

**Ворожцова Наталья Андреевна**

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

2.5.6. Технология машиностроения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Пермь 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: **Макаров Владимир Фёдорович**,  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Носенко Владимир Андреевич**,  
доктор технических наук, профессор, Волжский политехнический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Волгоградский технический университет», кафедра «Технология и оборудование машиностроительных производств», заведующий кафедрой

**Киселев Евгений Степанович**,  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», кафедра «Инновационные технологии в машиностроении», профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет»

Защита состоится «27» января 2023 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского университета Д ПНИПУ. 05.18 по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте [www.pstu.ru](http://www.pstu.ru) и в библиотеке ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2022 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
д-р техн. наук, профессор

М.Ш. Нихамкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Научно-техническими и широко распространенными деталями, применяемыми практически во всех отраслях машиностроения, являются зубчатые колеса. Темпы выпуска зубчатых колес значительно увеличиваются, спрос на мировом рынке зубчатых колес постоянно растет с одновременным ростом конкуренции и требований по качеству и надежности. 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 существенного 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 в условиях ограничения по габаритам и массе изделия. При изготовлении цилиндрических зубчатых колес авиационного редуктора требуется обеспечить: высокую степень точности зубчатого венца 5 – 4 – 4 согласно ГОСТ 1643–81, минимальную шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев  $Ra \leq 0,16$  мкм, отсутствие прижогов и термических трещин, в поверхностном слое цементированной поверхности зубьев (твердость  $HRC \geq 61$ ) должны залегать сжимающие остаточные напряжения, также необходимо контролировать микроструктуру и микротвердость. Данные требования сформированы для обеспечения высокой контактной выносливости зубьев, надежности и долговечности зубчатых колес. В условиях эксплуатации эти требования особенно важны для обеспечения безопасности полетов вертолетов.

**Степень разработанности темы.** Точность зубчатого венца, шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев и другие параметры качества поверхностного слоя зубьев цилиндрических зубчатых колес формируются на окончательных чистовых операциях. В настоящее время применение финишных операций зубошлифования и последующего зубохонингования помимо значительной трудоемкости, не обеспечивает стабильно требуемых параметров точности, шероховатости и качества поверхностного слоя. Поэтому для решения этой проблемы предложено технологически обеспечить требуемые параметры точности и качества поверхностного слоя на основе разработки и внедрения технологии совмещенной обработки шлифовально-полировальными червячными кругами при одновременном и существенном повышении производительности. В результате анализа научно-технической литературы исследований процессов шлифования, представленных в работах В.Ф. Безьязычного, 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 проведенные научные исследования и рекомендации практически отсутствуют. 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, качество 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 эвольвентных поверхностей 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, обеспечивающие 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 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:

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

- 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  $F_a = 1,6$  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;

- увеличении производительности финишных операций в 2,5 раза: время выполнения финишных операций уменьшилось с 64,4 до 24 минут;

- исключении операций правки зубчатого алмазного 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, микротвердомере 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 Excele, Mathcad.

**Положения, выносимые на защиту:**

– Разработан более производительный в сравнении с существующим технологический процесс совмещенной обработки цилиндрических зубчатых колес редукторов вертолетов с применением червячного шлифовально-полировального круга.

– 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.

– Разработаны методики по установлению рациональных режимов совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом и по исследованию качества поверхностного слоя эвольвентных поверхностей зубьев.

– 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 выполнен теоретический анализ, сформулированы цель и задачи, 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 и выполнена обработка полученных данных с применением статистической обработки результатов и их обобщение. Разработаны технологические рекомендации для внедрения совмещенной обработки шлифовально-полировальными червячными кругами, 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.** Работа 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 изданий, из которых 23 на английском языке.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** представлена актуальность темы диссертационного исследования, ее научная новизна, теоретическая и практическая ценность; поставлена цель и задачи исследования.

**Первая глава** посвящена анализу требований (конструкторских, технологических, эксплуатационных), предъявляемых к производству авиационных цилиндрических колес. Так, авиационные цилиндрические зубчатые колеса ( $m=6$  мм,  $b=48$  мм,  $d=181,1$  мм,  $\alpha=28^\circ$ ,  $z=29$ , сталь 18X2H4BA-Ш) главного редуктора ВР-14, передающего крутящий момент на винт вертолета Ми-8/17, изготавливают со степенью точности 5 – 4 – 4 согласно ГОСТ 1643-81. Кинематическая точность (5): погрешность шага  $F_p=25$  мкм, радиальное биение  $F_r=25$  мкм. Норма плавности (4): погрешность профиля  $F_\alpha=6$  мкм. Норма контакта (4): направление зуба  $F_b=8$  мкм. 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.



В результате проведенного анализа серийного технологического процесса установлено, что операция зубохонингования, выполняемая после зубошлифования для получения шероховатости  $Ra \leq 0,16$  мкм, стабильно не обеспечивает параметры точности зубьев, а именно погрешность профиля возрастает до  $F\alpha = 5,8$  мкм, при этом после операции зубошлифования погрешность профиля составляет с  $F\alpha = 2,6$  мкм. Кроме того, для операции зубохонингования требуется специальный инструмент – высокоточный зубчатый алмазный хон, периодическая правка которого занимает 72,4 минуты. После операции зубохонингования требуются дополнительные слесарные операции для обработки продольных радиусов зубьев.

Для решения проблемы проведен анализ научно-технической литературы, передового опыта зубообрабатывающих предприятий и предложен метод совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом. В научной литературе практически отсутствует информация и рекомендации о режимах резания и получаемом при этом качестве поверхностного слоя.

**Вторая глава** посвящена обоснованию применения совмещенной технологии обработки шлифовально-полировальным червячным кругом, теоретическому анализу процесса непрерывного шлифования, моделированию зацепления, расчету пятна контакта между эвольвентной поверхностью зуба и витком червячного круга с учетом изменяющихся режимов резания.

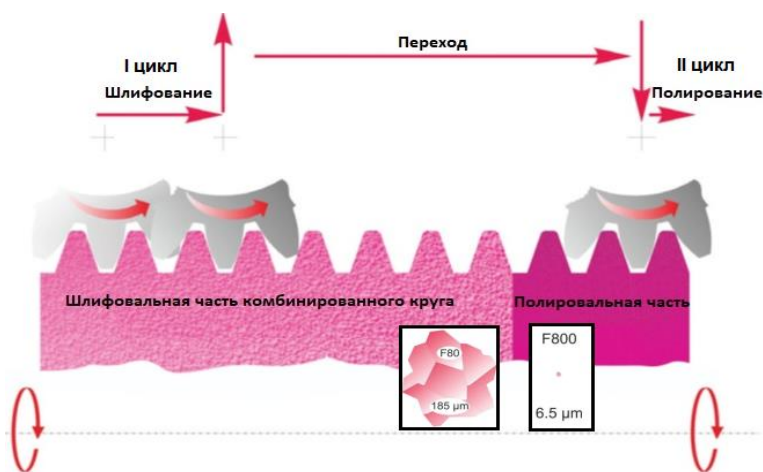


Рисунок 1 – Физическая модель совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом

Условно физическая модель процесса совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом представлена рисунке 1. Червячный круг состоит из двух частей: первая часть предназначена для шлифования, вторая часть для полирования. На основании предварительных теоретических и практических исследований для шлифовальной части круга выбран электрокорунд белый 25А, зернистостью 0,15 – 0,21 мм,

весьма мягкой степени твердости G, открытой структуры 8, на керамической связке. Для полировальной части выбран электрокорунд белый 25А, зернистостью 0,06 – 0,1 мм, весьма мягкой степени твердости, открытой структуры 14, на эластичной поливинилформалеовой связке. С учетом программного обеспечения станка и величины припуска совмещенную обработку эвольвентных поверхностей зубьев червячным шлифовально-полировальным кругом предложено выполнить за четыре шлифовальных прохода и один полировальный.

На стадии зубошлифования необходимо обеспечить требуемую точность при отсутствии термических трещин и прижогов. Целью цикла полирования является уменьшение шероховатости поверхности без изменения

макроегеометрии, топографии эвольвентных поверхностей зубьев и структуры поверхности материала. Процесс полирования второй частью червячного круга за счет мелкой зернистости и мягкой связки снимает не более 1 мкм, удаляя вершины шероховатости поверхности, при этом оставляя нетронутыми некоторые впадины. Шероховатость, образованная с наличием впадин и отсутствием вершин, обладает увеличенной площадью контакта для удержания и распределения пленки трансмиссионного масла на поверхности зубьев, что увеличивает долговечность зубчатых колес.

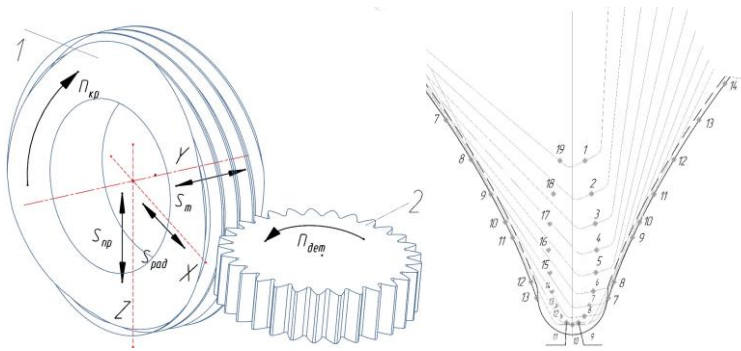


Рисунок 2 – Модель движения непрерывного обкатного зубошлифования червячным кругом и формирования профиля зуба

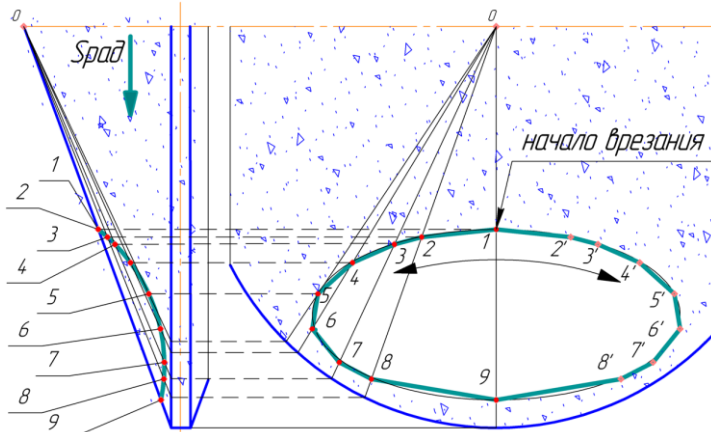


Рисунок 3 – Схема определения площади пятна контакта между червячным кругом и цилиндрическим зубчатым колесом

Пятно контакта (рисунок 4) с учетом радиальной подачи (врезания) ограничено эллипсом (точки 2, 7, 8, 9). При движении обката виток червячного круга перемещается относительно зуба – пятно контакта будет ограничено только половиной эллипса (точки 2, 7, 8, 1). Наличие продольной подачи  $S_{np}$ , 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. Данный участок не учитывается, так как в этом месте материал уже удален на 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.

Обкатное зубошлифование червячным кругом представляет собой торцевое шлифование – впадина зуба не обрабатывается в точках 9, 10, 11 (рисунок 2). Одновременное формирование отдельных участков поверхности сложного эвольвентного профиля зубьев червячным кругом происходит при различающихся условиях резания: образуются различные по величине пятна контакта на элементарных поверхностях профиля, различные силы резания и температуры.

Для определения площади пятна контакта с учетом радиальной подачи (рисунок 3) произведены графические построения. Поверхность боковой стороны витка червяка с вершиной в точке  $O$  врезается в профиль зуба колеса, ограниченный точками 1, 6, 9.

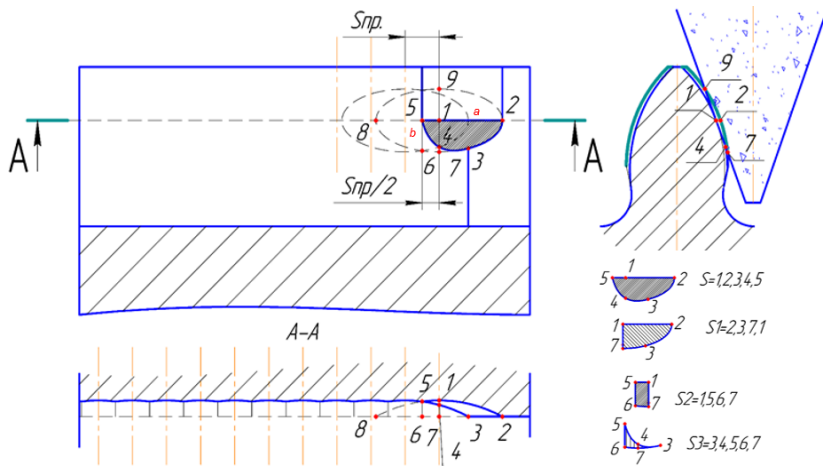


Рисунок 4 – Схема определения площади пятна контакта между червячным кругом и эвольвентной поверхностью зуба с учетом движения обката, радиальной и продольной подач

Тогда пятно контакта с учетом движения обката, радиальной и продольной подач, исходя из графических построений, определяется как:

$$S = S1 + S2 - S3, \quad (1)$$

где  $S2$  – площадь, ограниченная точками 1, 5, 6, 7;  $S3$  – площадь, ограниченная точками 3, 4, 5, 6, 7.

Формула пятна контакта с учетом движения обката, радиальной и продольной подач,

установленная Е.П. Калиным:

$$S = 0,11 \cdot \sqrt{(r_0 \cdot S_{rad})} \cdot (\pi \cdot \sqrt{(S_{rad} \cdot D_{кр}) + 2 \cdot S_{np}}), \quad (2)$$

где  $r_0$  – радиус основной окружности зубчатого колеса;  $S_{rad}$  – величина радиальной подачи;  $D_{кр}$  – диаметр червячного круга;  $S_{np}$  – величина продольной подачи.

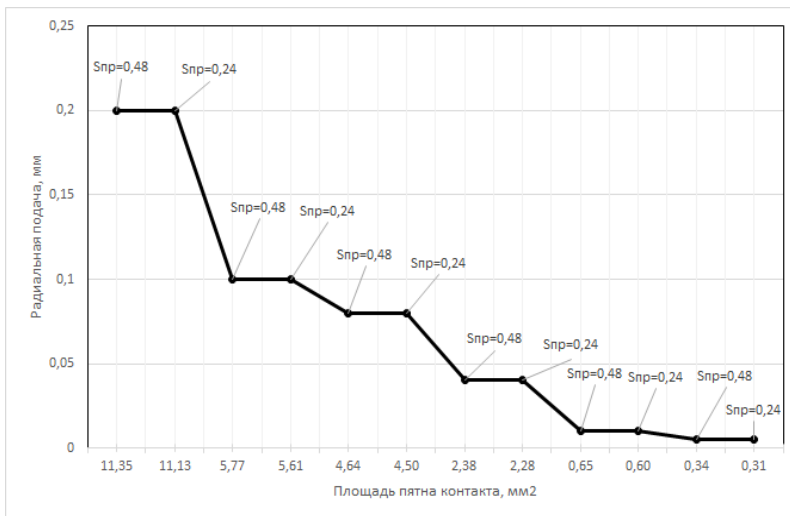


Рисунок 5 – Влияние радиальной и продольной подач на площадь пятна контакта

Варьирование радиальной и продольной подач изменяет площадь пятна контакта. Графически зависимость пятна контакта можно представить в виде графика. Из рисунка 5 видно, что наибольшее влияние на площадь пятна контакта оказывает радиальная подача.

Анализируя влияние радиальной и продольной подач на площадь пятна контакта, можно предположить, что изменения продольных и радиальных

подач также окажут аналогичное воздействие на величину шероховатости:

$$Ra = f \cdot (S_{rad}^k \cdot S_{np}^n) \quad (3)$$

Для доказательства теоретических положений о влиянии радиальной и продольной подач на величину шероховатости необходимо провести экспериментальные исследования по выбору рациональных режимов совмещенного обкатного зубошлифования шлифовально-полировальным червячным кругом.

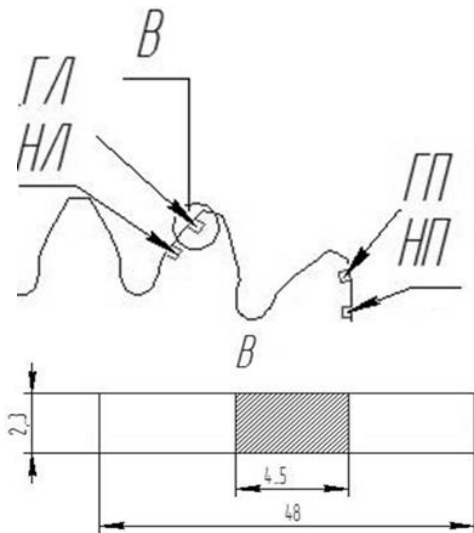


Рисунок 6 – Схема вырезки образцов



Рисунок 7 – Образцы для исследования микроструктуры

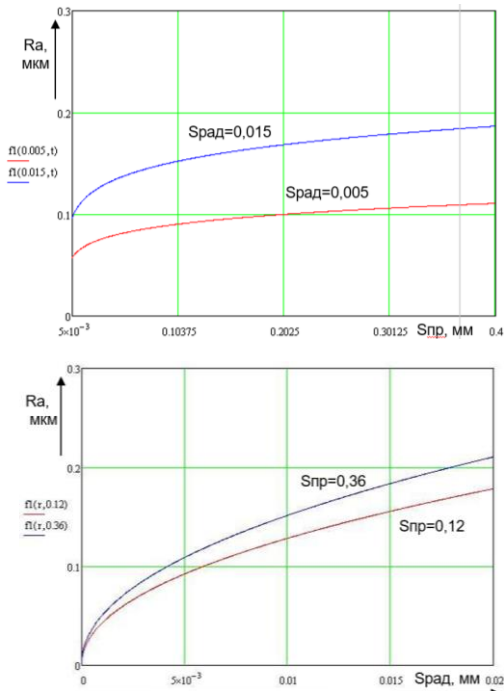


Рисунок 8 – Графики влияния продольной и радиальной подачи на шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев

В третьей главе представлено методическое обеспечение для проведения экспериментальных исследований. Даны характеристики технологического оборудования (станок Reishauer RZ basic), правящего (полноправящий алмазный ролик) и режущего инструмента (шлифовально-полировальный червячный круг 1\_275x125x160,  $m=6$ ,  $\alpha=28^\circ$ , I часть: A25 F80 G 8 V, II часть: A25 F800 I 14 P). Разработана методика планирования полнофакторного эксперимента  $2^2$  для получения математической модели влияния радиальной и продольной подачи на шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев в цикле зубополирования. Исходная шероховатость, полученная после стадии зубошлифования, составляет  $Ra=0,242 \pm 0,02$  мкм. Уровни варьирования радиальной подачи  $S_{rad}=0,015 - 0,01$  мм. Уровни варьирования продольной подачи  $S_{np}=0,36 - 0,12$  мм/об.

Разработанная методика предусматривает сравнительные экспериментальные исследования точности на контрольно-измерительной машине P-40 Klingelnberg, шероховатости, остаточных напряжений, микротвердости и микроструктуры поверхностей зубьев с применением специальных образцов, получаемых из обработанных цилиндрических зубчатых колес, вырезаемых на электроэрозионном станке Sodick AQ300L. Величина микронеровностей определялась с использованием профилометра MarSurf M300C Mahr. Исследования осевых остаточных напряжений проводились по методике ПИ1.4.804-84 НИАТ на установке АПООН. Метод Н.Н. Давиденкова предусматривает разрушение образцов (рисунок 6). Исследование микротвердости проводилось методике ПИ1.2.669-2003 ВИАМ на микротвердомере MICROMET 5104 Buehler. Металлографические исследования производились на микрошлифах образцов зубьев (рисунок 7) на приборах: стереомикроскоп Stemi 2000-C Zeiss и оптический инвертированный микроскоп Axiovert 40 MAT Zeiss.



**Четвертая глава** посвящена анализу экспериментальных исследований параметров точности и качества поверхностного слоя эвольвентных поверхностей зубьев при серийном изготовлении и опытных образцов. Рациональный режим выбирался по полученным регрессионным зависимостям шероховатости зубьев  $R_a$  от радиальной и продольной подач. Проводился полнофакторный эксперимент  $2^2$ . Значимость коэффициентов оценивалась по  $t$ -критерию Стьюдента, а адекватность регрессионной модели – по критерию Фишера.

В результате анализа эмпирической математической зависимости установлено, что наибольшее влияние на величину шероховатости профиля зуба при совмещенной обработке полировальной частью червячного круга оказывает радиальная подача  $S_{rad}$ , продольная подача  $S_{np}$  оказывает влияние в меньшей степени. На рисунке 8 представлена данная эмпирическая модель.

$$Ra = 1,577 \cdot S_{rad}^{0,4752} \cdot S_{np}^{0,1512} \quad (4)$$

Сравнительный анализ результатов точности и шероховатости приведен на рисунке 9: совмещенная обработка шлифовально-полировальным кругом на рациональных режимах  $S_{rad}=0,005$  мм и  $S_{np}=0,12$  мм/об. обеспечивает 1 – 1 – 1

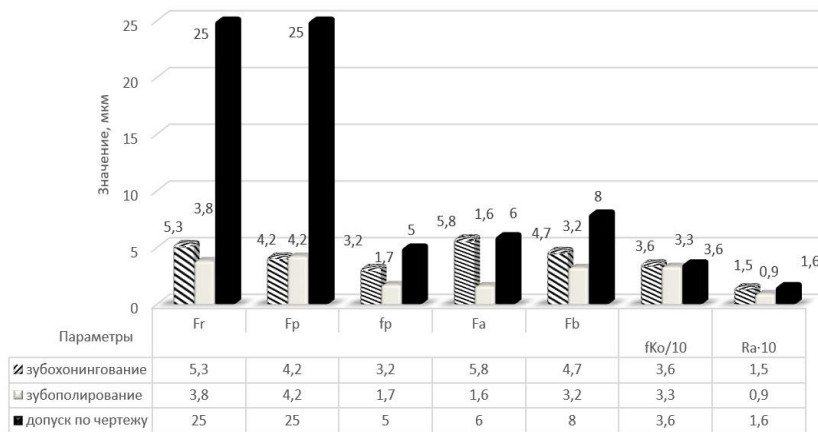


Рисунок 9 – Гистограмма результатов измерения точности и шероховатости боковых поверхностей

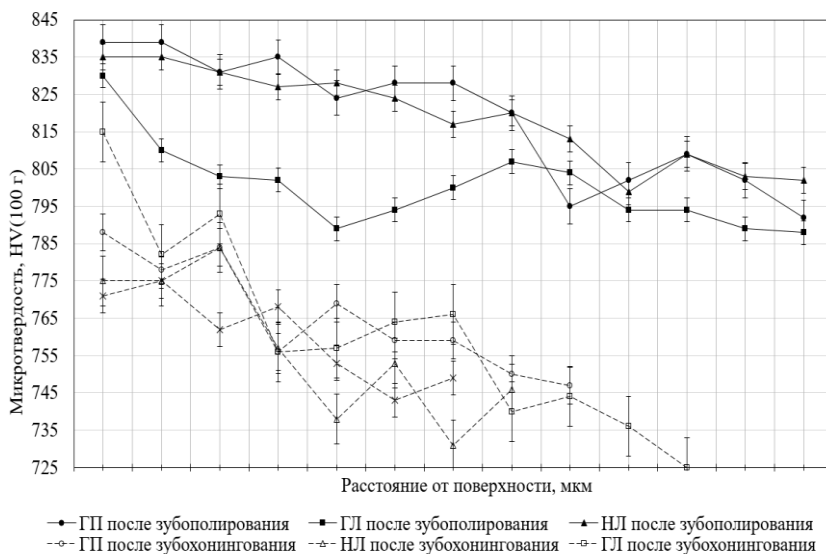


Рисунок 10 – График микротвердости образцов

степень точности: радиальное биение  $F_r=3,8$  мкм, погрешность профиля  $F_a=1,6$  мкм, погрешность направления  $F_b=3,2$  мкм. Шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев составляет  $R_a=0,09$  мкм. При этом производительность возросла в 2,5 раза. Микроструктура зубьев, обработанных на рациональном режиме  $S_{rad}=0,005$  мм и  $S_{np}=0,12$  мм/об., соответствует требованиям, таких дефектов, как шлифовочные прижоги, термические трещины, не обнаружено. Микроструктура эвольвентных поверхностей, обработанных этим методом, идентична микроструктуре эвольвентных поверхностей, обработанных по серийному технологическому процессу.

На рисунке 10 представлены результаты исследования микротвердости. Минимальное значение по шкале Виккерса не ниже  $HV > 715$ . Минимальные значения у ножи левой после зубохонингования и ножи правой после зубохонингования. Максимальные значения микротвердости определены у головки зуба после цикла зубополирования шлифовально-полировальным кругом.

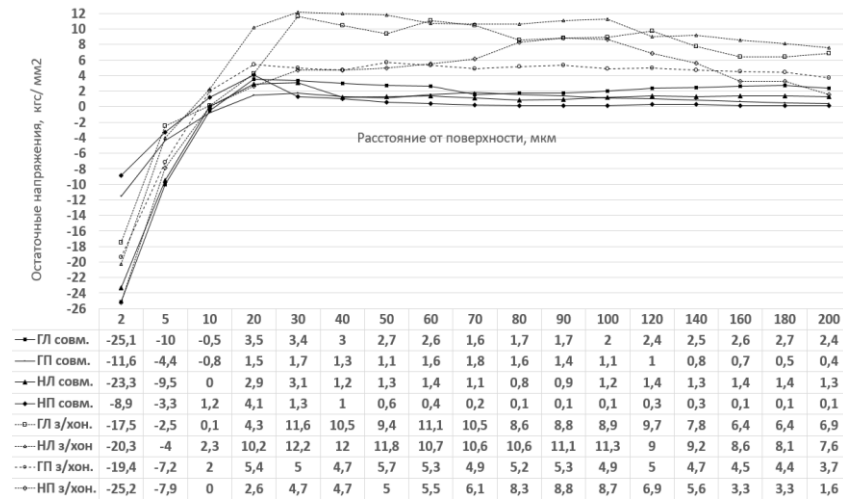


Рисунок 11 – График распределения остаточных напряжений образцов зубьев

зубьев при увеличении производительности и позволяет получить экономический эффект в размере более 2 миллионов рублей в год.

## 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:

1. 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  $Ra \leq 0,16$  мкм эвольвентных поверхностей зубьев при повышении производительности обработки.

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

Исследования остаточных напряжений (рисунок 11) показали, что в поверхностном слое образцов эвольвентных поверхностей зубьев сформированы благоприятные остаточные напряжения сжатия.

Внедрение результатов исследований на АО «Редуктор-ПМ» обеспечивает высокую точность зубчатого венца и качество поверхностей

3. 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.

4. 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.

5. 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  $S_{rad}=0,005$  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  $F_\alpha=1,6$  мкм, было  $F_\alpha=5,8$  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.

6. 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ:

1. **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 // Научные технологии в машиностроении. – 2019. – №2. – С. 22–28. DOI: 10.30987/article\_5c486cc16b81f0.62003791.
2. 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. DOI:10.15593/2224-9877-2020.1.09.
3. 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. DOI:10.30987/1999-8775-2021-5-15-22.

### Публикации в других изданиях:

4. **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.
5. 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.
6. **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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.

10. **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.

11. 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.

12. 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.