

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

На правах рукописи

Ворожцова Наталья Андреевна

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ
КАЧЕСТВА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС НА ОСНОВЕ СОВМЕЩЕННОЙ
ОБРАБОТКИ ЗУБЬЕВ ШЛИФОВАЛЬНО-ПОЛИРОВАЛЬНЫМ
ЧЕРВЯЧНЫМ КРУГОМ**

2.5.6. Технология машиностроения

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
В.Ф. Макаров

Пермь 2022

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ, ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	14
1.1. АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ, КОНСТРУКТОРСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К АВИАЦИОННЫМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ЗУБЧАТЫМ КОЛЕСАМ.....	14
1.2. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ, ТОЧНОСТИ И УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС	22
1.3. АНАЛИЗ НАУЧНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ КАЧЕСТВА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС33	31
1.4. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	49
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ ШЛИФОВАЛЬНО-ПОЛИРОВАЛЬНЫМИ ЧЕРВЯЧНЫМИ КРУГАМИ.....	52
2.1. ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕБУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКЕ ШЛИФОВАЛЬНО-ПОЛИРОВАЛЬНЫМ ЧЕРВЯЧНЫМ КРУГОМ	54
2.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПЛОЩАДИ ПЯТНА КОНТАКТА ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ОБКАТНОМ ЗУБОШЛИФОВАНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ЧЕРВЯЧНЫМ КРУГОМ.....	56
2.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПРОФИЛЯ ЗУБЬЕВ И ПЛОЩАДЬ ПЯТНА КОНТАКТА	69
2.4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ ШЛИФОВАЛЬНО-ПОЛИРОВАЛЬНЫМ ЧЕРВЯЧНЫМ КРУГОМ.....	72
2.5. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2	74
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО РЕЖИМА СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ ШЛИФОВАЛЬНО-ПОЛИРОВАЛЬНЫМ КРУГОМ И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ, ТОЧНОСТЬ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ	75
3.1. ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	75
3.2. ВЫБОР ПРАВЯЩЕГО И РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА	77

3.3. ВЫБОР РЕЖИМОВ И УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЯ И ПРАВКИ КРУГОВ	81
3.4. ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И ПРИБОРОВ.....	83
3.5. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПЛАНИРОВАНИЯ ПОЛНОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ ЦИКЛА ЗУБОПОЛИРОВАНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ	89
3.6. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3	92
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	93
4.1. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РАДИАЛЬНОЙ И ПРОДОЛЬНОЙ ПОДАЧ ПРИ СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКЕ НА ЦИКЛЕ ПОЛИРОВАНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ...	93
4.2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ ДЛЯ ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА, ОБРАБОТАННОГО НА РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМАХ СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ С ПОЛУЧЕНИЕМ МИНИМАЛЬНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ЭВОЛЬВЕНТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ	98
4.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЗУБЬЕВ.....	100
4.4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МИКРОТВЕРДОСТИ	102
4.5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕЛИЧИНЫ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ЗУБЬЕВ	103
4.6. ОБРАБОТКА ПАРТИИ ЗАГОТОВОК ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ШЛИФОВАЛЬНО- ПОЛИРОВАЛЬНЫМ ЧЕРВЯЧНЫМ КРУГОМ	105
4.6. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ ВНЕДРЕНИЯ СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ ШЛИФОВАЛЬНО-ПОЛИРОВАЛЬНЫМ ЧЕРВЯЧНЫМ КРУГОМ	106
4.7. РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ОТ ВНЕДРЕНИЯ СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ ШЛИФОВАЛЬНО-ПОЛИРОВАЛЬНЫМ ЧЕРВЯЧНЫМ КРУГОМ	109
4.8. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	113
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ А	130

АКТ ПЕРЕДАЧИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ АО «РЕДУКТОР-ПМ».....	130
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	131
АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	131
ПРИЛОЖЕНИЕ В	132
АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ ...	132
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	133
КОНСТРУКЦИЯ ПОЛНОПРОФИЛЬНОГО АЛМАЗНОГО РОЛИКА.....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	134
КОНСТРУКЦИЯ ШЛИФОВАЛЬНО-ПОЛИРОВАЛЬНОГО ЧЕРВЯЧНОГО КРУГА.....	134

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Зубчатые колеса являются широко распространенными наукоёмкими деталями, применяемыми практически во всех отраслях машиностроения. Темпы выпуска зубчатых колес значительно увеличиваются, спрос на мировом рынке зубчатых колес постоянно растет с одновременным ростом конкуренции и требований по качеству и надежности. В настоящее время в мире выпускается несколько миллионов различных зубчатых колес [32]. Особенно высокие требования предъявляются к авиационным зубчатым колесам, применяемым в современных редукторах вертолетов.

Создание новых и модернизация существующих вертолетов типа Ми-8/17, Ми-14, Ми-24, Ми-26, Ми-28, Ми-35, Ми-38 холдинга «Вертолеты России», обладающих более высокими техническими характеристиками, в условиях конкурентной борьбы, требует повышения производительности, качества, надежности и долговечности редукторов этих вертолетов, а это определяется во многом применяемой современной технологией изготовления каждого зубчатого колеса.

Наиболее многочисленными и ответственными являются цилиндрические зубчатые колеса редукторов, которые используют для передачи значительной мощности при условиях ограничения по габаритам и массе изделия. При изготовлении цилиндрических зубчатых колес требуется обеспечить: высокую степень точности зубчатого венца 5 – 4 – 4 согласно ГОСТ 1643-81 [19], минимальную шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев $Ra \leq 0,16$ мкм, отсутствие термических прижогов и трещин, а также благоприятные параметры качества поверхностного слоя: благоприятную макро- и микроструктуру, микротвердость, сжимающие остаточные напряжения. Приведенные требования сформированы для обеспечения контактной выносливости зубьев, надежности и долговечности зубчатых колес. В условиях эксплуатации эти требования

особенно важны для обеспечения безопасности полетов, надежной работы редуктора, передающего крутящий момент на винт вертолета.

Степень разработанности темы. Точность зубчатого венца, шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев и другие параметры качества поверхностного слоя цилиндрических зубчатых колес формируются на чистовых операциях. В настоящее время применение операций зубошлифования и последующего зубохонингования, помимо значительной трудоемкости, не обеспечивает стабильно требуемые параметры точности, шероховатости и качества поверхностного слоя. Поэтому для решения проблемы предложено технологически обеспечить требуемые параметры точности и качества поверхностного слоя на основе совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом при повышении производительности. В результате анализа научно-технической литературы исследований процессов шлифования, представленных в работах В.Ф. Безъязычного, Д.И. Волкова, А.С. Калашникова, Е.П. Калинина, Е.С. Киселева, В.Ф. Макарова, В.А. Носенко, В.А. Полетаева, В.И. Свирщёва, В.К. Старкова, W. Graf, H.J. Stadtfeld, A.Türich, а также производственного опыта предприятий, установлено, что в области совмещенной обработки практически отсутствуют проведенные научные исследования и рекомендации. В связи с этим тема представленной работы является весьма актуальной.

Работа выполнена в рамках договора между АО «Редуктор-ПМ» и ФГАОУ ВО «ПНПИПУ».

Цель работы – технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя эвольвентных поверхностей зубьев и точности зубчатого венца цилиндрических зубчатых колес на основе совмещенной обработки зубьев шлифовально-полировальным червячным кругом.

Задачи исследования:

1. На основе анализа научно-технической литературы и передового производственного опыта предприятий определить наиболее рациональные пути

и методы решения проблемы чистовой обработки эвольвентных поверхностей зубьев цилиндрических зубчатых колес, обеспечивающие параметры качества эвольвентных поверхностей зубьев и повышение производительности обработки.

2. Провести теоретическое обоснование и возможность применения технологии высокоэффективного непрерывного обкатного зубошлифования путем совмещенной обработки зубьев шлифовально-полировальным червячным кругом.

3. Выполнить моделирование формирования площади пятна контакта, возникающего при непрерывном обкатном зубошлифовании эвольвентных поверхностей зубьев цилиндрических зубчатых колес червячными кругами при изменяющихся режимах резания и их влиянии на шероховатость обработанной поверхности.

4. Разработать методическое обеспечение для проведения экспериментальных исследований по установлению закономерности влияния режимов резания совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом на шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев, точность зубчатого венца, поверхностного слоя зубьев: распределение и величину остаточных напряжений, микротвердость и микроструктуру, отсутствие трещин и шлифовочных прижогов.

5. Выполнить комплекс экспериментальных исследований по определению рационального режима совмещенной обработки на цикле зубополирования, установить эмпирическую математическую зависимость влияния режимов на шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев. Выполнить сравнительные исследования параметров качества поверхностного слоя эвольвентных поверхностей зубьев, обработанных на рациональном режиме совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом, и при серийном технологическом процессе с операциями зубошлифования и зубохонингования: распределения и величины остаточных напряжений, микротвердость и микроструктуру, отсутствие трещин и шлифовочных прижогов.

6. Разработать технологические рекомендации по внедрению совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом для серийного изготовления авиационных цилиндрических зубчатых колес.

Научная новизна (паспорт специальности 2.5.6):

1. Впервые на основе моделирования и экспериментальных исследований разработан более производительный в сравнении с существующим технологический процесс совмещенной обработки цилиндрических зубчатых колес редукторов вертолетов с применением червячного шлифовально-полировального круга.

2. Установлены рациональные режимы совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом, определяющие площадь пятна контакта, что позволило обосновать распределение припуска для плавного снижения шероховатости за четыре шлифовальных и один полировальный проходы червячного круга.

3. Установлена экспериментальная математическая зависимость величины шероховатости эвольвентных поверхностей зубьев от радиальной и продольной подач червячного круга, позволяющая обеспечить требуемую величину шероховатости эвольвентных поверхностей зубьев $Ra \leq 0,16$ мкм при повышении точности профиля зубчатого венца на 1 – 2 степени.

4. Экспериментально установлено, что технологический процесс совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом на рациональных режимах резания не вызывает образования термических трещин и прижогов, позволяет сформировать благоприятные параметры качества поверхностного слоя зубьев цилиндрических колес: остаточные напряжения сжатия, требуемую величину микротвердости и микроструктуру.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в том, что установлены зависимости величины шероховатости эвольвентных поверхностей зубьев от радиальной и продольной подач червячного круга. Установлено, что распределение припуска с уменьшением радиальной подачи

уменьшает площадь пятна контакта между профилем зуба и витком червячного круга, что обеспечивает плавное бесприжоговое снижение шероховатости. Доказано, что наибольшее влияние на шероховатость эвольвентной поверхности зубьев имеет радиальная подача червячного круга. Доказано, что технологический процесс совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом на рациональных режимах резания не вызывает образования термических трещин и прижогов, позволяет сформировать благоприятные параметры качества поверхностного слоя зубьев цилиндрических колес: остаточные напряжения сжатия, требуемую величину микротвердости и микроструктуру.

Практическая значимость:

1. Установлена возможность использования результатов исследования во всех областях машиностроения при изготовлении высокоточных цилиндрических зубчатых колес, у которых требуется обеспечить шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев $Ra \leq 0,16$ мкм.

2. Разработаны и переданы на предприятие АО «Редуктор-ПМ» технологические рекомендации по внедрению совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом для серийного изготовления цилиндрических зубчатых колес с целью повышения качества и производительности.

3. Разработана конструкция и установлены параметры шлифовально-полировального червячного круга, обеспечивающего точность зубчатого венца, шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев и высокую производительность обработки.

4. Разработана конструкция и параметры правящего полнопрофильного алмазного ролика, обеспечивающие модифицированную геометрию профиля зубчатого венца без дополнительной слесарной операции полирования радиусов зубьев.

5. На АО «Редуктор-ПМ» внедрен новый технологический процесс совмещенной обработки червячным шлифовально-полировальным кругом на рациональном режиме обработки вместо серийного технологического процесса с последовательными операциями зубошлифования и зубохониногования, обеспечивающий экономический эффект более 2 миллионов рублей в год при:

1) снижении шероховатости эвольвентных поверхностей зубьев с $Ra \leq 0,16$ мкм до $Ra = 0,09$ мкм;

2) улучшении степени точности зубчатого венца в 2 раза, достигнута степень точности 1 – 1 – 1, при требуемой 5 – 4 – 4 согласно ГОСТ 1643-81. Фактически получены: накопленная погрешность шага $F_p = 4,2$ мкм и радиальное биение зубчатого венца $F_r = 3,8$ мкм определяет 1-ю степень по нормам кинематической точности. Погрешность профиля зуба $F_\alpha = 1,6$ мкм определяет 1-ю степень по нормам плавности работы. Погрешность направления зуба $F_b = 3,2$ мкм определяет 1-ю степень точности по нормам контакта. Степень точности указана согласно DIN 3962, так как ГОСТ 1643-81 определяет до 3-й степени включительно;

3) увеличении производительности финишных операций в 2,5 раза: время выполнения финишных операций уменьшилось с 64,4 до 24 минут.

4) исключении операций правки зубчатого хона снижает трудоемкость на 72,4 минуты.

6. Результаты исследований применяются в учебном процессе по дисциплинам «Технологические процессы в машиностроении», «Процессы и операции формообразования», «Резание материалов» в ФГАОУ ВО «ПНИПУ».

7. Результаты работы были использованы при выполнении Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (N FSNM-2020-0026).

Методология и методы исследований. Теоретические исследования основаны на теории шлифования, инженерии поверхности, материаловедения, основных положениях технологии машиностроения. Использовались методы

математического моделирования и планирования экспериментов. Изготовление цилиндрических зубчатых колес и образцов производилось в АО «Редуктор-ПМ» на современных станках с ЧПУ. Исследования производились в АО «Редуктор-ПМ» на координатно-измерительной машине КИМ Р-40 Klingelnberg, профилометре MarSurf M300C Mahr, оптическом микроскопе Axiovert 400MAT Zeiss, электронном сканирующем микроскопе TescanMira3 Tescan, микротвердометре MicroMet 5104 Buehler. Исследование остаточных напряжений производилось в АО «ОДК-ПМ» разрушающим способом по методу Н.Н. Давиденкова. При исследованиях применялись стандартные и вновь разработанные методики.

Для моделирования при проведении теоретических исследований использовались программные продукты Kisssoft, Siemens NX, «КОМПАС», обработка результатов и анализ экспериментальных исследований осуществлялись с Microsoft Excel, Mathcad.

Положения, выносимые на защиту:

- Разработан технологический процесс совмещенной обработки цилиндрических зубчатых колес с применением червячного шлифовально-полировального круга со ступенчатым снятием припуска за четыре шлифовальных и один полировальный проход.
- Определены рациональные режимы для каждого цикла совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом, образующегося при этом пятна контакта.
- Установлена экспериментальная математическая зависимость для прогнозирования величины шероховатости эвольвентных поверхностей зубьев от радиальной и продольной подач червячного круга.
- Разработана методика исследования качества поверхностного слоя зубьев цилиндрических зубчатых колес.
- Установлено, что технологический процесс совмещенной обработки зубьев шлифовально-полировальным червячным кругом на рациональных

режимах не вызывает образования термических трещин и прижогов, позволяет сформировать благоприятные параметры качества поверхностного слоя.

Достоверность результатов обеспечена корректной постановкой задач, применением современного экспериментального оборудования и математического аппарата с применением методов статистической оценки погрешностей измерений и результатами экспериментальных исследований.

Личный вклад. Автором лично проведен теоретический анализ, поставлена цель и сформулированы задачи диссертации, проведено теоретическое обоснование и разработка процесса совмещенной обработки, моделирование и расчет пятна контакта и формирование шероховатости, разработана комплексная методика проведения экспериментальных исследований. Осуществлен комплекс экспериментальных исследований с последующей статистической обработкой полученных результатов. Оформлены технологические рекомендации для внедрения совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом, подготовлены доклады и их защита на конференциях.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и ее результаты освещены на научно-технических конференциях различного уровня:

1. Международная научно-техническая конференция «Инновационные технологии машиностроения в транспортном комплексе», г. Калининград, 2019 г.
2. Международная научно-техническая конференция «Машиностроение и техносфера XXI века», г. Севастополь, 2019 г.
3. X Международная научно-техническая конференция «Инновации в машиностроении», г. Кемерово-Шерегеш, 2019 г.
4. Научный симпозиум технологов-машиностроителей «Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий», г. Ростов-на-Дону, 2020 г.

5. XI Международная научно-практическая конференция «Инновации в машиностроении» г. Бийск, 2020 г.

6. XXI Всероссийская научно-техническая конференция «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2020», г. Пермь, 2020 г.

7. IV Международная научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Электрофизические методы обработки в современной промышленности», г. Пермь, 2020 г.

8. Научно-техническая конференция «Станкостроение и цифровое производство» в рамках Российского промышленного форума, г. Уфа, 2021 г.

9. Научно-технический семинар технологов-машиностроителей «Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий», г. Ростов-на-Дону, 2021 г.

Публикации. Материалы диссертационного исследования представлены в 12 публикациях, из которых три статьи опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Диссертационная работа изложена на 134 страницах машинописного текста, включающего 64 рисунка, 19 таблиц и 63 формулы. Список литературы состоит из 113 источников, из которых 23 на английском языке.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ, ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Анализ эксплуатационных, конструкторских и технологических требований, предъявляемых к авиационным цилиндрическим зубчатым колесам

Цилиндрические зубчатые колеса являются распространёнными деталями, применяемыми во всех отраслях машиностроения, при производстве которых используются самые современные наукоемкие технологии. Наиболее ответственными цилиндрическими зубчатыми колесами являются сателлиты главного редуктора вертолета. Высокие требования к обеспечению качества изготовления авиационных цилиндрических зубчатых колес обусловлены необходимостью равномерного распределения нагрузки [38] при передаче высоких крутящих моментов при средних и низких частотах вращения. По сравнению с наземными установками, передающими равную мощность, авиационные передачи имеют меньшие размеры и массу. На рисунке 1.1 изображена трехмерная модель главного редуктора ВР-14, передающего (от каждого двигателя 2100 л.с.) мощность (2x1700 л.с. на номинальном режиме, 2x1900 л.с. на взлетном режиме) на винт вертолета Ми-8/17.

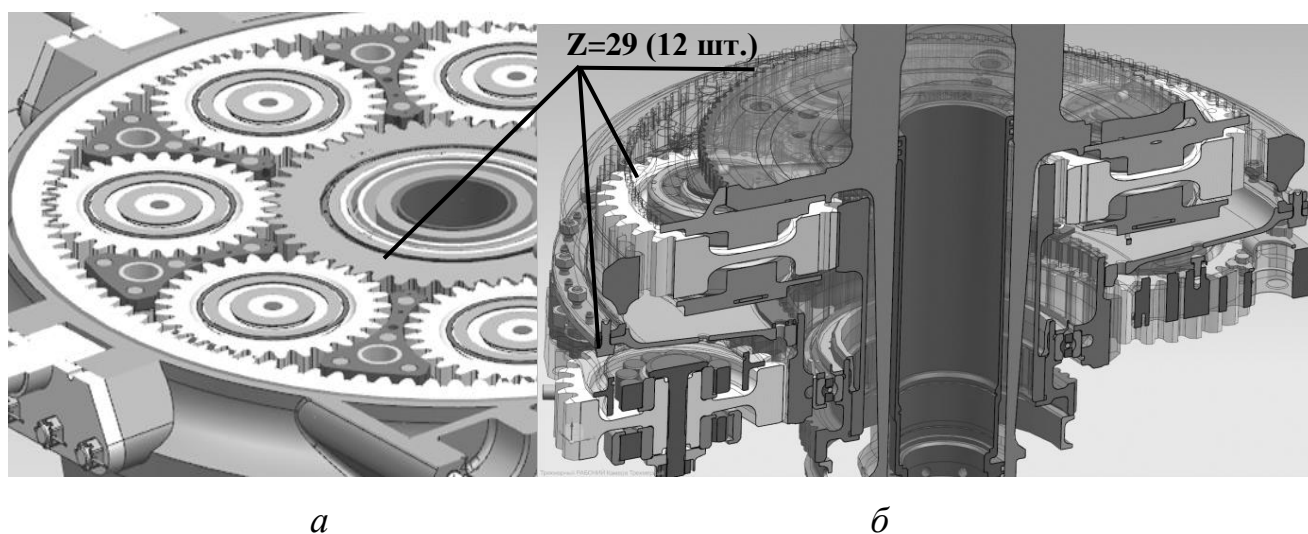


Рисунок 1.1 – Модель редуктора: *а* – продольный разрез, *б* – осевой разрез

Вертолеты семейства Ми-8/17 (рисунок 1.2) насчитывают порядка сотни модификаций, пользуются заслуженной известностью во множестве стран и обладают разными почетными званиями, благодаря своей надежности. В частности, «Самый массовый двухдвигательный вертолет в мире». Поэтому от качества изготовления каждой детали зависит работоспособность, надежность и виброактивность редукторов и в целом безопасность полетов.



а)

б)



в)

г)

Рисунок 1.2 – Вертолёты Ми-8/17 различных модификаций и назначений:

а - спасательный; *б* – военный; *в* – сельскохозяйственный; *г* – транспортный

Так, цилиндрические зубчатые колеса с числом зубьев $z=29$, модулем $m=6$, углом профиля зубьев $\alpha=28^\circ$, шириной зубчатого венца $b=48$ мм, диаметром делительной окружности $d=181,1$ мм [11] (рисунок 1.3) главного редуктора ВР-14, передающего крутящий момент на винт вертолета Ми-8/17, изготавливают согласно ГОСТ 1643-81 [19] со степенью точности 5 – 4 – 4: $F_p=25$ мкм и $F_r=25$ мкм определяют 5-ю степень по нормам кинематической точности. Погрешность профиля $F_\alpha=6$ мкм определяет 4-ю степень по нормам плавности работы. Погрешность направления $F_b=8$ мкм определяет 4-ю степень точности по нормам

контакта [12]. При этом для заданной точности на цементированных зубьях до твердости $HRC \geq 61$ необходимо обеспечить шероховатость эвольвентных поверхностей $Ra \leq 0,16$ мкм и отсутствие шлифовочных трещин и прижогов. Выполнение заданных требований обеспечивает плавность работы, контактную выносливость зубьев и, как следствие, безопасность полетов вертолета.

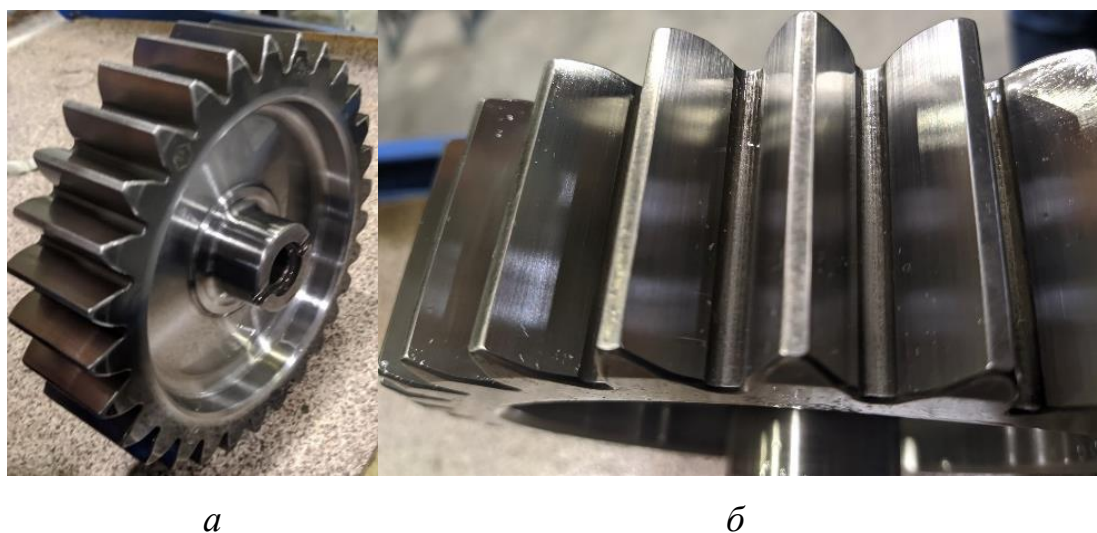


Рисунок 1.3 – Цилиндрическое зубчатое колесо: *а* – общий вид; *б* – вид сверху

ГОСТ 1643–81 [19] имеет зарубежные аналоги DIN 3962-1–78 [96], ISO 1328 [27], ANSI/AGMA 2015 [93]. В приведенных стандартах отдельные определяющие величины зафиксированы по ступеням качества. Определяющие величины погрешностей формы и расположения сгруппированы в виде семейств допусков соответственно основным функциям зубчатых зацеплений.

У рассматриваемого цилиндрического зубчатого колеса для учета характера эксплуатационных деформаций выполняют модификацию головки зуба, которая определяется глубиной фланка f_{Ko} 36...26 мкм (рисунок 1.4), при длине развернутости фланка зуба 3,3...4,0 мм.

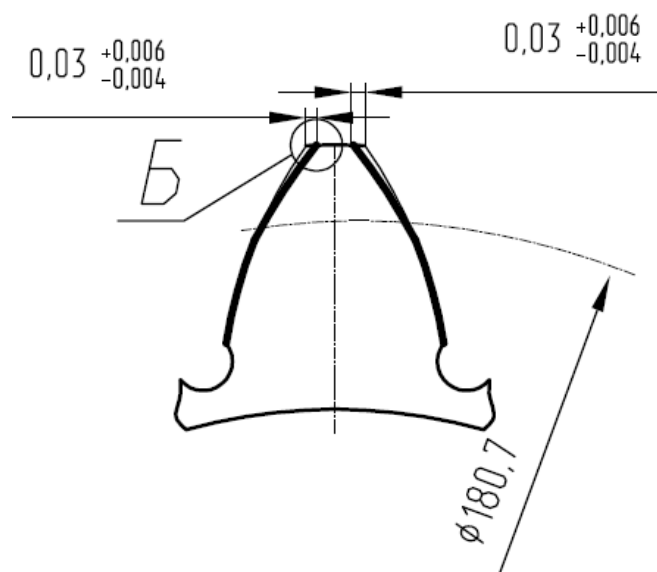


Рисунок 1.4 – Модификации профиля зуба цилиндрического зубчатого колеса

Также необходимо выдерживать допуск в 30 мкм для длины общей нормали ($81,36_{-0,03}$ мм) при изготовлении. При сборке главного редуктора допускается комплектовать цилиндрические зубчатые колеса с разностью допуска длины общей нормали в комплекте не более 18 мкм. Для обеспечения всех требований геометрической точности требуется прецизионность и надежная воспроизводимость результатов в микронном диапазоне, поэтому предъявляют очень высокие требования к технологии.

Кроме требований геометрической точности зубчатого венца необходимо обеспечить показатели качества поверхностного слоя профиля зубьев – шероховатость, остаточные напряжения, микротвердость, микро- и макроструктуру, химический состав, глубину цементации [13]. Так, шероховатость зубьев должна составлять не более $Ra \leq 0,16$ мкм. Поверхность зубчатого венца, изготавливаемого из хромоникелевольфрамовой стали 18X2H4BA-Ш (таблица 1.1), подвергается сложной химико-термической обработке на глубину 1,5 – 1,8 мм (цементация, закалка, обработка холодом), в результате которой твердость поверхностей обеспечивается не ниже $HRC \geq 61$ при твердости сердцевины $HRC \geq 31 \dots 41$.

Таблица 1.1 – Химический состав стали 18X2H4BA-Ш

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0,14...0,20	0,17...0,37	0,25...0,55	≤0,025	≤0,015	1,35...1,65	≤0,15
Ni	V	Ti	Cu	N	W	Fe
4,0...4,4	≤0,05	≤0,06	≤0,25	≤0,008	0,8...1,2	Основа

При этом строго регламентируется процентное содержание углерода в поверхностном слое, однородность, мелкозернистость структуры, глубина химико-термического слоя, механические свойства и их изотропность. После проведения чистовых операций, на которых достигаются требуемые параметры геометрической точности, необходимо производить стопроцентный контроль травлением на шлифовочные прижоги. В процессе зубошлифования под действием высоких температур происходят вторичные структурные изменения в материале, влияющие на возникновение неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений. При повышенных режимах шлифования и неблагоприятном отводе тепла СОТС величина этих напряжений по абсолютному значению может достигать значений остаточных напряжений после термообработки зубчатых колес. Происходящие микроструктурные изменения приводят к прижогам [77]. Данные требования обусловлены условиями для обеспечения контактной выносливости. Труды ученых Э.Б. Вулкакова, М.Д. Генкина, М.А. Рыжова, Н.М. Рыжова свидетельствуют, что в авиационных двигателях около 85 % зубчатых колес выходят из строя из-за контактных разрушений [3].

Контактная выносливость – это способность противостоять выкрашиванию поверхности под переменными контактными нагрузками. Определяется конструктивными и технологическими данными. Технологическое обеспечение контактной выносливости связано с формированием в поверхностном слое (5 – 15 мкм) требуемой структуры и микрогеометрии. Значимость состояния поверхностного слоя обусловлена тем, что он испытывает максимальные контактные напряжения, при этом может быть ослаблен наличием структурных и

технологических дефектов, и может являться местом для развития процесса контактной усталости.

Зарубежные и отечественные ученые в своих трудах доказали, что решающим значением для обеспечения контактной выносливости зубьев является обеспечение качества поверхностного слоя – шероховатость, благоприятные остаточные напряжения и требуемая твердость профиля зубьев [3; 5 – 8; 15 – 17; 28 – 30; 44; 46; 53; 54; 56; 58 – 61; 73; 75; 76; 79 – 81; 84 – 89; 94; 95; 97 – 113]. Исследование теплового потока при шлифовании показало, что поверхностный слой испытывает нагрев до температуры 900 – 1300°С за секунду [17; 40; 42]. Вслед за мгновенным нагревом происходит немедленное охлаждение в результате отвода теплоты. Это приводит к структурным превращениям, изменениям свойств и напряженного состояния поверхностного слоя. В зависимости от температуры, времени ее воздействия, а также обрабатываемого материала (теплостойкость) структурные изменения поверхностного слоя могут развиваться на различную глубину и представлять собой прижоги отпуска и закалки с отпуском. Наличие прижогов снижает контактную выносливость в несколько десятков раз.

Авторы [3; 5 – 8; 15 – 17; 28 – 30; 44; 46; 53; 54; 56; 58 – 61; 73; 75; 76; 79 – 81; 84 – 89; 94; 95; 97 – 113] считают, что причинами низкой контактной выносливости являются пониженная твердость поверхностного слоя и напряжения растяжения. Контактные разрушения, обусловленные наличием остаточных растягивающих напряжений на рабочих поверхностях зуба, возникают в связи с образованием структурных изменений при абразивной обработке. Установлено, что на зубьях с концентраторами напряжений начальные трещины выкрашивания материала возникают, как правило, в отпущенных зонах зуба, а развитие контактных разрушений в начальных стадиях ориентируется в направлении шлифовочных штрихов. Грубое шлифование эвольвентных поверхностей приводит и к образованию крупных отслаиваний поверхностных слоев материала. Такие контактные разрушения могут располагаться на любом участке зуба.

Приведены данные экспериментальных исследований [17] температуры зоны контакта пары зацеплений с шлифованными зубчатыми колесами (шероховатость профиля зубьев $R_a=1,0\dots1,25$ мкм) и хонингованными зубчатыми колесами (шероховатость профиля зубьев $R_a=0,32\dots0,43$ мкм). Установлено, что после приработки с маслом МС-20 шероховатость зубьев колес со шлифованными профилями составила $R_a=0,8\dots0,9$ мкм. Максимальная температура, возникающая на микронеровностях в момент удара при входе пар зубьев в зацепление со шлифованными профилями, увеличивается с 200 до 450°C при окружной скорости от 2 до 26 м/с. После приработки хонингованных зубчатых колес шероховатость практически не изменилась. Максимальная мгновенная температура для хонингованных колес составила 100 – 150°C, т.е. в 2-3 раза меньше.

В исследованиях [10; 30; 31 – 46 – 57; 71; 78 – 81; 83 – 113] отражена значимость финишной обработки. Экспериментальные исследования [111] доказали, что долговечность зубчатой передачи напрямую связана с толщиной масляной пленки и косвенно зависит от шероховатости. Рабочая поверхность зубьев с шероховатостью $R_a=0,07$ мкм не имеет повреждений микропиттингом к концу испытаний на износостойкость и выносливость, тогда как шероховатость $R_a=0,44$ мкм приводит к 79 % повреждений микропиттингом.

Исследования [106] зубчатой передачи авиационного двигателя Rolls Royce: зубчатые колеса с шероховатостью $R_a=0,087$ мкм имеют меньшие поверхностные повреждения после 2000 часов испытаний, чем зубчатые колеса с шероховатостью $R_a=0,335$ мкм после 150 часов.

В исследовании [102] сравниваются характеристики поверхности зубчатых колес, полученные в результате шлифования, хонингования и суперфиниширования цементированной стали, проведены динамические испытания с нагрузками 0,9 и 1,7 ГПа при приработке. Выявлено, что на микропиттинг наибольшее влияние оказывает шероховатость поверхности.

Микропиттинг наблюдался у шлифованных и хонингованных зубчатых колесах, у зубчатых колес после суперфинишной операции отсутствовал.

Проблемы контактной усталости становятся все более заметными в современных конструкциях зубчатых передач, в том числе зубчатой пары ветряной турбины. Износ поверхности может привести к таким видам контактного усталостного разрушения, как микропиттинг и питтинг. В работе [106] предложена модель, включающая характеристики поверхностного слоя, механические свойства и остаточные напряжения для изучения механизма контактного усталостного разрушения во время процесса износа зубчатой пары ветряной турбины. Результаты показывают, что критическая позиция повреждения перемещается глубже от приповерхностной зоны к подповерхностной во время процесса износа, указывая на то, что наиболее вероятный режим отказа постепенно изменяется от поверхностного разрушения до подповерхностного контактного разрушения.

Автор работы [110] приводит исследования Мюнхенского технического университета о влиянии шероховатости эвольвентных поверхностей зубьев на нагрузочную способность и мощность трансмиссии. Экспериментальные исследования показали, что шероховатость $R_a=0,15$ мкм после виброабразивной операции повышает нагрузочную способность зацепления приблизительно на 14 % по сравнению с шероховатостью $R_a=0,4$ мкм после операции зубошлифования. Повышение нагрузочной способности связано со снижением микропиттинга поверхности.

Проведенные исследования [36] влияния метода финишной обработки цилиндрических зубчатых колес на уровень вибраций при зацеплении выявили, что наименьшими шумовыми характеристиками обладают зацепления с зубчатыми колесами, обработанными по непрерывно-обкатному методу шлифования с созданием нерегулярной шероховатости. Испытания проводились на контрольно-обкатном станке, в них участвовали также зубчатые колеса, обработанные профильным методом зубошлифования с последующим

хонингованием, этот вид обработки ухудшил шумовые характеристики на 2 дБ. На 3 дБ ухудшение от эталонного метода обработки добавила обработка зубохонингования хоном с внутренним зацеплением.

В работе [3] доказано, что влияние поверхностного пластического деформирования на контактную выносливость менее значительно. Остаточные напряжения сжатия не оказывают на контактную выносливость такого решающего влияния, как оказывают его на выносливость при изгибе. В стандартах AGMA 912 – A04 [90] «Механизмы разрушения зубчатых колес» также отмечается, что одним из путей снижения вероятности адгезионного износа, возникающего у высоконагруженных зубчатых колес, является снижение высоты микронеровностей эвольвентных поверхностей зубьев.

На состояние поверхностного слоя зубьев большее влияние оказывают химико-термическая обработка и чистовые операции механической обработки, в ходе которых происходит пооперационное изменение характеристик качества поверхностного слоя и их передача от операции к операции. Поэтому важно на каждой из этих операций обеспечить получение оптимальных свойств контактной поверхности [93]. При этом совершенствование технологических процессов осуществлять не только с целью повышения качества, но и производительности.

1.2. Анализ проблем обеспечения шероховатости, точности и увеличения производительности обработки цилиндрических зубчатых колес

АО «Редуктор-ПМ», как и другие предприятия, изготавливающие авиационные зубчатые колеса, производит обработку по технологическому процессу, включающему такие основные операции, как зубофрезерование, цементация, зубошлифование, травление на шлифовочные прижоги, полирование кромок, зубохонингование. Для обеспечения требований точности зубчатого венца 5 – 4 – 4 согласно ГОСТ 1643-81 и шероховатости эвольвентных поверхностей зубьев $Ra \leq 0,16$ мкм по серийной технологии последовательно

выполняются две чистовые операции. Зубошлифование направлено на снятие основного припуска после химико-термической обработки и получения требуемой геометрической точности [14]. Несмотря на то, что точность обеспечивается, погрешность профиля $F_\alpha=2,8$ мкм (рисунок 1.5), шероховатость зубьев $Ra\leq 0,16$ мкм не обеспечивается [21].

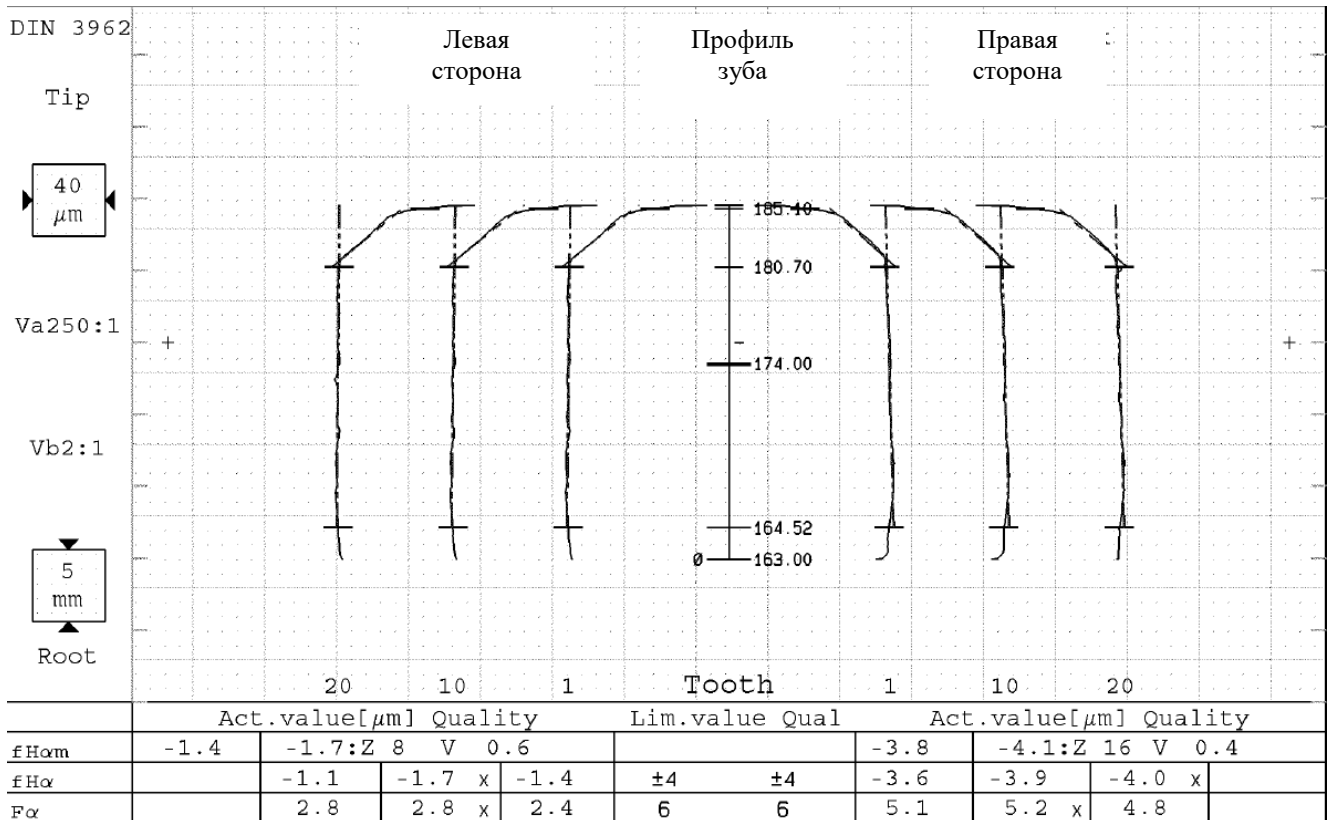


Рисунок 1.5 – Протокол измерения погрешности профиля после зубошлифования

Чтобы обеспечить требование шероховатости $Ra\leq 0,16$ мкм, выполняют операцию зубохонингования алмазным хонем [47], которая ухудшает точность – погрешность профиля зуба может достигать $F_\alpha=10,7$ мкм (рисунок 1.6).

В таблице 1.2 отражены средние значения с протоколов измерения пятидесяти зубчатых колес, изготовленных по серийному технологическому процессу [14]. Оценка результатов показывает, что зубохонингование ухудшает точность. Снижение точности связано с перезакреплением заготовки и погрешностью профиля зубчатого хона.

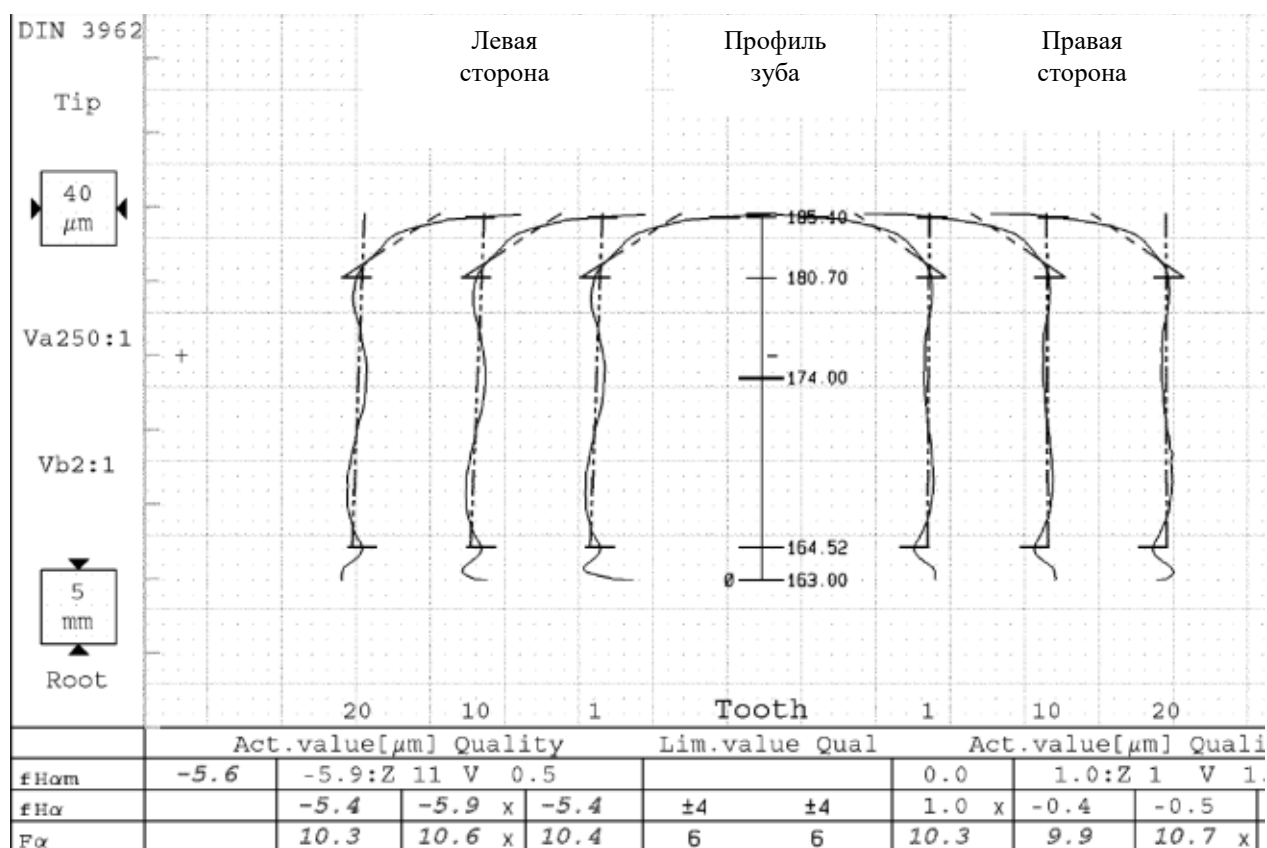


Рисунок 1.6 – Протокол измерения погрешности профиля после зубохонингования

Таблица 1.2 – Результаты измерений после финишных операций [14]

Наименование параметра	Обозначение	Значение, мкм	После зубошлифования	После зубохонингования
Нормы кинематической точности -5-				
Накопленная погрешность шага колеса	F_p	≤ 25	3,5	4,2
Радиальное биение зубчатого венца	F_r	≤ 25	4,2	5,3
Нормы плавности работы - 4-				
Погрешность профиля зуба	F_{α}	≤ 6	2,8	5,8
Отклонение шага	f_p	≤ 5	2,3	3,2
Нормы контакта зубьев - 4 -				
Погрешность направления зуба	F_b	≤ 8	4,3	4,7
Модификация головки зуба	$f_{K\alpha}$	36...26	32	39,9
Шероховатость	R_a	$\leq 0,16$	0,25	0,15

Поэтому основными проблемами серийного изготовления цилиндрического зубчатого колеса являются: низкая стабильность получения геометрической точности зубчатого венца после операции зубохонингования (рисунок 1.7) и высокая трудоемкость правки алмазного зубчатого хона для обеспечения заданной геометрической точности. Общая трудоемкость чистовых операций технологического процесса составляет 136,8 минуты, из которых зубошлифование – 19,4 минуты, операции правки алмазного зубчатого хона – 72,4 минуты, зубохонингование – 30 минут, слесарная операция полирования продольных радиусов – 15 минут.

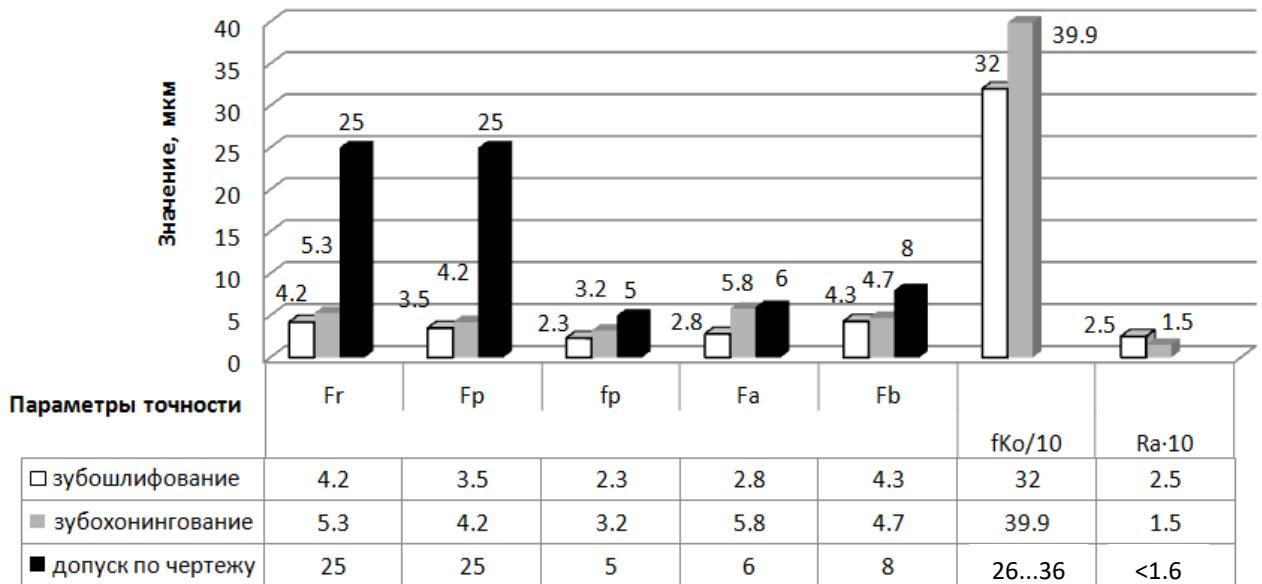


Рисунок 1.7 – Отклонения от допуска параметров точности зубчатого венца и шероховатости эвольвентных поверхностей зубьев на финишных операциях

Зубошлифование зубчатых колес производится на станке Reishauer RZ basic [12] (рисунок 1.8), в качестве технологического охлаждающего средства используется минеральное масло Dascolene 598 DB-R производителя STUART GmbH.

*а**б*

Рисунок 1.8 – станок Reishauer RZ basic: *а* – общий вид; *б* – рабочая зона

Для крепления цилиндрического зубчатого колеса применяется гидравлическое приспособление, приведенное на рисунке 1.9. Приспособление состоит из: 421471.00 – устройства зажима, 210507.13 – вращающегося центра, 339780.15 – колпака центра. Рабочее давление масла при зажиме заготовки детали составляет 12 бар. Усилие поджима верхним центром 350 Н. Приспособление устанавливается на шпиндель станка через переходной фланец, закрепление заготовок деталей происходит в начале обработки автоматически по программе. Гидравлическое приспособление обеспечивает высокую жесткость и повторяемость точности установки деталей, минимальных значений радиальных биений.

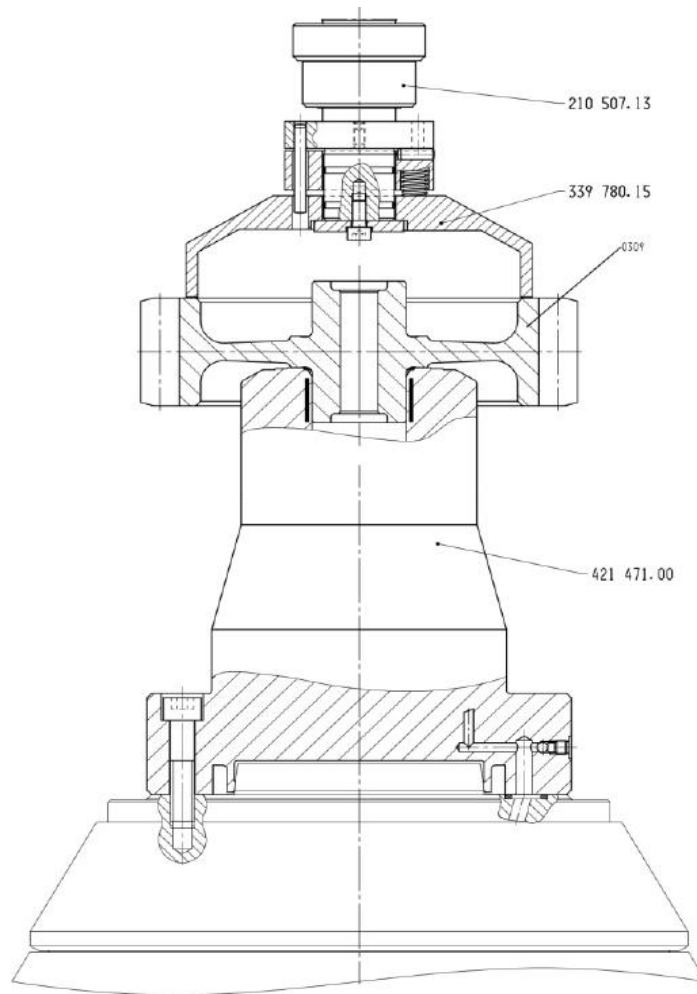


Рисунок 1.9 – Гидравлическое приспособление для зажима зубчатого колеса

Обработка производится червячным кругом Winterthur (Norton) 1_300x125x160, $m=6$, $\alpha=28^\circ$, 3GG 3NQW80J8VS3 63 m/s (рисунок 1.10).

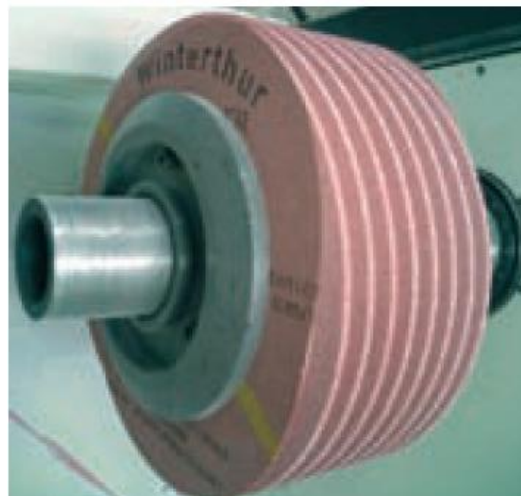


Рисунок 1.10 – Цилиндрический червячный круг производителя Winterthur

Червячный круг перед установкой на шпиндель станка Reishauer RZ basic проходит предварительную динамическую балансировку на специальном стенде (рисунок 1.11). Круг устанавливают на планшайбу и производят балансировку в двух плоскостях с помощью трех грузиков на планшайбе с допустимой неуравновешенностью массы 20...40 г (1 – 2-й классы по ГОСТ 3060). Нужно отметить, что такая динамическая балансировка на стенде является предварительной, так как шпиндель инструмента станка Reishauer RZ basic имеет встроенное балансировочное приспособление и автоматически поддерживает высокую точность балансировки посередине круга в течение всего времени обработки.

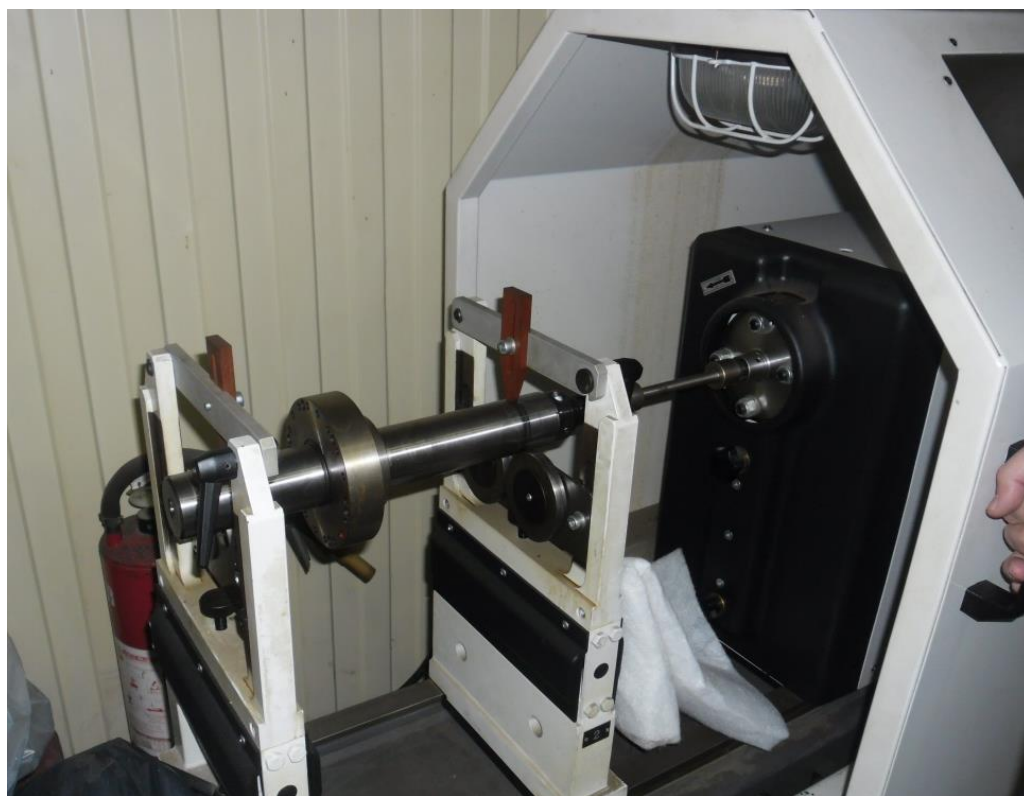


Рисунок 1.11 – Специальный балансировочный станок фирмы СЕМВ для предварительной балансировки червячных кругов вместе с планшайбой

Перед началом зубошлифования червячный круг подвергается правке алмазным роликом по схеме (рисунок 1.12). Используемый алмазный профильный ролик не формирует на червячном круге радиус ножки, поэтому

продольные радиуса зубьев обрабатываются дополнительно на операции полирования. Таким образом, трудоемкость финишных операций увеличивается на 19 минут для проведения операции полирования продольных радиусов зубьев.

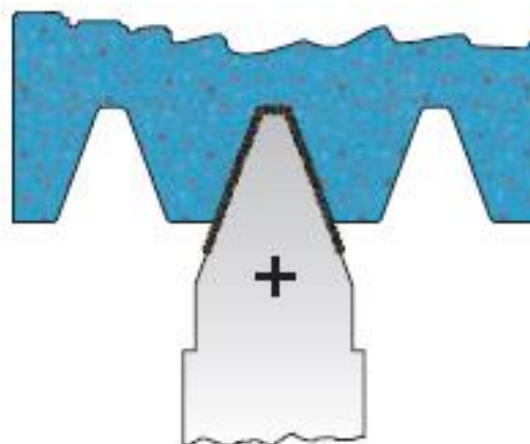


Рисунок 1.12 – Схема правки алмазным роликом

Операцию зубохонингования выполняют на станке ВСБ-138016 (рисунок 1.13, а) зубчатым алмазным хонем (рисунок 1.13, б) на режимах, указанных в таблице 1.4. На станке в качестве смазочно-охлаждающей жидкости используется смесь керосина (70 %) и индустриального масла (30 %). Алмазный эластичный зубчатый хон с модулем $m=6$, числом зубьев $z=37$, углом профиля зубьев $\alpha=28^\circ$, углом наклона линии зуба $\beta=15$ (направление линии зуба – правое), зерно АСМ 28/20 с 100%-ной концентрацией. Толщина эластичного слоя с алмазным абразивом составляет 2,5 мм. Перед зубохонингованием цилиндрического зубчатого колеса выполняют правку алмазного хона за четыре операции, общее время правки составляет 52,4 минуты. Правка зубчатого венца алмазного эластичного хона – достаточно трудоемкий процесс шлифования профиля, который выполняют на профильном зубошлифовальном станке Gleason Р600/800G за три операции и правкой хона по наружному диаметру на круглошлифовальном станке ЗУ142МВ, это позволяет улучшить точность.

*а**б*

Рисунок 1.13 – Общий вид: *а* – станка ВСБ-138016; *б* – зубчатого хона

Однако с каждой последующей заготовкой зубчатый алмазный хон изнашивается неравномерно по профилю зубьев, а погрешность его профиля возрастает, что способствует ухудшению погрешности профиля на обрабатываемом зубчатом колесе. По мере увеличения погрешности эвольвентного профиля зуба вновь возникает необходимость шлифования зубьев алмазного хона на следующий ремонтный размер. Количество таких правок зубчатого алмазного хона ограничивается 26 ремонтными размерами, т.е. каждая правка — это следующий ремонтный размер, после чего хон заменяют новым.

Таблица 1.3 – Режимы резания на операции зубохонингования

Число оборотов хона, в мин	Скорость резания, м/сек	Радиальное нагружение, Н	Осевая подача мм/об (мм/мин)	Количество двойных ходов	Время цикла, с
340...420 (3,4...4,2)	1,2...1,4	300 не более	0,32...0,48 (170...220)	4-10 до выведения черновины	60

При анализе чистовых операций серийного технологического процесса выявлены следующие проблемы:

1. Для обеспечения параметров точности и шероховатости зубьев зубчатых колес в серийном технологическом процессе применяется операция зубошлифования, которая обеспечивает точность. Для обеспечения шероховатости $Ra < 0,16$ мкм вводится операция зубохонингования.

2. Низкая стабильность получения геометрической точности зубчатого венца после операции зубохонингования требует дополнительной операции шлифования профиля зубьев хона с целью правки, что увеличивает загрузку оборудования (Gleason P600/800G), предназначенного для обработки серийных деталей.

3. Общее время выполнения финишных операций составляет 136,8 минуты, что сдерживает план производства из-за загрузки оборудования. В связи с этим требуется повышение производительности финишной обработки зубчатых колес.

4. Возникает необходимость проектирования специального зубчатого алмазного хона для каждого нового наименования зубчатого колеса, что снижает оперативность внедрения и освоения новых изделий.

5. Наличие ручной слесарной операции для полирования продольных радиусов $R=0,4$ мм зубьев требует автоматизации.

1.3. Анализ научных и практических решений по обеспечению качества и производительности обработки цилиндрических зубчатых колес

В разделе рассматриваются: методы финишной обработки цилиндрических зубчатых колес, конструкции абразивных кругов, характеристики абразивных кругов для обеспечения шероховатости зубьев $Ra < 0,16$ мкм, модели влияния технологических режимов и абразивных характеристик на величину шероховатости.

Исходными данными для выбора финишной операции являются: материал заготовки, вид его термической и химико-термической обработки, твердость, габариты и массы заготовки колеса, программа выпуска, требования к точности и шероховатости рабочей поверхности зуба [2; 22 – 26; 58; 70; 87]. В таблице 1.4 представлены методы чистовой обработки цилиндрических зубчатых колес с твердостью $HRC \geq 61$ после химико-термической обработки.

Таблица 1.4 – Методы чистовой обработки цилиндрических зубчатых колес

Принцип метода	Размеры, мм	Точность по DIN3962/63 и шероховатость, мкм	Область применения	Примечания
1	2	3	4	4
Шлифование методом обката с периодическим делением				
Прерывистое обкатное шлифование тарельчатым (двумя) кругом методом 0 или α -градусов	$m \leq 36$ $d < 4700$	Квалитет 2 $Ra \geq 0,25$ $Ra \geq 0,2$ [75; 97]	Окончательная обработка незакаленных и закаленных прецизионных зубчатых колес; производство от единичного до мелкосерийного	Изготовление зубьев практически с любыми топологическими модификациями, точечное касание между инструментом и заготовкой, низкая производительность. Станки сняты с производства. Совершенствование процесса – за счет применения алмазных кругов [2; 75; 36]
Шлифование методом обката с периодическим делением				
Прерывистое обкатное шлифование двусторонним коническим шлифовальным кругом	$m \leq 40$ $d < 4000$	Квалитет 4, в зависимости от размера зубьев $Ra \geq 0,25$	Окончательная обработка незакаленных преимущественно большого размера; производство от единичного до мелкосерийного	Возможно шлифование в двухпрофильном зацеплении с потерей качества [101]

1	2	3	4	4
Непрерывное обкатное шлифование				
Винтовое обкатное шлифование цилиндрическим червячным кругом	$m \leq 8$ $d < 800$	Квалитет 3 $Ra \geq 0,2$	Окончательная обработка незакаленных и закаленных прецизионных зубчатых колес; производство от мелко- до крупносерийного [6; 10; 39; 97; 101; 105]	Высокая точность за счет синхронизации движений инструмента и детали: совмещение движения обкатки и деления, исключая холостые ходы и реверсы. При этом устраняются погрешности изготовления и вспомогательное время. Обработка нескольких зубьев, находящихся в зацеплении. Точечное касание обуславливает низкую механико-термическую нагрузку на деталь – минимальный риск прижогов, равномерный износ круга и высокая стойкость [10]
Прерывистое профильное шлифование				
Профильное шлифование винтовым методом одним или несколькими профильными кругами [10; 97; 101; 105]	$m \leq 12$ $d < 400$ $m \leq 25$ $d < 4000$	Квалитет 3 $Ra \geq 0,25$	Окончательная обработка незакаленных и закаленных прецизионных зубчатых колес; производство от мелко- до крупносерийного	Точность зависит от геометрии инструмента. В исследовании [89] также отмечается значимость шероховатости с предварительной операции. Возникновение прижогов, погрешностей шага и профиля зубьев. Низкая производительность

1	2	3	4	4
Непрерывное профильное шлифование				
Врезное шлифование винтовым методом с помощью глобоидного червяка	$m \leq 3$ $d < 140$	Квалитет 3 $Ra \geq 0,25$	Окончательная обработка преимущественно закаленных зубчатых колес; производство от крупносерийного до массового (коробки передач легковых автомобилей)	Глобоидный червяк имеет линейных характер касания - повышается риск возникновения прижогов и производительность. Необходимость специальных инструментов для правки и обработки др. заготовок деталей [22]
Обкатное хонингование				
Метод винтового обката с помощью хона с внешними зубьями из кубического нитрида бора (с гальванической связкой) или из корунда (со связкой из искусственной смолы)	$m \leq 6$ $d < 280$	Квалитет 4. Зависит от геометрии зубчатого зацепления и точности предварительной обработки $Ra \leq 0,2$ $Ra \leq 0,05$ [2; 45]	Окончательная обработка закаленных зубчатых колес; производство крупносерийное и массовое	Зубчатыми хонами с гальванически связанным кубическим нитридом бора снимается до 0,15 мм. Скорость резания 0,5...5 м/с - механические напряжения и остаточные напряжения сжатия. Благоприятные условия создаются у головки хона, которая работает в условиях проскальзывания с опережением [49]. Низкая производительность. Хоны из электрокорунда зернистостью F/360/23, P600, P800 на эпоксидных, фенольно-формальдегидных термоактивных смолах твердостью O...S. Алмазные хоны на металлической связке из синтетических алмазов марки АСР, АСВ зернистостью 100/80...63/50

1	2	3	4	4
Обкатное хонингование				
Метод винтового обката с помощью хона с внутренними зубьями	$m \leq 8$ $d < 250$	Ухудшение точности $Ra \leq 0,2$	Окончательная обработка закаленных зубчатых колес, преимущественно для повышения качества поверхности и плавности хода; производство крупносерийное и массовое	Окончательная точность определяется качеством предварительной обработки (после зубошлифования) [2; 10; 38; 45; 71]
Доводка притиркой				
Обкатная притирка передачи в редукторе или на специальном притирочном станке спаренных колес	Широкий	Без изменения	Производство крупносерийное и массовое [2; 71]	Метод применяется исключительно для улучшения качества поверхности и плавности хода
Притирка				
Притирка с пастами [2; 3]	Широкий	Без изменения	Окончательная обработка для повышения качества поверхности и плавности хода	Снимается 20...30 мкм, исправляются погрешности основного шага и направления [3]. Производительность крайне низкая
Механическое полирование				
Полирование методом копирования на зубошлифовальных станках фетровыми и войлочными кругами. Каждая впадина обрабатывается поочередно [33]	$m \leq 12$ $d < 400$ $m \leq 25$ $d < 4000$	Без изменения	Для повышения качества поверхности и плавности хода	Выполняют также химическим, электрохимическим, электрохимико-механическим и другими способами. При электрополировании растворение металла на выступах микронеровностей идет во много раз быстрее, чем во впадинах [17]

1	2	3	4	4
Суперфиниширование				
Выполняется на специальных приспособлениях абразивным бруском, колеблющимся от электромагнита	Широкий	Без изменения	Для повышения качества поверхности [2; 17; 95]	Используют для срезания гребешков микронеровности поверхности. Низкая температура резания. Производительность крайне низкая. Бруски из электрокорунда белого, карбида кремния зеленого на керамической связке зернистостью М40...М10, а также из синтетического алмаза (АСМ и АСН) на металлической связке М1, зернистостью 40/28... 10/7, 50 и 100 % концентрации
Виброфиниширование				
Заготовки и гранулы наполнителя загружают во вращающийся барабан с вибрационным воздействием. Обработка в них осуществляется сухим и мокрым способами	Зависит от установки	Есть данные об ухудшении точности [109; 110]	Для повышения качества поверхности	Качество определяется свойствами наполнителя, его физическими характеристиками, режимами и продолжительностью обработки.

В таблице 1.5 представлена сводная таблица анализ работ отечественных и зарубежных ученых по методам финишной обработки зубьев цилиндрических зубчатых колес с твердостью $HRC \geq 61$ после химико-термической обработки по критериям: шероховатости, точности, производительности, опасности возникновения прижогов.

Таблица 1.5 – Анализ работ отечественных и зарубежных ученых

Авторы	Шероховатость	Квалитет точности	Производительность	Степень возникновения прижогов
1	2	3	4	5
Метод прерывистого обкатного шлифования: тарельчатым кругом (двумя кругами) с 0 или α -градусов или двусторонним коническим кругом				
А.В. Якимов [84 – 87], Е.П. Калинин [40 – 42], В.К. Старков [75]	Ra>0,2	3	Низкая	Средняя
Метод винтового обкатного шлифования цилиндрическим червячным кругом				
Е.П. Калинин [40 – 42], А.С. Калашников [35– 38], G. Walter [109, 110], J.F. Delavy [82], J. Cadisch, W. Thyssen, P. Schacke, R.Schwaighofer	Ra>0,2	2	Очень высокая	Очень низкий
Профильное шлифование винтовым методом одним или несколькими профильными кругами				
А.В. Якимов [84 – 87], Т. Hüsemanab [100], В. Karpuschewskiab, G. Walter [109; 110]	Ra>0,25	3	Низкая	Средняя
Прерывистое профильное шлифование профильными кругами				
А.В. Якимов [84 – 87], Т. Hüsemanab [100], В. Karpuschewski, А. Türich	Ra>0,25	3	Низкая	Высокая
Врезное шлифование винтовым методом с помощью глобоидного червяка				
А.С. Калашников [35– 38], G. Walter [109; 110], J.F. Delavy [82], А.Э. Воронов [15]	Ra>0,2	3	Высокая	Высокая

1	2	3	4	5
Метод винтового обката с помощью хона с внешними зубьями				
В.Ф Макаров [46], А.В. Курищук [45], А.С. Калашников [35 – 38]	Ra<0,16 мкм	3	Низкая	Очень низкая, но применяется только после зубошлифования
Притирка с пастами				
А.С. Калашников [35 – 38]	Ra<0,16 мкм	3	Крайне низкая [38; 39]	Низкая, но применяется только после зубошлифования
Полирование методом копирования на зубошлифовальных станках				
М.Д Генкин., М.А. Рыжов, Э.Н. Гулида [17; 29]	Ra<0,16 мкм	3	Низкая [17; 29]	Низкая, но применяется только после зубошлифования
Суперфиниширование				
А.С. Калашников [38; 39], П.Д. Дудко [30], Э.Н. Гулида [29], Н.И. Stadtfeld [105]	Ra<0,16 мкм	3	Крайне низкая	Низкая, но применяется только после зубошлифования
Виброфиниширование				
L.Winkelmann, O. El-Saeed, M. Bell [111], G. Blake, J. Reynolds [94]	Ra<0,16 мкм	3	Высокая [94; 111]	Низкая, но применяется только после зубошлифования

Анализ таблиц 1.4 и 1.5 показал, что зубошлифование является единственным производительным процессом получения зубчатых колес твердостью HRC>61. Однако процесс зубошлифования не исключает возможности получения шлифовочных прижогов, ухудшающих качественные и эксплуатационные характеристики поверхностей зубьев. Но при обкатном зубошлифовании опасность возникновения прижогов значительно снижается. В

отличие от профильного шлифования, при котором впадина закрыта шлифовальным кругом, при обкатном шлифовании смазочно-охлаждающая жидкость имеет беспрепятственный доступ к зоне резания, что снижает температурную напряженность процесса шлифования и тем самым уменьшает вероятность возникновения прижогов на зубчатом колесе. Поэтому зубошлифование методом непрерывного обката цилиндрическими червячными кругами определено как наиболее приоритетный из методов обкатного зубошлифования, так как обеспечивает 3-ю степень точности и шероховатость $Ra > 0,2$ мкм, является максимально производительным методом с минимальным риском возникновения шлифовочных прижогов. Производственные мощности АО «Редуктор-ПМ» позволяют производить обработку выбранным приоритетным методом – обкатным зубошлифованием цилиндрическим червячным кругом.

Опыт доводки авиационных двигателей до большего ресурса подтверждает высокую работоспособность зубчатых колес с шероховатостью $Ra < 0,16$ мкм. Анализ методов, проведенный в таблице 1.4, показал, что требуемую шероховатость возможно получить в большинстве случаев только на дополнительных операциях – зубохонингования, виброфиниширования и др. Однако при анализе методов, обеспечивающих шероховатость $Ra < 0,16$ мкм, в исследовании [109; 110] отмечено негативное влияние виброабразивной суперфинишной обработки на геометрические параметры точности профилей зубьев.

Зарубежными производителями, в том числе компанией Reishauer предложена конструкция шлифовально-полировального червячного круга, обеспечивающего шероховатость $Ra < 0,1$ мкм. Экспертиза Мюнхенского университета подтвердила снижение потерь общей мощности на 15 % образцов, обработанных шлифовально-полировальными червячными кругами за счет снижения трения в передаче под нагрузкой, если сравнивать с образцами, обработанными стандартным шлифовальным червячным кругом. Результат

снижения потерь общей мощности также подтвержден показанием температуры масла при работе в установившемся режиме на испытательном стенде.

Комбинированные червячные круги (рисунок 1.14) представлены на зарубежном рынке в 2016 г. как высокопроизводительная новинка у некоторых зарубежных производителей – Reishauer, Gleason, Tyrolit. Червячные круги состоят из двух частей: шлифовальной части с более крупным абразивом на керамической связке и полировальной части с мелким абразивным зерном на упругой связке [109; 110]. Характеристики полировальной части комбинированных кругов не разглашаются производителем, приобрести червячный круг возможно только с приобретением технологии. Приобретение технологии у зарубежных производителей стоит характеризуется соответствующими денежными затратами.

Добавление полировальной части на червячном шлифовальном круге открывает новые возможности для обеспечения точности и шероховатости. При демонстрации новых разработок в печати [109; 110], производители утверждают, что шлифовально-полировальным кругом возможно обеспечить шероховатость поверхности профилей зубьев $Ra < 0,1$ мкм. При этом не разглашаются: обрабатываемый материал, режимы резания, абразивные характеристики круга, получаемая степень точности зубчатого колеса, параметры качества поверхностного слоя. Круги только опробованы на зубчатых колесах автомобильной промышленности, но не внедрены в серийное производство.

Следует отметить, что идея создания шлифовального круга переменной абразивной способности в осевом направлении предложена еще в 2004 г. коллективом авторов: В.И. Свирщёв, В.К. Флегентов, В.Ф. Макаров, И.В. Подборнов. Оформлен патент RU 2240913 (13) С1 на способ бесцентрового шлифования круглых поверхностей при последовательном выполнении черновой, чистовой и отделочной операций [64]. Есть и другие российские патенты на комбинированный абразивный инструмент [61 – 67]

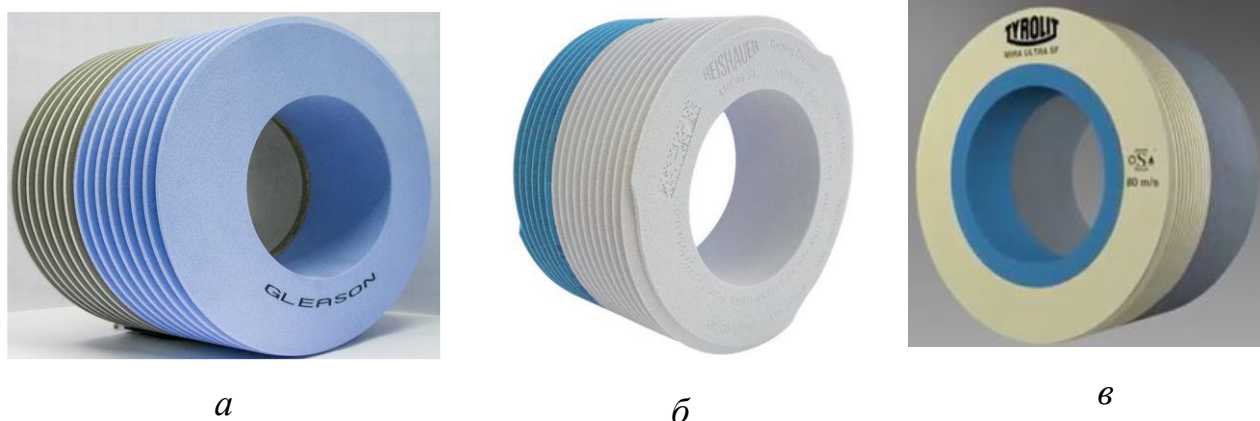


Рисунок 1.14 – Шлифовально-полировальные червячные круги производителей: *а* – Gleason, *б* – Reishauer, *в* – Tyrolit

Для внедрения технологии на авиационное производство необходимо проведение исследований параметров качества поверхностного слоя эвольвентных поверхностей зубьев – микротвердости, микроструктуры и остаточных напряжений, обработанных не по директивному технологическому процессу. И сравнение этих параметров качества поверхностного слоя с параметрами качества эвольвентных поверхностей зубьев, получаемых при серийном изготовлении по технологии зубошлифования с последующим зубохонингованием. В России и за рубежом таких исследований не проводилось. Без всестороннего исследования внедрить новую технологию и новый инструмент в авиационное производство не представляется возможным.

Для обеспечения требуемой шероховатости эвольвентных поверхностей зубьев проведен анализ литературы и опыта предприятий по влиянию характеристик абразивного инструмента на шероховатость поверхности, так как от них в значительной степени будут зависеть: качество обработанной поверхности и производительность обработки. В таблице 1.6 изложены основные принципы выбора характеристик абразивных кругов.

Таблица 1.6 – Рекомендации по выбору характеристик абразивных кругов

Рекомендации	Примечания
Материал [22; 60; 69; 75]	
<p>Определяющими свойствами – теплоустойчивость и химическая инертность к обрабатываемому материалу [73]. Для шлифования фасонных поверхностей из закалённых легированных сталей с повышенной твердостью применяют различные модификации электрокорунда, реже кубического нитрида бора и химически модифицированного электрокорунда [46]</p>	<p>Химически модифицированный электрокорунд с размерами кристалла <1 мкм (модификация белого корунда и кубического нитрида бора). Производители шлифовальных кругов модифицируют, смешивают его с белым электрокорундом, дают свое обозначение каждой смеси [10]</p>
Зернистость ГОСТ Р 52381-2005 [23]	
<ul style="list-style-type: none"> - Чем меньше модуль, тем меньше зернистость и выше твердость абразивного инструмента; - для предварительной обработки выбирают крупнозернистые мягкие круги; - для чистовой обработки мелкозернистые с повышенной твердостью; <p>для закаленных сталей с высокой степенью твердости применяют средне- и мелкозернистые круги с равномерным распределением зерен</p>	<p>F100 – F120 для Ra=0,3...0,16 мкм F180 – F400 для Ra=0,12...0,1 мкм M28 – M14 для Ra=0,1...0,08 мкм [38]</p>
Степень твердости ГОСТ Р 52587-2006 [24]	
<p>Условия выбора кругов низкой степени твердости:</p> <ul style="list-style-type: none"> - шлифовальные круги с мелким зерном; - чем меньше модуль, тем выше твердость; - обработка твердых материалов; - большая площадь контакта круга и заготовки 	<p>Является мерой прочности удержания связкой абразивных зерен. Зависит производительность и качество поверхности. Снижение твердости ограничивается скоростью износа и потерей формы</p>
Структура [30; 56; 75; 76]	
<p>Использование высокопористых кругов (8 – 9) исключает появление прижогов в сравнении с нормальной структурой (5 – 7). Высокопористые круги при шлифовании фасонных поверхностей цементированных сталей увеличивают производительность, сокращают число правок, исключают появление прижогов</p>	<p>Электрокорунд 25 мкм, 8...10 структура, твердость К и L обеспечивают шероховатость Ra=0,4...0,63 мкм, остаточные напряжения от -20 до -30 Мпа от поверхности на 0,02...0,06 мм (18X2H4BA)</p>
Связка [61; 73; 75; 76]	
<p>Связка круга влияет на работу абразивных зерен, от правильности ее выбора зависит производительность процесса, качество обработки и стойкость круга</p>	<p>Керамическая связка обеспечивает высокую стойкость, точность профиля, производительность. Для чистового шлифования закаленных сталей применяют круги на глифталевой, эпоксидно-каучуковой, вулканитовой, поливинилформалевого связках</p>

Сделав анализ таблицы 1.6, определим необходимые характеристики шлифовально-полировального круга. Шлифовальная часть: электрокорунд белый 25А, зернистостью 0,15 – 0,21 мм, весьма мягкой степени твердости G, открытой структуры 8, на керамической связке. Для полирования: электрокорунд белый 25А, мелкой зернистости 0,06 – 0,1 мм, весьма мягкой степени твердости, открытой структуры 14, на эластичной поливинилформалевой связке. Поливинилформаль не склонен к засаливанию, эластичность связки позволяет обрабатывать сложный эвольвентный профиль, получать минимальную шероховатость и зеркальную поверхность. 1_275x125x160 $m=6$ $\alpha=28^\circ$: I часть: A25 F80 G 8 V и II часть: A25 F800 I 14 P.

Кроме установления абразивных характеристик шлифовально-полировального червячного круга для обработки профиля зубьев, имеющих твердость $HRC \geq 61$ до шероховатости $Ra \leq 0,16$ мкм, необходимо изучить влияние режимов резания и выбранных характеристик на величину шероховатости. На основании теоретических и экспериментальных исследований установлено уравнение для шероховатости Rz при абразивной обработке в следующем виде [77]:

$$\begin{aligned}
 Rz = & \zeta \frac{N \frac{B}{s_{\text{пр}}} - 1}{10^3} \cdot \left\{ t - \frac{P_y}{j_{\text{тс}}} - \frac{\frac{P_y}{s_{\text{пр}}} \cdot [E_2(1-\mu_1^2) + E_1(1-\mu_2^2)]}{\pi \cdot E_1 \cdot E_2} \right. \\
 & \cdot \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot (D+d)}{q \cdot [E_2(1-\mu_1^2) + E_1(1-\mu_2^2)] + \frac{l^2(1 \pm \frac{V_D}{60V_{\text{кр}}})}{4 \cdot 10^3 \cdot D}} + \\
 & + \frac{\Delta P_y \cdot [E_2 \cdot (1-\mu_1^2) + E_1 \cdot (1-\mu_2^2)]}{\pi \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot \sqrt{(1-\frac{\lambda^2}{\omega^2})^2 + Th^2 \cdot \lambda^2}} + \\
 & \left. + \frac{(1 - \frac{\tau_{\text{сдв}}}{\sqrt{\tau_{\text{сдв}}^2 + \sigma_m^2}}) \cdot [2 \cdot s + r \cdot (\frac{\tau_{\text{сдв}}}{\sqrt{\tau_{\text{сдв}}^2 + \sigma_m^2}})]}{32} \right\}, \quad (1.1)
 \end{aligned}$$

Составляющая шероховатости поверхности, которая определяется геометрией абразивных зерен и кинематикой их движения [77]:

$$h_1 = \frac{N \frac{B}{s_{\text{пр}}} - 1}{10^3} \cdot \left\{ t - \frac{P_y}{j_{\text{ТС}}} - \frac{\frac{P_y}{s_{\text{пр}}} \cdot [E_2(1 - \mu_1^2) + E_1(1 - \mu_2^2)]}{\pi \cdot E_1 \cdot E_2} \cdot \ln \frac{2 \cdot \pi \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot (D + d)}{q \cdot [E_2(1 - \mu_1^2) + E_1(1 - \mu_2^2)]} + \frac{l^2 (1 \pm \frac{V_D}{60 V_{\text{кр}}})}{4 \cdot 10^3 \cdot D} \right\}, \quad (1.2)$$

Где ζ – коэффициент концентрации зерен; N – число проходов; B – ширина шлифовального круга; $s_{\text{пр}}$ – продольная подача; t – глубина; P_y – нормальная составляющая силы резания; $j_{\text{ТС}}$ – жесткость технологической системы; E_1, μ_1 и E_2, μ_2 – модуль упругости и коэффициент Пуассона связки круга и заготовки; q – нагрузка на единицу длины активной линии контакта [77]:

$$q = \frac{P_y}{s_{\text{пр}}}, \quad (1.3)$$

D, d – диаметр круга и детали; V_D – скорость детали, м/мин; $V_{\text{кр}}$ – скорость круга, м/с; l – средний шаг между зернами инструмента; \pm наружное (+наружное) шлифование.

Составляющая шероховатости от упругих колебаний зерен от разности сил [77]:

$$h_2 = \frac{\Delta P_y \cdot [E_2 \cdot (1 - \mu_1^2) + E_1 \cdot (1 - \mu_2^2)]}{\pi \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot \sqrt{(1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2})^2 + T_h^2 \cdot \lambda^2}}, \quad (1.4)$$

где λ – частота возмущающей силы; T_h – постоянная времени демпфирования; t – глубина резания; ΔP_y – разность действующих сил [77]:

$$\Delta P_y = \frac{6 \cdot c_{py} \cdot t^x \cdot P_y \cdot V_D^y \cdot P_y \cdot V_{\text{кр}}^z \cdot P_y \cdot \prod_{i=1}^m k_{yi}}{\frac{\beta}{\alpha^{3/4}} \cdot \sqrt{tgy} \cdot x^2 \cdot \sqrt{1 - \varepsilon} \cdot \sqrt{\frac{\omega}{1000}}}, \quad (1.5)$$

Где $c_{py}, x_{py}, y_{py}, z_{py}, k_{py}, \beta, k$ – коэффициенты; x – средняя величина зерна; ω – удельная производительность; α – коэффициент формы зерна.

Составляющая шероховатости h_3 от деформации обрабатываемого материала при контакте с абразивным зерном [77]

$$h_3 = \frac{(1 - \frac{\tau_{сдв}}{\tau_{сдв}^2 + \sigma_m^2}) \cdot [2 \cdot s + r \cdot (\frac{\tau_{сдв}}{\sqrt{\tau_{сдв}^2 + \sigma_m^2}})]}{32}, \quad (1.6)$$

где r – средний радиус зерен, σ_m – предел текучести обрабатываемого материала, $\tau_{сдв}$ – прочность обрабатываемого материала, s – средний шаг неровностей.

Связь параметров шероховатости Rz и Ra установлена в виде:

$$Ra = 0,18 \cdot Rz, \quad (1.7)$$

Уравнение (1.1) позволяет определить минимальную шероховатость при абразивной обработке. При большом числе проходов уравнение (1.2) и (1.4) можно принять равными нулю. Тогда шероховатость определяется уравнением (1.6). Формула (1.1) является теоретической и не имеет ограничений, однако эмпирические уравнения более точно раскрывают процесс в конкретных условиях. В таблице 1.7 приводятся экспериментальные уравнения, полученные для различных технологических методов абразивной обработки.

Таблица 1.7 – Экспериментальные формулы определения шероховатости

Условия обработки	Формула	Параметры
А.Г. Суслов, А.М. Дальский [77]		
Зубошлифование 18ХГТ HRC=61 на станке мод.5831	1. Круг 24 А25СМ (К5): Ra=1,44 мкм при $t=0,1$ мм, Ra=0,74 мкм при $t=0,02$ мм. 2. Круг КРС 160/125 (Б11): Ra=1,3 мкм при $t=0,1$ мм, Ra=0,9 мкм при $t=0,02$ мм. 3. Круг КРС 160/125 (М11): Ra=1,81 мкм при $t=0,1$ мм, Ra=1,23 мкм при $t=0,02$ мм 3. Круг ГАС 250/200 (Б11): Ra=1,6 мкм при $t=0,1$ мм, Ra=0,95 мкм при $t=0,02$ мм	Скорость резания $V=30$ м/с, скорость обката $S_0=52$ мм/мин, продольная подача $n=140$ дв.ход/мин, глубина t

Условия обработки	Формула	Параметры
А.Г. Суслов, А.М. Дальский [77]		
Чистовое шлифование плоской поверхности (сталь ШХ15)	$Ra = 0,27 \cdot \frac{z^{0.48} \cdot v_{ст}^{0.27} \cdot S_{поп}}{n^{0.1}} \quad (1.8)$	z – зернистость круга (46...100); $V_{см}$ – скорость перемещения стола станка (0,021... 0,017 м/с); $S_{поп}$ – поперечная подача стола (3...6 мм/ход); t – глубина шлифования (0,01...0,04); n – число выхаживаний (1...5)
	$Ra = 0,28 \cdot \frac{z^{0.46} \cdot v_{ст}^{0.34} \cdot S_{поп} \cdot t^{0.12}}{n^{0.13}} \quad (1.9)$	
Общая формула отделочного шлифования плоских поверхностей абразивными и алмазными кругами	$y_i = b^c \cdot k_0 \cdot z^{k1} \cdot v_{ст}^{k2} \cdot s^{k3} \cdot t^{k4} \quad (1.10)$	b - характеризует твердость связки, если твердость С2, то $b=2$, если СМ2, то $b=1$. Уравнение адекватно описывает процесс шлифования при $z=46...100$; $V_{см}=0,021... 0,017$ м/с; $S_{поп}=3...6$ мм/ход; $t=0,01...0,04$ мм
Для 20Х (HRC54-60) абразивным кругом	$Ra = b^{-0.42} \cdot 0,01 \cdot z^{0.46} \cdot v_{ст}^{0.1} \cdot s^{0.54} \cdot t^{-0.07} \quad (1.11)$	
Для 20Х (HRC54-60) алмазным кругом	$Ra = b^0 \cdot 0,07 \cdot z^{1,08} \cdot v_{ст}^{0.21} \cdot s^{0.4} \cdot t^{-0.15} \quad (1.12)$	
12ХН3А (HRC60-64) абразивным кругом	$Ra = b^{0,16} \cdot 0,17 \cdot z^{0,08} \cdot v_{ст}^{0,27} \cdot s^{0,17} \cdot t^{0,06} \quad (1.13)$	
12ХН3А (HRC60-64) алмазным кругом	$Ra = b^0 \cdot 0,15 \cdot z^{0,01} \cdot v_{ст}^{0,01} \cdot s^{0,01} \cdot t^{-0,01} \quad (1.14)$	
Шлифование наружных цилиндрических поверхностей (сталь 40Х HRC30)	$y_i = k_0 \cdot v^{k1} \cdot s_{пр}^{k2} \cdot s_{рад}^{k3} \cdot n^{k4} \cdot H^{k5} \cdot z^{k6} \cdot j_{ст}^{k7} \quad (1.15)$	Окружная скорость детали V от 0,33 до 0,83 м/с; продольная подача в долях ширины круга $S_{пр}$ от 0,3 до 0,8В; радиальная подача $S_{рад}$ от 0,01 до 0,05 мм/дв.ход; число выхаживаний n от 5 до 10. твердость круга H – от К до L. зернистость z от 16 до 40; статическая жесткость $j_{см}$ станка от 9,8 до 29,4 мН/м.
	$Ra = 0,47 \cdot v^{-0.06} \cdot s_{пр}^{0.36} \cdot s_{рад}^{-0.009} \cdot n^{-0.024} \cdot H^{0.29} \cdot z^{0.08} \cdot j_{ст}^{0.34} \quad (1.16)$	

Условия обработки	Формула	Параметры
А.Г. Суслов, А.М. Дальский [77]		
<p>Внутреннее шлифование стали 40X HRC30-35</p>	$Ra = 9,25 \cdot S_{\text{пр}}^{0,39} \cdot S_{\text{рад}}^{0,05} \cdot n^{0,012} z^{0,06} \cdot v^{-0,23} \cdot H^{-0,04} \cdot j_{\text{СТ}}^{0,98}, \quad (1.17)$	<p>n - число выхаживаний (1...5); H - твердость круга (для стали $H=5$); $j_{\text{СТ}}$ - жесткость станка (7,84...2,4 кН/мм)</p>
<p>Алмазное суперфиниширование наружных цилиндрических поверхностей после предварительной термообработки ТВЧ и прерывистого шлифования (сталь 45 и 40X)</p>	$Ra = \frac{S_{\text{рад1}}^{0,19} \cdot S_{\text{рад2}}^{0,05} \cdot z_{\text{б}}^{0,58} \cdot p_{\text{б}}^{0,22}}{k_{\text{м}} \cdot k_{\text{с}} \cdot (HRC_{\text{э}})^{4,02} \cdot N_1^{0,24} \cdot N_2^{0,24} \cdot t_{0,32} \cdot n_{\text{б}}^{0,29} \cdot n_3^{0,29}} \quad (1.18)$	<p>$S_{\text{рад1}}$ – радиальная подача при получистовом шлифовании (0,065...0,015 мм/об); $S_{\text{рад2}}$ – радиальная подача при чистовом шлифовании (0,03 ... 0,013 мм/об); $z_{\text{б}}$ - зернистость алмазного бруска АСМ (20...40); $p_{\text{б}}$ – давление бруска (200 ... 500 кПа); $HRC_{\text{э}}$ – твердость обрабатываемого материала (HRC 48 ... 60); N_1 и N_2 – число впадин прерывистого круга при получистом и чистовом шлифовании (12...13); t – припуск на суперфиниш (5...35 мкм); $n_{\text{б}}$ – скорость осцилляции бруска (17...30 Гц); n_3 – скорость вращения заготовки (0,63...3,17 об/с); $k_{\text{м}}$ – коэффициент, материала: для стали 45 $k_{\text{м}}=1,93$; для стали 40X $k_{\text{м}}=1,39$; $k_{\text{с}}$ – коэффициент подачи СОТС при суперфинишировании: $k_{\text{с}}=1,23$ для подачи СОТС поливом.</p>
<p>Полирование конечными лентами наружных цилиндрических поверхностей</p>	$Ra = k_0 \cdot \frac{Ra_{\text{исх}}^{k_1} \cdot z^{k_2}}{p^{k_3} \cdot v^{k_4} \cdot T^{k_5}}, \quad (1.19)$	<p>$Ra_{\text{исх}}$ – исходное значение среднего арифметического отклонения профиля шероховатости поверхности (0,32...0,80 мкм); z – зернистость (63/50...80/63); p – давление (98/588кПа); v – окружная скорость детали (0,17...0,61 м/с); T – время (25...60 с)</p>

Условия обработки	Формула	Параметры
В.Ф. Макаров [46]		
Полирование лопаток титановых сплавов бесконечными лентами	$Ra = 5.38 \cdot \left[\frac{p^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 \pm \frac{R_{пол}}{R_{дет}}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot H}{D_p^{\frac{1}{3}} \cdot \left[4 \cdot V_k^2 \cdot H \cdot (2R_{пол})^{\frac{1}{3}} + P_y^{\frac{4}{3}} \cdot \left(1 \pm \frac{R_{пол}}{R_{дет}}\right)^{\frac{5}{3}} \right]} \right] - 0.11 \cdot d_3$ <p style="text-align: center;">(1.20)</p>	Модуль упругости контактного ролика
А.А. Спиридонов [74]		
Хонингование	$Ra = c \cdot V_o^\alpha \cdot V_n^\beta \cdot P_y^\gamma \quad (1.21)$	V_o – окружная скорость, V_n – скорости возвратно-поступательного движения, P – давление
Зубошлифование	$Ra = c \cdot V_k^\alpha \cdot t^\beta \cdot S_e^\gamma \quad (1.22)$	V_k – скорость круга (м/с), t – радиальная подача (мм/ход), S_e – вертикальная подача (мм/об дет)
Н.Н. Попок [55]		
Зубошлифование	$Ra = 0,25 + 0,158 \cdot V_k + 0,088 \cdot t + 0,0504 \cdot S_e + 0,152 \cdot V_k \cdot t + 0,114 \cdot V_k \cdot S_e \quad (1.23)$	

В результате анализа теоретических и экспериментальных исследований установлено, что при абразивной обработке на шероховатость оказывают влияние: режимы резания, а именно подача, глубина, число проходов; абразивные характеристики; жесткость технологической системы, обрабатываемый материал и др. При обработке без многочисленных проходов на итоговую шероховатость также влияет исходная шероховатость. Установлены такие зависимости вышеперечисленных параметров на величину шероховатости:

- 1) шероховатость меньше, чем меньше зерно, чем больше его радиус закругления и чем больше концентрация;
- 2) шероховатость меньше, чем больше скорость резания;
- 3) шероховатость меньше, чем меньше подачи;

Уменьшению шероховатости также способствует применение верно подобранных смазывающе-охлаждающих технологических средств и методов их подачи. Так, в работе [88] ученые пришли к выводу, что использование различных методов охлаждения изменяет шероховатость за счет изменения износа абразивного круга.

1.4. Выводы по главе 1. Цель и задачи исследования

1. На основе анализа конструкторско-технологических требований, нормативной документации, научной литературы установлено, что обеспечение шероховатости $Ra \leq 0,16$ мкм эвольвентных поверхностей цилиндрических зубчатых колес является одним из способов повышения надежности (контактной выносливости) и долговечности зубчатой передачи.

2. На основе анализа серийного технологического процесса установлено, что дополнительная операция зубохонингования после зубошлифования не является рациональной, так как существенно увеличивает трудоемкость, не обеспечивает стабильного качества, снижает точность обработки, требует специального инструмента.

3. Среди рассмотренных методов чистовой обработки зубчатых колес предложена совмещенная обработка шлифовально-полировальным червячным кругом, которая позволяет обеспечить шероховатость, точность и производительность (сокращение трудоемкости в 1,5 – 2 раза).

4. Предложенная совмещенная обработка шлифовально-полировальным червячным кругом по сравнению с другими суперфинишными операциями, исключает негативное воздействие на эвольвенту зуба, как после вибрационного финиширования, не ухудшает точность, как от зубохонингования, не требует дополнительного оборудования, времени на переустановку деталей и т.д.

5. Для зубошлифования цементированных сталей рекомендуется использовать электрокорунд белый 25А, зернистостью 0,15 – 0,21 мм, весьма

мягкой степени твердости G, открытой структуры 8, на керамической связке. Для полирования электрокорунд белый 25А, мелкой зернистости 0,06 – 0,1 мм, мягкой степени твердости, структура – открытая 14, связка – вспененный поливинилформаль.

6. Возможности использования шлифовально-полировальных кругов представлены производителями в последнее время, но не проведены фундаментальные исследования, в научной литературе отсутствует информация о режимах обработки и получаемом качестве поверхностного слоя.

Поэтому задача технологического обеспечения шероховатости и точности, повышения производительности при совмещенной обработке шлифовально-полировальным червячным кругом и назначения рациональных режимов является актуальной.

Цель работы – технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя эвольвентных поверхностей зубьев и точности зубчатого венца цилиндрических зубчатых колес на основе совмещенной обработки зубьев шлифовально-полировальным червячным кругом.

Для выполнения цели поставлены **задачи исследования:**

1. На основе анализа научно-технической литературы и передового производственного опыта предприятий определить наиболее рациональные пути и методы решения проблемы чистовой обработки эвольвентных поверхностей зубьев цилиндрических зубчатых колес, обеспечивающие параметры качества эвольвентных поверхностей зубьев и повышение производительности обработки.

2. Провести теоретическое обоснование и возможность применения технологии высокоэффективного непрерывного обкатного зубошлифования путем совмещенной обработки зубьев шлифовально-полировальным червячным кругом.

3. Выполнить моделирование формирования площади пятна контакта, возникающего при непрерывном обкатном зубошлифовании эвольвентных поверхностей зубьев цилиндрических зубчатых колес червячными кругами при

изменяющихся режимах резания и их влиянии на шероховатость обработанной поверхности.

4. Разработать методическое обеспечение для проведения экспериментальных исследований по установлению закономерности влияния режимов резания совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом на шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев, точность зубчатого венца, поверхностного слоя зубьев: распределение и величину остаточных напряжений, микротвердость и микроструктуру, отсутствие трещин и шлифовочных прижогов.

5. Выполнить комплекс экспериментальных исследований по определению рационального режима совмещенной обработки на цикле зубополирования, установить эмпирическую математическую зависимость влияния режимов на шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев. Выполнить сравнительные исследования параметров качества поверхностного слоя эвольвентных поверхностей зубьев, обработанных на рациональном режиме совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом, и при серийном технологическом процессе с операциями зубошлифования и зубохонингования: распределения и величины остаточных напряжений, микротвердость и микроструктуру, отсутствие трещин и шлифовочных прижогов.

6. Разработать технологические рекомендации по внедрению совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом для серийного изготовления авиационных цилиндрических зубчатых колес.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ ШЛИФОВАЛЬНО-ПОЛИРОВАЛЬНЫМИ ЧЕРВЯЧНЫМИ КРУГАМИ

Современная теория шлифования построена на фундаментальных работах П.Е. Дьяченко, Е.Н. Маслова, С.А. Попова, В.И. Островского и других уважаемых исследователей [53]. Решением теоретических и прикладных задач шлифования занимались такие ученые, как А.А. Аршанский, В.Ф. Безъязычный, С.Г. Бишутин, Б.М. Бржозовский, Д.И. Волков, В.Г. Гусев, Д.Г. Евсеев, О.В. Захаров, Ю.М. Зубарев, Е.С. Киселев, А.М. Козлов, И.И. Колтунов, А.В. Королёв, З.И. Кремень, А.М. Кузнецов, В.Ф. Макаров, Л.Л. Мишнаевский, Ю.К. Новоселов., В.А. Носенко, В.А. Полетаев, В.Л. Романов, В.И. Свирщёв, Ю.С. Степанов и др. Абразивная обработка поверхностей сложного профиля, в том числе и эвольвентных поверхностей, представлена в работах А.С. Калашников, Е.П. Калинина, В.К. Старкова, А.В. Якимова, W. Graf, H.J. Stadtfeld, A.Türich и др. Оценка качества поверхности и влияние ее на долговечность проведены А.М. Сулимой, А.Г. Сусловым, А.М. Дальским, В.Ф. Безъязычным, П.И. Ящерицыным.

Выдвинута гипотеза: обеспечение шероховатости $Ra \leq 0,16$ мкм, повышение точности и производительности возможно путем разработки нового технологического процесса совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом. Теоретически обосновывается ступенчатое снятие припуска, изменение площади пятна контакта в зависимости от режимов резания на каждом цикле для получения требуемой шероховатости эвольвентных поверхностей $Ra \leq 0,16$ мкм.

Исходя из проведенного анализа в первой главе, можно заключить, что для чистовой обработки зубьев цилиндрических колес все чаще применяются методы шлифования, во многих случаях представляющие собой компромисс между производственными расходами и постоянно растущими требованиями к эксплуатационным характеристикам, из которых следует упомянуть:

1) высокие прочностные характеристики в отношении износа и поломки зубьев, обеспечиваемые процессами химико-термической обработки, в частности цементацией;

2) высокую кинематическую точность, минимальные погрешности изготовления и искажения формы зубьев, которые достигаются преимущественно с помощью непрерывно работающих методов и модифицированной формы зубьев;

3) высокую плавность хода, незначительный уровень шума, достигаемые наряду с другими условиями высокой точности.

Методы непрерывного шлифования для зубьев цилиндрических колес наиболее удачным образом сочетают в себе высокую производительность и точность в связи с тем, что:

1) окончательная обработка зубьев не прерывается процессом прерывистого деления, поэтому ограничиваются или устраняются погрешности изготовления и показатели вспомогательного времени;

2) низкая механико-термическая нагрузка на шлифовальный круг и заготовку ведет к незначительному износу инструмента и высокой стойкости червячного шлифовального круга, а также к уменьшению нежелательного воздействия температурного фактора на поверхностный слой зубьев колеса;

3) практически любую модификацию профиля зуба можно воспроизвести в профиле червячного круга и перенести на заготовку благодаря соответствующей автоматической связи между червячным шлифовальным кругом и зубчатым зацеплением и хорошо проработанными технологиями правки, их можно реализовать без затрат.

Зубчатые колеса при малом объеме производства и значительной номенклатуре, как, например, в области редукторостроения, требуют методов, обладающих высокой гибкостью, а также инструмента по возможности не специализированного для обработки конкретных заготовок, эти требования обеспечивает непрерывное обкатное шлифование червячным кругом.

2.1. Обоснование возможности получения требуемых параметров точности и шероховатости при совмещенной обработке шлифовально-полировальным червячным кругом

Выдвинута гипотеза, что указанные требования можно достичь с помощью операции совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом за счет специальной стратегии шлифования с разбиением цикла обработки на несколько ступеней для назначения оптимальных режимов резания на каждой из ступеней. Условно схема процесса совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом представлена рисунке 2.1. Червячный круг является сборным и изготовлен из двух частей – шлифовальной и полировальной [109; 110].

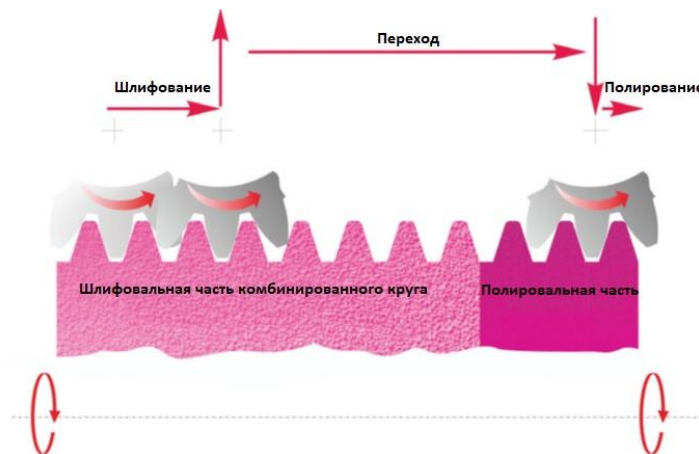


Рисунок 2.1 – Схема совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом

На рисунке 2.2 представлено сравнение абразивных зерен, применяемых для шлифования, например, с размерностью 185 мкм и полирования 6,5 мкм. Для полировальной части комбинированного круга используют эластичную – поливинилформалевую связку, для шлифования – жесткую керамическую связку, обеспечивающую точность обработки.

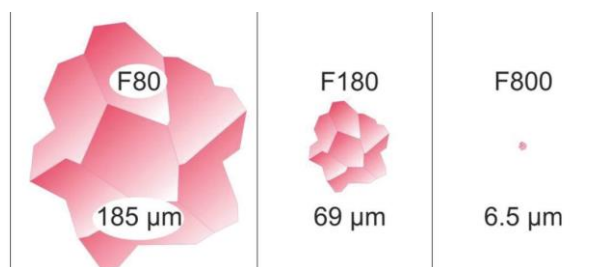


Рисунок 2.2 – Сравнение размеров зерен шлифовальной и полировальной частей абразивного круга [109; 110]

Целью шлифования является получение идеальной геометрии, хорошего качества поверхности (отсутствие прижогов) и высокой производительности. Цикл полирования второй частью комбинированного круга удаляет вершины (1 мкм) микронеровностей, оставленные после первой части комбинированного круга ($Ra \geq 0,25$ мкм), уменьшая шероховатость поверхности до $Ra \leq 0,16$ мкм (рисунок 2.3). Полирование, выполненное без переустановки и прерывания процесса, обеспечивает производительность, точность зубчатого венца и шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев [71].

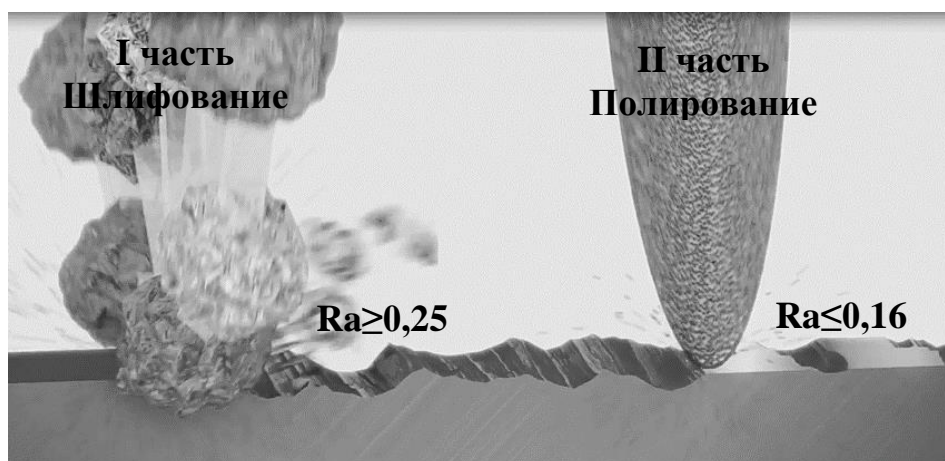


Рисунок 2.3 – Образование шероховатости после шлифования и полирования

Профилограмма образования шероховатости эвольвентных поверхностей зубьев после совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом условно изображена на рисунке 2.4. Целью цикла полирования является уменьшение шероховатости поверхности без изменения макрогеометрии, топографии эвольвентных поверхностей зубьев и структуры поверхности

материала. Процесс полирования второй частью червячного круга за счет мелкой зернистости и мягкой связки снимает примерно 1 мкм, удаляя вершины шероховатости поверхности, при этом оставляя нетронутыми некоторые впадины. Согласно исследованиям [69; 100; 101], доказано, что шероховатость, образованная с наличием впадин и отсутствием вершин, обладает увеличенной площадью контакта для удержания и распределения пленки трансмиссионного масла на шероховатости зубьев, что увеличивает долговечность зубчатых колес.

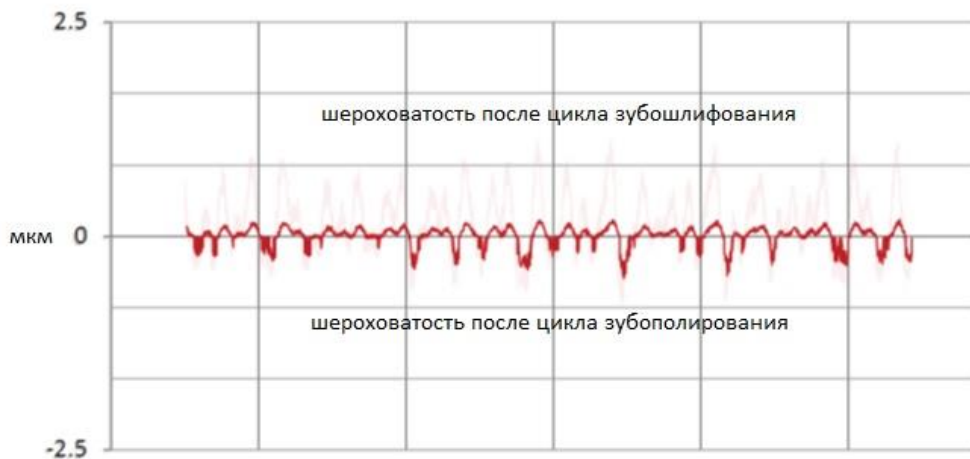


Рисунок 2.4 – Профилограмма образования шероховатости зубьев

2.2. Моделирование и расчет площади пятна контакта при непрерывном обкатном зубошлифовании цилиндрическим червячным кругом

При винтовом обкатном зубошлифовании цилиндрическим червячным кругом профиль зубьев формируется благодаря сложению ряда движений, сообщаемых станком зубчатому колесу и абразивному червячному кругу. На рисунке 2.5 представлена схема обкатного непрерывного зубошлифования цилиндрическим червячным кругом. Эвольвентный профиль образуется движением обката инструмента (число оборотов шлифовального круга – $n_{кр}$) и детали (число оборотов зубчатого $n_{дет} = n_{кр}/z$). Одновременный контакт нескольких зубьев с витками червячного круга обеспечивает непрерывный съём припуска. S_{np} по оси Z

отвечает за шлифование по длине зуба. $S_{рад}$ по оси X – за обработку зубьев по высоте. S_m – тангенциальное движение подачи по оси Y – обеспечивает использование всей полезной высоты круга, вводя в работу неизношенные участки [41; 42].

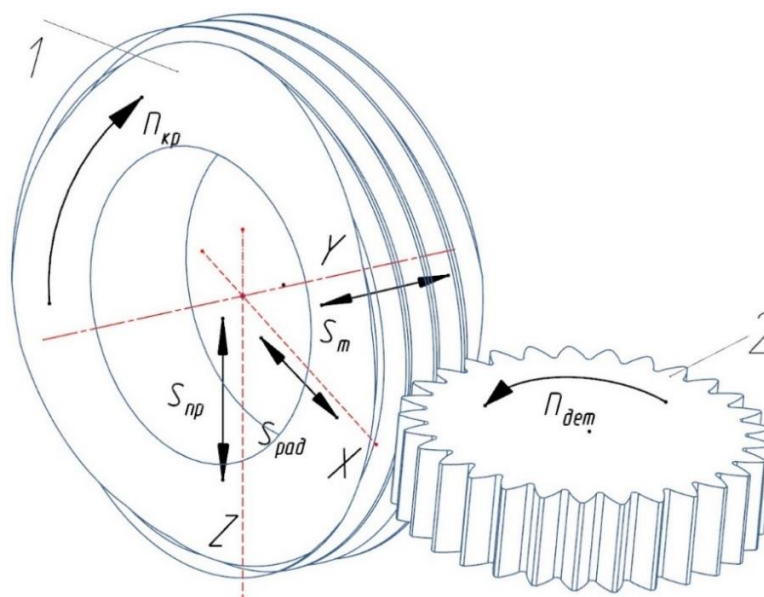


Рисунок 2.5 – Схема обкатного непрерывного зубошлифования: 1 – червячный круг; 2 – зубчатое колесо

В процессе обката виток червячного круга занимает ряд последовательных положений относительно зуба цилиндрического колеса. При этом за каждый проход снимается слой материала, изображенный на рисунке 2.6 штриховой линией. Из схемы формирования профиля зубьев видно, что виток червячного круга начинает врезаться в профиль зуба в положении 4. В положении 5 виток режет левой боковой стороной и правым наружным углом. В положении 6, 7, 8, 11, 12, 13, 14 виток режет обеими боковыми сторонами. Таким образом, из рисунка 2.6 видно, что припуск снимает боковая поверхность червячного круга. Наружный диаметр червячного круга не участвует в процессе резания. Впадина зуба не обрабатывается на операции зубошлифования.

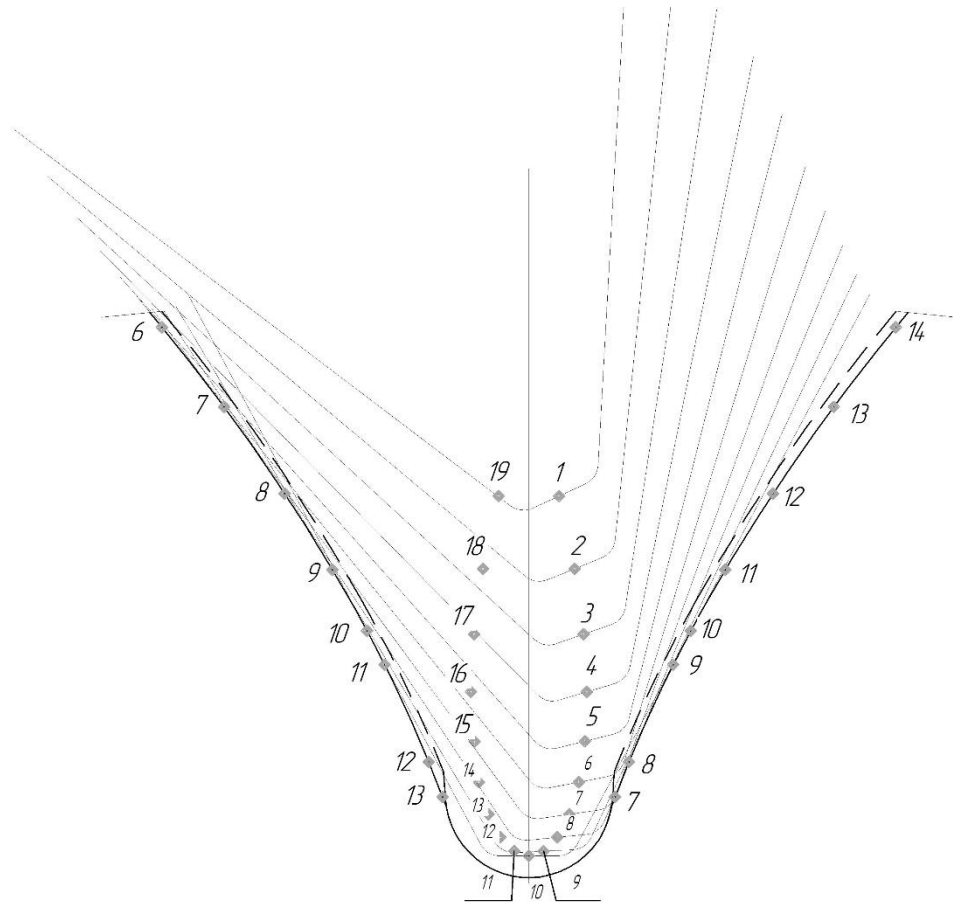


Рисунок 2.6 – Схема процесса формирования профиля зуба при зубошлифовании червячным кругом

При шлифовании зубьев цилиндрического зубчатого колеса, имеющего сложный эвольвентный профиль, червячным кругом происходит формирование отдельных участков поверхности, непрерывно сменяющих друг друга. Обработка каждого из этих участков – пятен контактов – происходит при различных силах резания и температурах, что приводит к изменению показателей качества на каждом участке обработанного профиля [57].

При врезании витка червячного круга в эвольвентный профиль зуба площадью контакта будет часть поверхности, ограниченная некоторым контуром. Построение этого контура схематично представлено на рисунке 2.7. Поверхность боковой стороны витка червяка с вершиной в точке O врезается в эвольвентный профиль зуба колеса, ограниченный точками $1, 6, 9$.

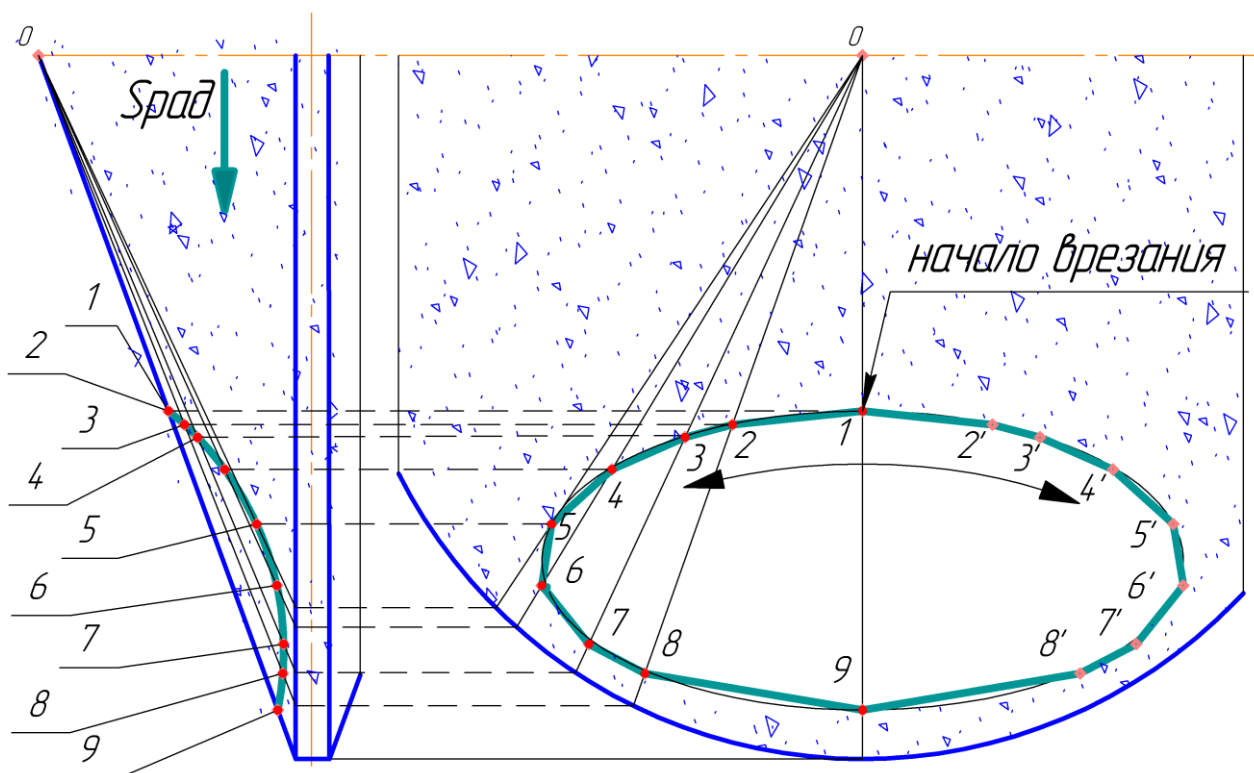


Рисунок 2.7 – Условная схема для определения площади пятна контакта между червячным кругом и цилиндрическим зубчатым колесом

На рисунке 2.7 жирной линией изображен фактический контур площади пятна контакта в проекции на плоскость перпендикулярную оси витка червячного круга. Если построить на осях $1 - 9$ и $6 - 6'$, геометрически точный эллипс (штриховая линия), то фактическое пятно контакта почти точно совпадет с этим эллипсом. При этом необходимо заметить, что чем ближе к наружному диаметру червячного круга будет располагаться пятно контакта, тем больше его контур будет приближаться к эллипсу. Поскольку фактическое пятно контакта очень мало и располагается в непосредственной близости к наружному диаметру витка червячного круга, то с достаточной точностью можно считать, что фактический контур представляет собой геометрически правильный эллипс [40 – 42].

Для расчета площади пятна контакта рассматриваемого зубчатого колеса ($z=29$, $m=6$, $\alpha=28^\circ$, $b=48$ мм, $d=181,1$ мм) и червячного круга с параметрами: наружный диаметр $D_a=275$ мм, количество заходов витков $n=3$, шаг витков (резьбы) $p=18,8495$ мм, средний диаметр резьбы $D_f=261$ мм, угол подъема витков $\psi=3,95^\circ$ ($\text{tg } \psi = 0,0689$), проведены построения эвольвентного зацепления в

программе KISS soft, моделирование контакта цилиндрического зубчатого колеса с рассчитанной геометрически точной эвольвентой и червячного круга в программе Siemens NX, геометрические построения развертки пятна контакта при снятии припуска в программе «КОМПАС».

Расчет эвольвентного зацепления в программе KISS soft в модуле «изготовление». На рисунке 2.8 представлена схема зацепления рассматриваемого цилиндрического колеса с трехзаходным червячным кругом, из которой видно, что при обработке трехзаходным червячным кругом увеличивается производительность, так как обрабатываются три впадины одновременно в зависимости от положения в различный момент времени.

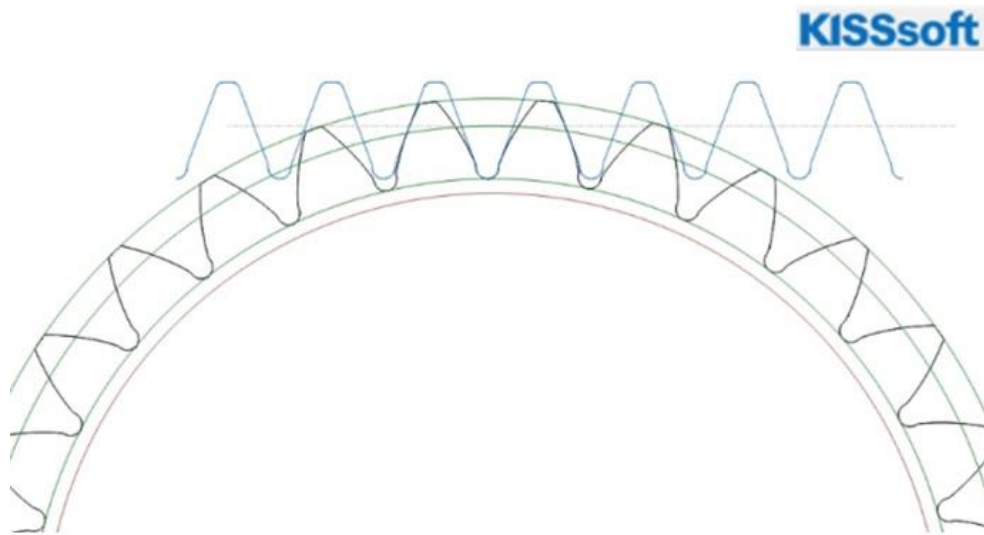


Рисунок 2.8 – Схема зацепления цилиндрического колеса с трехзаходным червячным кругом

При увеличении схемы зацепления цилиндрического колеса с червячным кругом можно рассмотреть получаемый профиль зуба после операции зубошлифования (рисунок 2.9), исходный контур зубчатого колеса и снимаемый припуск. Рисунок 2.9 также дает наглядное изображение того, что впадина зубьев не шлифуется, червячный круг работает только боковыми сторонами витков червячного круга, наружный диаметр червячного круга не участвует в процессе зубошлифования.

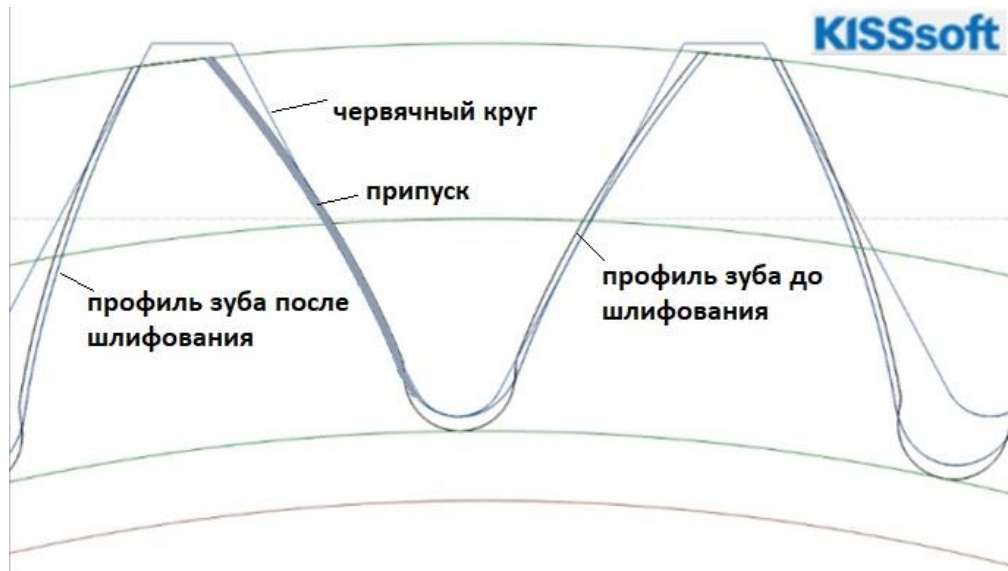


Рисунок 2.9 – Увеличение схемы зацепления цилиндрического колеса с трехзаходным червячным кругом

После расчета в KISS soft геометрии эвольвенты зубчатого колеса на операции зубошлифования с учетом снимаемого припуска проведено моделирование контакта цилиндрического зубчатого колеса (рисунок 2.10) с рассчитанной геометрически точной эвольвентой и червячного круга в программе Siemens NX.

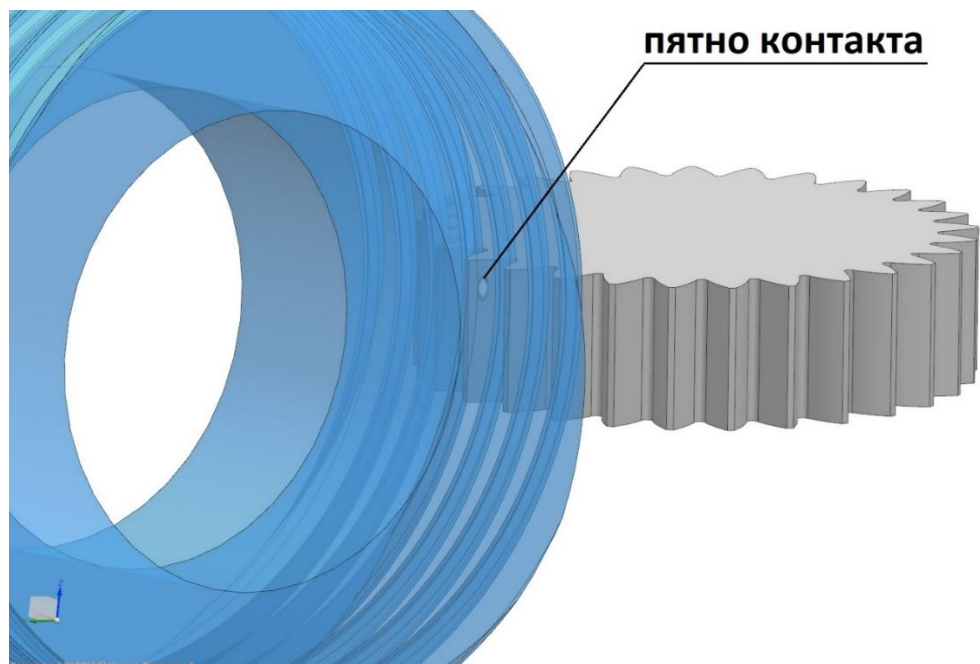


Рисунок 2.10 – Модель пятна контакта зубчатого колеса с червячным кругом

При наложении ограничения видимости на червячный круг, на зубчатом колесе можно наблюдать пятно контакта (рисунок 2.11). Данная форма пятна контакта смоделирована без учета снятия припуска, движения обката и продольной подачи. Форма пятна контакта при сопряжении цилиндрического зубчатого колеса и червячного круга представляет собой эллипс.

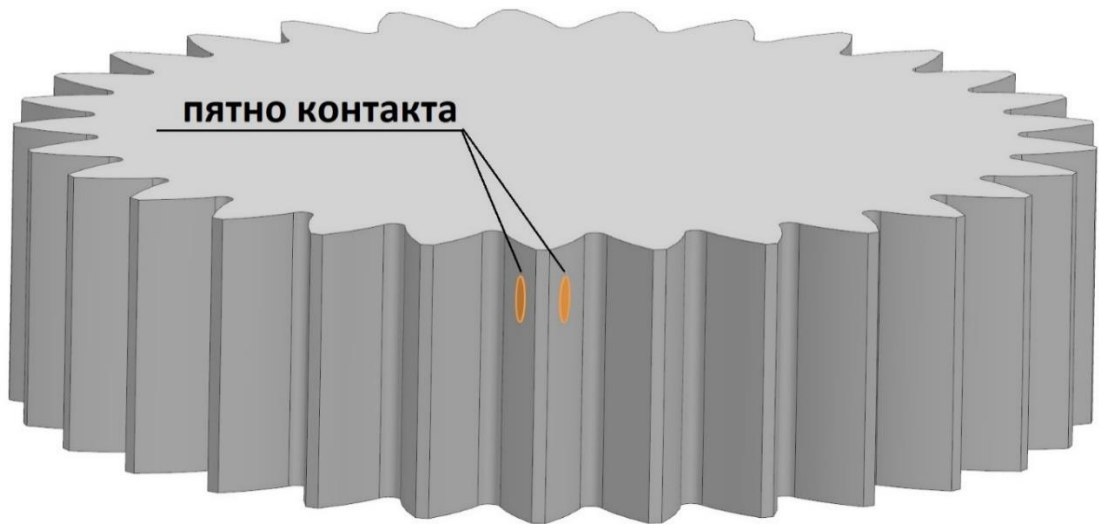


Рисунок 2.11 – Форма пятна контакта зубчатого колеса с червячным кругом

Для нахождения формы пятна контакта из программы KISS soft выгружена модель с геометрически точной эвольвентой в программу «КОМПАС» и сделаны дополнительные построения – построен виток червячного круга при снятии припуска 0,11 мм. Припуск 0,11 мм выбран для наглядности построения и является максимальным. Добавлен радиус червячного круга. Далее в пересечении профиля зуба и витка червяка построены точки и перенесены на проекцию червячного круга. После чего построено еще несколько лучей на профиле от эвольвенты зуба до места пересечения с витком профиля червячного круга. Следует отметить, что чем больше лучей построено, тем точнее форма пятна контакта. После достаточного построения лучей для определения формы вторая половина построена зеркально. На рисунке 2.12 приведено изображение построения пятна контакта.

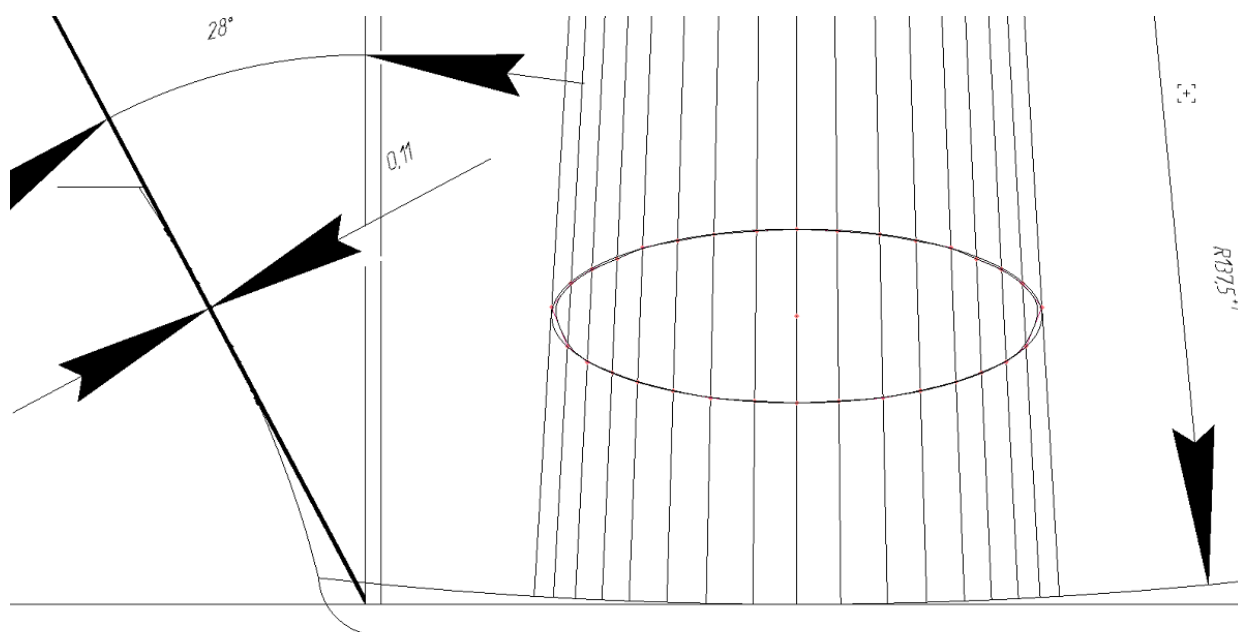


Рисунок 2.12 – Построение пятна контакта

Фактическая площадь пятна контакта при срезании припуска, равного 0,11 мм составляет $S_{кф}=65,89$ мм. Данная площадь рассчитана из соединения точек образованных при построении лучей сечения (рисунок 2.13).

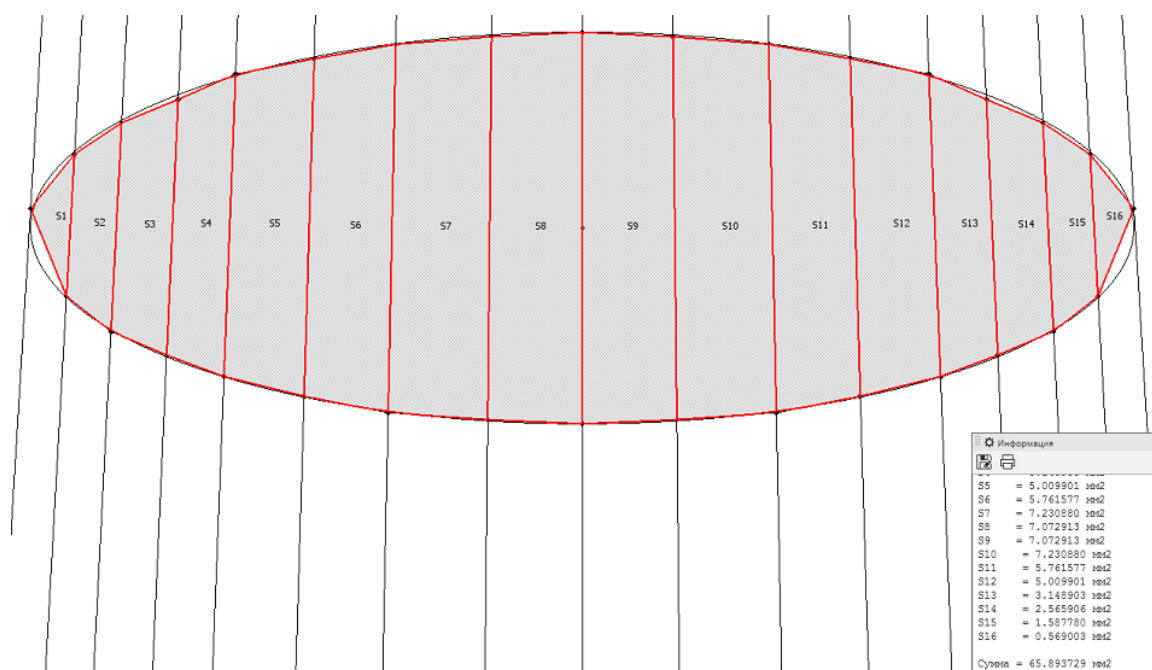


Рисунок 2.13 – Фактическая площадь пятна контакта

Площадь геометрически правильного эллипса, полученного после соединения по построенным точкам (рисунок 2.14) составляет $S_э=66,9$ мм.

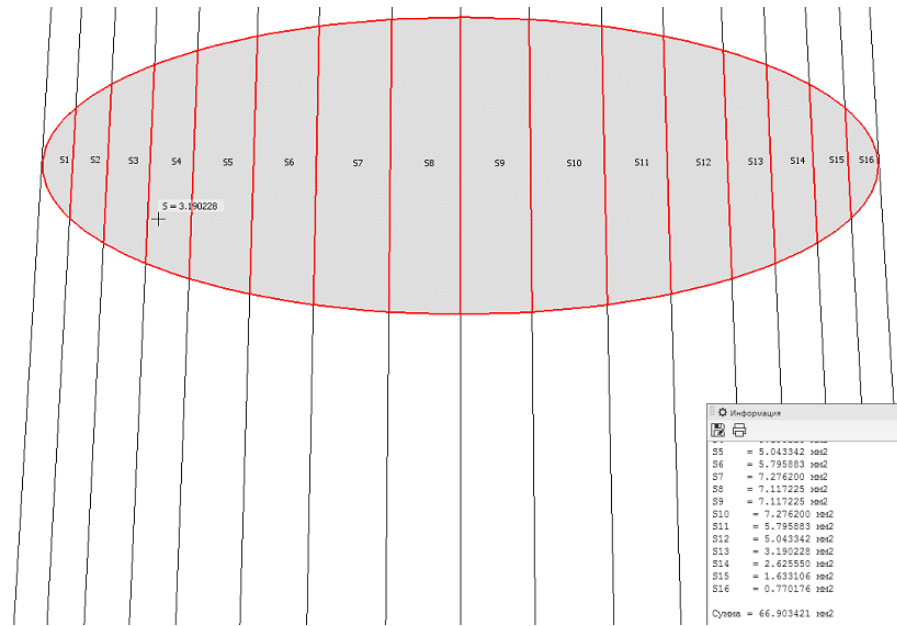


Рисунок 2.14 – Площадь пятна контакта геометрически правильного эллипса

Следует отметить, что данные построения определяют площадь пятна контакта с учетом снимаемого припуска, но без учета движения обката и радиальной подачи. По этой причине необходимо сделать дополнительные построения и провести аналитический расчет фактической площади пятна контакта, учитывающей не только снимаемый припуск, но и движения обката и продольную подачу.

На рисунке 2.15 построена форма реального пятна контакта, возникающего при зубошлифовании абразивным червяком. Если бы червячный круг только бы врезался в профиль зуба, то пятно контакта было бы ограничено эллипсом (точки 2, 7, 8, 9). Однако при наличии движения обката виток червячного круга перемещается относительно зуба в направлении стрелки со скоростью. При этом в каждый момент времени площадь пятна контакта будет ограничена только половиной эллипса (точки 2, 7, 8, 1).

Наличие продольной подачи S_{np} (ось Z), позволяющая обрабатывать зубья по всей длине, еще больше изменяет площадь контакта. Во-первых, от эллипса остается только $\frac{1}{4}$ часть (точки 2, 7, 1). Во-вторых, к этой площади прибавляется участок (точки 1, 5, 6, 7). Здесь расстояние между точками 1 и 5 равно $S_{np}/2$. В-третьих, общая площадь, ограниченная точками 2, 5, 6, 7, уменьшается на

величину участка, ограниченного точками 3, 4, 5, 6, 7. Данный участок не учитывается, так как в этом месте материал уже был удален при предыдущем обороте колеса. Итак, в процессе обработки фактическое пятно контакта между витком шлифовального круга и эвольвентной поверхностью зуба колеса будет ограничено контуром 2, 3, 4, 5, 1.

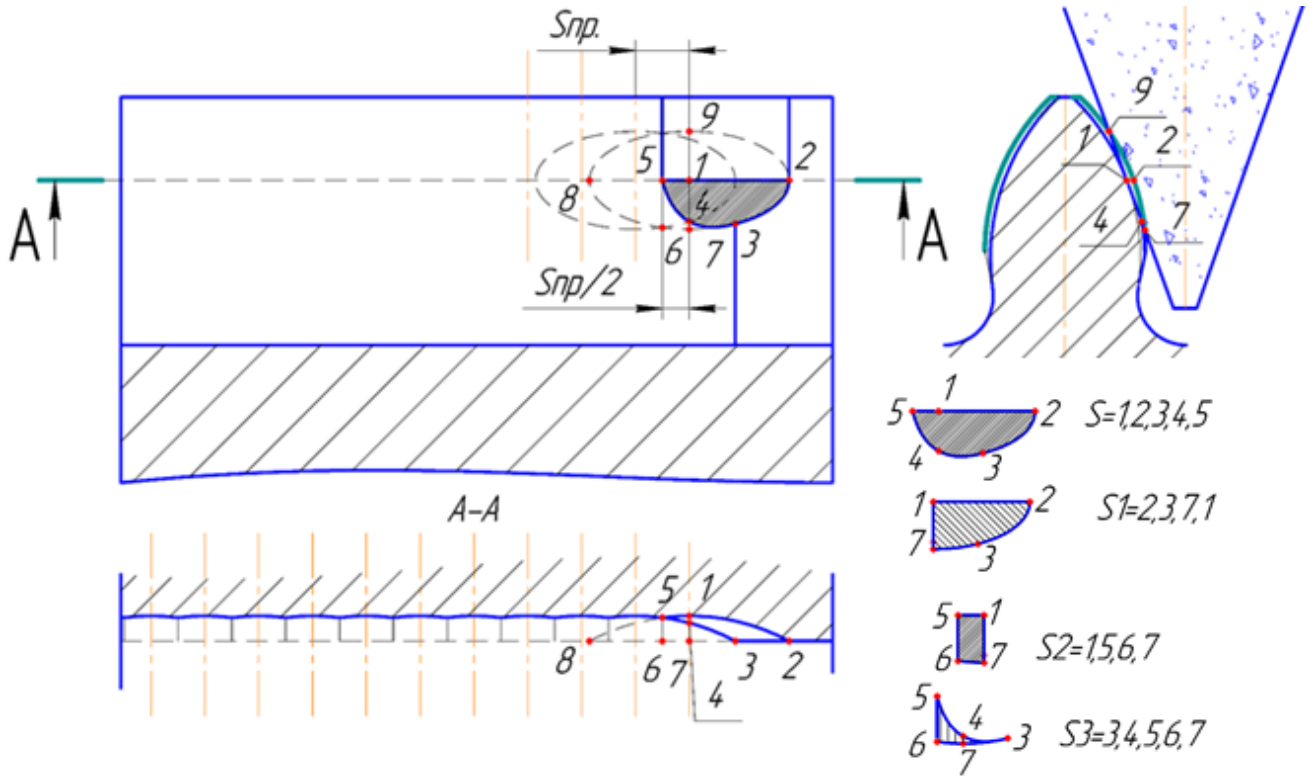


Рисунок 2.15 – Площадь пятна контакта при зубошлифовании методом обката абразивным червяком

Расчет площади пятна контакта необходим для изучения его зависимости от режимов зубошлифования и распределения температур на задаваемых режимах. Для нахождения площади пятна контакта при зубошлифовании червячным кругом необходимо найти площадь части боковой поверхности витка (точки 1, 2, 3, 4, 5). При этом исходная площадь пятна контакта

$$S = S1 + S2 - S3, \quad (2.1)$$

где $S1$ – площадь, ограниченная контуром точек 2, 3, 7, 1; $S2$ – площадь, ограниченная контуром точек 1, 5, 6, 7; $S3$ – площадь, ограниченная контуром точек 3, 4, 5, 6, 7.

Площадь $S1$ (точки 2, 3, 7, 1) можно определить по формуле эллипса:

$$S1 = \frac{a \cdot b \cdot \pi}{4}, \quad (2.2)$$

где a (точки 1, 7) и b (точки 1, 2) полуоси эллипса.

Площадь $S2$ (точки 1, 5, 6, 7) можно определить по формуле:

$$S2 = \frac{S_{\text{пр}}}{2} \cdot b, \quad (2.3)$$

где $S_{\text{пр}}$ – продольная подача (точки 1, 5) и b (точки 1, 7) полуоси эллипса.

$S3$ (точки 3, 4, 5, 6, 7) можно определить по формуле:

$$S3 = 0,12 \cdot (S1 + S2) \quad (2.4)$$

Подставив в формулу (2.1) формулы (2.2), (2.3), (2.4) и сделав соответствующие преобразования, получим формулы для расчета площади пятна контакта

$$S = 0,88 (S1 + S2) = 0,88 \cdot \left(\frac{a \cdot b \cdot \pi}{4} + \frac{S_{\text{пр}}}{2} \cdot b \right) = 0,44b \cdot \left(\frac{\pi \cdot a}{2} + S_{\text{пр}} \right) \quad (2.5)$$

Для нахождения величин a и b сделаем дополнительные геометрические построения:

$$a = \frac{1}{2} \cdot D_{\text{кр}} \cdot \sqrt{\frac{4 S_{\text{рад}}}{D_{\text{кр}}}} = \sqrt{S_{\text{рад}} \cdot D_{\text{кр}}} \quad (2.6)$$

Из решения трансцендентного уравнения, выведенного Е.П. Калининым [46], получим величину b

$$b = 0,5 \cdot \sqrt{r_0 \cdot S_{\text{рад}}} \quad (2.7)$$

Подставив значения величин a (2.6) и b (2.7) в выражение 2.5 [46]:

$$S = 0,44 \cdot 0,5 \cdot \sqrt{r_0 \cdot S_{\text{рад}}} \cdot \left(\frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{S_{\text{рад}} \cdot D_{\text{кр}}} + S_{\text{пр}} \right) \quad (2.8)$$

Окончательное уравнение площади пятна контакта можно выразить так [46]:

$$S = 0,11 \cdot \sqrt{r_0 \cdot S_{\text{рад}}} (\pi \cdot \sqrt{S_{\text{рад}} \cdot D_{\text{кр}}} + 2 \cdot S_{\text{пр}}), \quad (2.9)$$

Где r_0 – радиус основной окружности зубчатого колеса, $S_{\text{рад}}$ – радиальная подача, $S_{\text{пр}}$ – продольная подача, $D_{\text{кр}}$ – диаметр червячного круга.

В работе [40] установлена зависимость шероховатости зубьев от эквивалентной толщины стружки (рисунок 2.16), при зубошлифовании цилиндрическим червячным кругом разной зернистости: 1-я кривая 8 – 12, 2-я кривая 12 – 20.

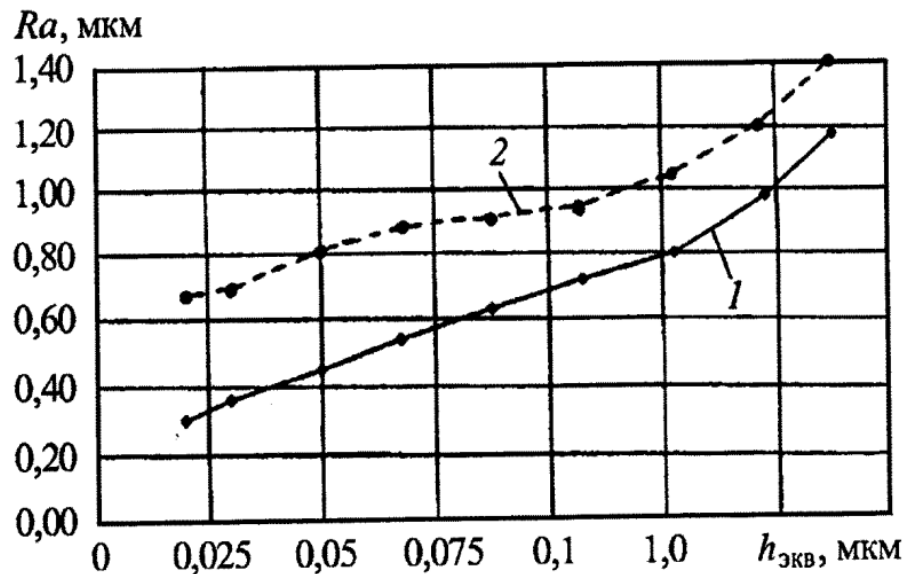
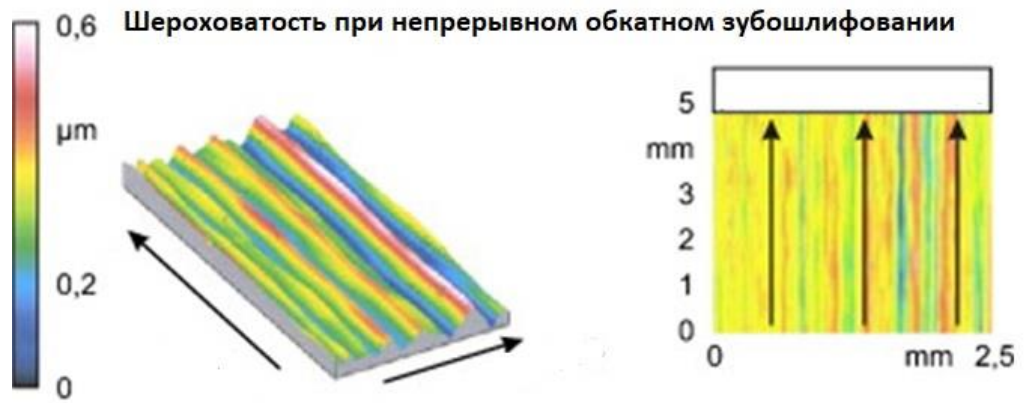
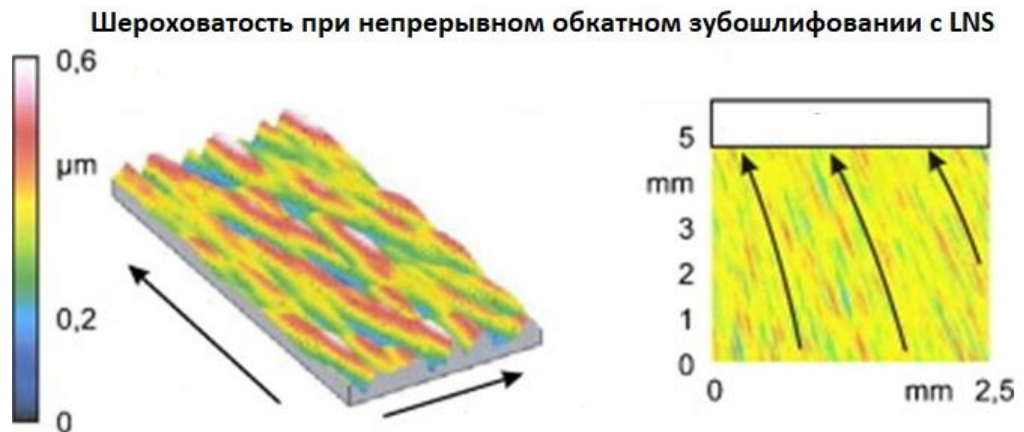


Рисунок 2.16 – Зависимость шероховатости поверхности от стружки [36]

В процессе обработки винтового обкатного шлифования зубьев возможно принудительное наведение нерегулярного профиля микронеровностей за счет математического аппарата станка. Компания Reishauer обозначает возможность создания прерывистой шероховатости технологией *LNS* – Low Noise Shifting. Систематическая микронеровность (шлифовальные резы) прерываются при диагональном движении подачи червячного круга. Длина резов сокращается (рисунок 2.17, б), высота микронеровностей уменьшается. Такая структура поверхности повышает плавность зацепления [36; 100; 109]. Создание нерегулярной шероховатости происходит без потери производительности.



а



б

Рисунок 2.17 – Шероховатость эвольветных поверхностей зубьев:

а – систематическая; б – стохастическая (*LNS*)

Функция станка *LNS2* используется для прямозубых зубчатых колес, функция *LNS1* – для малого модуля и косозубых зубчатых колес. Функция *LNS* – функция расчета движения шифтинга, исключая появление регулярной шероховатости. Регулярная шероховатость на поверхности образуется как отношение вращения алмазного ролика и шлифовального круга. Например, если в процессе правки алмазный ролик вращается с $n=1000$ об/мин, а червячный шлифовальный круг $n=10$ об/мин, тогда образуется 100 участков регулярной шероховатости. *LNS* как дополнительное механическое движение в кинематике непрерывного шлифования создает нерегулярные поверхностные структуры, которые предотвращают генерацию тональных возбуждений. Как следствие,

шестерни *LNS* не создают нежелательного шума передачи. *LNS* незаметно работает в фоновом режиме процесса шлифования [109; 110].

Проведенные исследования [36] влияния метода финишной обработки зубчатых колес на уровень вибраций при зацеплении выявили, что наименьшими шумовыми характеристиками обладают зацепления с зубчатыми колесами, обработанными цилиндрическим червячным кругом с созданием нерегулярной шероховатости. На втором месте с наименьшими шумовыми характеристиками – непрерывное профильное зубошлифование и зубохонингование на одном станке; на третьем месте - зубохонингование хоном с внутренним зацеплением; на четвертом месте непрерывные обкатное зубошлифование кругом CBN; и наиболее высокие шумовые показатели – у зубошевингования и последующей обкатки со снятием забоин. При этом в работе не приведены значения шероховатости, полученные каждым методом.

2.3. Моделирование влияния режимов совмещенной обработки на шероховатость профиля зубьев и площадь пятна контакта

Из формулы (2.9) видно, какое влияние оказывает изменение продольной и поперечной подач на площадь пятна контакта, поэтому можем предположить, что изменения продольных и радиальных подач также окажут влияние на величину шероховатости. Поэтому, изменяя режимы резания, а именно радиальную и продольную подачу, можно определить площадь пятна контакта. В таблице 2.1 приведены возможные варианты назначения режимов резания и получаемых пятен контакта. Зависимость площади пятна контакта от радиальной и продольной подач можно представить в виде рисунка 2.18. Из которого видно, что наибольшее влияние на площадь пятна контакта оказывает радиальная подача. При постоянной продольной подаче $S_{пр}=0,48$ мм, увеличение радиальной подачи в два раза $S_{рад1}=0,1$ мм и $S_{пр2}=0,2$ мм, увеличивает в два раза пятно

контакта $S=5,77 \text{ мм}^2$ до $S=11,35 \text{ мм}^2$. Это приводит к росту сил резания и температуры.

Таблица 2.1 – Площадь пятна контакта в зависимости от режимов резания

№ п/п	С _{рад} , мм	С _{пр} , мм/об	Ra	S расч.
1	0,2	0,48	x1-1-1	11,3503
2	0,2	0,24	x1-2-1	11,12561
3	0,1	0,48	x1-3-1	5,768223
4	0,1	0,24	x1-4-1	5,60934
5	0,08	0,48	x1-5-1	4,644585
6	0,08	0,24	x1-6-1	4,502475
7	0,04	0,48	x1-7-1	2,381156
8	0,04	0,24	x1-8-1	2,280669
9	0,01	0,48	x1-9-1	0,645532
10	0,01	0,24	x1-10-1	0,595289
11	0,005	0,48	x1-11-1	0,343578
12	0,005	0,24	x1-12-1	0,30805

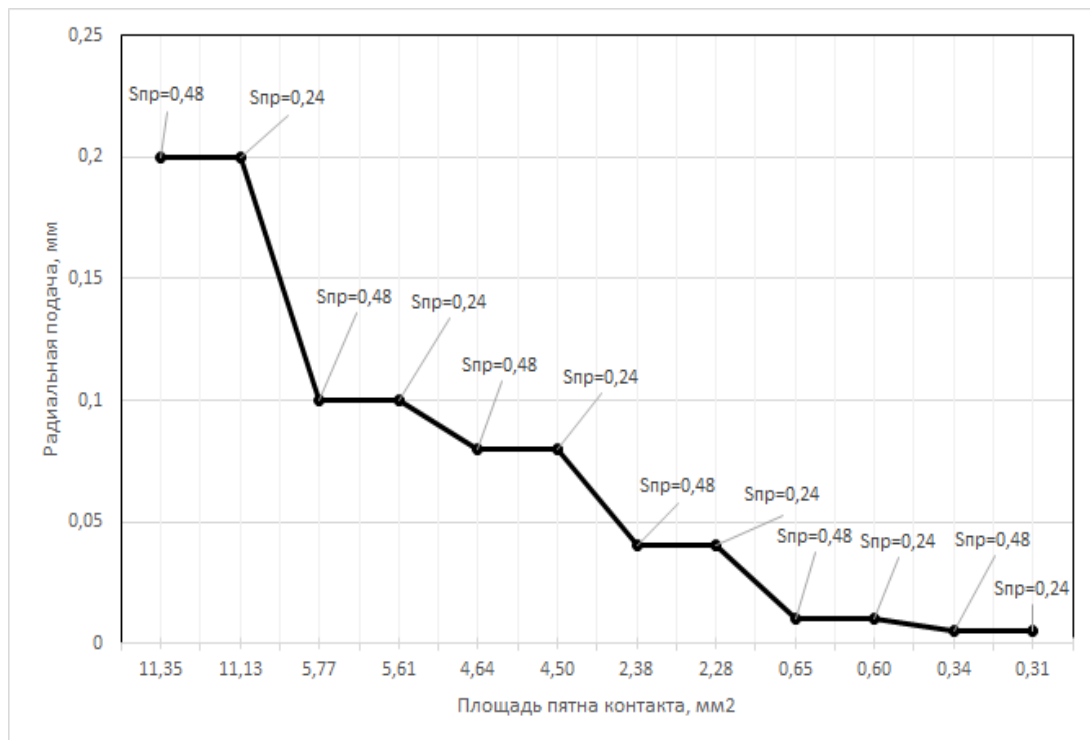


Рисунок 2.18 – Зависимость площади пятна контакта от радиальной и продольной подач

Е.П. Калининым проведены исследования влияния радиальной и продольной подачи на величину силы резания (рисунок 2.19), которая выражается формулой (2.10), также установлена зависимость (2.11) продольной и радиальной подачи на температуру (рисунок 2.20) [42]:

$$Pz = C_p \cdot S_{\text{рад}}^{0,8} \cdot S_{\text{пр}}^{0,16} \cdot t, \quad (2.10)$$

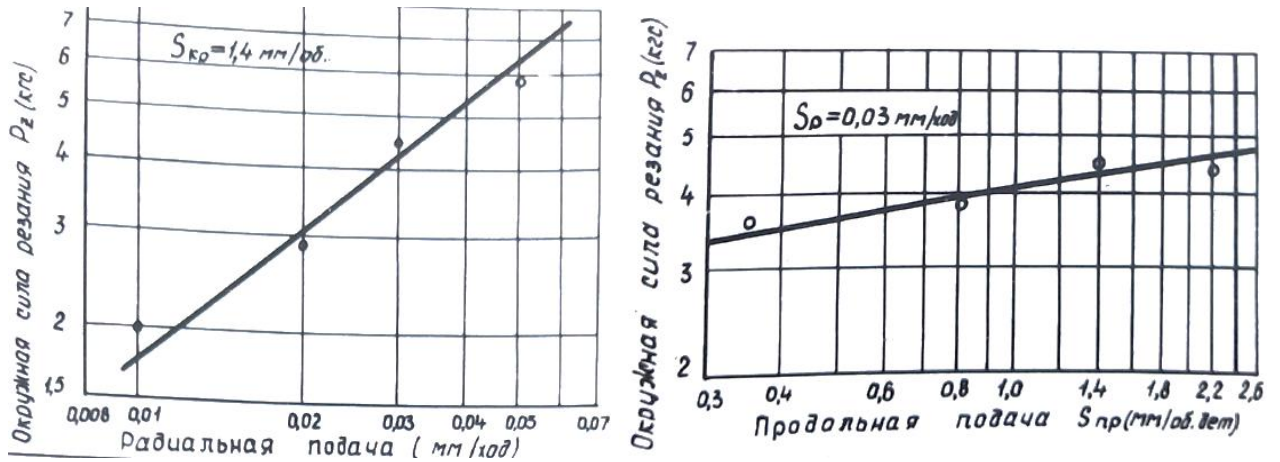


Рисунок 2.19 – Зависимость силы резания от радиальной и продольной подач [42]

$$T = \frac{S_{\text{рад}}^{0,55} + S_{\text{пр}}^{0,16} \cdot 10^4}{(27 \cdot S_{\text{рад}}^{0,55} + S_{\text{пр}}^{0,16}) \cdot \sqrt{\lambda c_y}} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \quad (2.11)$$

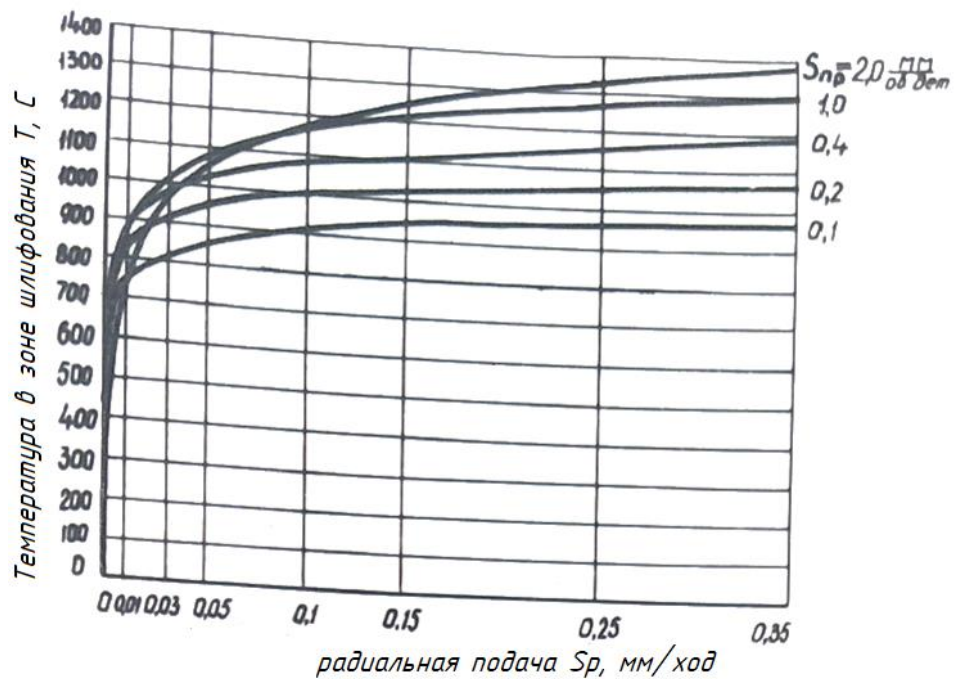


Рисунок 2.20 – Зависимость температуры от радиальной и продольной подач [42]

На основании исследований Е.П. Калина радиальная подача оказывает существенное влияние на силу резания. Можно предположить, что изменения продольных и радиальных подач также окажут аналогичное воздействие на величину шероховатости. Предполагается, что с уменьшением пятна контакта уменьшается шероховатость. Возможная зависимость представлена на рисунке 2.21. Теоретические исследования необходимо проверить экспериментально.

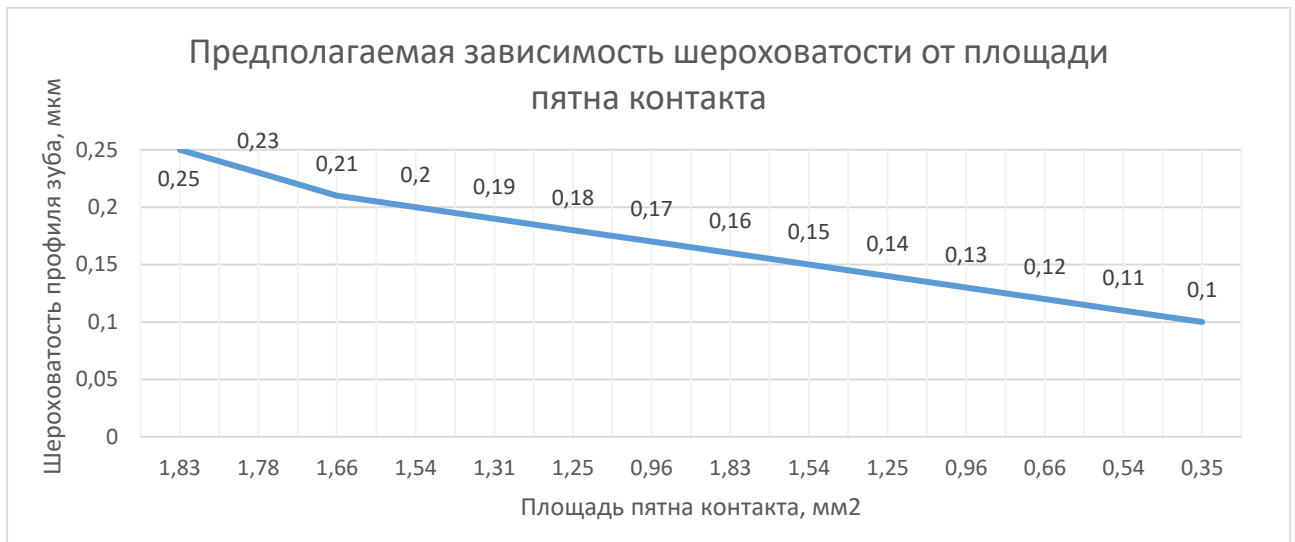


Рисунок 2.21 – Предполагаемая зависимость шероховатости от площади пятна контакта при обкатном зубошлифовании червячными кругами

2.4. Разработка технологического процесса совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом

Для обеспечения точности, шероховатости, качества обрабатываемой поверхности зубьев, а также повышения производительности разработан технологический процесс совмещенного обкатного зубошлифования комбинированным червячным кругом. На каждом из пяти циклов необходимы оптимальные режимы для обеспечения минимальной шероховатости и отсутствия прижогов. На черновых циклах зубошлифования удаляют основную часть припуска на повышенных режимах резания. Чистовые циклы зубошлифования

выполняют до достижения требуемой точности на режимах, не вызывающих структурных изменений. Для повышения чистоты поверхности производится зубополирование. Для выполнения целей каждого цикла необходимо обосновано перераспределить припуск.

Припуск на операцию зубошлифования рассчитывается как разница длины общей нормали на операции зубофрезерования $L_{з/фр.}=81,78_{-0,06}$ мм и зубошлифования $L_{з/шл.}=81,36_{-0,03}$ мм.

$$2Z_{max}=(81,78 - 81,33)=0,45 \text{ мм}, 2Z_{min}=(81,72 - 81,36)=0,36 \text{ мм}.$$

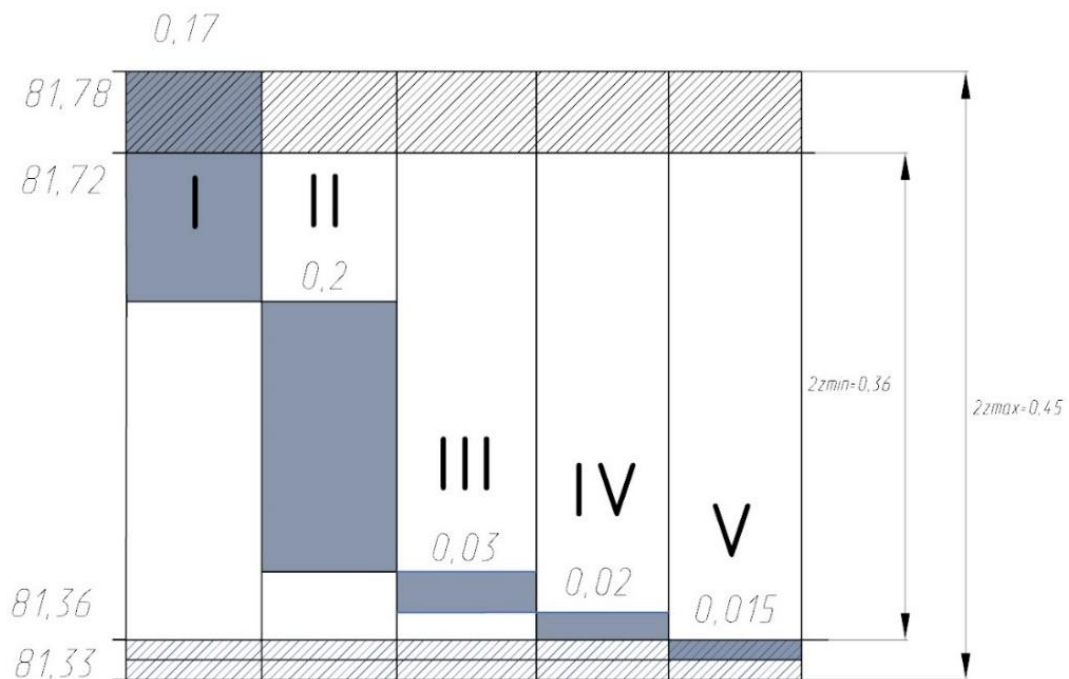


Рисунок 2.22 – Распределение съема припуска каждом цикле

Припуск на первом цикле определили равным 0,17 мм для максимальной производительности. Однако при снятии его за один возникает возможность появления прижогов. Поэтому снимать будем за два прохода и радиальной подачей $S_{rad}=0,085$ мм.

Припуск на втором цикле определили равным 0,20 мм. Поэтому снимать будем за пять проходов и радиальной подачей $S_{rad}=0,04$ мм.

Припуск на третьем цикле определили равным 0,03 мм. Поэтому снимать будем за два прохода и радиальной подачей $S_{rad}=0,015$ мм.

Припуск на четвертом цикле определили равным 0,02 мм. Поэтому снимать будем за два проходов и радиальной подачей $S_{rad}=0,01$ мм.

Припуск на пятом цикле определили равным 0,015 мм. Для назначения режимов резания, обеспечивающих требуемую шероховатость, точность и производительность необходимо провести экспериментальные исследования с планированием эксперимента.

2.5. Выводы по главе 2

1. При обработке эвольвентного профиля зубьев червяным кругом происходит формирование отдельных участков поверхности, непрерывно сменяющих друг друга. Обработка каждого из этих участков – пятен контактов происходит при различных силах резания и температурах.

2. На основании анализа исследований Е.П. Калинина установлена зависимость радиальной и продольной подач на площадь пятна контакта, наибольшее влияние оказывает радиальная подача.

3. Зависимость шероховатости эвольвентной поверхности от площади пятна контакта, от радиальной и продольной подачи необходимо проверить экспериментально.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО РЕЖИМА СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ ШЛИФОВАЛЬНО-ПОЛИРОВАЛЬНЫМ КРУГОМ И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ, ТОЧНОСТЬ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

3.1. Выбор технологического оборудования

Экспериментальные исследования для определения рационального режима совмещенного зубошлифования шлифовально-полировальным кругом проводились на оборудовании, которое применяется на операции зубошлифования по серийной технологии, а именно RZ basic компании Reishauer. Станок RZ basic Reishauer предназначен для обработки внешних зубчатых цилиндрических зацеплений методом непрерывного обкатного зубошлифования с использованием цилиндрических червячных кругов. Общий вид станка и рабочая зона станка изображены на рисунке 3.1. Для закрепления заготовки детали используется та же зажимная оснастка, что и по серийной технологии, по которой проводится зубошлифование. Приспособление для закрепления состоит из зажимного приспособления, вращающегося верхнего центра, колпака для вращающегося центра. Рабочее давление масла для данного приспособления при зажиме составляет 12 бар. Усилие поджима верхним центром составляет 350 Н. Станок оснащен автоматическим устройством центрирования для оптимального позиционирования зубьев заготовки по отношению к червячному шлифовальному кругу. Автоматическое центрирование основано на измерении толщины зубьев или ширины впадины зубьев на вершине зубьев заготовок. Эти измерения позволяют производить центрирование шлифовального круга с использованием относительных измерений отшлифованного зацепления [47; 48].



Рисунок 3.1 – Станок Reishauer RZ basic: *а* – общий вид; *б* – рабочая зона

В результате проведенного анализа в разделе 1.1, установлено, что зубошлифовальное оборудование фирмы Reishauer модели RZ basic в совокупности с применяемой оснасткой позволяет надежно достигать требуемых параметров точности зубчатого венца (см. таблицу 1.3, рисунок 1.8) рассматриваемого зубчатого колеса со значительными запасами по использованным допускам по параметрам более 54 %. Высокая точность обрабатываемого зубчатого колеса обусловлена многочисленными параметрами: точностью позиционирования осей, наличием встроенного устройства для автоматизированного поддержания баланса червячного круга во время всего цикла обработки.

3.2. Выбор правящего и режущего инструмента

Процесс правки имеет задачу спрофилировать контур заданного профиля шлифовального круга. Полнопрофильный алмазный ролик должен сформировать такой профиль червячного абразивного круга, чтобы на зубчатом колесе обеспечить геометрические параметры детали, и дополнительно формировать радиус продольной кромки $R0,4 \pm 0,2$ мм на вершине зуба (рисунок 3.2) с целью исключения слесарной операции полирования продольных кромок.

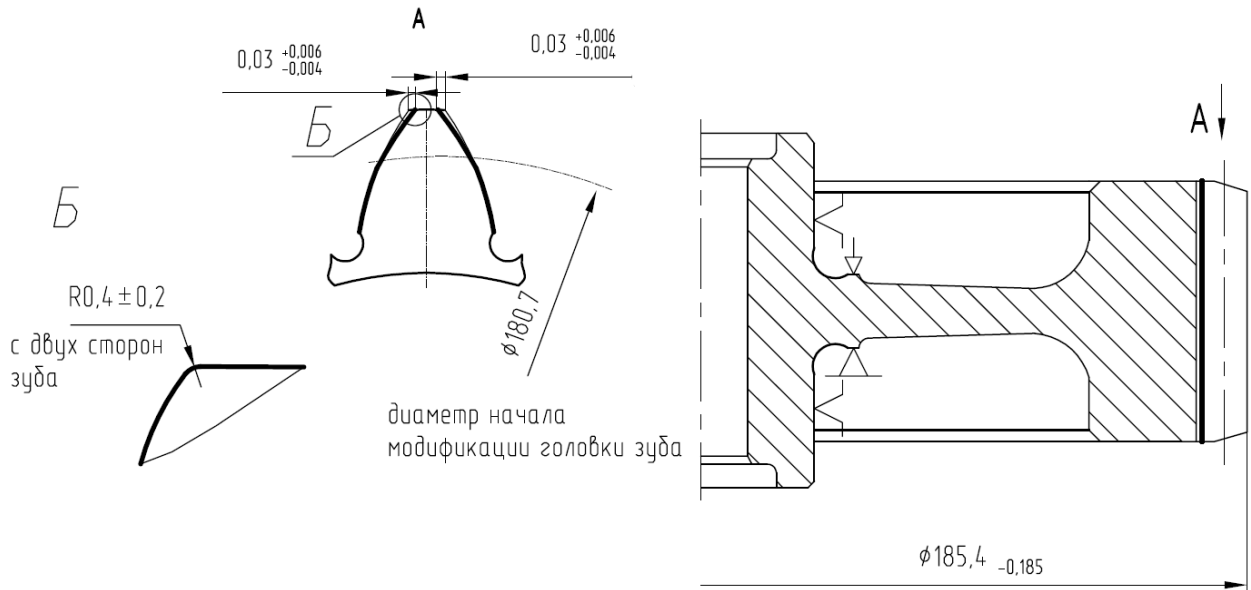


Рисунок 3.2 – Требуемые геометрические параметры зубчатого венца

В качестве инструмента для профильной правки разработана конструкция полнопрофильного алмазного правящего ролика для шлифовально-полировального круга, конструкция которого приведена в Приложении Г, общий вид изображен на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Общий вид алмазного правящего ролика

Проектирование и расчет необходимых геометрических параметров ролика производился исходя из того, какой профиль витка червячного круга необходимо сформировать, чтобы в процессе непрерывно обкатного шлифования заготовки детали обеспечить требуемые параметры зуба (модификацию фланка и радиус продольных кромок). На рисунке 3.4. представлено построение схемы обката витком червячного круга с учетом обеспечения радиуса продольных кромок детали.

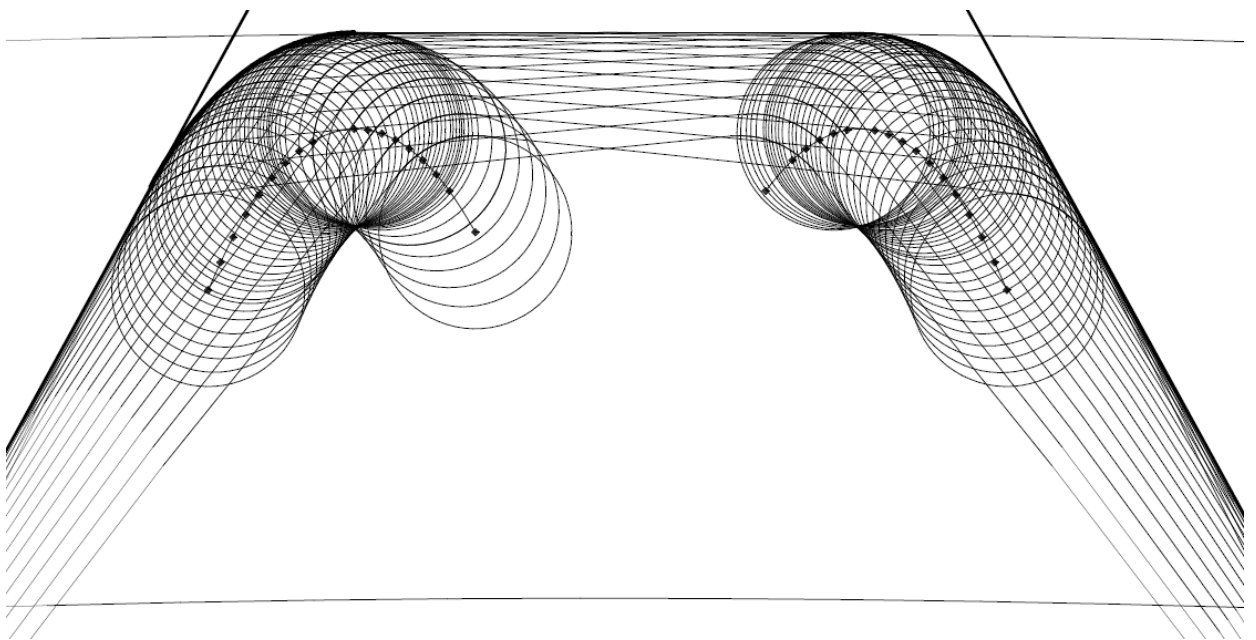


Рисунок 3.4 – Схема обката витком червячного круга продольных радиусов
вершины зуба

Процесс правки имеет задачу спрофилировать контур заданного профиля шлифовального круга, заострить изношенные абразивные зерна и выбором соответствующих параметров оптимально согласовать структуру поверхности шлифовального круга с задачей обработки. Данные процесса правки обобщают все технологические параметры, управляющие процессом правки шлифовального круга. Весь процесс правки можно подразделить на несколько ступеней, чтобы варьированием параметрами добиться оптимальных результатов правки. Параметры – число правящих ходов, число оборотов шлифовального круга, число оборотов инструмента для правки, радиальная подача на один правящий ход, а также управление движением деления у многозаходных шлифовальных станков – подбираются индивидуально для различных шагов правки.

Выбор режущего инструмента – червячного круга первого типа (прямого профиля) по ГОСТ Р 52781-2007 [25] выполняется размерами, согласованными с оснасткой станка на керамической связке, зернистость и твердость выбирают в зависимости от модуля и материала зубчатого колеса. Для высокопроизводительной обработки выбирают многозаходные круги. Так, однозаходный круг за один оборот обрабатывает одну впадину зубьев, а трёхзаходный – три впадины [109].

В разделе 1.3 проведен анализ научных работ и выбраны характеристики комбинированного червячного круга. Шлифовальная часть: электрокорунд белый 25А, зернистостью 0,15–0,21 мм, весьма мягкой степени твердости G, открытой структуры 8, на керамической связке. Полировальная часть: электрокорунд белый 25А, мелкой зернистости 0,06–0,1 мм, мягкой степени твердости, открытой структуры 14, связка – вспененный поливинилформаль [49].

Сформированы геометрические параметры червячного круга и абразивные характеристики шлифовальной и полировальных частей. Запустить в производство изготовление сборного червячного круга согласилась компания Reishauer. Чертеж шлифовально-полировального червячного круга приведен в Приложении Д. После получения червячного круга, произведено исследование

шлифовальной и полировальной его частей. Зернистость шлифовальной части соответствует требованиям от 0,15 до 0,21 мм (рисунок 3.5).

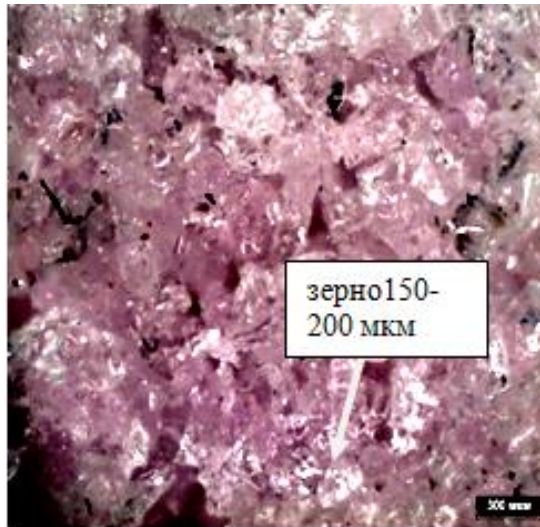


Рисунок 3.5 – Микроструктура шлифовальной части на керамической связке

Для контроля зернистости от 0,06 до 0,1 мм полировальной части проведено исследование, рисунке 3.6 представлен общий вид исследованного образца.

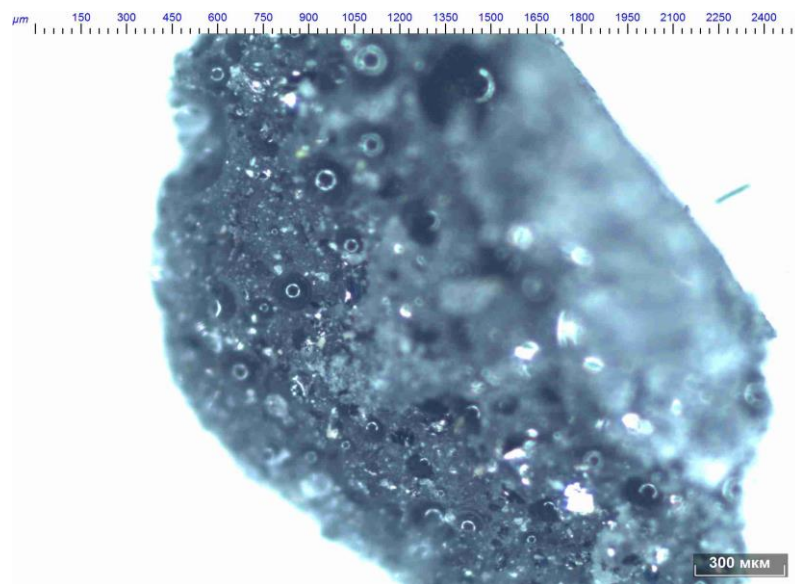


Рисунок 3.6 – Общий вид образца полировальной части

На рисунке 3.7 представлены фотографии, полученные с помощью электронного сканирующего микроскопа MIRA3 TESCAN [50].

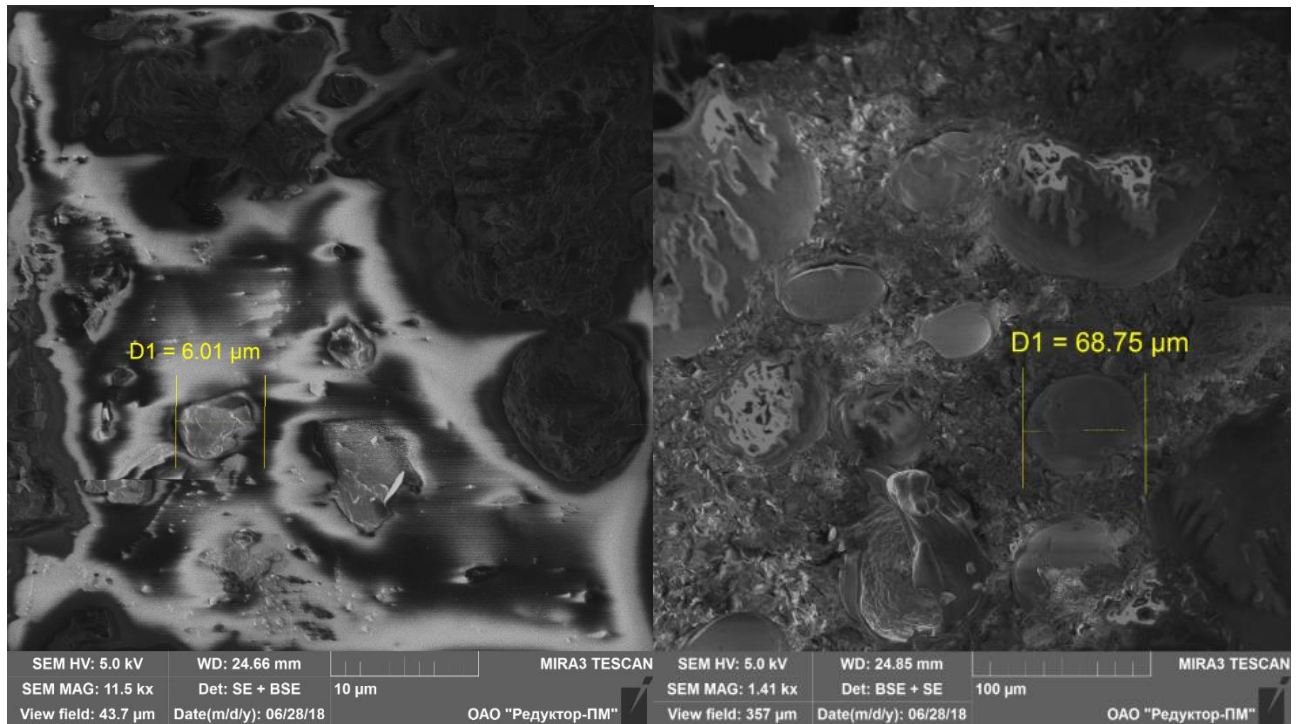


Рисунок 3.7 – Микроструктура полировальной части

3.3. Выбор режимов и условий обработки резания и правки кругов

Совмещенная обработка шлифовально-полировальным червячным кругом выполняется за одну установку зубчатого колеса, но условно разбита на два цикла. На первом цикле производится шлифование для снятия основного припуска и обеспечения геометрической точности зубчатого венца. На втором цикле производится полирование для обеспечения требуемой шероховатости эвольвентных поверхностей зубьев. При полировании абразивным зерном размером 6,0 – 10 мкм с поверхности удаляются вершины (пики) микронеровностей шероховатости поверхности зуба [51].

На рисунке 3.8 изображена панель управления станка (дисплей) режимами совмещенной обработки комбинированным шлифовально-полировальным кругом по двум циклам.

Первые четыре ступени относятся к первому циклу: первая и вторая ступени соответствуют черновому шлифованию с основным съемом припуска,

третья и четвертая ступень – получистовое и чистовое шлифование соответственно. На этой стадии формируются все геометрические и точностные характеристики зубчатого колеса. Пятая ступень обработки относится ко второму циклу – полированию поверхности. Перед началом работы необходимо запрограммировать работу станка на смещение зоны контакта зубчатого колеса и червячного круга до полировальной его части. Для достижения требуемой шероховатости поверхности профиля зубьев изменяемым параметром на пятой ступени обработки является количество ходов, сдвиг шифтинга.

Название загот 0309 / Satellit Инф загот 1 m6.0, EW28, z29 Инф загот 3 SLS m6.0, EW28, 3GG
Инф загот 2 DKS Инф загот 4

Параметр шлиф

Сум подач рад: 0,470
норм:

Ступень активна

Дополн путь - конеч положение хода

Маятниковое движение

Число ходов

Число оборотов шлиф круга 1/мин

Радиальн подача на раб ход мм

Скорость радиальн подачи мм/мин

Подача Z1 мм/об

Подача Y1 мм/ммхода

Сдвиг шифтинга мм

Охлаждающее масло %

Накопл радиальная подача мм

Попутн шлиф + МОС 1

Ступень V	I цикл шлифование				II цикл полирование
	Ступень 1	Ступень 2	Ступень 3	Ступень 4	Ступень 5
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Число ходов	2	5	1	1	3
Число оборотов шлиф круга	2350	2350	2350	2350	3000
Радиальн подача на раб ход	0,085	0,04	0,02	0,01	0,005
Скорость радиальн подачи	60,0	60,0	60,0	60	60
Подача Z1	0,48	0,48	0,24	0,12	0,12
Подача Y1	0,040	0,030	0,287	0,287	0,005
Сдвиг шифтинга	0,000	0,000	-14,000	52,000	0,000
Охлаждающее масло	100	100	80	70	50
Накопл радиальная подача	0,165	0,200	0,065	0,030	0,010

Рисунок 3.8 – Панель управления станка режимами зубошлифования

Непременным условием высококачественного зубошлифования (отсутствия термических трещин и прижогов) является эффективное применение смазочно-охлаждающей жидкости. В данном случае применяется COTC Daskolene 598 DB-RB под давлением 0,8–2,0 МПа с производительностью 160 литров в минуту [52].

3.4. Выбор оборудования и приборов

Оценка влияния режимов резания совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом на параметры точности и шероховатости производилась на реальных заготовках одной партии, прошедших все стадии технологического процесса до выполнения зубошлифования. Химико-термическая обработка (цементация) также производилась одной партией. Для вырезки образцов применялся электроэрозионный станок с ЧПУ AQ300L Sodick (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Общий вид станка AQ300L Sodick

Контроль параметров точности профиля зубьев после серийного технологического процесса (зубошлифование с последующим зубохонингованием) и операции совмещенной обработки комбинированным червячным кругом выполнен на контрольной измерительной машине фирмы Р-40 Klingelnberg (рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 – Контрольно-измерительная машина P-40 Klingelberg

Исследование шероховатости зубьев цилиндрических колес производилось на профилометре MarSurf M300C Mahr (рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 – Измерение шероховатости зубьев на профилометре MarSurf M300C Mahr

Для проведения исследования микроструктуры на электроэрозионном станке вырезаны образцы согласно схеме (рисунок 3.12). Вырезка образцов проводилась электроэрозионным методом по внутренней диафрагме шестерни, не затрагивая эвольвентных поверхностей зубьев [68].

*a**б*

Рисунок 3.12 – Общий вид вырезки образца для исследования микроструктуры: *a* – общий вид зубчатого колеса; *б* – общий вид образца

Исследование изменений микротвердости и микроструктуры поверхностного слоя проведены в металлографической лаборатории АО «Редуктор-ПМ» на приборах:

1. Внешний вид образцов исследован на стереомикроскопе Zeiss Stemi 2000-C (рисунок 3.13, *a*).
2. Исследование микроструктуры поверхности зубьев выполнено на оптическом инвертированном микроскопе Zeiss Axivert 40 MAT (рисунок 3.13, *б*) [17].

*a**б*

Рисунок 3.13 – Приборы для металлографического исследования: *a* – стереомикроскоп Zeiss Stemi 2000-C; *б* – оптический инвертированный микроскоп Zeiss Axivert 40 MAT

Исследования производились на образцах, вырезанных из цилиндрических зубчатых колес на электроэрозионном станке AQ300L Sodick. Общий вид образца представлен на рисунке 3.14 а. На рисунке 3.14б представлено изображение, полученное с стереомикроскопа микроскопа Stemi 2000-C Zeiss. На рисунке 3.14, в, приведено изображение структуры, полученное на микроскопе Zeiss Axivert 40 MAT.

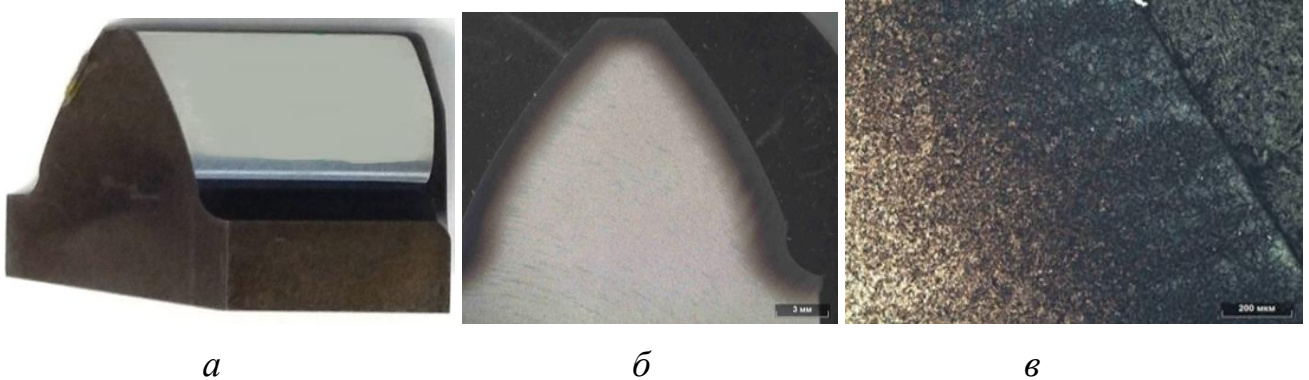


Рисунок 3.14 – Образцы для металлографических исследований: *а* – общий вид; *б* – вид образца с микроскопа Zeiss Stemi 2000-C; *в* – структура материала с Zeiss Axivert 40 MAT

3. Микротвердость определена по кривым распределения методом восстановленного отпечатка по шкале Виккерса на приборе BUEHLER MICROMET 5104 (рисунок 3.15) [72]. Снимки получены с помощью цифровой фотокамеры Canon EOS650D.

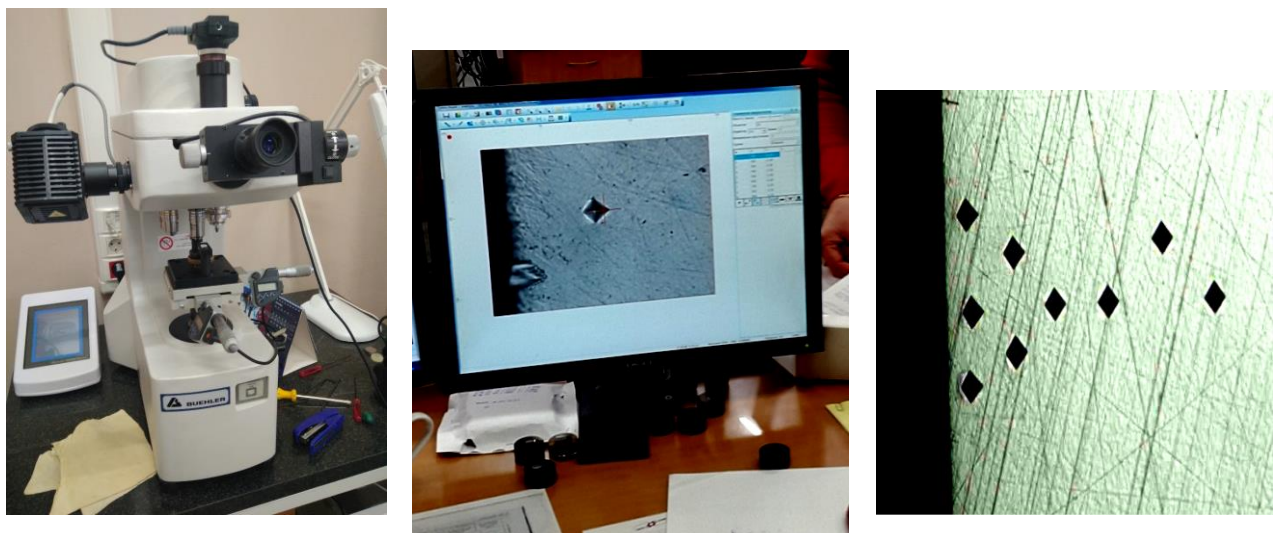


Рисунок 3.15 – Измерение микротвердости на микротвердомере BUEHLER MICROMET 5104

Для исследования микротвердости и остаточных напряжений на электроэрозионном станке вырезаны призматические образцы размерами 5x3x75 мм методом по схеме согласно рисунку 3.16.

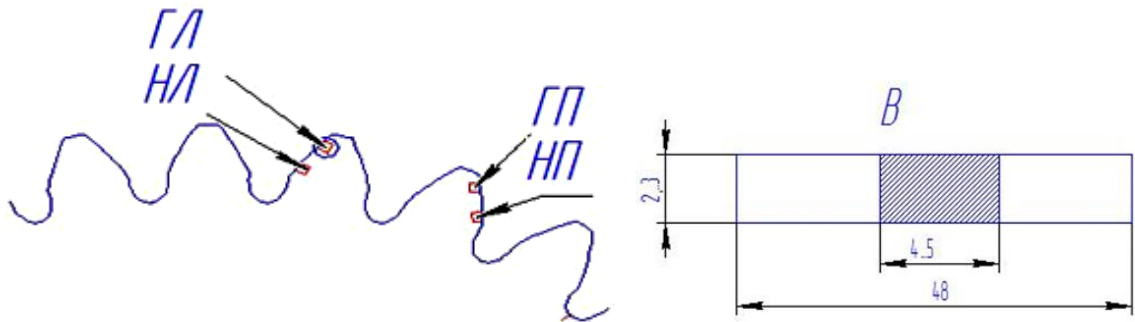
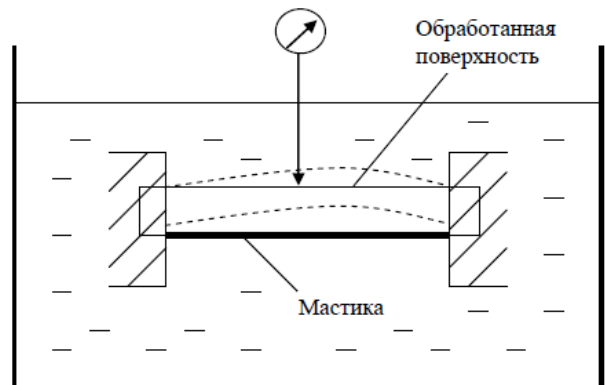


Рисунок 3.16 – Эскиз вырезки образцов и мест контроля остаточных напряжений на зубьях шестерен (Г – головка, Н – ножка, Л – левая, П – правая)

Исследования остаточных напряжений проведены на установке АПООН по методике ПИ 1.4.804-84 (НИАТ-1985 г.) [72] в лаборатории «ОДК-ПМ» методом Н.Н. Давиденкова. Общий вид установки и схема крепления образцов представлены на рисунке 3.17.



a



б

Рисунок 3.17 – Установка АПООН: *a* – общий вид; *б* – схема крепления образца

В таблице 3.1 приведен расчёт необходимого количества образцов для исследований шероховатости, остаточных напряжений, микротвердости, микроструктуры. Для проведения исследований параметров качества поверхностного слоя необходимо одно зубчатое колесо, обрабатывалось методом совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом на рациональном режиме с получением шероховатости эвольвентных поверхностей зубьев $Ra < 0,16$ мкм. После этого из данного зубчатого колеса необходимо вырезать образца: три зуба, один из которых необходим для исследования микроструктуры, второй – для исследования микротвердости, и третий образец для исследования остаточных напряжений. Для проведения сравнительных испытаний необходимо подготовить аналогичные образцы из цилиндрического зубчатого колеса, изготовленного по серийному технологическому процессу.

Таблица 3.1 – Расчет количества образцов для исследования точности и качества поверхностного слоя зубьев

№п/п	Параметр качества	Метод исследования	Вид образцов	Число образцов
1	Остаточные напряжения	Н.Н. Давиденкова	Пластины	4 по серийному и 4 по опытному ТП
2	Микротвердость	Вдавливание алмазной пирамиды на поперечных шлифах, микроскоп	Пластины	4 по серийному и 4 по опытному ТП
3	Микроструктура	На поперечных шлифах, микроскоп	Зуб	1 по серийному и 1 опытному ТП
4	Шероховатость	профилометре профилографе фирмы МАНР	Деталь	1 по серийному и 1 по опытному ТП
5	Точность зубьев на зубчатом колесе	КИМ Р-40 фирмы Klingelberg	Деталь	1 по серийному и 1 по опытному ТП

3.5. Разработка методики планирования полнофакторного эксперимента для получения математической модели влияния режимов совмещенной обработки цикла зубополирования на шероховатость

В результате анализа серийной технологии установлено, что параметры точности зубчатого венца обеспечиваются на операции зубошлифования, однако шероховатость рабочих поверхностей зубьев превышает установленные требования. Для получения шероховатости зубьев $Ra \leq 0,16$ мкм введена дополнительная операция зубохонингования, которая при обеспечении шероховатости ухудшает параметры точности. Анализ научной литературы и опыта предприятий показал, что на шероховатость поверхности влияет большое число факторов. Однако среди них выделяют: глубину резания, подачи, число выхаживаний, зернистость, концентрацию, правку круга.

Для проведения экспериментальных работ выбран станок RZ basic Reishauer, на котором вводятся следующие параметры обработки, которые могут быть приняты за варьируемые параметры при планировании эксперимента:

- 1) число проходов (1 ... 10);
- 2) радиальная подача на рабочий ход, мм (0,005 ... 0,03);
- 3) число оборотов шлифовального круга, 1/мин (2400 ... 3000);
- 4) скорость радиальной подачи, мм/мин (60)
- 5) подача ZI , мм/об (0,55 ... 0,57);
- 6) подача YI , мм/мм хода (0 ... 0,005);
- 7) сдвиг шифтинга, мм (0);
- 8) охлаждающее масло, л/мин (50...90).

Если закладывать в эксперимент все параметры варьирования станка $2^8=256$, то потребуются провести 256 экспериментов, что значительно трудоемко, Учитывая данные научной литературы и опыта предприятий, выбираем два только параметра – радиальную подачу и продольную подачу, от которых в

значительной степени зависят размеры пятна контакта. Исходную шероховатость определим, как константу равную, $Ra=0,242 \pm 0,02$ мкм (рисунок 3.18)

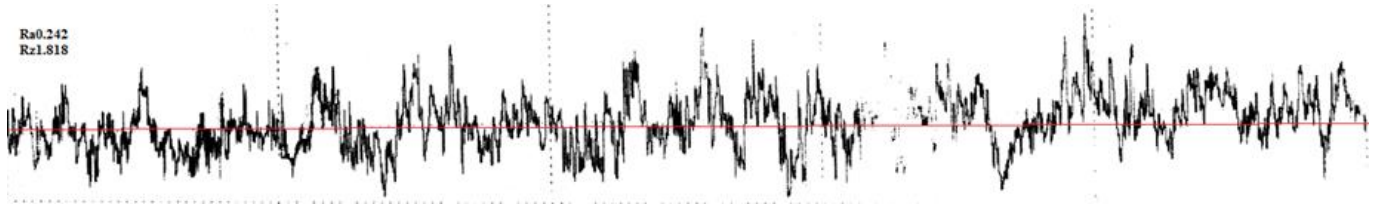


Рисунок 3.18 – Исходная шероховатость после I цикла составляет $Ra=0,242$ мкм

Перед проведением каждого опыта производили правку червячного круга алмазным роликом на одинаковом режиме. Таким образом в качестве варьируемых параметров выбраны следующие: радиальная подача $X_1 = S_{rad}$, и продольная подача $X_2 = S_{np}$.

В качестве исходных данных определены следующие параметры режимов резания при зубошлифовании – первая стадия включает в себя четыре ступени обработки. Режимы резания, принятые за константу, приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Режимы резания первого цикла комбинированной обработки

Параметр	1-я ступень	2-я ступень	3-я ступень	4-я ступень	5-я ступень
Число проходов N	2	5	1	1	10
Радиальная подача на рабочий ход $S_{rad/x}$, мм	0,085	0,04	0,02	0,01	$X1$
Накопленная радиальная подача $S_{rad/x} \cdot N$, мм	0,17	0,2	0,02	0,01	$X1 \cdot 10$
Число оборотов шлифовального круга $n_{кр}$, об/мин;	2350	2350	2350	2350	3000
Скорость радиальной подачи V_{rad} , мм/мин	60	60	60	60	60
Подача $Z1$, мм/об	0,48	0,48	0,24	0,12	$X2$
Подача $Y1$, мм/мм хода	0,04	0,03	0,287	0,287	0,005
Сдвиг шифтинга H , мм	0	0	-14	-52	0
Охлаждающее масло O , %	100	100	80	70	50
LNS	Вкл.	Вкл.	Вкл.	Вкл.	Вкл.

Станок RZ basic Reishauer выполняет встречное и попутное шлифование. При проведении экспериментальных работ всегда назначалось попутное. На основании проведенных расчетов в работе [85] установлено, что при попутном шлифовании толщина среза металла наибольшая при врезании и наименьшая при выходе зерна из металла, что важно при обеспечении требуемой шероховатости поверхности.

Также следует отметить, что экспериментальные работы по шлифованию выполнялись с включённой функцией станка *LNS2* для прямозубых зубчатых колес. Функция *LNS* – функция расчета движения шифтинга, исключая появление регулярной шероховатости. Регулярная шероховатость на поверхности детали образуется как отношение вращения алмазного ролика и шлифовального круга. Например, при правке алмазным роликом с $n=1000$ об/мин и червячного круга с $n=10$ об/мин образуется 100 участков регулярной шероховатости. *LNS* как дополнительное механическое движение в кинематике непрерывного шлифования создает нерегулярные поверхностные структуры, которые предотвращают генерацию тональных возбуждений. Как следствие, шестерни *LNS* не создают нежелательного шума передачи. *LNS* незаметно работает в фоновом режиме процесса шлифования. Ноль шифтинга круга рассчитывается как $1/3$ от начала первого витка шлифовального круга.

Метод математического планирования экспериментов [4] позволяет значительно сократить количество опытов и образцов. В таблице 3.3 определены интервалы варьирования.

Таблица 3.3 – Условия проведения полного факторного эксперимента

Уровни	Переменные	
	$X1$	$X2$
	S_{rad}/x , мм	S_{np} , мм/об
Верхний +1	0,015	0,36
Нулевой 0	0,01	0,24
Нижний -1	0,005	0,12

Зависимость шероховатости от радиальной и продольной подач – нелинейная, представим ее в виде:

$$y(x_1, x_2, x_k) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k b_{ij} x_i x_j. \quad (3.2)$$

Полнофакторный эксперимент по типу $N=2^2$ приведен в таблице 3.4. Тогда уравнение регрессии будет записано в виде формулы (3.3).

Таблица 3.4 – Матрица планирования эксперимента 2^2

№ опыта	$X0$	$X1$	$X2$	$X1 X2$	y
1	+	-	-	+	y_1
2	+	+	-	-	y_2
3	+	-	+	-	y_3
4	+	+	+	+	y_4

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2, \quad (3.3)$$

Столбцы $X1$, $X2$ – задают условие опыта, $X0$, $X1X2$ необходимы только для расчета. Проведено три параллельных опыта, получены значения отклика и определено среднее значение. Произведен регрессионный анализ с получением эмпирической математической модель, адекватность проверена по критерию Фишера.

3.6. Выводы по главе 3

1. Разработана методика проведения экспериментальных исследований для определения рационального режима совмещенной обработки шлифовальным полировальным червячным кругом.
2. Выбрано технологическое оборудование, правящий и режущий инструмент; оборудование и приборы для измерения и исследования образцов.
3. Разработана методика планирования полнофакторного эксперимента для получения математической модели влияния радиальной и продольной подачи на шероховатость эвольвентной поверхности зуба.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Результаты исследования влияния радиальной и продольной подач при совмещенной обработке на цикле полирования на шероховатость

На основе априорных данных формулу шероховатости Ra представим в следующем виде:

$$Ra = b_0 \cdot S_{\text{рад}}^{k1} + S_{\text{пр}}^{k2}, \quad (4.1)$$

где $S_{\text{рад}}$ – радиальная подача, $S_{\text{пр}}$ – продольная подача, $k1, k2$ – показатели степени, b_0 – коэффициент пропорциональности, зависящий от многих неучтенных факторов.

Уравнение (4.1) после логарифмирования имеет вид:

$$Y = \ln Ra = b_0 + b_1 X_1 - b_2 X_2. \quad (4.2)$$

На основе данных таблицы 3.5 и планирования произведено четыре опыта определения влияния радиальной и продольной подач на величину шероховатости при совмещенной обработке шлифовально-полировальным червячным кругом. С целью уменьшения влияния случайных факторов на эксперимент проведено три параллельных опыта. Среднее арифметическое значение функции отклика определяется формулой [74]:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n_j} \cdot \sum_{u=1}^{n_j} y_{ju}, \quad (4.3)$$

где j – номер опыта, u – номер параллельного опыта, n_j – количество параллельных опытов в j -й строке матрицы, y_{ju} – значение функции отклика в u -м параллельном опыте.

Дисперсия каждого среднего арифметического значения вычислялась по формуле [74]:

$$S_j^2 = \frac{1}{n_j - 1} \cdot \sum_{u=1}^{n_j} (y_{ju} - \bar{y}_j)^2, \quad (4.4)$$

Экспериментальные значения величины шероховатости поверхностей зубьев указаны в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Экспериментальные значения шероховатости

№ опыта	y_1	y_2	y_3
1	0,089	0,09	0,092
2	0,158	0,159	0,161
3	0,12	0,11	0,105
4	0,17	0,18	0,19

В таблице 4.2 приведены экспериментальные значения шероховатости и расчетные значения по формулам (4.3), (4.4).

Таблица 4.2 – Результаты шероховатости и расчетные данные

№ опыта	y_1	y_2	y_3	\bar{y}_j	S_j^2	Y	$(Y - \bar{y}_j)^2$
	$\ln y_1$	$\ln y_2$	$\ln y_3$				
1	0,089	0,09	0,092	0,09033	0,0002845	-2,381942	0,0005018
	-2,41912	-2,40794	-2,38597	-2,40434			
2	0,158	0,159	0,161	0,15933	$9,1642 \cdot 10^{-5}$	-1,859189	0,0005018
	-1,84516	-1,83885	-1,82635	-1,83678			
3	0,12	0,11	0,105	0,11166	0,0045943	-2,216179	0,0005018
	-2,12026	-2,20727	-2,25379	-2,19377			
4	0,17	0,18	0,19	0,18	0,0030936	-1,693427	0,0005018
	-1,77195	-1,71479	-1,66073	-1,71582			
–	$\Sigma 0,537$	$\Sigma 0,539$	$\Sigma 0,548$	–	Σ 0,008064008	–	0,002007
–	–	–	–	–	$S^2_{max} =$ 0,004594	–	–

Оценка коэффициентов регрессии производилась по критерию Кохрена

$$G = \frac{S_{max}^2}{\sum_{i=1}^n S_i^2}, \quad (4.5)$$

Предельное значение критерия Кохрена определяется по таблицам [74] при уровне значимости $\alpha=0,05$ для количества выборок 3 и степени свободы 4. Экспериментальное значение не превышает табличного (4.6), гипотеза об однородности дисперсий принимается.

$$G = \frac{0,004594287}{0,008064008} = 0,56972752 < G_{кр} = 0,7679 \quad (4.6)$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие линейные эффекты [74]:

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij} \cdot \bar{y}_j}{n}, \quad (4.7)$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие эффекты взаимодействия [74]:

$$b_{il} = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij} \cdot x_{lj} \cdot \bar{y}_j}{n}, \quad (4.8)$$

где i, l – номера факторов; x_{ij}, x_{lj} – кодированные значения факторов i и l в j -м опыте.

b_0 вычисляют по формуле [74]:

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{y}_j}{n} \quad (4.9)$$

Средняя арифметическая дисперсия всех опытов [74]:

$$S^2\{y\} = \frac{\sum_{j=1}^n S_j^2}{n} \quad (4.10)$$

Дисперсия коэффициентов регрессии [74]:

$$S^2\{b_i\} = \frac{S^2\{y\}}{n \cdot r} \quad (4.11)$$

В таблице 4.3 приведены расчётные коэффициенты и определена их значимость на влияние факторов на функцию отклика. Проверка гипотезы по критерию Стьюдента (4.12) [74], расчётные значения приведены в таблице 4.3.

$$t_i = \frac{|b_i|}{\sqrt{S^2\{b_i\}}} \quad (4.12)$$

Критическое значение $t_{кр}$ определялось по таблицам [74] при $n \cdot (r-1) = 4 \cdot (3-1) = 8$ степенях свободы и уровне значимости $\alpha = 0,05$ критическое значение $t_{кр} = 2,3$. Если $t_i > t_{кр}$, то гипотеза отвергается и коэффициент b_i признается значимым.

Таблица 4.3 – Рассчитанные коэффициенты регрессии

Коэффициент	Значение	Дисперсия	Критерий Стьюдента
b_0	-2,037684443	-2,03768444	157,210687
b_1	0,261376324	0,261376324	20,1656109
b_2	0,082881133	0,082881133	6,394415
b_{12}	-0,02240184	0	1,72833861

Коэффициенты регрессий рассчитаны по методу наименьших квадратов и получено уравнение регрессии (4.13):

$$Y = -2,038 + 0,261 \cdot x_1 + 0,829 \cdot x_2 - 0,022 \cdot x_{12} \quad (4.13)$$

Где b_{12} не является значимым коэффициентом тогда уравнение примет вид:

$$Y = -2,038 + 0,261 \cdot x_1 + 0,829 \cdot x_2 \quad (4.14)$$

Составим эмпирическую математическую модель шероховатости зубчатых колес и проверим на адекватность через отклонение Y (4.14) от результатов эксперимента \bar{y}_j в точке j -го опыта.

Дисперсию адекватности [74]:

$$S_{ад}^2 = \frac{n_i}{n-(k+1)} \cdot \sum_{i=1}^n (Y - \bar{y}_i)^2 \quad (4.15)$$

где \bar{y}_j – среднее арифметическое значение параметра оптимизации в i -ом опыте, Y – значение функции отклика, вычисленное по уравнению регрессии для условий i -го опыта, k – число факторов.

Проверим гипотезу об адекватности по критерию Фишера [74]:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S^2\{Y\}} \leq F_{кр}, \quad (4.16)$$

Табличное критическое значение Фишера для 5%-ного уровня значимости и числах степеней свободы $f_6=1$ и $f_м=8$ $F_{кр}=5,3$. Вычислим отношение:

$$F = \frac{0,00602}{0,002016} = 2,98715 \leq 5,3 \quad (4.17)$$

Проведём обратную замену $X_2=S_{np}$ – продольная подача, $X_1=S_{рад}$ – радиальная подача:

$$x_1 = \frac{(\ln x_1 - \ln x_{1 \max})}{\ln x_{1 \max} - \ln x_{1 \min}} + 1 = \frac{2 \cdot (\ln S_{рад} - \ln 0,015)}{\ln 0,015 - \ln 0,05} + 1 \quad (4.18)$$

$$x_2 = \frac{(\ln x_2 - \ln x_{2 \max})}{\ln x_{2 \max} - \ln x_{2 \min}} + 1 = \frac{2 \cdot (\ln S_{np} - \ln 0,36)}{\ln 0,36 - \ln 0,12} + 1 \quad (4.19)$$

После подстановки в уравнение (4.14):

$$\ln f = Y = -2,03768444 + 0,261376324 \cdot \left(\frac{2 \cdot (\ln S_{рад} - \ln 0,015)}{\ln 0,015 - \ln 0,05} + 1 \right) + 0,08288 \cdot \left(\frac{2 \cdot (\ln S_{np} - \ln 0,36)}{\ln 0,36 - \ln 0,12} + 1 \right) \quad (4.20)$$

Произведем математические преобразования уравнения (4.20) и получим:

$$Y_{10} = -2,038 + 0,261 \cdot S_{рад} + 0,083 \cdot S_{np} \quad (4.21)$$

$$Y_{10} = 0,475145 \cdot \ln S_{рад} + 0,01511 \cdot S_{np} + 0,4558395 \quad (4.22)$$

После находим зависимость шероховатости поверхностей зубьев от радиальной и продольной подачи на цикле зубополирования при комбинированной обработке шлифовально-полировальным кругом:

$$Ra = 1,577 \cdot S_{рад}^{0,4752} \cdot S_{np}^{0,1512} \quad (4.23)$$

Согласно формуле (4.23) построены графики, представленные на рисунке 4.1, можно сделать вывод, что на величину шероховатости наиболее влияние оказывает радиальная подача $S_{рад}$, продольная подача S_{np} оказывает влияние в меньшей степени. Аналогичная зависимость наблюдается для площади пятна контакта: на площадь пятна контакта значительное влияние оказывает радиальная подача, продольное оказывает незначительное влияние.

Минимальная шероховатость Ra эвольвентных поверхностей зубьев при совмещенной обработке шлифовально-полировальным кругом на цикле зубополирования получена при радиальной подаче $S_{рад}=0,05$ мм, и продольной подаче $S_{np}=0,12$ мм/об.

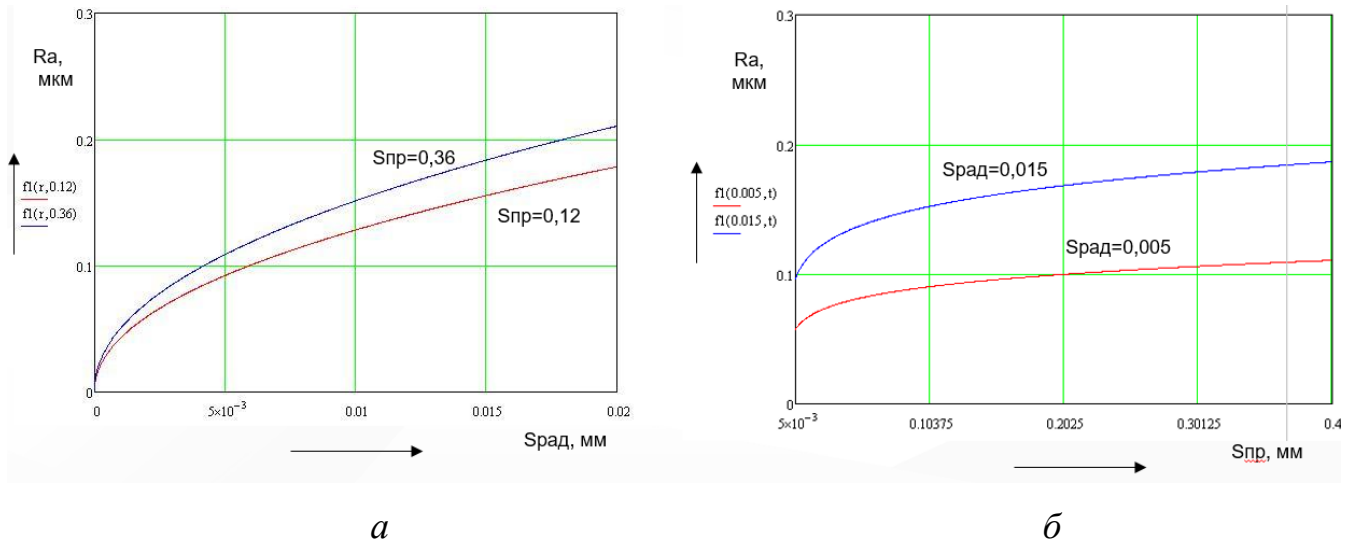


Рисунок 4.1 – Графики зависимостей от искомых переменных:

a – шероховатости от радиальной подачи; *б* – шероховатости от продольной подачи

4.2. Результаты исследования точности для зубчатого колеса, обработанного на рациональных режимах совмещенной обработки с получением минимальной шероховатости эвольвентных поверхностей зубьев

Сравнительные исследования параметров точности зубчатого венца производились для зубчатых колес, изготовленных по серийному технологическому процессу и после совмещенной обработки на рациональных режимах, с получением минимальной шероховатости. На рисунке 4.2 представлена профилограмма с минимальной шероховатостью эвольвентной поверхности зуба. Шероховатость боковой поверхности зуба составляет $R_a=0,089$ μm .

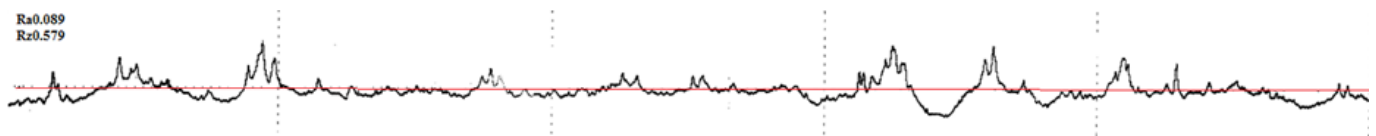


Рисунок 4.2 – Профилограмма с минимальной шероховатостью эвольвентной поверхности зуба $R_a=0,089$ μm

На рисунке 4.3 представлен протокол результатов измерения с КИМ Р-40 Klingelnberg. Средняя погрешность профиля составляет $F_\alpha = 1,6$ мкм.

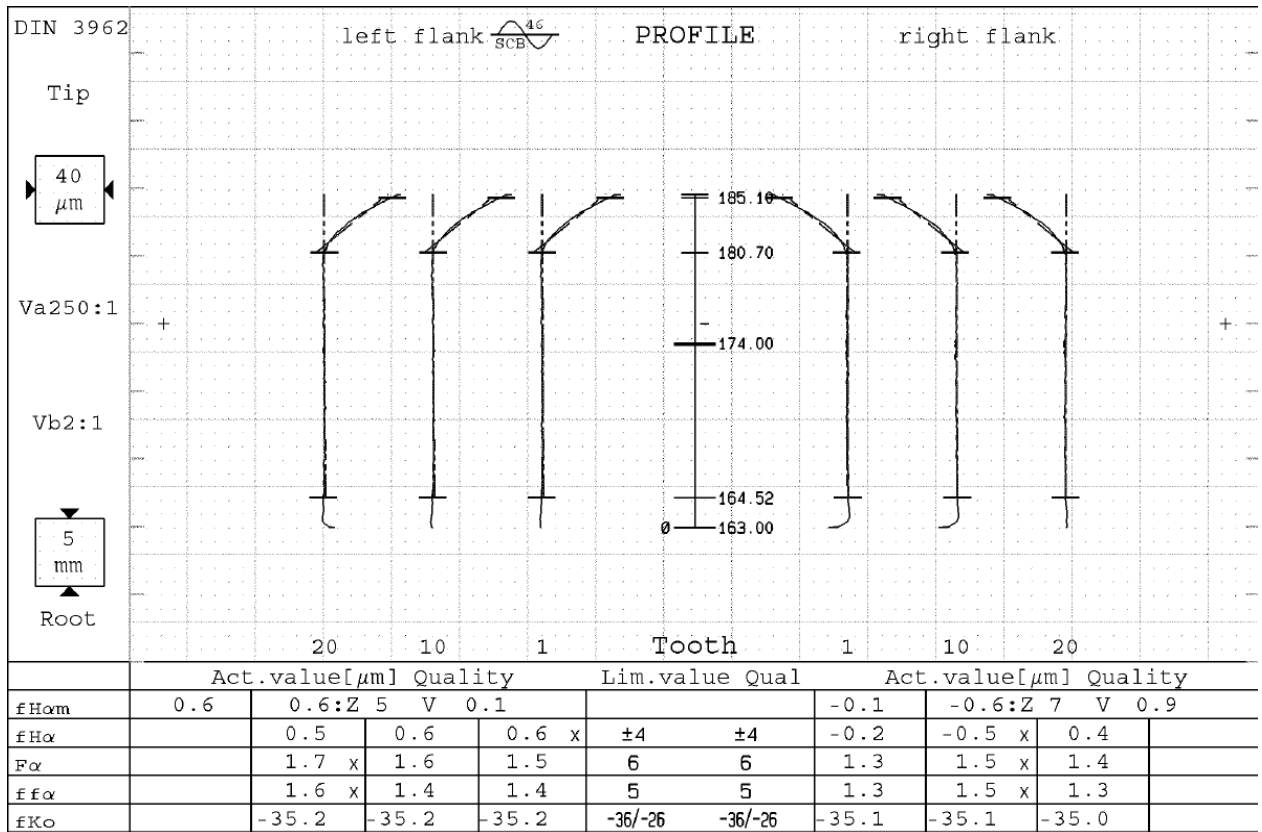


Рисунок 4.3 – Протокол измерения параметров погрешности профилей зубьев после совмещенной обработки шлифовально-полировальным кругом

Результаты точности профиля зубьев (рисунок 4.4) показали, что совмещенная обработка шлифовально-полировальным червячным кругом после цикла зубополирования обеспечивает точность и шероховатость. Погрешность профиля составляет $F_\alpha = 1,6$ мкм; $F_b = 3,2$ мкм – погрешность направления зуба, $F_r = 3,8$ мкм – радиальное биение; отклонение окружного шага $f_p = 1,7$ мкм; накопленная погрешность – $F_p = 4,2$ мкм.

Общее время совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом составляет 24 минуты. Время выполнения операций зубошлифования и зубохонингования серийного технологического процесса составляет 64,4 минуты. Что увеличивает производительность более чем в 2,5 раза. Также исключается необходимость периодической правки алмазного зубчатого хона, которая занимает 72,4 минуты.

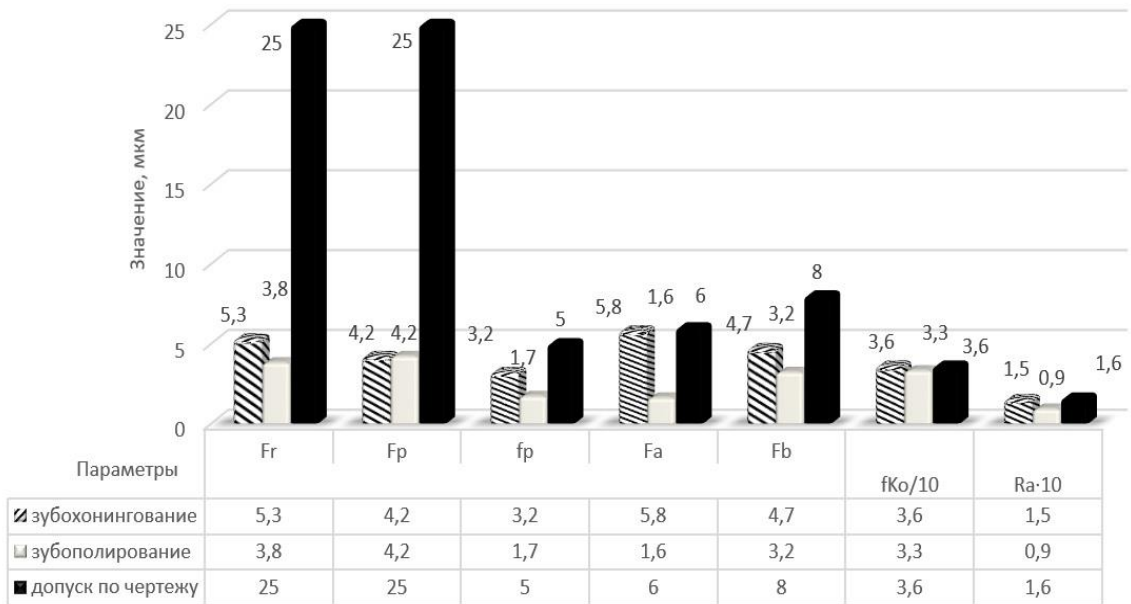


Рисунок 4.4 – Параметры точности зубчатого венца

4.3. Результаты экспериментальных исследований микроструктуры поверхностного слоя зубьев

Операция контроля шлифовочных прижогов травлением на шлифованных поверхностях зубьев выполнялась согласно действующей инструкции И066-027–2003. Прижогов на поверхности зубьев зубчатого колеса, обработанного методом совмещенной обработки шлифовально-полировальным кругом, не обнаружено.

Согласно инструкции И066-027-2003 заготовки деталей после окончательной механической обработки проходят последовательно следующие операции: обезжиривание, промывка в воде, травление в кислотном растворе, промывка в холодной воде, разрыхление шлама, промывка в холодной воде, обработка в нейтрализующем растворе, промывка в горячей воде, сушка сжатым воздухом, отпуск, контроль на прижоги. Допускается контроль на прижоги проводить до проведения отпуска. Поверхности деталей при контроле не должны иметь риски, царапины и следы травления. Шероховатость допускается $Ra \leq 0,16$ мкм. Контроль прижогов производят визуально или с применением лупы 4-кратного увеличения. Прижоги выявляются в виде темных и светлых участков,

полос, штрихов на матовой травленной поверхности. Допускается повторная переполіровка в пределах допуска и травление в сомнительных случаях [79].

Общий вид образца зуба, полученный с помощью стереомикроскопа Stemi 2000-C Zeiss, приведен на рисунке 4.5, *а*. Исследование микроструктуры проведено на оптическом микроскопе Axio Vert 40 MAT Zeiss, изображения, полученные с помощью оптического микроскопа, приведены на рисунке 4.5, *б*, *в*, *г*. В результате анализа установлено, что микроструктура цементируемого слоя на образцах после серийного технологического процесса и совмещенной обработки совпадает, является удовлетворительной и состоит из мелкоигльчатого и высокоуглеродистого мартенсита. Сердцевина – мелкоигльчатый низкоуглеродистый мартенсит.

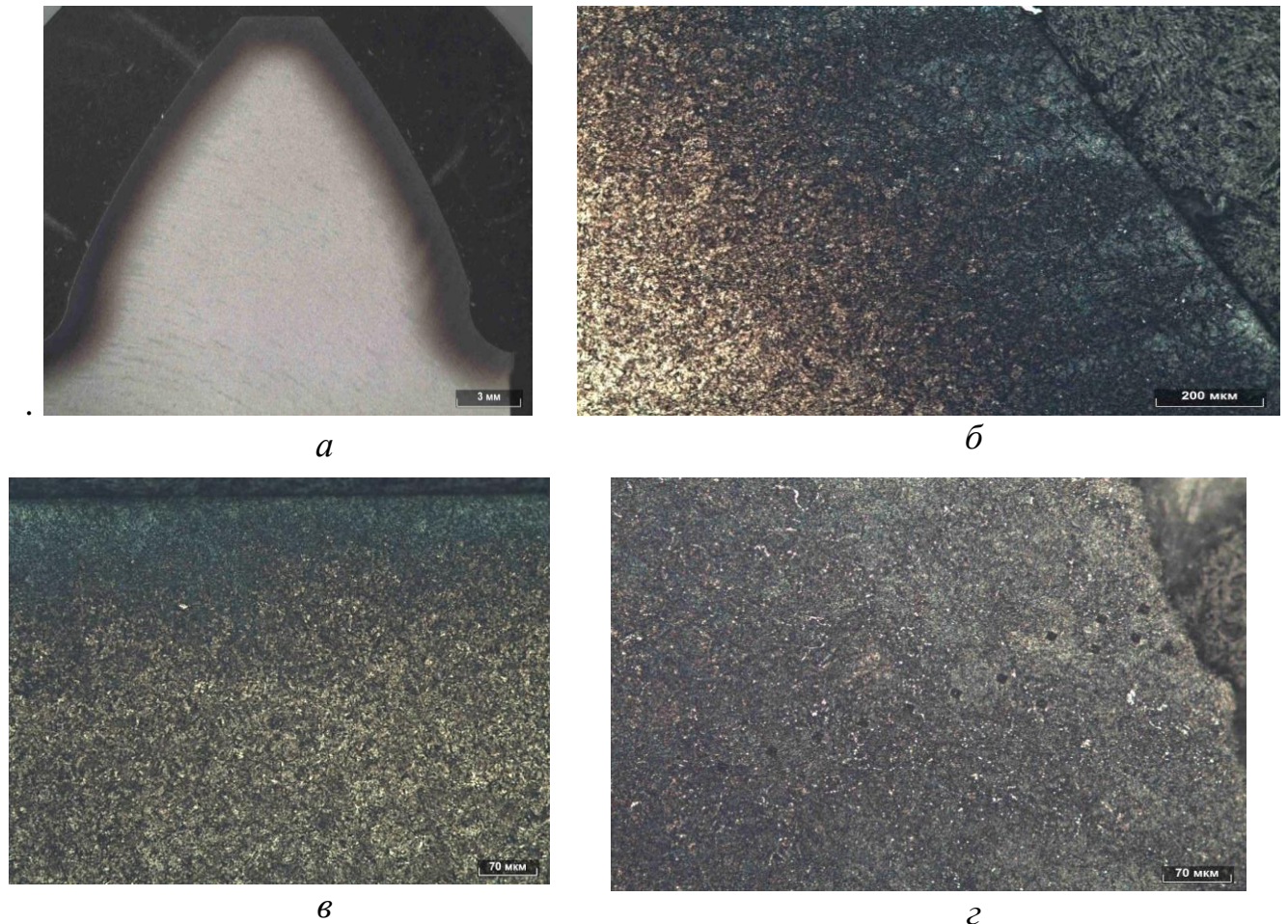


Рисунок 4.5 – Образцы для исследования микроструктуры:
а – общий вид; *б* – переходная поверхность; *в* – микроструктура цементного слоя; *г* – микроструктура сердцевины

4.4. Результаты экспериментальных исследований микротвердости

При исследовании микротвердости поверхностей зубьев необходимо учитывать состояние поверхности после химико-термической обработки: материал 18Х2Н4ВА-Ш, цементация и высокий отпуск: на глубину 1,5 ... 1,8 мм до твердости $HRC \geq 43,5$. Закалка до твердости $HRC \geq 61$ цементированных поверхностей, нецементированных поверхностей $HRC \geq 45$, после обработка холодом. На рисунке 4.6 представлены результаты исследования микротвердости поверхности.

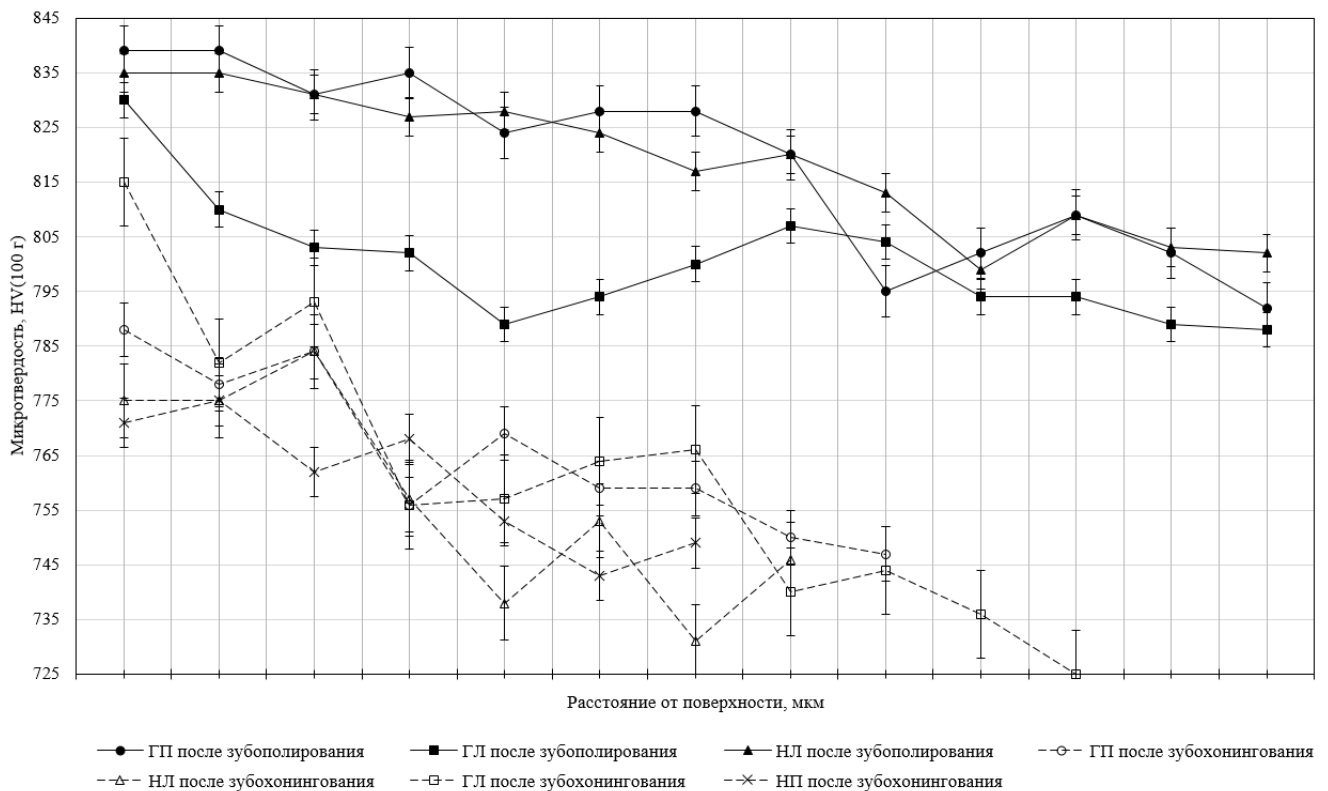


Рисунок 4.6 – Результаты распределения микротвердости

Микротвердость поверхностного слоя зубьев шестерен определяется твердостью цементированного слоя, глубина которого (0,9...1,2 мм) намного превышает толщину поверхностного слоя, который образуется при последовательной механической обработке зубьев шестерен (0,2...0,25 мм). Микротвердость соответствует $HV > 715$. Минимальные значения у ножки левой

после зубохонингования и ножки правой после зубохонингования. Максимальное значение микротвердости определены у головки зуба после полирования.

Установлено что, независимо от метода окончательной обработки зубьев зубохонингованием или зубополированием, максимальное значение микротвердости на поверхности зубьев практически не изменяется и составляет от 820 до 770 кг/мм².

4.5. Результаты экспериментальных исследований формирования величины и распределения остаточных напряжений зубьев

Результаты исследования остаточных напряжений образцов зубьев приведены в таблице 4.4, на рисунке 4.7 построен график распределения остаточных напряжений для левой и правой сторон на головке и ножке зубьев (ГЛ, НЛ, ГП, ГЛ).

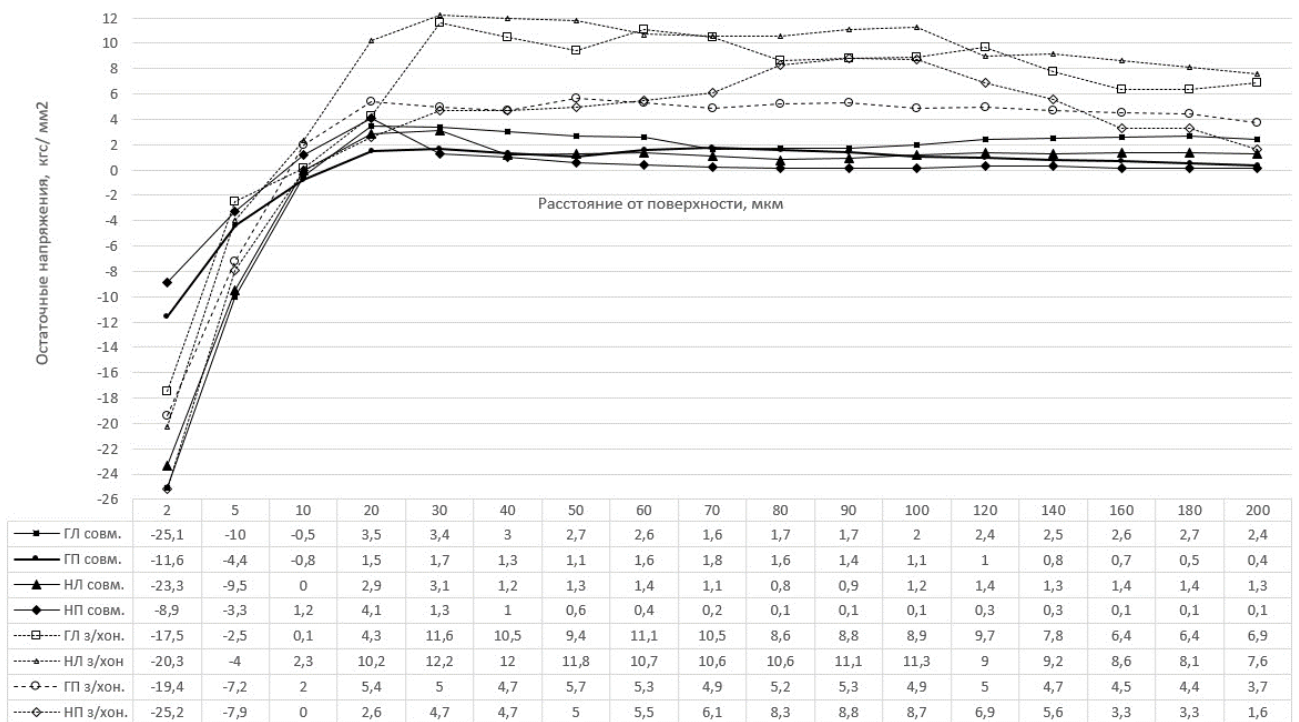


Рисунок 4.7 – Распределение остаточных напряжений

Таблица 4.4 – Результаты исследования остаточных напряжений образцов

Расстояние от поверхности, мкм	Остаточные напряжения в кгс/мм ² («-» сжимающие, «+» растягивающие) после зубохонингования							
	Образцы ГЛ		Образцы НЛ		Образцы ГП		Образцы НП	
	Усл.1	Усл.2	Усл.1	Усл.2	Усл.1	Усл.2	Усл.1	Усл.2
2	-31,8	-17,5	-35,9	-20,3	-33,2	-19,4	-34,9	-25,2
5	-11,9	-2,5	-12,4	-4,0	-15,8	-7,2	-9,7	-7,9
10	-1,9	0,1	-2,3	2,3	-2,5	2,0	-1,2	0
20	4,3	4,3	3,8	10,2	3,5	5,4	8,8	2,6
30	8,7	11,6	7,6	12,2	6,5	5,0	10,4	4,7
40	8,2	10,5	8,3	12,0	6,8	4,7	9,5	4,7
50	8,7	9,4	9,4	11,8	7,5	5,7	8,8	5,0
60	8,0	11,1	9,1	10,7	6,9	5,3	10,1	5,5
70	8,8	10,5	8,5	10,6	6,0	4,9	9,2	6,1
80	9,3	8,6	9,3	10,6	6,5	5,2	8,1	8,3
90	7,5	8,8	9,7	11,1	6,4	5,3	7,5	8,8
100	7,1	8,9	9,1	11,3	6,1	4,9	5,4	8,7
120	7,5	9,7	8,1	9,0	5,8	5,0	3,9	6,9
140	7,3	7,8	8,6	9,2	6,2	4,7	3,5	5,6
160	7,6	6,4	9,7	8,6	6,1	4,5	2,6	3,3
180	7,7	6,4	9,0	8,1	5,8	4,4	2,6	3,3
200	7,8	6,9	9,8	7,6	5,8	3,7	3,3	3,3
$\sigma_{сж}^{max}$ кгс/мм ²	-31,8	-17,5	-35,9	-20,3	-33,2	-19,4	-34,9	-25,2
$\sigma_{раст}^{max}$ кгс/мм ²	9,3	11,6	9,8	12,2	7,5	5,7	10,4	8,8
$\Delta_{\Delta=0}$, мкм	13	10	14	8	14	9	11	10

На образцах головки правой: до $-19,4...-11,6$ кгс/мм², переходящие в растягивающие до $5,7...7,5$ кгс/мм² на глубине 9–14 мкм. На образцах ножки левой до $-20,3...-35,9$ кгс/мм², переходящие в растягивающие до $9,8...12,2$ кгс/мм² на глубине 8–14 мкм. На образцах головки правой до $-19,4...-33,2$ кгс/мм², переходящие в растягивающие до $5,7...7,5$ кгс/мм² на глубине от 9 до 14

мкм. На образцах ножки правой до $-25,2\dots-34,9$ кгс/мм², переходящие в растягивающие до $8,8\dots10,4$ кгс/мм² на глубине от 10 до 11 мкм.

В результате сравнительного анализа остаточных напряжений установлено, что при всех исследуемых процессах на поверхностном слое зубьев выявлены сжимающие напряжения, что может быть связано с превалирующим действием силового фактора над тепловым [9]. Величина и характер распределения остаточных напряжений идентичны.

4.6. Обработка партии заготовок зубчатых колес шлифовально-полировальным червячным кругом

Для проверки адекватности математической модели (4.24) произведена обработка партии заготовок зубчатых колес на рациональных режимах в цикле зубополирования: радиальная подача $S_{rad}=0,05$ мм, и продольной подаче $S_{пр}=0,12$ мм/об.

После находим зависимость шероховатости поверхностей зубьев от радиальной и продольной подачи на цикле зубополирования при комбинированной обработке шлифовально-полировальным кругом:

$$Ra = 1,577 \cdot S_{rad}^{0,4752} \cdot S_{пр}^{0,1512} . \quad (4.24)$$

Согласно формуле (4.23) построены графики, представленные на рисунке 4.5, можно сделать вывод, что на величину шероховатости наиболее влияние оказывает радиальная подача, продольная подача $S_{пр}$ оказывает влияние в меньшей степени. Аналогичная зависимость наблюдается для площади пятна контакта: на площадь пятна контакта значительное влияние оказывает радиальная подача, продольное оказывает незначительное влияние.

Минимальная шероховатость Ra эвольвентных поверхностей зубьев при совмещенной обработке шлифовально-полировальным кругом на цикле

зубополирования получена при радиальной подаче $S_{rad}=0,05$ мм, и продольной подаче $S_{np}=0,12$ мм/об.

4.6. Разработка технологических рекомендаций для внедрения совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом

1. На рисунке 4.8 приведены рекомендации по распределению припуска между циклами.

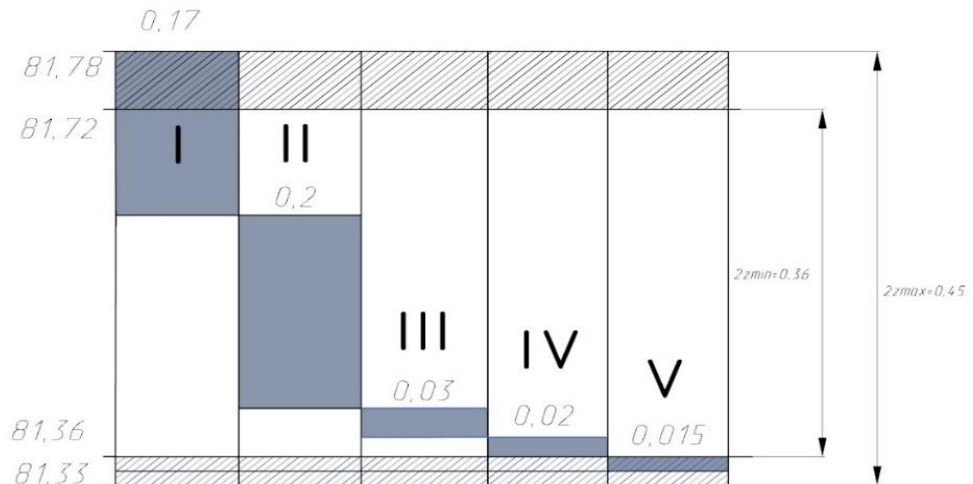


Рисунок 4.8 – Рекомендации по распределению припуска

Припуск на операцию зубошлифования рассчитывается как разница длины общей нормали на операции зубофрезерования $L_{з/фр.}=81,78_{-0,06}$ мм и зубошлифования $L_{з/шл.}=81,36_{-0,03}$ мм.

$$2Z_{max}=(81,78 - 81,33)=0,45 \text{ мм}, 2Z_{min}=(81,72 - 81,36)=0,36 \text{ мм}.$$

На первом цикле для максимальной производительности снимаем припуск 0,17 мм, но за два прохода – радиальная подача $S_{rad}=0,085$ мм.

На втором цикле снимаем припуск 0,20 мм за пять проходов – радиальная подача $S_{rad}=0,04$ мм.

На третьем цикле снимаем припуск 0,03 мм за два прохода – радиальная подача $S_{rad}=0,015$ мм.

Припуск на четвертом цикле определили равным 0,02 мм. Поэтому снимать будем за два прохода и радиальной подачей $S_{rad}=0,01$ мм.

Припуск на пятом цикле определили равным 0,015 мм. Для назначения режимов резания, обеспечивающих требуемую шероховатость, точность и производительность необходимо провести экспериментальные исследования с планированием эксперимента.

2. Рекомендации к режимам правки шлифовально-полировального круга профильным алмазным роликом (рисунок 4.9).

REISHAUER

Название загот	7272.0309-02 LNS2	Инф загот 1	IM=6 Z=29 B=48	Инф загот 3	3SS=65 PS=60
		Инф загот 2	2EW=28 GG=3	Инф загот 4	KW

Способ правки	Профильная правка
Правка бок поверхность	последовательно
Правка головки	с предыдущим процессом проточки
Правка с СОЖ	<input checked="" type="checkbox"/>

Данные правки	Степень V	Степень 1	Степень 2	Степень 3	Степень 4
Степень активна		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Маятниковая правка		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Число ходов		11	6		
Деление после каждого хода		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Число об шлиф круга	1/мин	53	53		
Число об инструм правки	1/мин	6000	6000		
Радиальн подача на раб ход	мм	0,020	0,005		
Накопл радиальная подача	мм	0,220	0,030		
Встреч шлиф					

Рисунок 4.9 – Рекомендации для правки круга профильным алмазным роликом

Правку производить каждые 7 деталей. Данные получены на основании статистических данных 56 деталей при измерении погрешности профиля и шероховатости эвольвентных поверхностей зубьев.

1. Рекомендации к режимам резания совмещенной обработки шлифовально-полировальным кругом для цикла зубошлифования и зубополирования приведены на рисунке 4.10. Режимы зубошлифования стабильно обеспечивают шероховатость эвольвентной поверхности $Ra=0,24$ мкм перед циклом полирования. Режимы цикла зубополирования, обеспечивающие минимальную шероховатость эвольвентной поверхности зубьев – радиальная подача $S_{rad}=0,005$ мм и продольная подача $S_{np}=0,12$ мм/об.

Название загот		Инф загот 1		Инф загот 3	
0309 / Satellit		m6.0, EW28, z29		SLS m6.0, EW28, 3GG	
		Инф загот 2		Инф загот 4	
		DKS			

Параметр шлиф	I цикл шлифование				II цикл полирование
	Ступень 1	Ступень 2	Ступень 3	Ступень 4	Ступень 5
Сум подач рад: 0,470 норм:					
Ступень активна	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Дополн путь - конец положение хода	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Маятниковое движение	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Число ходов	2	5	1	1	3
Число оборотов шлиф круга 1/мин	2350	2350	2350	2350	3000
Радиальн подача на раб ход мм	0,085	0,04	0,02	0,01	0,005
Скорость радиальн подачи мм/мин	60,0	60,0	60,0	60	60
Подача Z1 мм/об	0,48	0,48	0,24	0,12	0,12
Подача Y1 мм/ммхода	0,040	0,030	0,287	0,287	0,005
Сдвиг шифтинга мм	0,000	0,000	-14,000	52,000	0,000
Охлаждающее масло %	100	100	80	70	50
Накопл радиальная подача мм	0,165	0,200	0,065	0,030	0,010

Рисунок 4.10 – Рекомендованные режимы для совмещенной обработки шлифовально-полировальным кругом

2. Получена эмпирическая зависимость шероховатости эвольвентной поверхности от продольной и радиальной подач для цикла полирования цементированной стали 18X2H4BA-III $HRC \geq 61$ шлифовании зерном F800 (6...10 мкм), при исходной шероховатости $Ra_{0,242 \pm 0,02}$ мкм после цикла зубошлифования.

$$Ra = 1,577 \cdot S_{rad}^{0,4752} \cdot S_{np}^{0,1512} \quad (4.23)$$

4.7. Расчет экономического эффекта от внедрения совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом

Экономического эффект от внедрения результатов исследований на АО «Редуктор-ПМ» рассчитан как разница между затратами: на выполнение серийного технологического процесса и технологического процесса совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом. В таблице 4.5 приведены финишные операции серийного и опытного технологического процесса, время их выполнения.

Таблица 4.5 – Операции и время их выполнения

Серийный ТП			ТП совмещенной обработки	
№ опер.	Наименование опер.	Время, мин	Наименование опер.	Время, мин
1070	Зубошлифовальная	19,40	Зубошлифовальная	24,00
1200	Полирование радиусов	19,00	–	–
1360	Контроль	40,00	–	–
1500	Хонингование	30,00	–	–
1540	Контроль	8,00	Контроль	40,00
Итого:		116,40	-	64

Стоимость червячного шлифовального круга для операции №1070 составляет 50 000 руб. Стойкость червячного шлифовального круга 12 000 деталей. Затраты на деталь составят 4,17 руб.

Стоимость войлочного круга 350x50x200 и полировальной пасты для операции №1200 составляет 2000 руб. Пасты №27 – 20 г. – 1825 руб. Стойкость войлочного круга 100 деталей. Расход пасты 5 граммов на деталь. Затраты на деталь 111,25 руб.

Стоимость зубчатого алмазного хона для операции №1500 составляет 150 000 руб. Требуется производить периодическую правку хона после обработки 200 заготовок деталей. Алмазный слой зубчатого хона ограничивается 26 ремонтными размерами. Тогда стойкость хона составляет 5200 заготовок деталей. Затраты на деталь составляют 28,85 руб. В таблице 4.6 приведены операции правки хона и время их выполнения.

Таблица 4.6 – Операции серийного технологического процесса

№ опер.	Наименование опер.	Содержание работ / станок	Время, мин
1476	Зубошлифовальная	Хона / P600/800G	13,10
1478	Зубошлифовальная	Хона / P600/800G	13,10
1493	Зубошлифовальная	Хона / P600/800G	13,10
1495	Шлифовальная	Наружного диаметра хона / 3У142МВ	13,10
1497	Контроль	Хона	20,00
Итого:			72,40

Стоимость тарельчатого круга для правки хона составляет 6000 руб. Стойкость – 1 000 циклов правки. Тогда затраты на инструмент для правки хона составляют 6 руб. Стоимость круга для круглого шлифования наружного диаметра хона составляет 3000 руб. Стойкость – 1000 циклов. Тогда затраты на инструмент для правки хона составляют 3 руб.

Стоимость станко-часа станка Gleason P600/800 G составляет 5000 руб. /час. Стоимость станко-часа станка 3У142МВ составляет 2800 руб. /час. Стоимость станко-часа станка Reishauer RZ basic составляет 6800 руб. /час. Стоимость станко-часа станка ВСБ-138016 составляет 4000 руб. /час. Стоимость станко-часа полировальной бабки составляет 2300 руб. В стоимость станко-часа входит стоимость оплаты труда, затраты на электроэнергию, затраты на обслуживание, затраты на амортизационные отчисления, затраты на аренду, на прочие расходы.

Стоимость обработки по каждой операции вычисляется по формуле (4.24):

$$C_{об} = C_{сч} \cdot t_{об} + Z_{ин} \quad (4.24)$$

Стоимость обработки операции зубошлифование:

$$C_{з/ш} = 6800 \cdot 0,32 + 4,17 = 2180,17 \text{ руб.} \quad (4.25)$$

Стоимость обработки операции полирование:

$$C_{полир} = 2300 \cdot 0,31 + 111,25 = 825,25 \text{ руб.} \quad (4.26)$$

Стоимость обработки операции зубохонингования:

$$C_{з/х} = 4000 \cdot 0,5 + 28,85 = 2028,85 \text{ руб.} \quad (4.27)$$

Стоимость обработки операций правки на станке Р600/800G:

$$C_{прав} = 5000 \cdot 0,22 + 6 = 1091,67 \text{ руб.} \quad (4.28)$$

Стоимость обработки операций правки на станке 3У142МВ:

$$C_{прав} = 2800 \cdot 0,22 + 3 = 614,33 \text{ руб.} \quad (4.29)$$

Стоимость червячного шлифовального круга для операции №1070 составляет 150 000 руб. Стойкость червячного шлифовального круга 12 000 деталей. Затраты на деталь составят 12,5 руб. Стоимость обработки операции зубошлифование:

$$C_{з/ш} = 6800 \cdot 0,4 + 12,5 = 2726,67 \text{ руб.} \quad (4.29)$$

В таблице 4.7 приведена сумма затрат по каждой по операции

Таблица 4.7 – затраты на выполнения операций

Серийный ТП			ТП совмещенной обработки	
№ опер.	Наименование опер.	Затраты, руб.	Наименование опер.	Затраты, руб.
1070	Зубошлифовальная	2180,17	Зубошлифовальная	2732,5
1200	Полирование радиусов	825,25	–	–
1360	Контроль	500,00	–	–
1500	Хонингование	2028,85	–	–
1540	Контроль	100,00	Контроль	500
	Итого:	5134,27	-	3232,5
1476	Зубошлифовальная	1091,67	–	–
1478	Зубошлифовальная	1091,67	–	–
1493	Зубошлифовальная	1091,67	–	–
1495	Шлифовальная	614,33	–	–
1497	Контроль	500	–	–
	Итого по операциям правки:	4389,34	–	–

Экономический эффект равен 1 901,77 руб. на деталь. На комплект для одного редуктора – 12 шт. экономический эффект составит 22 821,24 рублей. В 2021 г. при изготовлении 100 редукторов получен экономический эффект 2 282 124 рублей. Также необходимо учесть затраты на правку зубчатого алмазного хона. Таким образом, при обработке 1200 колес произведена правка после каждой 200-й заготовки. Затраты на 6 циклов правки составят 26 336 рублей. Итого, экономический эффект на 100 редукторов (1200 зубчатых колес) составляет 2 308 460 руб.

4.8. Выводы по главе 4

1. Проведены экспериментальные исследования по установлению рациональных режимов совмещенной обработки на цикле зубополирования. Определены рациональные режимы совмещенной обработки на цикле зубополирования – радиальная подача $S_{\text{рад}}=0,005$ мм и продольная подача $S_{\text{пр}}=0,12$ мм/об.

2. Установлена эмпирическая математическая зависимость режимов обработки шлифовально-полировальным червячным кругом на шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев.

3. Проведены сравнительные исследования качества поверхностного слоя эвольвентных поверхностей зубьев, обработанных на рациональных режимах совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом и при серийном технологическом процессе с операциями зубошлифования и зубохонингования: распределения и величины остаточных напряжений, микротвердость и микроструктуру, отсутствие трещин и шлифовочных прижогов.

4. Разработаны технологические рекомендации для внедрения совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе разработан технологический процесс совмещенной обработки цилиндрических зубчатых колес шлифовально-полировальным червячным кругом при повышении качества эвольвентных поверхностей зубьев зубчатых колес и существенном повышении производительности окончательной чистовой обработки. Получены научно-практические результаты:

5. Из анализа научно-технической литературы и передового производственного опыта предприятий в качестве рационального метода обработки эвольвентных поверхностей зубьев цилиндрических зубчатых колес выбран метод непрерывного обкатного зубошлифования. Данный метод обеспечивает необходимые параметры точности зубьев 4 – 4 – 5 по ГОСТ 1643–81, а при помощи специального шлифовально-полировального червячного круга, разработки технологического процесса и управляющей программы позволяет получить требуемую шероховатость $Ra < 0,16$ мкм эвольвентных поверхностей зубьев при повышении производительности обработки.

6. Проведено теоретическое обоснование и возможность применения технологии высокоэффективного непрерывного обкатного зубошлифования путем совмещенной обработки зубьев шлифовально-полировальным червячным кругом.

7. Выполнено моделирование формирования площади пятна контакта, возникающего при непрерывном обкатном зубошлифовании эвольвентных поверхностей зубьев цилиндрических зубчатых колес червячными кругами при изменяющихся режимах резания и их влиянии на шероховатость обработанной поверхности. Установлено, что на площадь пятна контакта оказывают влияние радиальная S_{rad} и продольная S_{np} подачи.

8. Разработано методическое обеспечение для проведения экспериментальных исследований по установлению закономерности влияния режимов резания совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом на шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев, точность зубчатого венца, поверхностного слоя зубьев: распределение и величину остаточных напряжений, микротвердость и микроструктуру, отсутствие трещин и шлифовочных прижогов.

9. Выполнен комплекс экспериментальных исследований по установлению рациональных режимов совмещенной обработки на цикле зубополирования, установлены эмпирические математические зависимости режимов обработки шлифовально-полировальным червячным кругом, влияющие на шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев, точность зубчатого венца и производительность. Определены рациональные режимы совмещенной обработки на цикле зубополирования (радиальная подача $S_{pad}=0,005$ мм и продольная подача $S_{np}=0,12$ мм/об) для получения параметров шероховатости поверхностей зубьев $Ra=0,09$ мкм и точности зубчатого венца 1 – 1 – 1 по ГОСТ 1643-81 (стало $F_a=1,6$ мкм, было $F_a=5,8$ мкм, стало $f_p=1,7$ мкм, было $f_p=3,2$ мкм, стало $F_r=3,8$ мкм, было $F_r=5,3$ мкм, стало $F_b=3,2$ мкм, было $F_b=4,7$ мкм), при увеличении производительности более чем в 2,5 раза. Выполнены сравнительные исследования качества поверхностного слоя зубьев цилиндрических зубчатых колес, обработанных на рациональных режимах совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом и при серийном технологическом процессе с операциями зубошлифования и зубохонингования: распределение и величину остаточных напряжений, микротвердость и микроструктуру, отсутствие трещин и шлифовочных прижогов.

10. Разработаны технологические рекомендации по внедрению совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом для серийного изготовления авиационных цилиндрических зубчатых колес, обеспечивающие шероховатость $Ra=0,24$ мкм эвольвентных поверхностей после

цикла зубошлифования, шероховатость $Ra=0,09$ мкм после цикла зубополирования.

В результате решена актуальная производственная и научная задача технологического обеспечения и повышения качества эвольвентных поверхностей зубьев зубчатых колес, имеющая особое значение для повышения безопасности полетов вертолетов при повышении производительности их выпуска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 1609628 Рос. Федерация – № 4458818. Комбинированный шлифовальный инструмент / Л. В. Худобин, Ю. М. Правиков, Г. Р. Муслина, Е. А. Карев; заявл. 12.07.1988; опубл. 30.11.1990.
2. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
3. Авиационные зубчатые передачи и редукторы: [Справочник] // В. И. Алексеев, В. М. Ананьев, М. М. Булыгина [и др.]; под ред. Э.Б. Вулгакова. – М.: Машиностроение. – 1981. – 374 с.
4. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
5. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
6. Байкалов, А.К. Введение в теорию шлифования материалов / А.К. Байкалов. – К.: Наукова думка, 1978. – 207 с.
7. Безъязычный, В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения / В. Ф. Безъязычный. – М.: Машиностроение, 2012. – 320 с.
8. Безъязычный, В.Ф. Исследование влияния технологических условий обработки на эксплуатационные свойства деталей машин с учетом технологической наследственности / В.Ф. Безъязычный, А.Л. Водолагин // Вестник РГТА, 2008. – №1. – С. 15–20.
9. Биргер, И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
10. Вальтер, Г. Руководство по зубошлифованию / Г. Вальтер. – 2007. – 179 с.
11. Ворожцова, Н.А. Новый метод чистовой обработки зубчатого венца шлифовально-полировальным кругом / Н.А. Ворожцова, А.С. Горбунов, В.Ф. Макаров // Инновационные технологии машиностроения в транспортном

комплексе: сборник трудов XI Международной научно-технической конференции. – 2020. – С.57–61.

12. Ворожцова, Н.А. Обеспечение качества зубчатого венца цилиндрических колес при обработке комбинированным шлифовально-полировальным червячным кругом / Н.А. Ворожцова, А.С. Горбунов, В.Ф. Макаров // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2019. – №2. – С. 22–28.

13. Ворожцова, Н.А. Повышение производительности обработки сателлитов путем совмещения операций зубошлифования и зубополирования / Н.А. Ворожцова, А.С. Горбунов, В.Ф. Макаров // Инновации в машиностроении: сборник трудов X Международной научно-практической конференции под ред. В.Ю. Блюменштейна. – 2019. – С.23–29.

14. Ворожцова, Н.А. Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя зубчатых колес авиационных редукторов на основе обработки комбинированным червячным кругом / Н.А. Ворожцова, А.С. Горбунов, В.Ф. Макаров // Инновации в машиностроении: сборник трудов XI Международной научно-практической конференции под ред. А.Г. Овчаренко. – 2020. – С.48–53.

15. Воронов, А.Э. Совершенствование финишной обработки зубчатых колес за счет новой технологии формообразования шлифовальных кругов: диссертация кандидата технических наук: 05.02.08 / Воронов А. Э. – Луганск, 2017. – 157 с.

16. Гавриленко, В. А. Основы теории эвольвентной зубчатой передачи / В. А. Гавриленко. – М.: Машиностроение, 1969. – 432 с.

17. Генкин, М. Д. Повышение надежности тяжело-нагруженных зубчатых передач / М. Д. Генкин, М. А. Рыжов, Р. М. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.

18. ГОСТ 13755-2015. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные. Исходные контуры. Основные нормы взаимозаменяемости. – М.: Стандартинформ, 2016. – С. 16.

19. ГОСТ 1643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – С. 45.
20. ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчёт на прочность. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 123 с.
21. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – С. 7.
22. ГОСТ 3647-80. Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. Методы контроля. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – С. 27.
23. ГОСТ Р 52381-2005. Материалы абразивные. Зернистость и зерновой состав шлифовальных порошков. Контроль зернового состава. – М.: Стандартиформ, 2005. – С. 15.
24. ГОСТ Р 52587–2006. Инструмент абразивный. Обозначения и методы измерения твердости. – М.: Стандартиформ, 2007. – С. 15.
25. ГОСТ Р 52781–2007. Круги шлифовальные ии заточные. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2020. – С. 30.
26. ГОСТ Р ИСО 4287–2014. Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. – М.: Стандартиформ, 2016. – С. 18.
27. ГОСТ ISO 1328-1–2017. Передачи зубчатые цилиндрические. Система ISO. Классификация допусков на боковые поверхности зубьев – М.: Стандартиформ, 2018. – С.46.
28. Григорьев, В.С. Шероховатость и волнистость поверхности. Эксплуатационные требования и методы контроля параметров: учеб. пособ. [Текст] / В.С. Григорьев, Н.Е. Курносов, И.И. Воячек // – Пенза: Пенз. политехн. ин-т, 1982. – 92 с.
29. Гулида, Э. Н. Технология отделочных операций зубообработки цилиндрических колес: монография / Э. Н. Гулида. – Львов: Вища школа, 1977. – 168 с.

30. Дудко, П.Д. Прецизионная обработка деталей с применением абразивных составов / П.Д. Дудко //Прогрессивные методы финишной обработки деталей машин и приборов. – Киев: Общество «Знание», – 1977. – №7. – С. 3.
31. Дьяченко, П. Е. Исследование процесса шлифования / П. Е. Дьяченко. – М.: Оборонгиз, 1941. – 200 с.
32. Ермолаев, В.К. Точность, классификация и стоимость зубошлифования / В. К. Ермолаев. – Текст: электронный // Ритм машиностроения. – 2018. – URL: <https://ritm-magazine.ru/en/node/2515> (дата обращения 19.05.2020 г.).
33. Зубарев, Ю. М. Математическое описание процесса шлифования / Ю. М. Зубарев // Инструмент и технологии. – 2004. – №17–18. – С.55–65.
34. Зубарев, Ю. М. Устойчивость процесса шлифования с учетом его динамических характеристик / Ю. М. Зубарев, А. В. Приемышев. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета, 2016. – 388 с.
35. Калашников, А. С. Величина и структура микронеровностей поверхности зубьев цилиндрических зубчатых передач / А. С. Калашников, Ю. А. Моргунов, Е. П. Пронина // Технологии машиностроения: международная научно-практическая заочная конференция: сборник трудов конференции. – Ульяновск 2020. – С. 43–48.
36. Калашников, А. С. Современные методы зубошлифования цилиндрических колёс / А. С. Калашников, Ю. А. Моргунов, Р. А. Калашников // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2010. – № 5. – С. 21–26.
37. Калашников, А.С. Современные методы обработки зубчатых колёс / А. С. Калашников, Ю. А. Моргунов, П. А. Калашников. – М.: Спектр, 2012. – 238 с.
38. Калашников, А.С. Технология изготовления зубчатых колес / А. С. Калашников. – М.: Машиностроение, 2004. – 480 с.

39. Калашников, П.А. Повышение эффективности изготовления цилиндрических зубчатых передач за счет применения процесса непрерывного обкатного зубошлифования с радиально-диагональным движением подачи: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.02.08 / П.А. Калашников – Москва, 2017. – 24 с.

40. Калинин, Е.П. Теория и практика управления производительностью шлифования без прижогов с учетом затупления инструмента / Е. П. Калинин. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 358 с.

41. Калинин, Е.П. Анализ схемы расположения абразивных зерен в объеме шлифовального круга / Е.П. Калинин, М.А. Шашков // Известия вузов. Машиностроение – 2004. – №1. – с.59-64.

42. Калинин, Е. П. Исследование процесса зубошлифования на станках с червячным абразивным кругом в связи с нахождением путей устранения прижогов и трещин: дис. канд. техн. наук: 05.03.01. – Пермь, 1967. – 134 с.

43. Клепиков, В. В. Совершенствование процессов обработки зубчатых колес за счет конструкторских и технологических параметров: диссертация доктора технических наук: 05.03.01 / В.В. Клепиков – Москва, 2001. – 400 с.

44. Кремень, З.И. Выбор оптимальных условий абразивной доводки металлов / З.И. Кремень // Вестник машиностроения. – 1969. – №5. – С. 48.

45. Курищук, А.В. Исследования и выбор оптимальной характеристики алмазных зубчатых хонов и технологических параметров их изготовления: автор. дис. канд. техн. наук: 05.07.08 / А.В. Курищук – Киев, 1976. – 24 с.

46. Макаров, В.Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов / В. Ф. Макаров. – Санкт-Петербург: Лань, 2013. – 320 с.

47. Макаров, В.Ф. Исследование качества поверхностного слоя зубчатого венца после суперфинишной обработки комбинированным червячным кругом / В.Ф.Макаров, Н.А.Ворожцова, А.С. Горбунов // Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции. – 2019. – С.262–267.

48. Макаров, В.Ф. Обеспечение точности и качества поверхностного слоя авиационного зубчатого колеса методом непрерывного обкатного зубошлифования с использованием комбинированного червячного круга/ В.Ф. Макаров, Н.А. Ворожцова, А.С.Горбунов // Электрофизические методы обработки в современной промышленности: сборник трудов IV Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. –2020. – С.220–223.

49. Макаров, В.Ф. Обработка зубчатых колес сборными шлифовально-полировальными кругами / В.Ф. Макаров, Н.А. Ворожцова, М.В. Песин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – №1. – С. 79–87.

50. Макаров, В.Ф. Результаты обеспечения точности и качества поверхностного слоя сателлитов авиационных редукторов комбинированным червячным кругом /В.Ф. Макаров, Н.А. Ворожцова, А.С. Горбунов //Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации: сборник трудов XXI Всероссийской научно-технической конференции. – 2020. – Т1. –С.119–122.

51. Макаров, В.Ф. Технологическое обеспечение точности и качества поверхностного слоя рабочих поверхностей авиационных зубчатых колес комбинированным шлифовально-полировальным червячным кругом / В.Ф. Макаров, Н.А. Ворожцова, А.С. Горбунов // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: труды научного симпозиума технологов-машиностроителей. – 2020. – С.511–518.

52. Макаров, В.Ф. Технологическое обеспечение точности и шероховатости зубьев цилиндрических зубчатых колес путем комбинированной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом / В.Ф. Макаров, Н.А. Ворожцова, М.В. Песин // Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий: сборник трудов научного семинара технологов-машиностроителей. – 2021. С.191–197.

53. Маслов, Е. Н. Теория шлифования металлов / Е. Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 400 с.
54. Маталин, А.А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства шлифовальных кругов / А.А. Маталин. – М.: Машгиз, 1958. – 204 с.
55. Моделирование влияния технологических факторов на точность зубчатых колес при зубошлифовании / Н. Н. Попок, Д. Г. Латушкин, Ю. Е. Махаринский, Н. В. Путеев // Вестник Полоцкого государственного университета. Промышленность и прикладные науки. Машиноведение и машиностроение. – 2017. – С. 55-59.
56. Направленное формирование свойств изделий машиностроения /А. С. Васильев, А. М. Дальский, Ю. М. Золотаревский, А. И. Кондаков / – М.: Машиностроение, 2005. – 352 с.
57. Никитин, С.П. Математическое моделирование термомеханических процессов в зоне резания элементарных поверхностей при профильном глубинном шлифовании, обеспечивающее заданный предел выносливости лопаток турбин ГТД: дис. д-ра техн. наук: 05.02.08 / С.П. Никитин – Пермь, 2019. – 446 с.
58. Носенко, В.А. Технология шлифования металлов / В.А. Носенко, С.В. Носенко. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 616 с.
59. Орлов, П.Н. Технологическое обеспечение параметров качества деталей при абразивной доводке: дис. д-ра техн. наук: / П.Н. Орлов – М.: МВТУ им. Баумана, 1981. – 509с.
60. Островский, В. И. О физико-химических процессах при шлифовании титановых сплавов / В. И. Островский // Абразивы: научно-технический реферативный сборник. – М.: НИИМАШ, 1967. – № 1. – С. 1–14.
61. Островский, В. И. Теоретические основы процесса шлифования / В. И. Островский. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1981. – 144 с.

62. Пат. RU 2151047C1 Рос. Федерация, МПК В24D5/14. Комбинированный шлифовальный круг / Худобин Л.В., Правиков Ю.М., Муслина Г.Р. заявл. 28.05.1999; опубл. 20.06.2000.

63. Пат. RU 2211754C1 Рос. Федерация, МПК В24В4/00 В24D5/14. Способ комбинированного шлифования / Степанов Ю.С., Афанасьев Б.И., Поляков А.И., Фомин Д.С., Бородин В.В., Кобзев/ заявл. 05.03.2002; опубл. 10.09.2003.

64. Пат. RU 2240913C1. Рос. Федерация, МПК 7В24В5/18 1/00. Способ бесцентрового шлифования / Свирщев В.И, Флегентов В.К, Макаров В.Ф, Подборнов И В. заявл. 24.03.2003; опубл. 10.01.2005.

65. Пат. RU 2260508C2 Рос. Федерация, МПК В24D5/14. Шлифовальный круг / Гордеев А. В., Вострокнутов Д. В.; патентообладатель: Тольяттинский политехнический институт. – № 2001117089/02; заявл. 18.06.2001; опубл. 20.09.2005.

66. Пат. RU 2282531C2 Рос. Федерация, МПК В24D5/14. Абразивный круг / Бутенко В.И., Диденко М.Д., Рыбинская Т.А., Диденко Д.И. заявл. 11.10.2004; опубл. 27.08.2006.

67. Пат. 2407996 Рос. Федерация, МПК G01L 1/00. Неразрушающий способ экспрессного выявления зон на поверхности металлических деталей со шлифовочными и эксплуатационными прижогами / Кочаров Э. А., Олешко В. С. № 2008129897/28, заявлено 22.07.2008, опубликовано 27.12.2010.

68. Повышение технологических возможностей метода непрерывного обкатного зубошлифования/ Н.А. Ворожцова, А.С. Горбунов, В.Ф. Макаров, Е.Н. Колганова // Вестник брянского государственного технического университета– 2021. – №5 (102). – С.15–22.

69. Попов, В.С. Изнашивающаяся способность и механические свойства зерен абразивов / В. С. Попов, А. Б. Шишкин // Абразивы: научно-технический реферативный сборник. – М.: НИИМАШ, 1970. – № 6. – С. 20–23.

70. Попов, С. А. Влияние однородности зернового состава абразива и формы зерен на рельеф режущей поверхности шлифовальных кругов / С. А. Попов, И. С. Соколова // Абразивы: научно-технический реферативный сборник. – М.: НИИМАШ, 1972. – № 12. – С. 2–6.

71. Производство зубчатых колес: справочник / С. Н. Калашников А. С. Калашников Г. И. Коган [и др.]; под общ. ред. Б. А. Тайца. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1990. – 464 с.

72. Разработка нового метода финишной обработки зубьев шестерен комбинированным шлифовально–полировальным червячным кругом/ В.Ф. Макаров, М.В. Песин, Н.А. Ворожцова, А.С. Горбунов // Инновационное и цифровое машиностроение: сборник трудов всероссийской научно-технической конференции. – 2021. – С.56–60.

73. Солер, Я. И. Выбор абразивных кругов по прижогам закаленных деталей с использованием цифровых технологий / Я. И. Солер, Д. Ю. Казимиров, В. Л. Нгуен // Вектор науки ТГУ. – 2015. – № 2. – С. 176-184.

74. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – Москва: Машиностроение, 1981. – 184 с.

75. Старков, В. К. Шлифование высокопористыми кругами / В. К. Старков. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.

76. Старков, В. К. Шлифование цементованных и закаленных сталей высокоструктурными кругами / В. К. Старков, Н. И. Белоусова // Авиационная промышленность. – 1972. – № 6. – С. 44–47.

77. Суслов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г.Суслов, А. М. Дальский. – Москва: Машиностроение, 2002. – С. 684.

78. Суслов, А.Г. Термофлуктуационная модель изнашивания поверхностей трения твердых тел при граничной смазке / А.Г. Суслов, С.П. Щец, М.И. Прудников // Трение и смазка в машинах и механизмах. – М.: Машиностроение, 2008. – № 10. – С. 40-47.

79. Суслов, А. Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
80. Суслов, А.Г. Изменение параметров шероховатости при контактировании гладкой и шероховатой поверхности [Текст] / А.Г. Суслов, Н.В. Кравцов, А.А. Кельнер // Технологическое обеспечение функциональных параметров качества поверхностного слоя деталей машин: сборник научных трудов. – Брянск: Изд-во БИТМа, 1987. – 152 с.
81. Тепловые процессы при зубошлифовании зубчатых колес тарельчатыми профильными кругами / О. В. Якимов, О. О. Якимова, П. О. Якимов, И. М. Иванищева // Информационные технологии в образовании, науке и производстве. – 2013. – № 1(2). – С. 135–146.
82. Шлифование зубчатых колес / J.F. Delavy, J. Cadisch, W. Thyssen, P.Schacke, R. Schwalghofer // Reishauer AG. – 1993. – с.124.
83. Шишков, В. А. Образование поверхностей резанием по методу обкатки / В. А. Шишков. – М.: Машгиз, 1951. – 151 с.
84. Якимов, А. В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – Москва: Машиностроение, 1975. – 176 с.
85. Якимов, А. В. Методика расчета температур и глубин дефектного слоя при зубошлифовании колес на станках с червячным абразивным кругом / А. В. Якимов. Е. П. Калинин. Т. Е. Халпанова // Вестник машиностроения. – 1967. – № 7. – С. 32-34.
86. Якимов, А. В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / В. К. Старков. – М.: Машиностроение, 1984. – 311 с.
87. Якимов, А. В. Прерывистое шлифование / А. В. Якимов. – Киев: Вища Школа, 1986. – 176 с.
88. Ящерицын, П. И. Планирование экспериментов в машиностроении: справочник / П. И. Ящерицын, Е. И. Махаринский. – Минск: Вышэйшая школа, – 1985. – 283 с.

89. Ящерицын, П. И. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей / П. И. Ящерицын, А.К. Цокур, М.Л. Еременко. – Минск: Наука и техника, 1973. – 184 с.
90. AGMA 912-A04. Mechanisms of Gear Tooth Failures. Alexandria, USA. 2004. – 30 p.
91. Analysis of chip shape distribution using image processing technology to estimate wearing condition of gear grinding wheel /H. Karasawaa, T. Yoshidaa, R. Fukuia, T. Kizakia [et al] – Procedia CIRP. – 2019. – Vol. 81. – P. 381-386. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827119303713>.
92. Andersson, C. Grinding or shaving-economic decision support in the production of gears / Andersson, C., Stahl J.E // Swedish Production Symposium. - 2014.
93. ANSI/AGMA 2015-1-A01. Accuracy Classification system –tangential measurements for cylindrical gears. Alexandria, USA. 2015. – 48 p.
94. Blake, G. Case study involving surface durability and improved surface finish / G. Blake, J. Reynolds. – Текст : электронный // Gear technology : электронный журнал. – 2012. – URL: <https://www.geartechology.com/issues/0812x/blake.pdf> (дата обращения: 01.02.2021).
95. Conventional and Advanced Finishing of Gears. Advanced Gear Manufacturing and Finishing Classical and Modern Processes /K. Gupta, N. Kumar. J. Rudolph [et al]. – Текст: электронный. – 2017. – P. 127-165. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128044605000055>. (дата обращения: 01.02.2021).
96. DIN 3962-1–1978. Tolerances for Cylindrical Gear Teeth; Tolerances for Deviations of Individual Parameters. – German Institute for Standardisation, 1978. – 18 p.
97. Dudley, D.W. Handbook of practical gear, design and manufacture. CRC press. – New York, 1962. – 820 p.

98. Heinz, L. Cylindrical gears. Calculation – Materials – Manufacturing – Текст : электронный / L. Heinz, J. Börner, R. Heß. – 2017. – URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9781569904893/cylindrical-gears#book-description>. (дата обращения: 03.02.2021).
99. Hongqi, L. A Time-Domain Dynamic Model for Chatter Prediction of Cylindrical Plunge Grinding / Li. Hongqi, Y.C. Shin // Journal of Manufacturing Science and Engineering, – 2006, vol.128. – P.404–415.
100. Influence of gear hobbing feed marks on the resulting gear quality after discontinuous profile grinding. / N. Gubaab, T. Husemannab, B. Kapuschewskiab. – Текст: электронный // CIRP Journal of manufacturing Science and Technology. – 2020. – Vol. 31. – November. – P. 314–321. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1755581720300705>. (дата обращения: 03.02.2021).
101. Malkin, S. Grinding Technology. Theory and applications of machining with abrasives /S. Malkin, C. Guo. – Industrial press, New York, 2008. 372 p.
102. Machining parameter optimization in shear thickening polishing of gear surfaces / D.N. Nguyen, T.P. Dao, C. Prakash [et al]. – Текст : электронный // Jmr&T. Elsevier: электронный журнал. – 2020. URL:http://researchgate.net/publication/339814754_Machining_Parameter_Optimization_in_Shear_Thickening_Polishing_of_Gear_Surfaces (дата обращения: 01.02.2021).
103. Mike, S. A new approach to the bearing area curve. SME Technical Paper // International Honing Technologies. – 1990. – May 1-3. – Novi, Michigan.
104. Roughness measuring systems from Jena optik. Surface texture parameters in practice. Jenaoptik publication. – 2013. – № 06. – Nr. 10037109.
105. Stadtfeld, H.J. The science of gear engineering and modern manufacturing methods for angular transmissions /H. J. Stadtfeld. – New York, 2014. P.491.
106. Study on gear contact fatigue failure competition mechanism considering tooth wear evolution – Текст : электронный / H. Liu, H. Liu, C. Zhu, J.Tang //

Tribology International. – Vol. 147. – 2020. – July. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X20301195>. (дата обращения: 03.02.2021).

107. The effect of manufacturing method and running-in load on the surface integrity of efficiency tested ground, honed and superfinished gears – Текст: электронный / D. Mallipreddi, M. Norell, M. Sosa, L. Nyborg. // Tribology International. – 2019. – Vol. 131. – March. – P. 277-287. – URL: <https://www.sciencedirect.com/search?qs=Gear%2C%20grinding&date=2017-2020>. (дата обращения: 03.02.2021).

108. Topographical analysis of machined surfaces after grinding with different cooling-lubrication techniques - Текст : электронный / R. de Souza, R. Leonardo, R. Ribeiro da, [et al]. // Tribology International. – Vol.141. – 2020. – January. –105962. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X19304815>. (дата обращения: 01.02.2021).

109. Walter, G. Polish grinding of gears for higher transmission efficiency / G. Walter. - Текст : электронный // Gear solutions : электронный журнал. - 2016. URL: <http://gearsolutions.com/features/polish-grinding-of-gears-for-higher-transmission-efficiency> (дата обращения: 01.02.2021).

110. Walter, G. Шлифование и полирование зубчатых колес / Walter Graf. – Текст: электронный // РИТМ машиностроения. – 2016. – URL: <https://ritm-magazine.ru/ru/public/shlifovanie-i-polirovanie-zubchatyh-koles> (дата обращения: 10.05.2020 г.).

111. Winkelmann, L. The effect of superfinishing on gear micropitting – Текст : электронный / L. Winkelmann, O. El-Saeed, M. Bell. // Gear technology : электронный журнал. – 2009. – URL: http://geartechnology.com/articles/0309/The_Effect_of_Superfinishing_on_Gear_Micropitting (дата обращения: 01.02.2021).

112. Zhou, W. Study on surface generation mechanism and roughness distribution in gear profile grinding / Weihua Zhou, Jinyuan Tang, WenShao //

International Journal of Mechanical Sciences. – 2020. – Volume 187. – 1 December. – 105921.

113. 2D/3D Ground Surface Topography Modeling Considering Dressing and Wear Effects in Grinding Process /J.L.Jiang, P.Q.Ge, W.B.Bi [et al]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, –2013. – vol.74, – P.29–40.

Акт передачи результатов исследования АО «Редуктор-ПМ»



Акционерное общество «Авиационные редуктора и трансмиссии – Пермские моторы»

«УТВЕРЖДАЮ»

Технический директор-
первый заместитель
управляющего директора
АО «Редуктор-ПМ»


А. Д. Загрышев
«...» 2021 г.

АКТ № 275-03/02-607 от 19.10.2021 г.

передачи результатов научно-исследовательской
(опытно-технологической) работы

Комиссия в составе представителей АО «Редуктор-ПМ»: главного технолога Р.Т. Закирова и заместителя технического директора по производству А.В. Пивня составила акт о передаче представителями ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» доктором технических наук, профессором В.Ф. Макаровым, аспирантом Н.А. Ворожцовой научно-технической работы «Технологическое обеспечение шероховатости и точности зубчатых колес на основе совмещенной обработки шлифовально-полировальными червячными кругами» для внедрения на АО «Редуктор-ПМ» в механообрабатывающем цехе предприятия.

Заместитель технического
директора по производству

 А.В. Пивень

Главный технолог

 Р.Т. Закиров

Акт внедрения результатов исследования



Акционерное общество «Авиационные редуктора и трансмиссии – Пермские моторы»

«УТВЕРЖДАЮ»
Технический директор-
первый заместитель
управляющего директора
АО «Редуктор-ПМ»

 А.Д. Загрышев

«26» 10 2021 г.

АКТ №275-03/02- 707

**внедрения процесса совмещенной обработки зубьев цилиндрических
зубчатых колес шлифовально-полировальными червячными кругами**

Акт составлен о том, что:

Ведущим специалистом АО «Редуктор - ПМ», аспирантом кафедры ИТМ ПНИПУ Ворожцовой Н.А. разработан и внедрен на АО «Редуктор - ПМ» новый технологический процесс совмещенной обработки зубьев цилиндрических зубчатых колес шлифовально-полировальными червячными кругами, обеспечивающий повышение точности, уменьшение величины шероховатости профиля зубьев, при сокращении трудоемкости и повышении производительности. Новый технологический процесс опробован на партиях зубчатых колес изделий авиационных редукторов ВР-14 и ВР-29, обеспечивает изготовление в полном соответствии с требованиями конструкторской документации и технических условий.

В результате внедрения работы получен годовой экономический эффект в сумме более 2 млн. рублей.

Главный технолог
АО «Редуктор-ПМ»



Р.Т. Закиров

Акт об использовании результатов исследования в учебном процессе

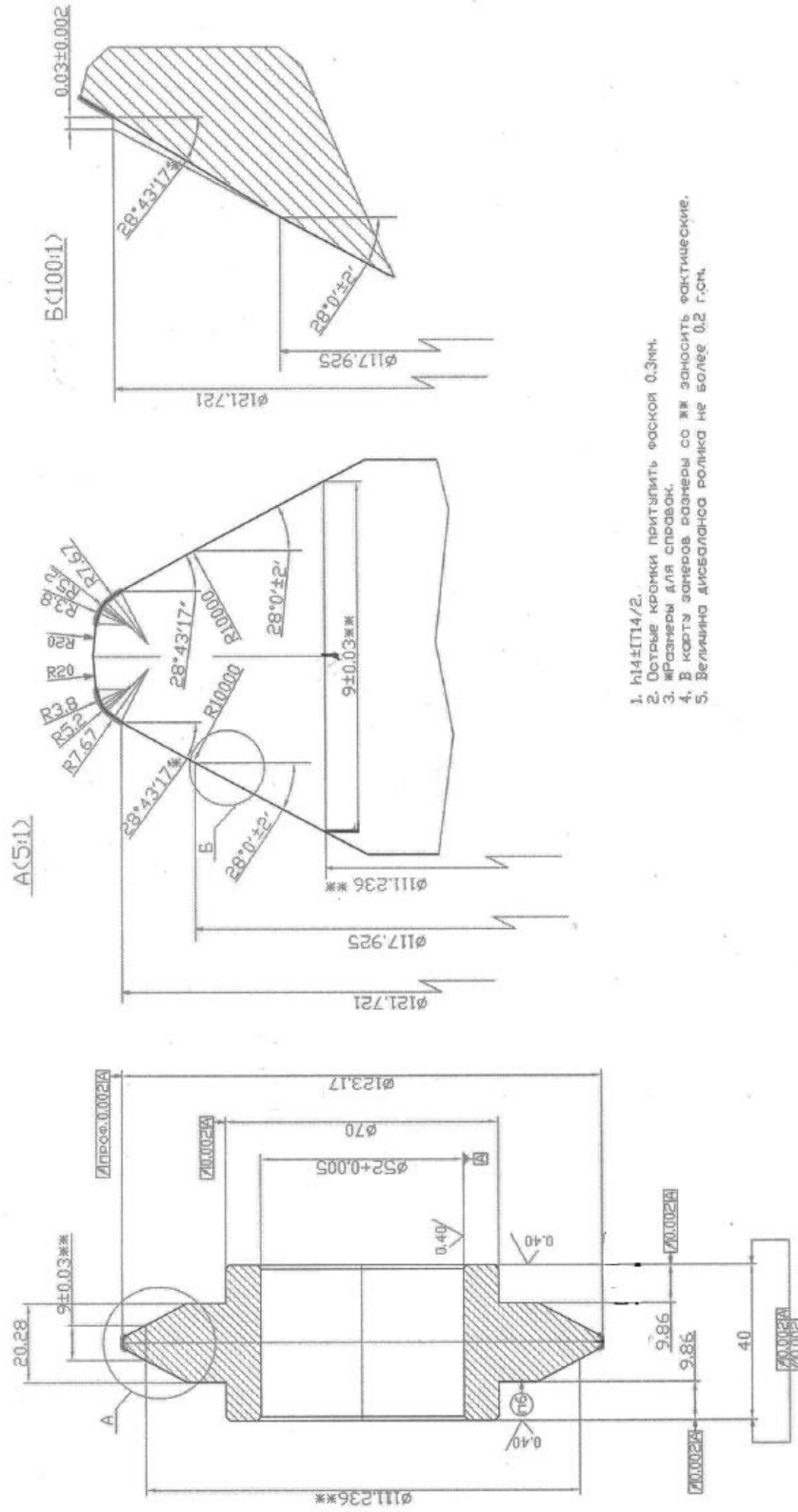
АКТ
внедрения результатов диссертационной работы
в образовательный процесс

В ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» внедрены в образовательный процесс результаты диссертационной работы Ворожцовой Натальи Андреевны «Технологическое обеспечение и качества зубчатых колес на основе совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом» на кафедре «Инновационные технологии машиностроения» в учебных дисциплинах: «Технологические процессы в машиностроении» в части обработки зубчатых колес, «Процессы и операции формообразования» части комбинированные процессы обработки, «Резание материалов» в части абразивной обработки. Эффектом от внедрения является повышение качества образовательного процесса, так как при освоении курсов используются последние достижения в области технологии машиностроения.

д-р техн. наук, профессор
заведующий кафедрой «Инновационные
технологии машиностроения»

В.В. Карманов

Конструкция полнопрофильного алмазного ролика



1. H14ПТ4/2.
2. Острые кромки притупить фаской 0.3мм.
3. Размеры для справок.
4. В коды замеров размеры со звз заносить фактические.
5. Величина дисбаланса ролика не более 0.2 г.см.

Конструкция шлифовально-полировального червячного круга

Schleifscheibe 418040.50
auf die Breite 65 mm abdrehen

Pos	Menge	Materialnr.	AI	Benennung	Dimension	Menge	ME
1	1	153516001	00	SCHLEIFSCHEIBE	275x60x160		

Schleifscheibe vorprofiliert (grinding wheel pre-profiled)

Modul (module)	Eingriffswinkel (pressure angle)	Gangzahl (number of starts)	Höhe Kopf-Werkzeug (tool tip addendum) h _{kw}	Hand of helix
6.0	28	3	7.200	R

Oberflächen DIN ISO 1302		Behandlung, Zustand		Material		Menge	
(✓)							
Werkstoffnormen DIN ISO 1715		Allgemeinabzeichen		Werkstoff		Modellnr.	
+0.5 -0.3 +0.8 +0.4		DIN ISO 2768-mK		DIN ISO 8015			
© REISHAUER AG 2009 Copyright reserved Schutzvermerk nach DIN 34 beachten		Benennung		Satzschleifscheibe A80 G8 V0167 / EK800			
REISHAUER		Sollet/Works		41805175		Revision 0 Blatt 1 von 1	