для передачи крутящего момента от электродвигателя к шпинделю устройства.

3.2 Анализ технологичности конструкции детали

Технологичность конструкции изделия – понятие относительное.

Изделие, достаточно технологичное в единичном производстве, может быть мало технологичным в обычном поточно–массовом и совершенно нетехнологичным в поточно–автоматизированном производстве.

Технологичность конструкции напрямую связана с производственными возможностями. Если в единичном производстве используются станки с программным управлением или другое переналаживаемое автоматическое оборудование, то характеристика технологичности конструкции выпускаемых изделий для этих условий может сильно измениться по сравнению с условиями единичного производства, оснащенного обычным универсальным оборудованием. Развитие производственной техники изменяет уровень технологичности конструкции; ранее нетехнологичные конструкции могут стать вполне технологичными при новых методах обработки.

Технологичность конструкции изделий – понятие комплексное. Нельзя технологичность конструкции рассматривать изолированно без взаимной связи и учета условий выполнения заготовительных процессов, процессов механической обработки, сборки и контроля. Отработанная на технологичность конструкция заготовки не должна усложнять последующую механическую обработку. В то же время отработку на технологичность конструкции детали следует производить не только в целях упрощения механической обработки, но и с учетом выполнения заготовительных процессов и сборки, стремясь получить наименьшую трудоемкость и наименьшую себестоимость изготовления машины в целом.

Данную деталь "Колесо червячное " предлагается изготавливать из бронзы БрОФ 7-0.2 по ГОСТ 5017-2006.

Химический состав:

$$Sn = 7,0 - 8,0 \%$$

$$P = 0,1 - 0,25 \%$$

$$Fe = 0,5 \%$$

$$Pb = 0,02 \%$$

$$Sb = 0,002 \%$$

$$Bi = 0,002 \%$$

$$Al = 0,002 \%$$

$$Si = 0,002 \%$$

Анализируя конструкцию детали, можно сделать вывод, что деталь спроектирована технически грамотно.

Данная деталь по всем параметрам является технологичной, поскольку не требует применение специального оборудования и не имеет труднодоступных поверхностей для обработки.

В качестве заготовки целесообразно принять: Прокат ДКРНТ 32 БрОФ 7-0.2 ГОСТ 10025-2016.

3.3 Определение типа производства

В машиностроении различают условно три основных типа производства: массовое, серийное и единичное.

При массовом производстве изделия изготавливаются непрерывно в течение нескольких лет. Характерным признаком массового производства является выполнение на большинстве рабочих мест только одной закрепленной операции.

При серийном производстве изготавливают серию изделий, регулярно повторяющихся через определенные промежутки времени. Характерный признак серийного производства - выполнение на рабочих местах нескольких повторяющихся операций.

В единичном производстве изготавливаются изделия широкой номенклатуры в малых количествах, которые либо не повторяются совершенно, либо повторяются через неопределенное время [47].

Исходные данные для расчета:

N_1 – годовая программа изделий.

m – количество деталей данного наименования на изделие.

Необходимо знать массу детали.

K_{30} - коэффициент закрепления детали.

Порядок расчета:

1) Определим годовую программу выпуска деталей.

$$N = N_1 m(1+\beta/100);$$

β – % деталей в запасные части, потери на брак ($\approx 2...5\%$), $\beta = 2...5\%$.

2) Определим основные технологические операции изготовления деталей (разработать маршрутную технологию).

3) Рассчитаем приближенно штучное время обработки на основных технологических операциях или методом укрупненного нормирования [47,48,49,50].

4) Определим необходимое количество станков на каждой из основных операций.

$$m_p = \frac{NT_{ш-к}}{60F_d\eta_{з.н}};$$

N – годовая программа выпуска одной детали.

$T_{ш-к}$ – штучно-калькуляционное время.

F_d – действительный годовой фонд времени работы оборудования (в часах).

ЕРС – единица ремонтной сложности.

Данные о действительном годовом фонде времени в зависимости от количества смен в сутки представлены в таблице 3.1

Таблица 3.1 - Данные о действительном годовом фонде времени

Тип оборудования	Двухсменный режим работы
1) Металлорежущие станки (от 1 до 30 ЕРС)	4029

Тип оборудования	Двухсменный режим работы
2) Металлорежущие станки (свыше 30 ЕРС)	3904
3) Автоматические линии	3738
4) Поточные линии	3987
5) Рабочие места без оборудования (верстак, стол).	4154

$\eta_{\text{зн}}$ - нормативный коэффициент загрузки оборудования, зависит от типа производства. Его среднее значение выбирается по отделению или участку для двухсменной работы.

Таблица 3.2 - Нормативный коэффициент загрузки оборудования

Тип производства	Коэффициент $\eta_{\text{з.н.}}$
Мелкосерийное	0,8...0,9
Среднесерийное	0,75...0,85
Крупносерийное, массовое	0,65...0,75

В соответствии с таблицей 3.2 принимаем $\eta_{\text{з.н.}} = 0,8$.

Дробное количество станков полученное при расчете округляем до ближайшего целого в большую сторону и определяем фактический коэффициент загрузки:

$$\eta_{\text{зф}} = m_{\text{р}} / m_{\text{пр}};$$

В знаменателе $m_{\text{пр}}$ – принятое количество станков (рабочих мест).

Полученные данные вносят в таблицу.

Если $\eta_{\text{зф}} < \eta_{\text{зн}}$, то необходимо дозагрузить данное рабочее место аналогичными по трудоемкости операциями и записать полученное количество операций в графу 7.

Если $\eta_{\text{зф}} < \eta_{\text{зн}}$, то необходимо дозагрузить данное рабочее место аналогичными по трудоемкости операциями и записать полученное количество операций в графу 7.

$$0 = \frac{\eta_{\text{з.н.}}}{\eta_{\text{з.ф.}}}$$

Если $\eta_{\text{зф}} > \eta_{\text{зн}}$, то необходимо на данной операции увеличить количество станков.

После заполнения таблицы определяем суммарное значение графы 7 и делим на суммарное значение графы 5.

$$K_{3.0.} = \frac{\sum O}{\sum P}$$

Данные по нормативному коэффициенту загрузки для каждого типа производства представлены в таблице 3.3

Таблица 3.3 - Критерии типа производства по коэффициенту закрепления операции

Значение K_{30}	Тип производства
$K_{30} = 1$	Массовое
$1 < K_{30} \leq 10$	Крупносерийное
$10 < K_{30} \leq 20$	Среднесерийное
$20 < K_{30} \leq 40$	Мелкосерийное
$40 < K_{30}$	Единичное

Определим тип производства на участке изготовления деталей «колесо червячное» выпуском $N = 2000$ шт. Материал – БрОФ 7-02 по ГОСТ 5017-2006.

Учитывая программу выпуска $N = 20000$ штук в год, в качестве исходной заготовки используем: прокат ДКРНТ 32 БрОФ 7-02 ГОСТ 10025-2016. Прокат круглого сечения, $\varnothing 32$ мм. Масса заготовки 0,5 кг.

Назначаем маршрут обработки:

1 Токарная

2 Зубофрезерная

Расчёт штучно-калькуляционного времени обработки на основных технологических операциях [36].

Штучно-калькуляционное время в минутах определяется по формуле:

$$T_{ш-к} = \varphi_k \cdot T_o,$$

где φ_k – коэффициент, зависящий от типа производства,

T_o – основное (технологическое) время, мин.

Основное (технологическое время) можно определить по формулам в зависимости от вида обработки:

1) Подрезка торцев $0,000037(D^2 - d^2)$

2) Точение наружной поверхности	0,00017dL
3) Сверление	0,00052dL
4) Рассверливание	0,00031dL
5) Растачивание	0,00018dL
6) Зубофрезерование	0,0022dB

где d – диаметр, мм;

L – длина, мм;

B – ширина;

Значение коэффициента φ_k [36,37,38,39]

Типы станков	Производство	
	Единичное и мелкосерийное	Крупносерийное
Токарные	2,14	1,36
Токарно-револьверные	1,98	1,35
Токарно-многорезцовые	-	1,50
Вертикально-сверлильные	1,72	1,30
Радиально-сверлильные	1,75	1,41
Расточные	3,25	-
Круглошлифовальные	2,10	1,55
Строгальные	1,73	-
Фрезерные	1,84	1,51
Зубодолбежные	1,66	1,27

Операция 1: Токарная.

Подрезка торцев.

Основное технологическое время:

$$T_o = 0,37 \times 10^{-4} \times (29,8^2 \times 24^2) \times 2 = 0,024 \text{ мин.}$$

Штучное время обработки детали:

$$T_{шт} = \varphi_k \times T_o = 1,36 \times 0,024 = 0,032 \text{ мин.}$$

Точение наружной поверхности.

Основное технологическое время:

$$T_o = 0,17 \times 10^{-3} \times 26 \times 22 = 0,1 \text{ мин.}$$

Штучное время обработки детали:

$$T_{шт} = \varphi_k \times T_o = 1,36 \times 0,1 = 0,136 \text{ мин.}$$

Сверление.

Основное технологическое время:

$$T_o = 0,52 \times 10^{-3} \times 3 \times 22 = 0,03 \text{ мин.}$$

Штучное время обработки детали:

$$T_{шт} = \varphi_k \times T_o = 1,36 \times 0,03 = 0,04 \text{ мин.}$$

Рассверливание.

Основное технологическое время по формуле:

$$T_o = 0,31 \times 10^{-3} \times 8 \times 22 = 0,05 \text{ мин.}$$

Штучное время обработки детали по формуле:

$$T_{шт} = \varphi_k \times T_o = 1,36 \times 0,05 = 0,07 \text{ мин.}$$

Рассверливание.

Основное технологическое время:

$$T_o = 0,31 \times 10^{-3} \times 4 \times 22 = 0,095 \text{ мин.}$$

Штучное время обработки детали:

$$T_{шт} = \varphi_k \times T_o = 1,36 \times 0,095 = 0,13 \text{ мин.}$$

Растачивание.

Основное технологическое:

$$T_o = 0,18 \times 10^{-3} \times 16 \times 22 = 0,06 \text{ мин.}$$

Штучное время обработки детали:

$$T_{шт} = \varphi_k \times T_o = 1,36 \times 0,06 = 0,086 \text{ мин.}$$

Растачивание.

Основное технологическое время:

$$T_o = 0,18 \times 10^{-3} \times 19 \times 22 \times 2 = 0,15 \text{ мин.}$$

Штучное время обработки детали:

$$T_{шт} = \varphi_k \times T_o = 1,36 \times 0,15 = 0,2 \text{ мин.}$$

$$\Sigma T_{шт-к} = 4,44 \text{ мин.}$$

Зубофрезерование.

Основное технологическое время:

$$T_o = 0,22 \times 10^{-2} \times 29,8 \times 4 = 0,26 \text{ мин.}$$

Штучное время обработки детали:

$$T_{шт} = \varphi_{\kappa} \times T_o = 1,27 \times 0,26 = 0,33 \text{ мин.}$$

Определим необходимое количество оборудования:

$$m_p = \frac{N \cdot T_{шт-к}}{60 \cdot F_d \cdot \eta_n};$$

$\eta_{зн}$ - нормативный коэффициент загрузки оборудования, $\eta_{зн} = 0,8$.

$$m_p = \frac{N \cdot T_{шт-к}}{60 \cdot F_d \cdot \eta_n} = \frac{2000 \cdot T_{шт-к}}{60 \cdot 4015 \cdot 0,8} = 0,01 \times T_{шт-к};$$

1) $m_p = 0,01 \times 4,44 = 0,04$ принимаем $m_{пр} = 1$

2) $m_p = 0,01 \times 0,33 = 0,003$ принимаем $m_{пр} = 1$

Определим фактический коэффициент загрузки по формуле (3.3):

$$\eta_{зф} = \frac{m_p}{m_{пр}};$$

Так как $\eta_{зф} < \eta_{зн}$, то необходимо дополнительно загрузить рабочие места примерно равноценными операциями.

Определим отношение нормативного коэффициента загрузки оборудования к фактическому по формуле (3.4):

$$O_i = \eta_{зн} / \eta_{зф};$$

$$O_1 = 0,8 / 0,04 = 20;$$

$$O_2 = 0,8 / 0,003 = 267;$$

Полученные данные заносим в таблицу. Таким образом, формируем сводную таблицу 3.5.

Таблица 3.5 – Сводная таблица определения коэффициента закрепления операции

№ п\п	Операция	$T_{шт-к}$	m_p	P	$\eta_{зф}$	O
1	Токарная (ТВ-320)	4,44	0,04	1	0,04	20
2	Зубофрезерная (НАМАІ 120)	0,33	0,003	1	0,003	267

$\Sigma P=2$		$\Sigma O=287$
--------------	--	----------------

Определяем коэффициент закрепления операций по формуле (3.5):

$$K_{30} = \frac{\Sigma O}{\Sigma P} = \frac{287}{2} = 143,5.$$

$$40 < K_{30}.$$

Таким образом, по результатам расчетов получили условия, которые соответствуют единичному производству.

3.4 Выбор и обоснование способа получения заготовки

В качестве заготовки в базовом техпроцессе используется прокат ДКРНТ 32 БрОФ 7-02 ГОСТ 10025-2016 с химическим составом по ГОСТ 5017-2006.

Заготовка цилиндрическая $\varnothing 32 \times 150$ диаметр и длина соответственно.

Условное обозначение прутка:

Пруток калиброванный, круглый, нормальной точности, с предельными отклонениями по $h11$, мерной длины (МД), диаметром 32мм по ГОСТ 10025-2016, из бронзы марки БрОФ 7-02, группы качества поверхности (В) по ГОСТ 5017-2006:

Пруток ДКРНТ 32БрОФ 7-02 ГОСТ 10025-2016

Коэффициент использования материала:

$$K_{им} = M_d / M_z = 0,083 / 0,18 = 0,46.$$

Затраты на материал определяются по массе проката, требующего на изготовление детали, и массе сдаваемой стружки. При этом необходимо учитывать стандартную длину прутков и отходы в результате не кратности длины заготовок этой стандартной длине [47]:

$$S_{заг_{пр}} = Q \cdot S - (Q - q) \cdot S_{отх},$$

где Q – масса заготовки, кг;

S – цена 1кг материала заготовки;

q – масса готовой детали;

$S_{отх}$ – цена 1 кг отходов;

$Q = 0,18$ кг; $S = 698$ руб./кг; $q = 0,097$ кг; $S_{отх} = 230$ руб./кг.

Затраты на материал заготовки из проката по формуле (3.14) составят:

$$S_{\text{заг}} = Q \cdot S - (Q - g) \cdot S_{\text{отх}} = 0,18 \cdot 698 - (0,18 - 0,083) \cdot 230 = 125,64 \text{ руб.}$$

Для заготовки – отливки с достаточной точностью затраты можно определить [47]:

$$\begin{aligned} S_{\text{заг}_0} &= (C_i \cdot Q \cdot K_T \cdot K_C \cdot K_B \cdot K_M \cdot K_{\Pi}) - (Q - g) \cdot S_{\text{отх}} \text{ руб.} \\ &= 0,18 \cdot 698 - (0,18 - 0,083) \cdot 230 = 125,64 \text{ руб.} \\ S_{\text{заг}} &= \left(\frac{C_i}{1000} \cdot Q \cdot K_T \cdot K_C \cdot K_B \cdot K_M \cdot K_{\Pi} \right) - (Q - g) \cdot \frac{S_{\text{отх}}}{1000} \text{ (руб.)}, \end{aligned} \quad (3.15)$$

где C_i – базовая стоимость 1 кг заготовок-отливок;

K_T – коэффициент, зависящий от класса точности;

K_C – коэффициент, зависящий от группы сложности;

K_B – коэффициент, зависящий от массы отливки;

K_M – коэффициент, зависящий от материала отливки;

K_{Π} – коэффициент, зависящий от объёма производства отливок.

$C_i = 888$ руб/кг;

Цена одной отливки:

$$\begin{aligned} S_{\text{заг}_0} &= (C_i \cdot Q \cdot K_T \cdot K_C \cdot K_B \cdot K_M \cdot K_{\Pi}) - (Q - g) \cdot S_{\text{отх}} \\ &= (888 \cdot 0,136 \cdot 1 \cdot 0,95 \cdot 1 \cdot 2,4 \cdot 1,07) - (0,136 - 0,083) \cdot 230 \\ &= 282,44 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Экономический эффект:

$$\mathcal{E}_3 = (S_{\text{заг}_0} - S_{\text{заг}_{\text{пр}}}) \cdot N = (282,44 - 125,64) \cdot 2000 = 313\,591 \text{ руб.}$$

Здесь: $N = 2000$ шт. – годовая программа запуска деталей.

Следовательно, исходя из экономических соображений, выбранной заготовкой для данного типа производства, будет прокат.

3.5 Разработка маршрутной технологии обработки деталей

В качестве аналога использовалась типовая технология изготовления червячных колес [3]. Последовательность операций запишем в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 – Маршрут технологической обработки детали

№ операции	Наименование и содержание операции	Технологические базы	Оборудование
010	Заготовительная по МК (Отрезная по ТПП, токарная по ТПП, контрольная по ТПП).	Наружная поверхность и торец	Станок 8Г240, 1К62.
020	Токарно-винторезная (обработать деталь согласно карте эскизов)	Наружная поверхность и торец	Токарно-винторезный ст. ТВ-320.
030	Зубофрезерная (нарезать зубья за 3 прохода).	Отверстие и торец	Зубофрезерный ст. НАМАИ 120.
040	Слесарная (Снять заусенцы, притупить острые кромки после зубофрезерной операции).	—	Верстак слесарный, надфиль.
050	Моечная по ТИН.	—	Ванна промывочная.
060	Контроль (Проверить деталь по внешнему виду и ОСТ4ГО.070.014 согласно чертежу).	—	Меритель подобрать по техпроцессу.
070	Упаковывание по ТИН	—	-
080	Гальваническая по МК.	Отверстие	Ванна гальваническая
090	Упаковывание по ТПП.	—	-

3.6 Определение припусков расчетно-аналитическим способом

Используя известную методику [1,2] определим припуски на обработку отверстия – $\varnothing 19N7_{-0,028}^{-0,007}$.

Заготовка – прокат.

Технологический маршрут обработки поверхности $\varnothing 19N7$ построен следующим образом:

- 1) Сверление отверстия;
- 2) Растачивание отверстия;

Определяем значения шероховатости поверхности Rz и глубины дефектного слоя T и записываем их в таблицу.

При обработке наружных или внутренних поверхностей вращения, припуски рассчитываются по формуле [47,48]:

$$2 Z_{min} = 2 \cdot (R_{zi-1} + T_{i-1} + \sqrt{\rho_{i-1}^2 + \varepsilon_i^2})$$

где R_{zi-1} – шероховатость поверхности, полученной на предшествующем смежном переходе обработки;

T_{i-1} – глубина дефектного поверхностного слоя, полученного на предшествующем смежном переходе обработки и подлежащего удалению;

ρ_{i-1} – пространственное отклонение в расположении обрабатываемой поверхности относительно базовой.

ε_i – погрешность установки на выполняемой операции

Пространственное отклонение для заготовки не учитывается, т.к. она не имеет предварительно полученных в ходе заготовительной операции данного отверстия.

Пространственное отклонение ρ после сверления определяется смещением отверстия и уводом его оси вследствие нежесткости сверла. Суммарное пространственное отклонение равно векторной сумме этих составляющих:

$$\rho = \sqrt{(\Delta_K \cdot l)^2 + l_0^2}$$

где Δ_K – удельный увод сверла; $\Delta_K = 1,3$ мкм/мм

l – глубина сверления; $l = 6$ мм

l_0 – смещение оси отверстия; $l_0 = 15$ мкм/мм

$$\rho = \sqrt{(\Delta_K \cdot l)^2 + l_0^2} = \sqrt{(1,3 \cdot 6)^2 + 15^2} = 16 \text{ мкм}$$

Остаточное пространственное отклонение после растачивания:

$$\rho = k_y \cdot \rho_{заг}$$

где k_y – коэффициент уточнения формы; $k_y = 0,05$.

$\rho_{заг}$ – остаточное пространственное отклонение при сверлении;

$$\rho_{заг} = 0,05 \cdot 16 = 0,8 \text{ мкм}$$

Погрешность установки ε на выполняемом переходе при определении промежуточного припуска характеризуется смещением обрабатываемой поверхности которое должно компенсироваться дополнительной составляющей промежуточного припуска:

$$\varepsilon_y = \sqrt{\varepsilon_B^2 + \varepsilon_3^2}$$

где ε_B – погрешность базирования;

ε_3 – погрешность закрепления;

При закреплении детали в приспособлении погрешность базирования равна 500 мкм.

Погрешность закрепления $\varepsilon_3 = 100$ мкм.

Найдем погрешность установки:

$$\varepsilon_y = \sqrt{\varepsilon_B^2 + \varepsilon_3^2} = \sqrt{500^2 + 100^2} = 510 \text{ мкм}$$

Остаточная погрешность установки при растачивании:

$$\varepsilon_{y \text{ раст.}} = \varepsilon_{y \text{ сверл.}} \cdot k_y$$

где $k_y = 0,05$.

$$\varepsilon_{y \text{ раст.}} = \varepsilon_{y \text{ сверл.}} \cdot k_y = 0,05 \cdot 510 = 25,5 \text{ мкм}$$

Пользуясь чертежом и картами технологического процесса механической обработки записываем в таблицу значения допусков δ для соответствующих видов обработки. [55]

На основании записанных в таблице данных производим расчет минимальных значений межоперационных припусков.

$$2 Z_{min} = 2 \cdot (Rz_{i-1} + T_{i-1} + \sqrt{\rho_{i-1}^2 + \varepsilon_i^2})$$

Минимальный припуск под растачивание:

$$2 Z_{min} = 2 \cdot (20 + 30 + \sqrt{16^2 + 25,5^2}) = 160 \text{ мкм}$$

Т. к. сверление отверстия производится в сплошном материале, то значение минимального припуска $2Z_{min}$ соответствует минимальному диаметру сверления.

Графа таблицы “Расчетный размер” заполняется, начиная с конечного перехода последовательным вычитанием расчетного минимального припуска каждого технологического перехода.

Таким образом имея расчетный размер после последнего перехода 18,993 мм, для остальных переходов получаем:

Для сверления:

$$d_p = 18,993 - 0,16 = 18,833 \text{ мм}$$

В графе таблицы “Предельный размер” наибольшее значение d_{max} получается по расчетным размерам, округленным до точности допуска соответствующего перехода.

Наименьшие предельные размеры d_{min} определяются вычитанием из наибольших предельных размеров допусков соответствующих переходов.

Таким образом, для растачивания:

$$d_{max} = 18,993 \text{ мм}; \quad d_{min} = 18,993 - 0,021 = 18,972 \text{ мм};$$

Для сверления:

$$d_{max} = 18,833 \text{ мм}; \quad d_{min} = 18,833 - 0,36 = 18,473 \text{ мм}.$$

Минимальные предельные значения припусков $z_{min}^{пр}$ равны разности наибольших предельных размеров выполняемого и предшествующих переходов, а максимальные значения $z_{max}^{пр}$ соответственно разности наименьших предельных размеров.

Таким образом, для растачивания:

$$2z_{min}^{пр} = 18,993 - 18,83 = 0,163 \text{ мм}$$

$$2z_{max}^{пр} = 18,972 - 18,47 = 0,502 \text{ мм}$$

Результаты расчетов сводим в таблицу.

Таблица 3.7 - Таблица определения припусков на обработку отверстия $\varnothing 19N7_{-0,028}^{-0,007}$

Технологические переходы обработки поверхности	Элементы припуска, мкм				Расч. припуск $2Z_{min}$, мм	Расч. размер d_p , мм	Допуск δ мкм	Предельный размер, мм		Предельные значения припусков, мкм	
	Rz	T	ρ	ϵ				d_{min}	d_{max}	$2z_{max}^{пр}$	$2z_{min}^{пр}$
Заготовка	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Сверление	20	30	16	510	-	18,833	360	18,47	18,83	18,83	18,47
Растачивание	20	25	0,8	25,5	160	18,993	21	18,972	18,993	0,502	0,163

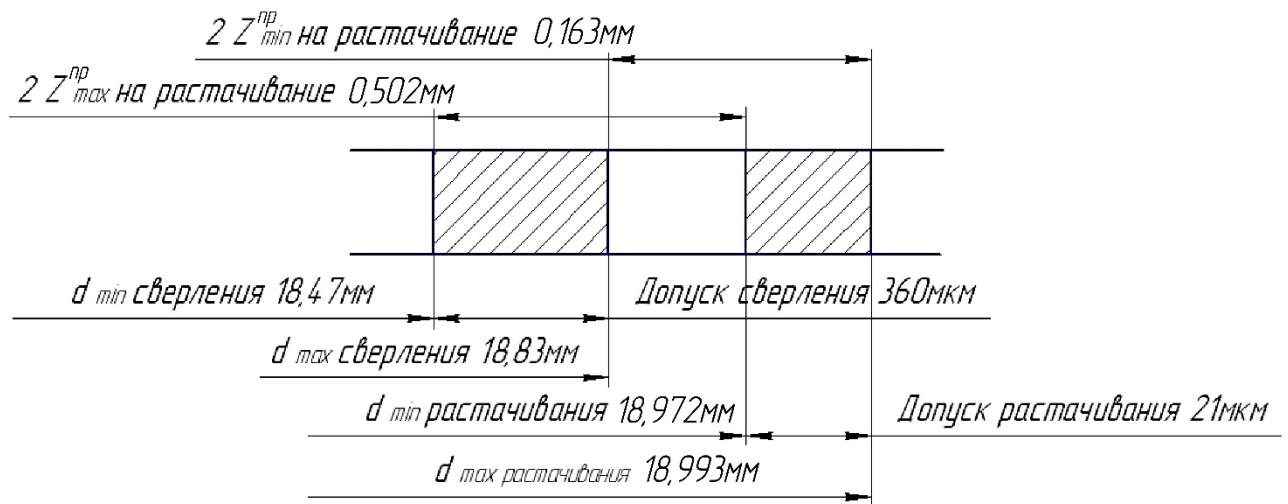


Рисунок 3.1 – Схема расположения допусков и припусков

3.7 Проектирование операционной технологии

3.7.1 Расчет точности обработки на чистовой операции

Сделаем расчет точности (суммарной погрешности) на операцию тонкого растачивания отверстия $\varnothing 19N7_{-0,028}^{-0,007}$.

Суммарная погрешность обработки отверстия может быть определена по формуле:

$$\Delta_{\text{сум}} = 2 \cdot \sqrt{\Delta_y^2 + \Delta_n^2 + 3\Delta_u^2 + 3\Delta_T^2 + \varepsilon^2} + \sum \Delta_\phi;$$

где Δ_y – погрешность, возникающая в результате упругих отжятий звеньев технологической системы под действием сил резания;

Δ_n – погрешность настройки станка на размер;

Δ_u – погрешность, возникающая в результате размерного износа инструмента;

Δ_T – погрешность, вызванная температурными деформациями технологической системы З-И-П-С;

Δ_ϕ – сумма погрешностей формы детали, вызываемых геометрическими неточностями станка, деформациями заготовки под действием усилий закрепления и другими факторами;

Определяем погрешность, возникающую в результате упругих отжятий звеньев технологической системы под действием сил резания (Δ_y).

Как и при токарной обработке:

$$\Delta_y = \omega_{\max} P_{y_{\max}} - \omega_{\min} P_{y_{\min}};$$

где $\omega_{\max}, \omega_{\min}$ – наибольшая и наименьшая податливости технологической системы 3-И-П-С (мкм/кгс);

$P_{y_{\max}}, P_{y_{\min}}$ – наибольшее и наименьшее значения усилия резания.

Податливость системы применительно к данному случаю можно определить по формуле:

$$\omega = \omega_c + \omega_{\text{шп}} + \omega_{\text{опр}} + \omega_{\text{дет}},$$

где ω_c – податливость стола станка;

$\omega_{\text{шп}}$ – податливость шпиндельного узла станка;

$\omega_{\text{опр}}$ – податливость консольной оправки;

$\omega_{\text{дет}}$ – податливость детали.

Принимаем: $\omega_{\text{дет}} = 0$; $\omega_c = 0,17$ мкм/кгс; $\omega_{\text{шп}} = 0,2$ мкм/кгс;

$$\omega_{\text{опр}} = \frac{1}{3D} \cdot \left(\frac{L}{D} \right)^3, \text{ мкм / кгс};$$

где L – величина вылета консольной оправки от шпинделя:

($L_{\text{наиб}} = 150$ мм; $L_{\text{наим}} = 80$ мм);

D – диаметр консольной оправки (70 мм).

$$\omega_{\text{опр max}} = \frac{1}{3 \cdot 70} \left(\frac{150}{70} \right)^3 = 0,05 \text{ мкм / кгс}; \quad \omega_{\text{опр min}} = \frac{1}{3 \cdot 70} \left(\frac{80}{70} \right)^3 = 0,007 \text{ мкм / кгс}.$$

$$\omega_{\max} = 0,17 + 0,2 + 0,05 = 0,42 \text{ мкм / кгс}; \quad \omega_{\min} = 0,17 + 0,2 + 0,007 = 0,377 \text{ мкм / кгс}.$$

$$P_{y_{\min}} = 10 C_p t^x s^y v^n k_p = 10 \cdot 40 \cdot 0,15^1 \cdot 0,04^{0,75} \cdot 300^0 \cdot 0,8 = 4,3 \text{ кгс};$$

$$P_{y_{\max}} = 10 \cdot 40 \cdot 0,15^1 \cdot 0,06^{0,75} \cdot 400^0 \cdot 0,8 = 5,8 \text{ кгс}.$$

Определяем погрешность, обусловленную упругими отжатыми технологической системы:

$$\Delta_y = 0,42 \cdot 5,8 - 0,377 \cdot 4,3 = 0,815 \text{ мкм}.$$

Погрешность настройки станка составит: $\Delta_u = 2$ мкм.

Погрешность от износа инструмента и погрешность от температурных деформаций очень малы, поэтому их не учитываем. $\Delta_u = 0$; $\Delta_T = 0$.

Погрешность закрепления при установке составит: $\varepsilon = 2$ мкм.

Сумма погрешностей формы детали, вызываемых геометрическими неточностями станка, деформациями заготовки под действием усилий закрепления и другими факторами $\Delta_{\phi} = 3$ мкм.

Определяем суммарную погрешность обработки:

$$\Delta_{\text{сум}} = 2\sqrt{0,815^2 + 2^2 + 2^2} + 3 = 9 \text{ мкм.}$$

Допустимая погрешность при обработке отверстия $\varnothing 19N7_{-0,028}^{-0,007}$ равна 21 мкм.

Вывод: т.к. суммарная погрешность обработки равная 9 мкм меньше допустимой погрешности равной 21 мкм. Обработка отверстия $\varnothing 19N7_{-0,028}^{-0,007}$ на данном станке возможна.

3.7.2 Выбор станков, инструмента, средств измерения и технологического оснащения

Таблица 3.7 Выбор режущего и измерительного инструмента

№ операции	Наименование и содержание операции	Режущий инструмент	Оборудование
010	Заготовительная	Пила дисковая	Станок 8Г240, 1К62
020	Токарно-винторезная	Резец проходной, канавочный, фасочный, расточной, сверло $\varnothing 3.5$, $\varnothing 14$ мм	Токарно-винторезный ст. ТВ-320
030	Зубофрезерная	Фреза модульная $m=1$	Зубофрезерный ст. НАМАИ 120
040	Слесарная	Надфиль, шабер, Лупа ЛПП-1-7	Верстак слесарный, надфиль
050	Моечная	-	Ванна промывочная
060	Контроль		Меритель подобрать по техпроцессу
070	Упаковывание	-	-
080	Гальваническая	-	Ванна гальваническая
090	Упаковывание	-	-

3.7.3 Расчет режимов резания на основные операции

Учитывая специфику станков с ЧПУ и необходимость увеличения их отдачи в единицу времени, целесообразно в ряде случаев повышать скорость резания путем снижения периода стойкости режущего инструмента.

Повышению уровня нормативных скоростей резания способствует также внестаночная заточка, доводка и настройка инструмента с высокой точностью при соблюдении заданных геометрических параметров, наличие быстрозажимных устройств для крепления инструмента, возможность автоматической смены частоты вращения в соответствии с заданной программой и увеличенная жесткость технологической системы, свойственная большинству моделей станков с ЧПУ.

Глубина резания t : при черновой обработке (предварительной) назначаем по возможности максимальную глубину резания t , равную всему припуску на обработку или большей части его; при чистовой (окончательной) обработке – в зависимости от размеров и шероховатости обработанной поверхности [56].

Подача S : при черновой обработке выбираем максимально возможную подачу, исходя из жесткости и прочности системы З-И-П-С, мощности привода станка, прочности твердосплавной пластинки и других ограничивающих факторов; при чистовой обработке – в зависимости от требуемой точности и шероховатости обработанной поверхности. [56]

Подача на оборот: $S_o = S_z \cdot z$

S_z – подача на зуб фрезы;

z – число зубьев фрезы;

Минутная подача: $S_m = S_o \cdot n = S_z \cdot z \cdot n$

S_o – подача на оборот фрезы;

n – частота вращения;

Скорость резания V : рассчитываем по эмпирическим формулам, установленным для каждого вида обработки, которые имеют общий вид [56]:

Для фрезерования:

$$V = \frac{C_v \cdot D^g}{T^m \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot z^p \cdot B^u};$$

Для точения:

$$V = \frac{C_v}{T^m t^x S^y} K_v;$$

D – диаметр фрезы;

T – период стойкости фрезы;

t – припуск на обработку;

z – число зубьев фрезы;

B – ширины фрезерования.

Значения коэффициента C_v и показателей степени, содержащихся в этих формулах, также, как и периода стойкости T инструмента, применяемого для данного вида обработки, приведены в таблицах для каждого вида обработки. Вычисленная скорость резания учитывает конкретные глубины резания, подачи и стойкости и действительна при определенных табличных значениях других факторов. Поэтому для получения действительного значения скорости резания V с учетом конкретных упомянутых факторов вводится поправочный коэффициент K_v .

$$K_v = K_{mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{iv},$$

где K_v – произведение ряда коэффициентов. Важнейшими из них, общими для всех видов обработки, являются:

K_{mv} – коэффициент, учитывающий качество обрабатываемого материала;

K_{nv} – коэффициент, учитывающий состояние поверхности заготовки;

K_{iv} – коэффициент, учитывающий материал инструмента.

Стойкость T – период работы инструмента до затупления, приводимый для различных видов обработки, соответствует одноинструментальной обработки.

Тогда действительная скорость резания:

$$V = V_{тб} \cdot K_v$$

Частота вращения n : определяется по зависимости приведенной ниже.

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D}$$

Окружная сила резания P : находится по следующей формуле [56].

Для фрезерования:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^n \cdot z}{D^g \cdot n^w} \cdot K_p;$$

Для точения:

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S^y \cdot V^n \cdot K_p;$$

K_p – общий поправочный коэффициент;

Числовые значения коэффициента C_p и показателей степени приведены в таблицах [56].

Если сила резания P_z вызывает значительные деформации инструмента или детали, приводящие к снижению точности или поломке, то следует уменьшить подачу на зуб S_z и, соответственно, скорость движения подачи V_s (минутной подачи S_m).

Крутящий момент на шпинделе $M_{кр}$: определяется по формуле [56].

$$M_{кр} = \frac{P_z \cdot D}{2 \cdot 100}$$

Мощность резания N_e : определяется из следующей зависимости [56].

$$N_e = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60}$$

Мощность, затрачиваемая на резание, должна быть меньше или равна мощности на шпинделе станка:

$$N_e \leq N_{шп}$$

где N_e – эффективная мощность резания, кВт;

$N_{шп}$ – допустимая мощность на шпинделе, определяемая по мощности привода, кВт.

Если условие $N_e \leq N_{шп}$ не выдерживается, то необходимо уменьшить скорость резания или изменить другие параметры резания.

Приводом станка является совокупность механизмов от источника движения до рабочего органа. Приводом главного движения резания является совокупность механизмов от электродвигателя до шпинделя станка, а его мощность определится исходя из мощности электродвигателя и потерь в механизмах.

Мощность на шпинделе определится по формуле:

$$N_{\text{шп}} = N_{\text{э}} \eta,$$

где $N_{\text{э}}$ – мощность электродвигателя привода главного движения резания, кВт;

η – КПД механизмов привода станка, $\eta = 0,7 \dots 0,8$.

Операция 020: Токарно-винторезная.

1) Точение наружной поверхности черновое

$$S_o = 0,4 \text{ мм/об}$$

$$t = 1 \text{ мм}$$

Скорость резания:

$$C_v = 182; K_v = 2,16; m = 0,23; x = 0,12; y = 0,3; T = 60 \text{ мин}$$

$$V = \frac{C_v}{T^m t^x S^y} K_v = \frac{182}{60^{0,23} 1^{0,12} 0,4^{0,3}} 2,16 = 200 \text{ м/мин}$$

Сила резания:

$$C_p = 55; n = 0; x = 1; y = 0,66; K_p = 0,66.$$

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S^y \cdot V^n \cdot K_p = 10 \cdot 55 \cdot 1^1 \cdot 0,4^{0,66} \cdot 200^0 \cdot 0,66 = 181,5 \text{ Н}$$

Мощность резания:

$$N = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60} = \frac{181,5 \cdot 200}{1020 \cdot 60} = 0,6 \text{ кВт}$$

2) Точение наружной поверхности чистовое

$$S_o = 0,165 \text{ мм/об}$$

$$t = 0,4 \text{ мм}$$

Скорость резания:

$$C_v = 270; K_v = 2,16; m = 0,23; x = 0,12; y = 0,3; T = 60 \text{ мин}$$

$$V = \frac{C_v}{T^m t^x S^y} K_v = \frac{270}{60^{0,23} 0,4^{0,12} 0,165^{0,25}} 2,16 = 389 \text{ м/мин}$$

Сила резания:

$$C_p = 55; n = 0; x = 1; y = 0,66; K_p = 0,66$$

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S^y \cdot V^n \cdot K_p = 10 \cdot 55 \cdot 0,4^1 \cdot 0,165^{0,66} \cdot 389^0 \cdot 0,66 = 44,2 \text{ Н}$$

Мощность резания:

$$N = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60} = \frac{44,2 \cdot 389}{1020 \cdot 60} = 0,28 \text{ кВт}$$

3) Растачивание черновое

$$S_o = 0,16 \text{ мм/об}$$

$$t = 1 \text{ мм}$$

Скорость резания:

$$C_v = 182; K_v = 2,16; m = 0,23; x = 0,12; y = 0,3; T = 60 \text{ мин}$$

$$V = \frac{C_v}{T^m t^x S^y} K_v = \frac{182}{60^{0,23} 1^{0,12} 0,16^{0,3}} 2,16 = 262 \text{ м/мин}$$

Сила резания:

$$C_p = 55; n = 0; x = 1; y = 0,66; K_p = 0,66$$

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S^y \cdot V^n \cdot K_p = 10 \cdot 55 \cdot 1^1 \cdot 0,16^{0,66} \cdot 262^0 \cdot 0,66 = 108 \text{ Н}$$

Мощность резания:

$$N = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60} = \frac{108 \cdot 262}{1020 \cdot 60} = 0,46 \text{ кВт}$$

4) Растачивание чистовое

$$S_o = 0,13 \text{ мм/об}$$

$$t = 0,4 \text{ мм}$$

Скорость резания:

$$C_v = 270; K_v = 2,16; m = 0,23; x = 0,12; y = 0,25; T = 60 \text{ мин}$$

$$V = \frac{C_v}{T^m t^x S^y} K_v = \frac{270}{60^{0,23} 0,4^{0,12} 0,13^{0,25}} 2,16 = 416 \text{ м/мин}$$

Сила резания:

$$C_p = 55; n = 0; x = 1; y = 0,66; K_p = 0,66$$

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S^y \cdot V^n \cdot K_p = 10 \cdot 55 \cdot 0,4^1 \cdot 0,13^{0,66} \cdot 416^0 \cdot 0,66 = 38 \text{ Н}$$

Мощность резания:

$$N = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60} = \frac{38 \cdot 416}{1020 \cdot 60} = 0,26 \text{ кВт}$$

5) Прорезание паза

$$S_o = 0,13 \text{ мм/об}$$

$$t = 2,45 \text{ мм}$$

Скорость резания:

$$C_v = 182; K_v = 3; m = 0,23; x = 0,12; y = 0,3; T = 60 \text{ мин}$$

$$V = \frac{C_v}{T^m t^x S^y} K_v = \frac{182}{60^{0,23} 2,45^{0,12} 0,16^{0,3}} 3 = 331,35 \text{ м/мин}$$

Сила резания:

$$C_p = 75; n = 0; x = 1; y = 1; K_p = 0,55$$

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S^y \cdot V^n \cdot K_p = 10 \cdot 75 \cdot 2,45^1 \cdot 0,16^1 \cdot 331^0 \cdot 0,55 = 162 \text{ Н}$$

Мощность резания:

$$N = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60} = \frac{162 \cdot 331,35}{1020 \cdot 60} = 0,88 \text{ кВт}$$

5) Сверление отв. Ø14 мм

$$S_o = 0,35 \text{ мм/об}$$

$$t = 7 \text{ мм}$$

Скорость резания:

$$C_v = 32,6; K_v = 2,4; D = 14; T = 60 \text{ мин}; S = 0,35 \text{ мм/об}; q = 0,25; m = 0,4; y = 0,125$$

$$V = \frac{C_v \cdot D^q}{T^m S^y} K_v = \frac{32,6 \cdot 14^{0,25}}{60^{0,4} 0,35^{0,125}} 2,4 = 33,6 \text{ м/мин}$$

Крутящий момент:

$$C_M = 0,012; K_P = 0,65; q = 2; y = 0,8$$

$$M_{кр} = 10 \cdot C_M \cdot D^q \cdot S^y \cdot K_P = 10 \cdot 0,012 \cdot 14^2 \cdot 0,35^{0,8} \cdot 0,65 = 6,6 \text{ Н}$$

Осевая сила:

$$C_P = 31,5; K_P = 0,65; q = 1; y = 0,8$$

$$P_o = 10 \cdot C_P \cdot D^q \cdot S^y \cdot K_P = 10 \cdot 31,5 \cdot 14^1 \cdot 0,35^{0,8} \cdot 0,65 = 1237,6 \text{ Н}$$

Мощность резания:

$$N = \frac{M_{кр} \cdot n}{9750} = \frac{6,6 \cdot 764}{9750} = 0,5 \text{ кВт}$$

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 33,6}{3,14 \cdot 14} = 764 \text{ мин}^{-1}$$

Операция 030: Зубофрезерная.

$$t = 1 \text{ мм}$$

$$S_Z = 0,06 \text{ мм/зуб}$$

$$V = \frac{C_v \cdot D^g}{T^m \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot z^p \cdot B^u} = \frac{53 \cdot 16^{0,45}}{120^{0,33} \cdot 1^{0,3} \cdot 0,06^{0,2} \cdot 18^{0,1} \cdot 8^{0,1}} = 42 \text{ м/мин}$$

$$C_v = 53; m = 0,33; x = 0,3; y = 0,2; z = 8; q = 0,45; u = 0,1; p = 0,1; T = 60 \text{ мин}$$

Сила резания:

$$K_{mp} = 0,65; C_p = 47; n = 1280 \text{ мин}^{-1}; x = 0,86; y = 0,72; u = 0,1; q = 0,86; w = 0$$

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^n \cdot z}{D^g \cdot n^w} \cdot K_p = \frac{10 \cdot 47 \cdot 1^{0,86} \cdot 0,06^{0,72} \cdot 18^{0,4} \cdot 8}{16^{0,86} \cdot 1280^0} \cdot 0,65 = 63 \text{ Н}$$

Крутящий момент:

$$M_{кр} = \frac{P_z \cdot D}{2 \cdot 100} = \frac{63 \cdot 14}{2 \cdot 100} = 5 \text{ Н*м}$$

Мощность резания:

$$N_e = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60} = \frac{63 \cdot 42}{1020 \cdot 60} = 0,04 \text{ кВт}$$

3.7.4 Расчёт технической нормы времени

В единичном и массовом производствах рассчитывается штучное время.

В серийном и среднесерийном производстве определяется норма штучно-калькуляционного времени $T_{ш-к}$ [47]:

$$T_{ш-к} = T_{шт} + \frac{T_{пз}}{n},$$

где $T_{шт}$ – штучное время, мин;

$T_{п-з}$ – подготовительно–заключительное время, мин;

n – количество деталей в настроечной партии, шт;

$$T_{шт} = (T_o + T_b) \cdot \left(1 + \frac{\kappa}{100}\right),$$

где T_o – основное время, мин;

T_b – вспомогательное время, мин;

κ – поправочный коэффициент, зависящий от типа производства;

$$T_b = T_{y.c} + T_{3.o} + T_{уп} + T_{из},$$

где $T_{y.c}$ – время на установку и снятие детали, мин;

$T_{3.o}$ – время на закрепление и открепление детали, мин;

$T_{уп}$ – время на приёмы управления, мин;

$T_{из}$ – время на измерение, мин;

Находим основное время для токарно-винторезной операции по формуле для каждого перехода:

$$T_o = \frac{L \cdot i}{n \cdot S},$$

где L – длина резания, мм;

i – количество проходов;

n – частота вращения, мин⁻¹;

S – подача, мм/об;

Таким образом вычисляется основное время на каждый переход. Результаты расчётов сведены в таблицу 3.8.

Таблица 3.8 – Результаты расчёта основного времени на операции обработки резанием

Содержание перехода	Формула	Результат, мин
Черновое точение		
Подрезать торец 1	$T_o = \frac{16 \cdot 1}{1800 \cdot 0,4}$	0,022
Точить пов. 2	$T_o = \frac{3 \cdot 5}{1800 \cdot 0,4}$	0,02
Подрезать торец 8	$T_o = \frac{16 \cdot 1}{1800 \cdot 0,4}$	0,022
Точить пов. 7	$T_o = \frac{9 \cdot 2}{1800 \cdot 0,4}$	0,025
Точить пов. 6	$T_o = \frac{2 \cdot 4}{1800 \cdot 0,13}$	0,034
Точить пов. 5	$T_o = \frac{3,5 \cdot 4}{1800 \cdot 0,4}$	0,019
Точить пов. 3	$T_o = \frac{3,5 \cdot 4}{1800 \cdot 0,4}$	0,019
Зацентровать	$T_o = \frac{2 \cdot 1}{2500 \cdot 0,35}$	0,002
Сверлить отв.	$T_o = \frac{23 \cdot 1}{820 \cdot 0,35}$	0,08
Расточить отв.	$T_o = \frac{23 \cdot 2}{1800 \cdot 0,16}$	0,16
Расточить пов. 11	$T_o = \frac{5,6 \cdot 3}{1800 \cdot 0,16}$	0,058
Расточить пов. 9	$T_o = \frac{5,6 \cdot 3}{1800 \cdot 0,16}$	0,058
Чистовое точение		
Подрезать торец 8	$T_o = \frac{13 \cdot 1}{2500 \cdot 0,165}$	0,03

Содержание перехода	Формула	Результат, мин
Точить пов. 7	$T_o = \frac{7 \cdot 1}{2500 \cdot 0,165}$	0,017
Точить пов. 6	$T_o = \frac{2,45 \cdot 1}{2500 \cdot 0,13}$	0,0075
Точить пов. 5	$T_o = \frac{3,5 \cdot 1}{2500 \cdot 0,13}$	0,01
Подрезать торец 1	$T_o = \frac{13 \cdot 1}{2500 \cdot 0,165}$	0,03
Точить пов. 2	$T_o = \frac{3,45 \cdot 1}{2500 \cdot 0,165}$	0,008
Точить пов. 3	$T_o = \frac{3,5 \cdot 1}{2500 \cdot 0,13}$	0,01
Расточить пов. 10	$T_o = \frac{10 \cdot 1}{2500 \cdot 0,13}$	0,03
Расточить пов. 11	$T_o = \frac{6 \cdot 1}{2500 \cdot 0,13}$	0,018
Расточить пов. 9	$T_o = \frac{6 \cdot 1}{2500 \cdot 0,13}$	0,018
		$\Sigma T_o = 0,697$

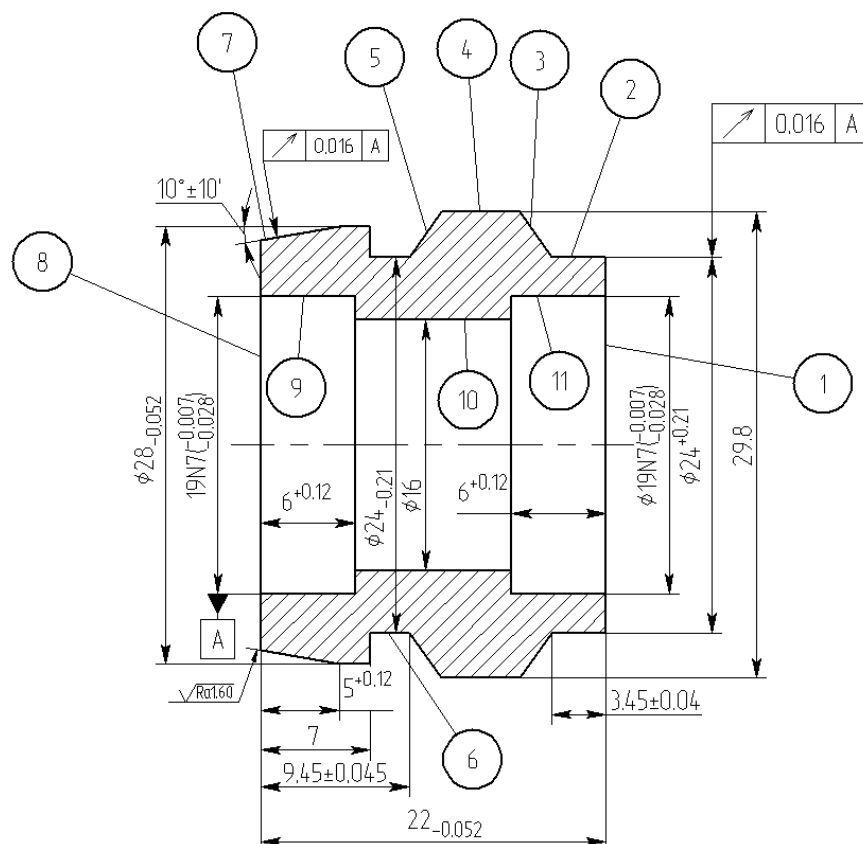


Рисунок 3.2 Номера обрабатываемых поверхностей детали

Находим вспомогательное время для одного установа по формуле (3.49):

$$T_{\text{Выс}} = T_{\text{У.С}} + T_{\text{З.О}} + T_{\text{УП}} + T_{\text{ИЗ}} = 0,15 + 0,085 + 0,035 + 0,17 = 0,44 \text{ мин}$$

$$T_{\text{У.С}} = 0,15 \text{ мин}; T_{\text{З.О}} = 0,085 \text{ мин}; T_{\text{УП}} = 0,035 \text{ мин}; T_{\text{ИЗ}} = 0,17 \text{ мин.}$$

Поскольку деталь обрабатывалась за 6 установов, то:

$$T_B = T_{\text{Выс}} \cdot 6 = 2,64 \text{ мин}$$

Находим штучное время:

$$T_{\text{шт}} = (T_o + T_B) \left(1 + \frac{k}{100}\right) = (0,697 + 2,64) \left(1 + \frac{5}{100}\right) = 3,5 \text{ мин}$$

Находим штучно-калькуляционное время:

$$T_{\text{шт-К}} = T_{\text{шт}} + \frac{T_{\text{ПЗ}}}{n} = 3,5 + \frac{20}{100} = 3,7 \text{ мин}$$

Находим основное время для зубофрезерной операции:

$$T_o = \frac{L \cdot i}{n \cdot S} = \frac{9 \cdot 3}{1280 \cdot 0,48} = 0,044 \text{ мин}$$

Находим вспомогательное время:

$$T_B = T_{\text{У.С}} + T_{\text{З.О}} + T_{\text{УП}} + T_{\text{ИЗ}} = 0,13 + 0,085 + 0,3 + 0,18 = 0,695 \text{ мин}$$

$$T_{\text{У.С}} = 0,13 \text{ мин}; T_{\text{З.О}} = 0,085 \text{ мин}; T_{\text{УП}} = 0,3 \text{ мин}; T_{\text{ИЗ}} = 0,18 \text{ мин.}$$

Находим штучное время:

$$T_{\text{шт}} = (T_o + T_B) \left(1 + \frac{k}{100}\right) = (0,044 + 0,695) \left(1 + \frac{5}{100}\right) = 0,776 \text{ мин}$$

Находим штучно-калькуляционное время:

$$T_{\text{шт-К}} = T_{\text{шт}} + \frac{T_{\text{ПЗ}}}{n} = 0,776 + \frac{21}{100} = 0,986 \text{ мин}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе исследованы параметры, влияющие на производительность электроэрозионного профилирования, критерием которой служит интенсивность съёма связки.

Выполненные аналитические исследования и производственного опыта свидетельствуют о сложности обеспечения требуемой работоспособности, стойкости алмазных кругов и точности обработки деталей из твердых сплавов, керамики, ситаллов, технического стекла и др. неметаллических материалов.

Проведенные эксперименты на различных поисковых технологических режимах обработки позволили получить зависимости объёмной величины интенсивности съёма.

Интерпретация построенных графических зависимостей позволяет сделать выводы о рациональном и более эффективном использовании технологических режимов электроэрозионного профилирования для достижения заданной точности профиля алмазного круга.

В ходе исследовательских работ разработана конструкция специального приспособления для профилирования алмазных шлифовальных кругов на металлических связках, позволяющего использовать его без снятия и переустановки алмазного круга на станках.

Список использованных источников

- 1 Чачин, В.Н., Дорофеев, В.Д. Профилирование алмазных шлифовальных кругов [текст]. – Минск: Наука и техника, 1974. – 160 с.
- 2 Соколов, В.О. Профилирование и правка алмазных шлифовальных кругов на металлических связках [текст] // Техника машиностроения, 2000. — № 1. — С. 27—29.
- 3 Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 4. “Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов” [текст] – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с.
- 4 Бугай, И.А., Васильев, Е.В., Попов, А.Ю. Анализ методик правки алмазных кругов для обработки высокоточных твердосплавных изделий [текст] // Динамика систем, механизмов и машин. – №2. – 2014. – С.290-293.
- 5 Якимов, А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей [текст]. – М.: Машиностроение, 1984. – 312с.
- 6 Сироткин, С.Л., Коломиец, В.В. Профилирование и правка алмазно-абразивного инструмента на металлической связке [текст]. – В кн.: Прогрессивные технологические процессы точной и высококачественной обработки деталей. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1978. – С.40-43.
- 7 Ящерицын П.И., Дорофеев В.Д., Гринин Г.П. Профилирование алмазно-абразивных инструментов пластическим деформированием [текст]. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1982. – 112 с.
- 8 Черный, А.П., Прусенко, Э.Г. Профилирование фасонных алмазных кругов методом пластического деформирования [текст] // Станки и инструмент. – 1972. – №6. – С.42-43.
- 9 Романов, В.Ф., Авакян, В.В. Правка и профилирование абразивного, алмазного и эльборового инструмента [текст]. – М.: Машиностроение, 1976. – 32с.

10 Ящерицын, П.И., Дорофеев, В.Д., Пахалин, Ю.А. Электроэрозионная правка алмазно-абразивных инструментов [текст]. – Минск: Наука и техника, 1981. – 232с.

11 Волков, Ю.С., Лившиц, А.Л. Введение в теорию размерного формообразования электрофизикохимическими методами [текст]. – Киев, Вища школа, 1978. - 120с.

12 Соколов В.О., Дресвянников В.А. Глубинное профилирование алмазных шлифовальных кругов электроэрозионным методом [текст] // Точность технологических и транспортных систем: Сб. статей Междунар. науч.-техн. конф. Часть 2. Пенза, 1998. - С. 134-136.

13 Янюшкин, А.С., Лобанов, Д.В., Скиба, В.Ю., Гартфельдер, В.А., Секлетина, Л.С. Повышение эффективности алмазного инструмента на металлической связке при шлифовании высокопрочных материалов [текст] // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. – № 3 (76). – С. 17–27.

14 Экологические преимущества применения при шлифовании электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках взамен электрохимической правки [текст]/ Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, С.А. Дитиненко, В.И. Полянский // Вісник НТУ «ХП». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХП», 2016. – № 38(1210). – С. 35–40.

15 Абразивная и алмазная обработка материалов [текст]. Справочник. Под ред. д-ра техн, наук проф. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.

16 Львов, В.Н., Сафронов, В.Г., Данилова, Ф.Б. Электрохимическая правка шлифовальных кругов на металлических и- органических связках [текст] // Алмазы и- сверхтвердые материалы. – 1976. –№7. – С. 14 - 17.

17 Казбанов, Г.Н. Электрохимическая правка алмазных кругов на металлических связках [текст] // Вестник Харьковского политехи. Ин-та, 1973. №81, Вып.3.-С. 34.

18 Грабченко, А.И. и др. 3D моделирование алмазно-абразивных инструментов и процессов шлифования: Учеб. пособие / А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок, В.А. Федорович. – Харьков: НТУ <<ХПИ>>, 2006. – 364 с. - На русск. яз.

19 Доброскок, В. Л. Научные основы формирования рабочей поверхности кругов на токопроводных связках в процессе шлифования [текст]: Дис...докт. техн. наук: 05.03.01 – Харьков, 2001. – 447 с.

20 Попов, С.А., Малевский, Н.П., Терещенко, Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. - М.: Машиностроение, 1977. - 263 с.

21 Романов, В.Ф., Авакян, В.В. Технология алмазной правки шлифовальных кругов [текст]. - М.: Машиностроение, 1980. - 118 с.

22 Алмазный инструмент фасонного профиля [текст] / Коломиец В.В., Полупан Б.И., Химач О.В.; Отв. ред. Чеповецкий И.Х.; АП Украины. Ин-т сверхтвердых материалов. – Киев : Наук, думка, 1992. – 176 с.

23 Дорофеев, В.Д. Основы профильной алмазно-абразивной обработки [текст]. – Саратов: Изд-во Сарат. гос. ун-та, 1983. – 189с.

24 Дорофеев, В.Д. Основы теории и технологии профильной алмазно-абразивной обработки [текст] – Дисс.докт.техн.наук, Минск, 1984. – 517с.

25 Пахалин, Ю.А. Алмазное контактно-эрозионное шлифование [текст] / Ю.А. Пахалин. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 178 с.

26 Дресвянников, В.А. Совершенствование технологии профилирования и правки алмазных шлифовальных кругов на металлических связках [текст]. – Дис. канд. техн. наук, Пенза 1998: – 159с.

27 Соколов, В.О., Новичков, А.В. Аналитическое определение износа профильного алмазного круга [текст] // Процессы абразивной обработки,

абразивные инструменты и материалы: Сб. трудов Междунар. науч.-техн. конф. "Шлифабразив-98". Волжский, 1998. – С.57-59.

28 Соколов, В.О., Новичков, А.В. Математическая модель износа профильного алмазного шлифовального круга [текст] // Точность технологических и транспортных систем: Сб. статей Междунар. науч.-техн. конф. Часть 1. Пенза, 1998. - С.122-124.

29 Соколов, В.О., Новичков, А.В. Профильные алмазные круги на металлических связках [текст] // Машиностроитель, 1998. №8. - С. 19-20.

30 Соколов, В.О. Профилирование и правка алмазных шлифовальных кругов на металлических связках [текст] // Техника машиностроения, 2000. — № 1. — С. 27—29.

31 Дресвянников, В.А. Совершенствование технологии профилирования и правки алмазных шлифовальных кругов на металлических связках [текст]. - Дис. канд. техн. наук, Пенза 1998: – 159с.

32 Кольчугин, С.Ф. Повышение точности и эффективности профильного врезного алмазно-эрозионного шлифования [текст] : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.02.08 / Пензенский техн. ун-т.- Пенза, 1997.- 18 с.

33 Никиткин, А.С. Оптимизация технологического процесса глубинного электроэрозионного профилирования алмазных шлифовальных кругов / А. С. Никиткин, П. Н. Цибизов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2014. – № 3 (11). – С. 132–137.

34 Оптимизация технологии глубинного шлифования [текст] /С.С.Силин, Б.Н.Леонов, В.А.Хрульков и др.; Редкол.: П.Н.Орлов (пред.). – М.: Машиностроение, 1989. - 120 с.

35 Дорофеев, В.Д., Соколов, В.О., Конягин, В.П. Измерение межэлектродного зазора при электроэрозионной обработке промежутке [текст] // Электронная обработка материалов, 1981. №5. - С. 10-11.

36 Михайлуца, Э.Б. Влияние электроэрозионной правки на состояние алмазоносного слоя кругов [текст]. / Технология и автоматизация

производственных процессов в машиностроении. Межвуз.сб.науч.тр. 1978. № 7. – С.77–78.

37 Доброскок, В.Л. Научные основы формирования рабочей поверхности кругов на токопроводных связках в процессе шлифования [текст]: Дис...докт. техн. наук: 05.03.01 – Харьков, 2001. – 447 с.

38 Соколов, В.О. Управление процессом электроэрозионного формообразования // Элементы и приборы систем измерения и управления автоматизированных производств: Межвуз.сб.науч.тр. - Пенза, 1997. – С.82-87.

39 Грабченко, А. И., Федорович, В. А. 3D процессы алмазно-абразивной обработки [текст] . Монография. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 345 с.

40 Дорофеев, В.Д., Соколов, В.О., Фунтов, Н.В. и др. Установка для профилирования алмазных кругов [текст]// Машиностроитель. – 1984. – №6. - С. 12-13.

41 Дорофеев, В.Д., Соколов, В.О., Фунтов, Н.В. и др. Оборудование для правки алмазно-абразивных кругов [текст] // Машиностроитель, 1985. – № 6.- С.14-15.

42 Дунаев, П.Ф. Конструирование узлов и деталей машин [текст]: Учеб. пособие для студ.высш.учеб.заведений /П.Ф.Дунаев, О.П.Леликов. – 11-е изд., стер. - М.: Издательский центр «Академия», 2008. - 496 с. [35].

43 ГОСТ Р 54466–2011 Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные взрывозащищенные мощностью от 0,25 до 400 кВт включительно. Общие технические требования и методы испытаний [текст]. – М.: Стандартинформ, 2012. – 16с.

44 ГОСТ 31606-2012 Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные мощностью от 0,12 до 400 кВт включительно. Общие технические требования [текст]. – М.: Стандартинформ, 2013. – 23с.

45 Электродвигатели асинхронные трёхфазные общепромышленные. Серия АИР. Техническое описание и руководство по эксплуатации [текст]. – Бавленск: АО БЭЗ, 2015. – 15с. URL: <http://www.bavemz.ru>

46 Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя [текст]. В 3-х т. Т.1 Издание 9-е, перераб. и доп. Под редакцией И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2006. – 928с.

47 Горбацевич, А.Ф.; Шкред, В.А. Курсовое проектирование по технологии машиностроения [Текст]: Учебное пособие... - 5-е изд., стереотип. – М.: Альянс, 2007.- 256с.

48 Проектирование технологических процессов механической обработки в машиностроении [Текст]: Учеб.пособие для машиностроительных специальностей вузов/ Под ред. В.В.Бабука. – Минск: Вышэйш.шк., 1987. – 255с.

49 Картавов С.А. (ред.). Технология машиностроения (специальная часть) [Текст]..—2-е изд., перераб. и доп. — Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1984. – 272 с.

50 Приближенное нормирование технологических операций обработки резанием [Текст] : Справочно-методическое пособие. – Пенза: Изд-ние каф. «ТОРП», 1998. – 65 с.

51 ГОСТ 5017-2006 Бронзы оловянные, обрабатываемые давлением. Марки [текст]. – М.: Стандартиформ, 2007. – 7с.

52 ГОСТ 10025-2016 Прутки оловянно-фосфористой бронзы. Технические условия [текст]. – М.: Стандартиформ, 2018. – 16с.

53 ГОСТ 25347-2013. Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Ряды допусков, предельные отклонения отверстий и валов [Текст]. – М.: Стандартиформ, 2015. – 60с.

54 Справочник технолога – машиностроителя [Текст]: В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Суслова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение–1, 2001. – 944 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Чертеж детали



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Технологическая документация

Дубл.													
Взамен.													
Подл.									Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

--	--	--

02069042.02101.0M201

--	--	--

« » А.В.Липов

ПГУ 15.04.05.01.00.00 ТД

Разработчик: _____ Баландин Д.А.

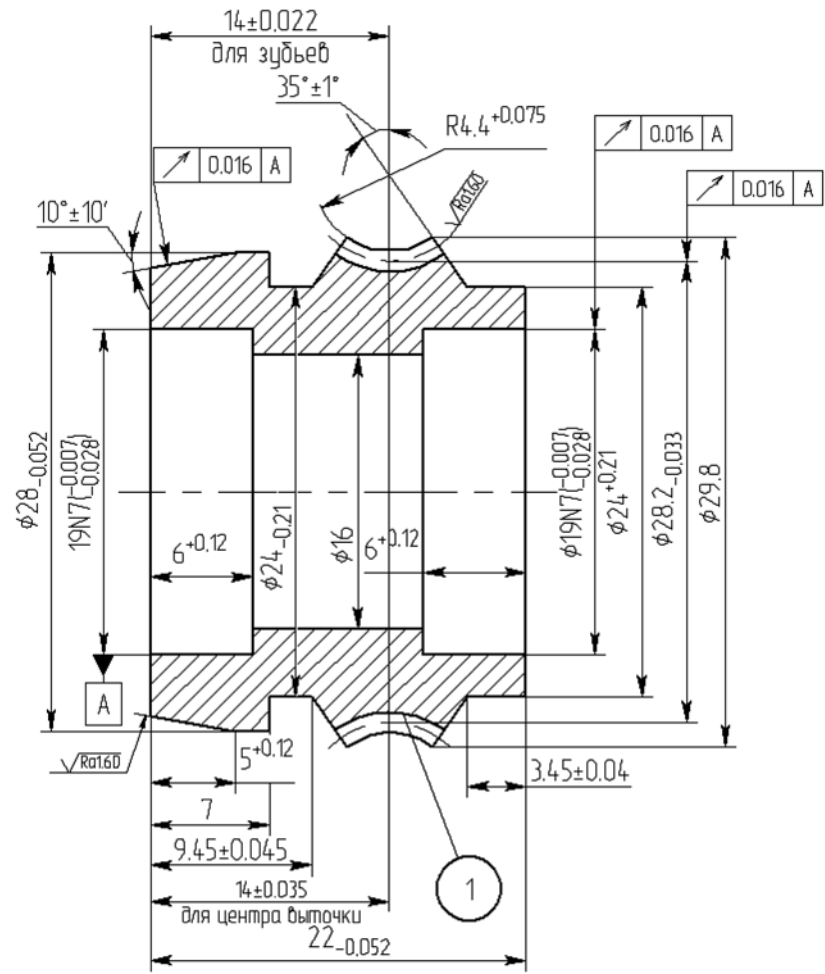
87

[illegible]

	КАРТА ЭСКИЗОВ		

Номер операції
020



Инв.№ подл.	Подп. и дата	Взам.инв.№	Инв.№ дцдл.	Подп. и дата		
КАРТА ЭСКИЗОВ						
					√ Ra 6.3 (√)	
					Номер операции 030	
						
Изм.	Лист	N докум.	Подп.	Дата	Изм.	Лист
N докум.						
Подп.						
Дата						
Н.контр.						
Лист						
90						
Листов						
1						

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

ПРИЛОЖЕНИЕ В
Статья,
опубликованная в научно-техническом сборнике

**ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ АЛМАЗОВ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ
НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ**

Д.А. Баландин, В.З. Зверовщиков, Н.А. Миронычев

**INFLUENCE OF ARRANGEMENT OF DIAMONDS IN THE BLANKET
ON OPERABILITY OF DIAMOND WHEELS**

D.A. Balandin, V.Z. Zverovshchikov, N.A. Mironychev

Аннотация. В статье приводятся результаты исследований рабочего рельефа алмазных кругов. Приводятся данные о расположении алмазных зерен в металлической связке, связи прочностных характеристик удержания зерен и сил резания, действующих на отдельное зерно. Даются практические рекомендации по режимам электроэрозионной правки.

Ключевые слова: рабочий рельеф, зерно алмаза, связка, сила резания, режимы правки, критерий вскрытия зерен, стойкость круга.

Abstract. Results of researches of a working relief of diamond wheels are given in article. Data on arrangement of diamond grains are provided in a metal linking, communication of strength characteristics of deduction of the grains and forces of cutting operating on separate grain. Practical recommendations about the modes of electroerosive editing are made.

Keywords: working relief, diamond grain, sheaf, cutting force, editing modes, criterion of opening of grains, firmness of a circle

Алмазные круги, эксплуатируемые без предварительной подготовки к работе, имеют невысокую стойкость, после чего требуется их правка.

Наибольшее распространение получили электроэрозионная и электрохимическая правка кругов на металлической связке. Благодаря меньшему влиянию на окружающую среду наибольшее применение нашла первая из них.

Однако сложность управления процессом правки и такое явление, как графитизация алмазных зерен настоятельно требуют совершенствования технологии, оснащения, аппаратуры правильного определения и оптимизации технологических режимов.



а) вид сбоку (торца)



б) наружная поверхность круга (периферия)
Размер зоны сканирования 10x10мм

Рис. 1 – Расположение алмазных зерен в металлической связке круга в состоянии поставки. Электронная фотография x10. Рамкой выделена зона исследования

Следует учесть также дополнительные проблемы, влияющие на работоспособность алмазных кругов:

- избыточное вскрытие зерен, ослабляющее их удержание в связке:

- недостаточный по высоте рабочий рельеф круга, что сокращает время его работы до очередной правки.
- искажение профиля круга из-за износа правящего электрода-инструмента.

Для проведения исследований использовался алмазный круг со следующими характеристиками 14A1 200 x 10 x 32 x 3 ACB D64 100 M1 36 м/с ГОСТ Р 53923—2010. Фотограмметрирование поверхностей круга до электроэрозионной правки приведено на рисунках 1 и 2.

По данным [1] для данной марки круга в 1см² рабочей поверхности находится 3840 зерен, которые при эффективной правке эталонными мастер-электродами позволяют выполнять обработку деталей из керамики, ситаллов, твердых сплавов с допусками на выдерживаемые размеры в пределах 0,01...0,03 мм.

Для получения повышенной точности следует использовать на финишных операциях круги меньшей зернистости.

Фотография рабочей поверхности круга после правки приведена на рисунке 2. Размер зоны сканирования 0,64x1,840 мм

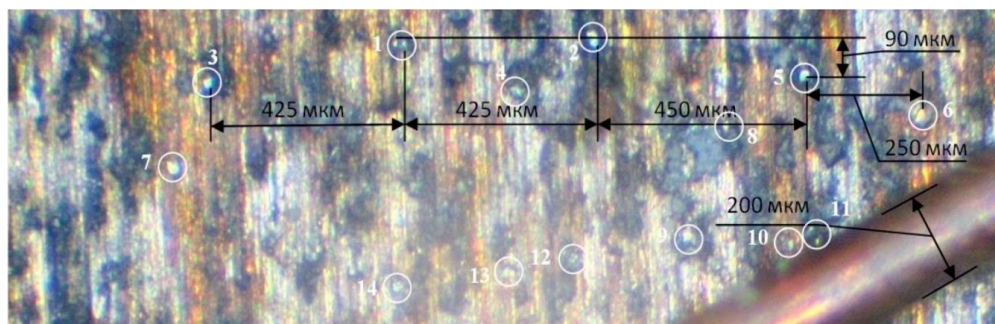


Рисунок 2 – Квазипериодичность выступающих режущих зерен после правки (по данным [2])

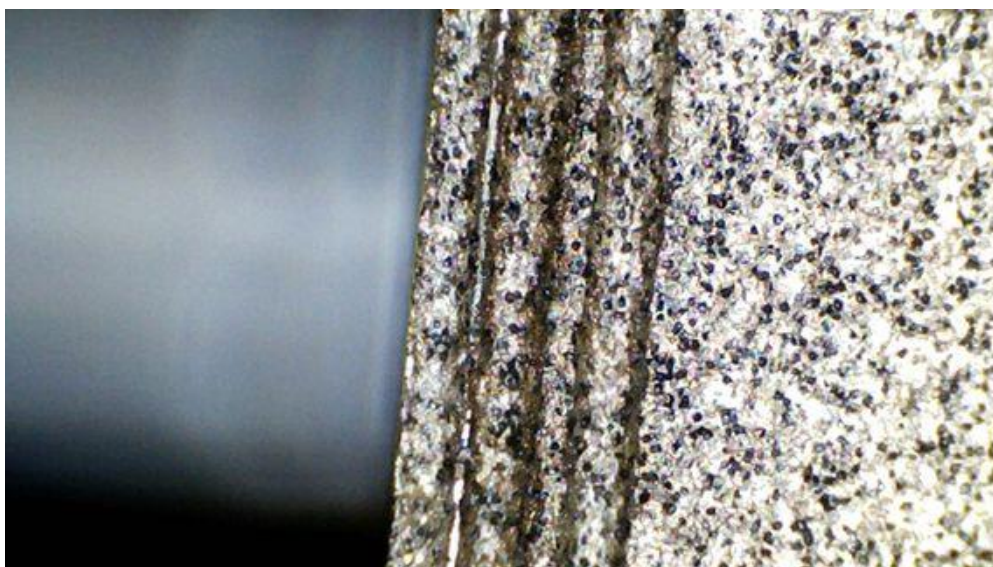


Рисунок 3 – Расположение алмазных зерен в металлической связке кругов [7]

Ранее проведенными исследованиями [3] установлено квазипериодическое расположение алмазных зерен на рабочей поверхности алмазного круга, однако визуальное изучение поверхности алмазного круга свидетельствует о

кластерном размещении зерен, что связано с особенностями технологии изготовления кругов и частично со сложностями соблюдения технологической дисциплины. Число зерен в кластере от 10 до 18. Поэтому стабилизация процесса правки возможна лишь для идеальной технологии формообразования алмазonoсного слоя, когда алмазные зерна ориентируются большой осью по радиусу круга.

При электроэрозионной правке надо учитывать квазирегулярно-кластерное расположение алмазных зерен и соответственно регулировать разряд импульсного воздействия от генератора технологических импульсов в соответствии с возникающим в момент правки результирующим сопротивлением в цепи, изменяя при этом величину тока и напряжения. Переходный процесс в момент разряда будет измеряться долями секунды, поэтому электронная схема управления должна обладать высокой степенью быстрodeйствия и позволять регулировать значения заданных параметров. Это требует создания автоматизированной системы управления процессом правки для отслеживания быстропротекающих переходных процессов в электрической разрядной цепи.

В каждом кластере происходит вскрытие алмазных зерен по мере проведения правки, чем создаются условия поддержания точностных параметров рабочего профиля с незначительными допустимыми отклонениями.

Подповерхностные слои также содержат алмазные зерна, расположенные аналогичным образом, но размещающимися по случайной закономерности. Тщательное и точное исследование характера размещения кластеров по всей толщине рабочего слоя связано с большим объемом проводимых съемок, наблюдений, измерений и подсчетов, причем влияние времени изготовления, номера партии кругов и компонентов (материала связки, технической чистоты), технологии прессования настолько сложно классифицировать, что возможность строго отследить закономерности и стабильность качества представляется лишь на предприятии-изготовителе.

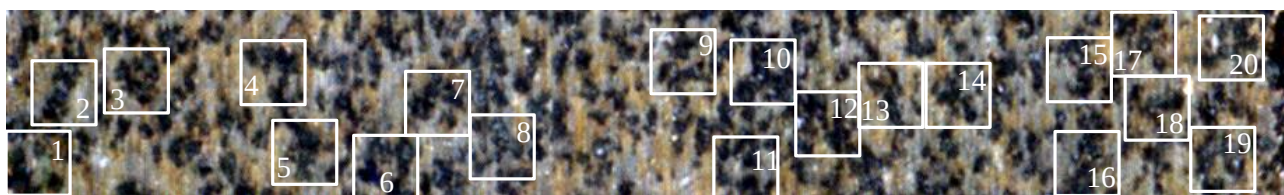


Рисунок 3 – Квазирегулярно–кластерное расположение зерен в связке

Размер кластера 500х500мкм, число зерен в кластере 10...18, размер зерен 0,1...0,125 мм

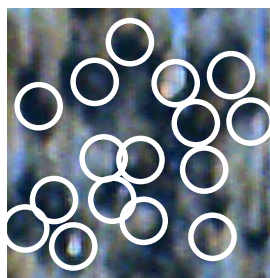


Рисунок 4 – Кластер и рабочие алмазные зерна в нем

Для исследования размещения зерен в связке круга и их численности были проведены подсчеты соотношения компонентов связки и рабочих зерен на

поверхности с применением программы анализа изображений *JmicroVision v.1.3.3* (Швейцария).

Выполненное нами приведение числа подсчитанных зерен к 1 см² поверхности круга соответствует данным работы [1] и составляет 3640...5460.

Спектральный (частотный) анализ размещения алмазных зерен на поверхности площадью 100мм² показал неоднородность их распределения в связке и разновысотность (таблица 1).

Таблица 1 - Распределение алмазных зерен на периферии круга

По кластерам	Размер зерен	Положение: перпендикулярное/параллельное, %	Выступ над поверхностью связки, мм	Расстояние между зернами в кластере, мм
1	0,1...0,125	30/50	0,02...0,06	0,01...0,06
2	0,1...0,125	30/50	0,02...0,06	0,01...0,06
3	0,1...0,125	30/50	0,02...0,06	0,01...0,06
4	0,1...0,125	30/50	0,02...0,06	0,01...0,06
5	0,1...0,125	30/50	0,02...0,06	0,01...0,06
6	0,1...0,125	30/50	0,02...0,06	0,01...0,06
7	0,1...0,125	30/50	0,02...0,06	0,01...0,06
8	0,1...0,125	30/50	0,02...0,06	0,01...0,06
9	0,1...0,125	30/50	0,02...0,06	0,01...0,06
10	0,1...0,125	30/50	0,02...0,06	0,01...0,06
11	0,1...0,125	30/50	0,02...0,06	0,01...0,06
12	0,1...0,125	30/50	0,02...0,06	0,01...0,06
13	0,1...0,125	30/50	0,02...0,06	0,01...0,06
14	0,1...0,125	30/50	0,02...0,06	0,01...0,06
15	0,1...0,125	30/50	0,02...0,06	0,01...0,06
16	0,1...0,125	30/50	0,02...0,06	0,01...0,06
17	0,1...0,125	30/50	0,02...0,06	0,01...0,06
18	0,1...0,125	30/50	0,02...0,06	0,01...0,06
19	0,1...0,125	30/50	0,02...0,06	0,01...0,06
20	0,1...0,125	30/50	0,02...0,06	0,01...0,06

Для наглядности приведем распределение по высоте выступов зерен в кластерах на площадке 500х500мкм (рисунок 5).

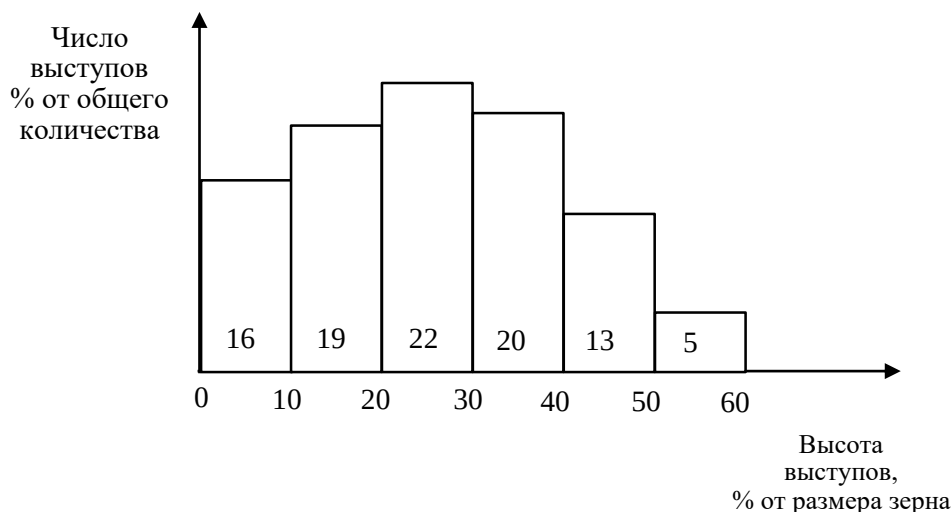


Рисунок 5 – Гистограмма распределения алмазных зерен на рабочей поверхности круга
Размещение зерен в металлической связке может быть произвольным [3] и схематично представлено на рисунке 4. Аналогичное расположение зерен установлено на основе анализа топографии поверхности круга на рисунках 1 и 2.

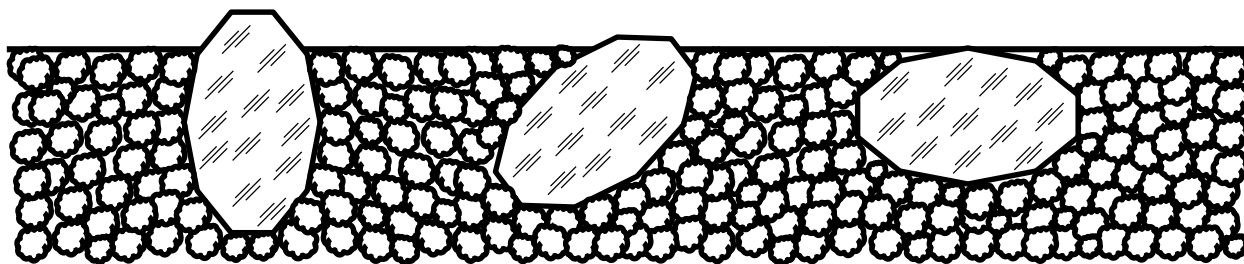


Рисунок 6 – Расположение большой оси алмазного зерна в металлической связке по отношению к поверхности

а) нормальное, б) наклонное, в) параллельное

Действующие на выступающие зерна силы резания при шлифовании стремятся повернуть и вырвать их из связки за счет изгибающего момента, однако при заглублении более, чем на 50% объема обеспечивается надежное удержание алмазных зерен связкой.

Правка круга происходит за счет удаления слоя металла при электрическом пробое с заданной частотой и скважностью [2] и сопровождается оплавлением связки и вскрытием рабочего профиля зерен. Величина съема металла связки составляет в зависимости от режимов правки от 0,01 до 0,07 мм [7], что соизмеримо в некоторых случаях с размером алмазных зерен. Поэтому число правок круга при тонком рабочем слое будет невелико.

Нормальное расположение большой оси зерна в алмазоносном слое круга считается предпочтительным, так как позволяет достичь максимального эффекта как при резании, так и с точки зрения срока службы инструмента.

При обработке сложнопрофильных поверхностей параллельное расположение алмазных зерен в связке при обработке наклонных или торцовых поверхностей деталей наиболее благоприятно сказывается на точности обработки и размерной стойкости рабочего профиля.

На основе выполненных исследований, анализа топографии и технологии электроэрозионной правки алмазных кругов можно сделать следующие выводы:

- установлено, что расположение алмазных зерен в металлической связке имеет квазирегулярное-кластерное распределение с выступом над связкой в пределах 0,2...0,5 размера большей или меньшей оси зерна.
- число зерен в кластере составляет от 10 до 18, что зависит от технологии изготовления кругов, зернистости и концентрации.
- электроэрозионная правка повышает стойкость круга и удержание зерен за счет оплавления металла связки в зоне пробоя разряда и его упрочнения.
- затупление зерен при правке приводит к повышению стойкости зерна, увеличению сил резания и температуры в зоне резания.
- кластерный характер размещения алмазных зерен свидетельствует о наличии прерывистой рабочей поверхности круга, что создает улучшенные условия протекания процесса резания и способствует достижению равномерной шероховатости на детали.

Список используемых источников

1. Бакуль, В.Н. Число зерен в одном карате - одна из важнейших характеристик алмазного порошка [Текст] / В.Н. Бакуль // Синтетические алмазы, 1976. – №4. – С. 22...27.
2. Семёнов, А.Д., Никиткин, А.С., Авдеева О.В. Определение режимов генератора технологических импульсов для электроэрозионного профилирования алмазных шлифовальных кругов. – Инженерный вестник Дона. – №2. – 2012. – С.493-500
3. Никиткин, А.С. Интенсификация и стабилизация электроэрозионного профилирования алмазных шлифовальных кругов путем автоматизированного управления режимами обработки [текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пенза, 2012. – 23с.
4. Бакуль В.Н., Никитин, Ю.И., Верник, Е.Б., Селех, В.Ф. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента [текст]: Учеб. пособие для техникумов. М., Машиностроение, 1975. – 296с.
5. Никиткин, А. С. Оптимизация технологического процесса глубинного электроэрозионного профилирования алмазных шлифовальных кругов / А. С. Никиткин, П. Н. Цибизов // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2014. – № 3 (11). – С. 132–137.
6. Соколов В.О. Комплексное обеспечение точности профильной алмазно-абразивной обработки [текст]: автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Саратов, 2000. – 32с.
7. The Art of Grinding. STUDER WireDress®. The latest generation of machine-integrated dressing technology for metal-bonded grinding wheels. Искусство шлифования. Технология проволочной электроэрозии® Штудер. Новейшее поколение машинно-интегрированной технологии правки шлифовальных кругов на металлической связке [текст] URL:

https://cdn.studer.com/fileadmin/content_live_2019/www.studer.com/01_pdf/02_flyer/englisch/flyer-studer-wiredress-en.pdf
URL:
<https://www.studer.com/en/cylindrical-grinding-machines/software-options/wiredressr/> (дата обращения 20.05.2020г.).

**Баландин
Даниил Алексеевич**
Пензенский
государственный
университет, г. Пенза,
Россия

E-mail: mrs@pnzgu.ru

**Зверовщиков Владимир
Зиновьевич**
Пензенский
государственный
университет, г. Пенза,
Россия

E-mail: tmspgu@mail.ru

**Миронычев Николай
Алексеевич**
Пензенский
государственный
университет, г. Пенза,
Россия

E-mail: minial@bk.ru

Balandin D.A.
Penza State University,
Penza, Russia

Zverovshchikov V.Z./
Penza State University,
Penza, Russia

Mironychev N.A.
Penza State University,
Penza, Russia

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
Спецификации конструкции приспособления

Первое прим.		Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
						<u>Документация</u>		
		A1			ПГЧ 15.04.05.01.00.00 СБ1	Сборочный чертёж		
Справ. №						<u>Сборочные единицы</u>		
		д/ч		1	ПГЧ 15.04.05.01.00.00 СБ1.10	Редуктор	1	
		д/ч		2	ПГЧ 15.04.05.01.00.00 СБ1.20	Суппорт	1	
		д/ч		3	ПГЧ 15.04.05.01.00.00 СБ1.30	Механизм отсчётный	1	
		д/ч		4	ПГЧ 15.04.05.01.00.00 СБ1.40	Датчик поворота	1	
		д/ч		5	ПГЧ 15.04.05.01.00.00 СБ1.50	Ванна	1	
						<u>Детали</u>		
Подпись и дата		д/ч		6	ПГЧ 15.04.05.01.00.00 СБ1/01	Основание	1	
		д/ч		7	ПГЧ 15.04.05.01.00.00 СБ1/02	Стенка передняя	1	
		д/ч		8	ПГЧ 15.04.05.01.00.00 СБ1/03	Стенка боковая	2	
		д/ч		9	ПГЧ 15.04.05.01.00.00 СБ1/04	Кожух	1	
Инв. № дубл.		д/ч		10	ПГЧ 15.04.05.01.00.00 СБ1/05	Кронштейн	1	
		д/ч		11	ПГЧ 15.04.05.01.00.00 СБ1/06	Фланец	1	
		д/ч		12	ПГЧ 15.04.05.01.00.00 СБ1/07	Стойка	4	
Взамен инв. №		д/ч		13	ПГЧ 15.04.05.01.00.00 СБ1/08	Стойка	3	
		д/ч		14	ПГЧ 15.04.05.01.00.00 СБ1/09	Колесо зубч. $m=1.5; z=20$	2	
		д/ч		15	ПГЧ 15.04.05.01.00.00 СБ1/10	Колесо зубч. $m=0.8; z=20$	1	
		д/ч		16	ПГЧ 15.04.05.01.00.00 СБ1/11	Колесо зубч. $m=0.8; z=100$	1	
Подпись и дата		д/ч		17	ПГЧ 15.04.05.01.00.00 СБ1/12	Планка	2	
		д/ч		18	ПГЧ 15.04.05.01.00.00 СБ1/13	Упор регулируемый	1	
Инв. № подл.		Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПГЧ 15.04.05.01.00.00 СП	
		Разраб.	Баландин				Устройство для электроэрозионного профилирования	
		Пров.	Миранычев					
		Н.контр.-	Большаков				Каф. «КПТО» гр. 18ММм2	
		Утв.	Липов					

Перв.примен.	Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
Справ. №	δ/ч		19	ПГУ 15.04.05.01.00.00 СБ1/14	Упор	1	
	δ/ч		20	ПГУ 15.04.05.01.00.00 СБ1/15	Штырь направляющий	2	
	δ/ч		21	ПГУ 15.04.05.01.00.00 СБ1/16	Винт специальный	1	
	δ/ч		22	ПГУ 15.04.05.01.00.00 СБ1/17	Пружина	2	
	δ/ч		23	ПГУ 15.04.05.01.00.00 СБ1/18	Втулка	1	
	δ/ч		24	ПГУ 15.04.05.01.00.00 СБ1/19	Стакан	1	
	δ/ч		25	ПГУ 15.04.05.01.00.00 СБ1/20	Втулка упорная	1	
	δ/ч		26	ПГУ 15.04.05.01.00.00 СБ1/21	Гайка	2	
	δ/ч		27	ПГУ 15.04.05.01.00.00 СБ1/22	Планка прижимная	4	
	δ/ч		28	ПГУ 15.04.05.01.00.00 СБ1/23	Диск отсчётный	1	
	δ/ч		29	ПГУ 15.04.05.01.00.00 СБ1/24	Винт специальный	1	
	δ/ч		30	ПГУ 15.04.05.01.00.00 СБ1/25	Фланец	1	
	δ/ч		31	ПГУ 15.04.05.01.00.00 СБ1/26	Оправка	1	
Подпись и дата	δ/ч		32	ПГУ 15.04.05.01.00.00 СБ1/27	Крыльчатка доработанная	1	
	δ/ч		33	ПГУ 15.04.05.01.00.00 СБ1/28	Прокладка	1	
Инв. № дубл.					Стандартные изделия		
			40		Болт М8-6дх20.36.40Х.016		
Взамен инв. №					ГОСТ 7808-70	12	
			41		Болт М6-6дх25.36.40Х.016		
					ГОСТ 7808-70	4	
			42		Болт М5-6дх16.36.40Х.016		
Подпись и дата					ГОСТ 7808-70	4	
			43		Болт М5-6дх12.36.40Х.016		
					ГОСТ 7808-70	2	
			45		Винт В.М5-6дх20.50.88.35Х.016		
					ГОСТ 1491-80	16	
ПГУ 15.04.05.01.00.00 СП							лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			2

Перв.примен.	Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
Справ. №			46		Винт В.М4-6gx12.50.88.35X.016		
					ГОСТ 14 91-80	9	
			47		Винт В.М4-6gx8.50.88.35X.016		
					ГОСТ 14 91-80	2	
			48		Винт В.М3-6gx10.50.88.35X.016		
					ГОСТ 14 91-80	14	
			49		Винт В.М3-6gx4.50.88.35X.016		
					ГОСТ 14 91-80	1	
			51		Болт М4-6gx10.36.40X.016		
					ГОСТ 14 91-80	4	
			52		Болт М3-6gx4.36.40X.016		
					ГОСТ 14 91-80	2	
Подпись и дата			54		Винт А.М4-6gx6.14H.35X.016		
					ГОСТ 14 76-93	2	
			56		Гайка М6-6H.12X.016		
Инв. № докл.					ГОСТ ISO 4035-2014	4	
			57		Гайка М5-6H.12X.016		
					ГОСТ ISO 4035-2014	3	
Взамен инв. №			58		Гайка М4-6H.12X.016		
					ГОСТ ISO 4035-2014	1	
			60		Шайба 8.65Г.016		
Подпись и дата					ГОСТ Р ИСО 10673-2017	12	
			61		Шайба 6.65Г.016		
					ГОСТ Р ИСО 10673-2017	4	
			62		Шайба 5.65Г.016		
					ГОСТ Р ИСО 10673-2017	12	
	Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПГУ 15.04.05.01.00.00 СП	
							лист
							3

Перв.примен.	Формат			Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
	Зона	Поз.					
Справ. №		63			Шайба 4.65Г.016		
					ГОСТ Р ИСО 10673-2017	8	
		64			Шайба 3.65Г.016		
					ГОСТ Р ИСО 10673-2017	4	
		66			Шпонка 4x4x10		
					ГОСТ 8790-79	2	
		67			Штифт 4g6x16.3.036		
					ГОСТ 3128-70	3	
					Готовые изделия		
Подпись и дата		70			Двигатель АИР 56В4 1081		
					n=1310мин ⁻¹ ; 120 Вт	1	
		71			Двигатель Д219-П		
					n = 6мин ⁻¹ ; 12 Вт	1	
Инв. № дубл.		72			Соединитель РШАВПБ14	1	
Взамен инв. №							
Подпись и дата							
ПГУ 15.04.05.01.00.00 СП							лист
							4
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Ведомость выпускной квалификационной работы

Первое прим.	Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Ко л.	Примечание	
	A4			ПГУ 15.04.05.01.00.00 ТЗ	Задание на проектирование			
	A4			ПГУ 15.04.05.01.00.00 ПЗ	Пояснительная записка			
Справ. №	A4			ПГУ 15.04.05.01.00.00 ТД	Технологическая документация			
	A4			ПГУ 15.04.05.01.00.00 СП	Спецификация на приспособление			
	A4			ПГУ 15.04.05.01.00.00 ВР	Ведомость ВКР			
					Документация графическая			
	A1	1		ППГУ 15.04.05.01.00.00 СХ	Классификация методов правки	1		
					алмазных кругов			
	A1	2		ПГУ 15.04.05.01.00.00 СХ	Технологические схемы	1		
					профилирования			
Подпись и дата	A1	3		ПГУ 15.04.05.01.00.00 РИ	Результат исследований профилирования	1		
	A1	4		ПГУ 15.04.05.01.00.00 РИ	Результат исследований			
	A1	5		ПГУ 15.04.05.01.00.00 СХ	Параметры электронных	1		
					Исследований			
Инв. № дубл.	A1	6		ПГУ 15.04.05.01.00.00 РИ	Результаты исследований	1		
	A1	7		ПГУ 15.04.05.01.00.00 РИ	Результаты исследований	1		
	A1	8		ПГУ 15.04.05.01.00.00 РИ	Результаты исследований	1		
Взамен инв. №	A1	9		ПГУ 15.04.05.01.00.00 СХ	Схема проведения измерений	1		
	A1	10		ПГУ 15.04.05.01.00.00 СХ	Измерительное устройство	1		
					определения съема металла			
	A1	11		ПГУ 15.04.05.01.00.00 СБ	Устройство электроэрозион-	1		
Подпись и дата					ного профилирования			
	A1	12		ПГУ 15.04.05.01.00.00 ТН	Технологические наладки	1		
	Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ПГУ 15.04.05.01.00.00 ВР		
Инв.№ подл.	Разраб.	Баландин			Ведомость выпускной квалификационной работы	Лит.	Лист	Листов
	Пров.	Миранычев				В	К	Р
	Н.контр.-	Большаков				Каф. «КПТО» гр. 18ММм2		
	Утв.	Липов						