

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования



«Пензенский  
государственный  
университет»  
(ФГБОУ ВО «ПГУ»)

ул. Красная, д. 40, г. Пенза, Россия, 440026  
Тел/факс: (841-2) 56-51-22,  
e-mail: [cnit@pnzgu.ru](mailto:cnit@pnzgu.ru), <http://www.pnzgu.ru>

«УТВЕРЖДАЮ»

проректор по научной работе  
и инновационной деятельности  
ФГБОУ ВО «Пензенский  
государственный университет»



С.М. Васин

жабре 2022 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Ворожцовой Натальи Андреевны  
«Технологическое обеспечение и повышение качества зубчатых колес на  
основе совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным  
кругом», представленную на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности 2.5.6 Технология машиностроения

#### Актуальность темы исследования

Обеспечение безопасности полетов определяется в том числе надежностью и долговечностью цилиндрических зубчатых колес главного редуктора, передающего значительную мощность от двигателей на винт вертолета. Высокая контактная выносливость зубьев цилиндрических зубчатых колес зависит от точности изготовления зубчатого венца (требуемая степень точности 5 – 4 – 4 согласно ГОСТ 1643–81) и качества поверхностного слоя эвольвентных поверхностей зубьев. Эвольвентные поверхности зубьев перед окончательными механическими операциями проходят сложную химико-термическую обработку – цементацию и закалку до твердости  $HRC \geq 61$ . Окончательные механические операции при обеспечении точности и шероховатости  $Ra \leq 0,16$  мкм не должны вызывать термических трещин и прижогов, в поверхностном слое цементированной поверхности зубьев должны оставаться остаточные напряжения сжатия, определенная микроструктура и микротвердость.

Высокий спрос и увеличение объемов производства на вертолеты Ми-8/17, Ми-14, Ми-24, Ми-26, Ми-28, Ми-35, Ми-38, а также освоение новых изделий и различных модификаций существующих вертолетов с улучшенными показателями качества – более высокими техническими характеристиками, требует существенного повышения производительности, качества, надежности и долговечности редукторов этих вертолетов, что во

многим определяется применяемой технологией изготовления каждого зубчатого колеса.

В этой связи тема технологического обеспечения и повышения качества зубчатых колес на основе совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом представляется актуальной.

### **Структура и содержание**

Диссертационная 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.

Во введении представлена актуальность темы диссертационного исследования, поставлена цель и задачи исследования, приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ конструкторских, технологических, эксплуатационных требований, предъявляемых к производству авиационных цилиндрических колес. Обозначены проблемы стабильного обеспечения заданной точности зубчатого венца и шероховатости эвольвентных поверхностей. Проведен анализ научно-технической литературы, передового опыта зубообрабатывающих предприятий по методам финишной обработки зубьев цилиндрических зубчатых колес по критериям получаемой шероховатости, точности, производительности и степени возможности получения прижогов. Проведен анализ научно-технической литературы по влиянию абразивных характеристик на шероховатость обрабатываемой поверхности сложного эвольвентного профиля. Приведены теоретические и экспериментальные формулы определения шероховатости. 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.

Во второй главе обосновано применение 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. Установлено, что изменение радиальной и продольной подач изменяет площадь пятна контакта. Предполагается аналогичное их воздействие на величину шероховатости поверхности.

В третьей главе представлено методическое обеспечение для проведения экспериментальных исследований. Даны характеристики технологического оборудования, правящего и режущего инструмента. Разработана методика планирования полнофакторного эксперимента для получения математической модели влияния радиальной и продольной подач

на шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев в цикле зубополирования. Разработана методика и проведены сравнительные исследования параметров качества поверхностного слоя эвольвентных поверхностей зубьев, обработанных по серию технологическому процессу и эвольвентных поверхностей зубьев, обработанных методом совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом. Разработанная методика предусматривает сравнительные экспериментальные исследования точности зубчатого венца, шероховатости, остаточных напряжений, микротвердости и микроструктуры поверхностей зубьев с применением специальных образцов.

Четвертая глава посвящена анализу экспериментальных исследований параметров точности и качества поверхностного слоя эвольвентных поверхностей зубьев при серийном изготовлении и опытных образцов. Выведена эмпирическая математическая модель, в результате которой установлено, что наибольшее влияние на величину шероховатости профиля зуба при совмещенной обработке полировальной частью червячного круга оказывает радиальная подача  $S_{рад}$ , продольная подача  $S_{пр}$  оказывает влияние в меньшей степени. Сравнительный анализ показал, что совмещенная обработка шлифовально-полировальным кругом на рациональных режимах  $S_{рад}=0,005$  мм и  $S_{пр}=0,12$  мм/об. обеспечивает 1 – 1 – 1 степень точности: радиальное биение  $Fr=3,8$  мкм, погрешность профиля  $F\alpha=1,6$  мкм, погрешность направления  $Fb=3,2$  мкм. Шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев составляет  $Ra=0,09$  мкм. При этом производительность возросла в 2,5 раза. Микроструктура зубьев, обработанных на рациональном режиме  $S_{рад}=0,005$  мм и  $S_{пр}=0,12$  мм/об., соответствует требованиям, таких дефектов, как шлифовочные прижоги, термические трещины, не обнаружено. Микроструктура, микротвердость, остаточные напряжения эвольвентных поверхностей, обработанных методом совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом, в целом соответствуют данным, полученным на образцах эвольвентных поверхностей, обработанных по серийному технологическому процессу.

Приведены технологические рекомендации. Внедрение результатов исследований на АО «Редуктор-ПМ» обеспечивает высокую точность зубчатого венца и качество поверхностей зубьев при увеличении производительности и получении экономического эффекта.

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.

Материалы диссертации изложены последовательно, положения аргументированы, оформление в целом качественное.

## **Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций**

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

### **Научная новизна**

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. Разработаны 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».

### **Замечания по диссертации и автореферату**

1. Автор не приводит сведений, каким образом учитывалось влияние износа круга на точность зубчатого венца.
2. Неясно, как сделан вывод 5 в главе 1.
3. При моделировании контакта для определения упругих деформаций необходимо учитывать прочностные характеристики материала круга, но у автора нет упоминаний об исследовании или каких-либо справочных данных по этим характеристикам.
4. Неясно, насколько отличается значимость радиальной и продольной подач от значимости остальных факторов, отброшенных при постановке эксперимента.
5. Отсутствует аналитическая составляющая полученных результатов исследования остаточных напряжений, микротвердости и микроструктуры в части структурно-фазовых превращений.
6. Зернистость абразива, использованного при полировании, упомянута стр. 79 как 0,06-0,1мм. В то же время на рис 3.7 и стр. 81 эта величина составила 6-10 мкм. Неясно, абразив какой зернистости использовался на самом деле.
7. Неясно, как рекомендации пп 4.6 связаны с экспериментальной моделью и теоретическими исследованиями предыдущих глав работы.
8. В диссертации нарушена нумерация содержания после раздела 4.6.
9. При расчете экономического эффекта стойкость червячного шлифовального круга составила 12 000 деталей, обоснование этого количества отсутствует.

Отмеченные замечания не являются принципиальными и не снижают ценности выполненного исследования. Их следует рассматривать в качестве возможных направлений продолжения исследований.

### **Соответствие содержания диссертации указанной специальности**

Работа соответствует паспорту специальности 2.5.6 Технология машиностроения в пунктах:

п.3. Установлена экспериментальная математическая зависимость величины шероховатости эвольвентных поверхностей зубьев от радиальной и продольной подач червячного круга, позволяющая обеспечивать требуемую величину шероховатости эвольвентных поверхностей зубьев при повышении точности профиля зубчатого венца;

п.4. Разработан более производительный, в сравнении с существующим, технологический процесс совмещенной обработки цилиндрических зубчатых колес с применением червячного шлифовально-полировального круга;

п.7. 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;

п.9. 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.

### **Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации**

Автореферат изложен правильно, достаточно полно и его содержание объективно отражает содержание диссертации.

### **Значимость результатов для науки и производства**

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.

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  $S_{рад}=0,005$  мм и продольная подача  $S_{пр}=0,12$  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.

### **Заключение о соответствии диссертационной работы**

Диссертационная работа Ворожцовой Натальи Андреевны «Технологическое обеспечение и повышение качества зубчатых колес на основе совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 Технология машиностроения, является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, базирующейся на достаточном количестве теоретических и экспериментальных исследований.

Научные положения, полученные автором диссертации, достоверны и достаточны для обоснования сделанных выводов и заключений. Несмотря на приведенные недостатки, диссертация в целом выполнена на достаточно высоком научном уровне, с новизной теоретических и практических разработок, которые являются актуальными, интересными и достоверными. Оформление, стиль и язык изложения работы соответствуют требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли достаточную апробацию на научно-технических конференциях и опубликованы в 12 научных работах, включая 3 статьи в рецензируемых российских журналах.

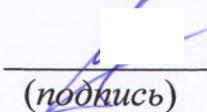
На основании вышеизложенного считаем, что диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.5.6 Технология машиностроения, отвечает требованиям, предъявляемым диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук в пунктах 9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. за №842 с учетом дополнений от 28.08.2017 г. Содержит выводы и результаты, позволяющие квалифицировать их, как решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, а ее автор Ворожцова Наталья Андреевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 Технология машиностроения.

Диссертационная работа и отзыв на нее обсуждены и одобрены на заседании кафедры «Технологии и оборудование машиностроения» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» 29 ноября 2022 года, протокол № 4.

Заведующий кафедрой «Технологии и оборудование машиностроения» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»,

д.т.н. по специальностям 05.02.08,  
05.02.07.(2.5.5.,2.5.6)  
440026 г. Пенза, ул. Красная, 40,  
учебный корпус №4, ауд. №106.  
Тел. 8 (8412) 208-430  
E-mail: [azwer@mail.ru](mailto:azwer@mail.ru)

Зверовщиков  
Александр Евгеньевич

  
(подпись) 27.12.2022  
(дата)

Подпись доктора технических наук,  
доцента А.Е. Зверовщикова  
удостоверяю:  
Ученый секретарь Ученого Совета ПГУ

Дорофеева Ольга  
Станиславовна

  
\_\_\_\_\_