

В диссертационный совет  
Пермского национального  
исследовательского университета  
Д ПНИПУ 05.18 \_\_\_\_\_  
614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т,  
д.29.

## ОТЗЫВ

официального оппонента Киселёва Е.С. на диссертационную работу  
Ворожцовой Натальи Андреевны «ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И  
ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС НА ОСНОВЕ СОВМЕЩЕННОЙ  
ОБРАБОТКИ ЗУБЬЕВ ШЛИФОВАЛЬНО-ПОЛИРОВАЛЬНЫМ ЧЕРВЯЧНЫМ КРУГОМ»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 2.5.6 – Технология машиностроения

### 1. Структура и объём диссертации

Диссертация выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» и состоит из введения, пяти глав, общих выводов по диссертации, условных обозначений, списка использованных источников (113 наименований) и пяти приложений.

Основное содержание работы изложено на 134 страницах и включает 64 рисунка и 19 таблиц.

*В первой главе (37 с.)* выполнен анализ научно-технической и патентной литературы по современному состоянию технологии окончательной обработки прецизионных зубчатых колес, сложных по конструкции и отличающихся высокими требованиями по эксплуатационным характеристикам, вертолетных редукторов. Отмечен большой вклад в развитии технологии шлифования отечественных ученых, но не упоминается о зарубежных исследователях, вклад которых не менее значим в развитии технологии абразивной обработки в целом (в том числе и шлифования). Основные усилия автора в данной главе сосредоточены на выявлении физических закономерностей и отличий технологий окончательной обработки поверхностей зубьев для обеспечения их заданных эксплуатационных характеристик. Основная часть представленной информации посвящена сравнительно новой зарубежной технологической разработке - окончательному формообразованию зубьев цилиндрических прямозубых колес путем совмещенной обработки шлифовально-полировальными червячными кругами на станках фирмы Reishauer, а также других зарубежных производителей (Gleason и Tyrolit). Несомненно, на данный момент времени, это один из высокоэффективных методов изготовления данных видов прецизионных изделий, получившей широкое распространение в промышленно развитых странах и, практически отсутствующий, на отечественных металлообрабатывающих заводах. Приводятся сравнительные

характеристики отечественной и зарубежной технологии окончательной обработки по новому методу и отдельному шлифованию с последующим зубохонингованию, получившим распространение на промышленных предприятиях РФ. Сравнение параметров качества поверхностного слоя зубчатых колес, полученных по новой технологии, с серийными авиационными зубчатыми колесами показывает существенные преимущества первых. Однако, по мнению автора, для внедрения новой технологии в серийное производство необходимы трудоемкие исследования взаимосвязи элементов режима резания с параметрами точности зубчатых колес, шероховатостью обработанных поверхностей, а также с микротвердостью, микроструктурой и остаточными напряжениями. Автор высказывает мнение, что подобные исследования в России и за рубежом не проводились. Оппонент считает, что с первым утверждением согласится можно, а со вторым – нет. Тем более, что диссертант сам приводит информацию: *«при демонстрации новых разработок в печати [6, 64], производители утверждают, что шлифовально-полировальным кругом можно обеспечить шероховатость поверхности профилей зубьев по  $Ra=0,05$  мкм. При этом не разглашаются: обрабатываемый материал, режимы резания, точные характеристики круга, получаемая степень точности зубчатого колеса, параметры качества поверхностного слоя».*

Выводы по 1-ой главе в целом вытекают из представленной информации, хотя цель работы совпадает с названием диссертационной работы и сформулирована не совсем четко.

Нельзя не отметить, в качестве недостатков, многочисленные отступления автора от стандартной и общепринятой технической терминологии при написании данной и последующих глав. Так обрабатывается «деталь», вместо «заготовка детали» и др. Термин «точность», почему-то, не входит в число показателей, характеризующих «качество» детали. Диссертант употребляет термин «снижается или увеличивается шероховатость». Между тем, кроме высотных параметров шероховатости, существуют и шаговые. Есть  $t_p$ .

Тем не менее, несмотря на отмеченные недочёты, в первой главе представлен интересный материал, позволяющий автору обосновать перечень задач, которые необходимо решить для достижения поставленной цели.

**Вторая глава** (22 с.) в соответствии с названием посвящена «теоретическому обоснованию и разработке совмещенной обработки шлифовально-полировальными червячными кругами». Однако, метод совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом был уже разработан, по утверждению диссертанта, за рубежом, еще 2016 году. Вероятно, речь идет об исследовании кинематики контактного взаимодействия обрабатываемой заготовки зубчатого колеса и червячного шлифовально-полировального круга с заранее установленными производителем инструмента параметрами (в частности, принят *трехзаходный* червячный круг, почему?). На рис. 2.3. Образование шероховатости после шлифования и полирования описано с приведением далеких от реальности видов расположения абразивных зерен шлифовальной и полировальной части круга (не учтена разновысотность

зерен и их подвижность в эластичной поливинилформалеовой связке). Не указаны (и необоснован выбор) соотношения диаметров делительных окружностей червячного круга и цилиндрического зубчатого колеса.

В самом начале главы 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». На взгляд оппонента, это скорее аксиома.

Неясно, о каком *новом* технологическом процессе идет речь, если он давно разработан за рубежом.

В подразделе 2.1 выдвинута новая «гипотеза», что «указанные требования возможно достичь на 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*». Непонятно, на чем обоснованы эти две гипотезы и могут ли эти два утверждения относиться к научным гипотезам.

*Гипотеза – это предположение или догадка, утверждение, в отличие от аксиом, постулатов, требует доказательств. Гипотеза считается научной, если она, в соответствии с научным методом, объясняет факты, охватываемые этой гипотезой; не является противоречивой; принципиально опровергаема, т.е.. потенциально может быть проверена критическим экспериментом; не противоречит ранее установленным законам и может быть приложена к более широкому кругу явлений (Википедия).*

Создание теоретических основ для решения поставленных в работе задач с учётом сложности физических явлений, происходящих в зоне контакта инструмента и заготовки, невозможно без разработки математических моделей. Поэтому диссертант, на основе экспериментальных данных полученных профиллограмм, выдвигает свои предположения о формообразовании поверхностного слоя зубчатого колеса. С некоторыми из них можно согласиться, с другими это сделать сложнее. Диссертант правильно выбрал для расчета эвольвентного зацепления программу “KISS soft”, обладающую широкими возможностями для достижения поставленной цели диссертационной работы. Моделирование контакта цилиндрического зубчатого колеса с рассчитанной геометрически точной эвольвентой и червячного круга также выполнено с использованием наиболее подходящей для этой цели программы “Siemens NX”, геометрические построения развертки пятна контакта при снятии припуска рационально осуществлены в программе «КОМПАС». Автор справедливо утверждает, что при обработке трехзаходным червячным кругом увеличивается производительность, так как обрабатывается 3 впадины одновременно. Однако, ничего не говорит о снижении кинематической точности и плавности работы зубчатого зацепления. Рассматривается построение пятна контакта цилиндрического колеса и червячного шлифовально-полировального круга с учетом снимаемого припуска. Но не приводится информация о нормируемом пятне контакта

находящихся в зацеплении в редукторе двух, изготовленных по рассматриваемой технологии, цилиндрических прямозубых зубчатых колес.

Диссертант упоминает о возможностях создания прерывистой шероховатости зубчатых поверхностей технологией LNS - Low Noise Shifting на станках фирмы Reishauer и показывает преимущества последней для повышения эксплуатационных характеристик зубчатых колес. Однако эти возможности широко используются в промышленно развитых странах и вряд ли могут быть отнесены к заслугам диссертанта.

В подразделе 2.4. Разработка многоциклового технологии совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом, автор приводит интересные результаты экспериментальных исследований. Однако, по мнению оппонента, им место в подразделе 4.6. «Разработка технологических рекомендаций».

*Третья глава* (17 с.) диссертации посвящена разработке методики проведения экспериментальных исследований. К замечаниям по методике следует отнести отсутствие сведений о режиме и периодичности правки. Нет информации о том, как учитывалось (и учитывалось ли) влияние износа круга на точность и плавность работы зубчатого колеса. Методика и приборное оснащение для её реализации в диссертационных исследованиях, соответствующим поставленной цели и задачам для её достижения.

В качестве замечаний следует отметить отсутствие в методике подраздела, содержащего расчет числа параллельных опытов. В *табл. 3.1. Расчет количества образцов для исследования точности и качества поверхностного слоя зубьев* нет никакого расчета. Более того, диссертант сам, без всякого обоснования и произвольно устанавливает, что ему для подтверждения достоверности выполненных экспериментальных исследований достаточно оценить *микроструктуру, шероховатость, точность параметров зубьев на зубчатом колесе* достаточно использовать по одному образцу. Оппонент с этим не согласен, а потому – выражает сомнения в некоторых научных выводах по диссертации. Однако, в целом, замечания оппонента не являются критичными.

*В четвертой главе* (19 с.) приводятся результаты экспериментальных исследований по выявлению технологической эффективности предлагаемых автором диссертационной работы технических решений для реализации полученных во второй и третьей главах научных выводов.

Результаты основной части экспериментальных исследований были заранее предсказуемы (на качественном уровне), но как методики, так и используемое лабораторно-станочное оборудование дают более достоверную информацию о соответствии (либо о несоответствии) уровню поставленных задач и мировому уровню научных исследований. На взгляд оппонента выбранное лабораторно-станочное оборудование, программно-вычислительный комплекс, разработанные методики исследований вполне приемлемы для решения в ходе диссертационного исследования поставленных задач. Конечно, украшением диссертационной работы могли бы быть аналитические исследования структурно-фазового состава и технологических остаточных напряжений

поверхностного слоя наряду с их экспериментальной оценкой. Это позволило бы диссертанту уйти от констатации полученных результатов и перейти к объяснению причин их вызвавших. Но в целом объём экспериментальных исследований достаточен для диссертационных работ подобного типа.

Тем не менее следует отметить, что в ряде случаев диссертант должен был бы дать, хотя бы гипотетические предположения о первопричинах полученных результатов (например, по микротвердости, структурно-фазовым превращениям и остаточным напряжениям, а также шероховатости), а не ограничиваться лишь их констатацией. Без измерений составляющих сил резания и контактных температур сложно согласиться о том, что «в результате сравнительного анализа остаточных напряжений *установлено*, что при всех исследуемых процессах на поверхностном слое зубьев выявлены сжимающие напряжения [98], *что может быть связано с превалирующим действием силового фактора над тепловым*». Диссертанту не следует забывать, что причиной технологических остаточных напряжений могут быть и структурно-фазовые превращения в поверхностном слое.

Тем не менее, представленные в главе 4 материалы весьма интересны и представляют научную и практическую ценность

### **Заключение по диссертации (3с.)**

В заключении приведены основные научно-практические результаты диссертационных исследований. С некоторыми из них оппонент согласиться не может. В частности, в п. 9 (почему-то в диссертации они начинаются с пятого пункта) утверждается, что рациональные режимы совмещенной обработки шлифованием и полированием зубьев цилиндрических зубчатых колес обеспечена точность зубчатого венца 1-1-1 по ГОСТ1643-81. *Во-первых*, в данном ГОСТе отсутствует информация и показатели точности зубчатых колес точнее 3 степени точности.

*Во-вторых*, с учетом замечания по 3 методической главе (отсутствует расчет необходимого числа параллельных измерений, а оценка параметров качества зубьев зубчатых колес, осуществляемых по одному измеряемому образцу и учитывая погрешности измерительных приборов, не позволяет делать утверждения о достоверности полученных результатов), некоторые выводы из диссертационных исследований не совсем убедительны.

*В третьих*, вызывает сомнение, что по представленной на 1.9 схеме базирования заготовки зубчатого колеса на операции совмещенной обработки шлифованием и полированием зубьев (двойная опорная по цилиндрической поверхности), выполняемой на станке Reisauer RZ basic с учетом технических характеристик контрольно-измерительной машины P-40 Klingelberg, достижимы показатели по ступеням качества зарубежных стандартов на прямозубые цилиндрические зубчатые колеса по DIN 3962-1-78, ISO 1328, ANSI/AGMA 2015, соответствующие, по мнению диссертанта, *несуществующим показателям* 1 степени точности по ГОСТ 1643-81.

Остальные выводы, представленные в заключении, отражают в полном объёме полученные в ходе диссертационного исследования основные результаты работы.

### **Условные обозначения и список сокращений**

В данной диссертационной работе они отсутствуют. Последовательность условных обозначений должны удовлетворять требованиям ГОСТ Р 7.11 и ГОСТ Р 7.12.

### **Список использованных источников (33с.)**

Содержит наименование 113 публикаций, достаточно полно отражающих состояние отечественных и, в меньшей степени, зарубежных (23 наименований) исследований по рассматриваемой проблеме.

### **Приложения (2 с.)**

Включают в себя, в основном, материалы по практическому использованию научных результатов соискателя.

В целом, по объёму и структуре диссертационная работа имеет внутреннее единство и написана в соответствии с установившимися традициями. Структура диссертации логична, соответствует цели и задачам исследования, однако не в полном объёме отвечает требованиям *ГОСТ Р 7.0.11-2011. Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления.*

## **2. Актуальность избранной темы диссертации.**

Диссертационная работа Н.А. Ворожцовой посвящена вопросам совершенствования технологии окончательной обработки заготовок прецизионных зубчатых колес. Наличие жёстких допусков на каждый контролируемый точностной параметр в совокупности с повышенными требованиями к другим параметрам качества поверхностного слоя готовой детали, отвечающим за их эксплуатационные характеристики, делают изготовление таких колес весьма трудоёмкой и дорогостоящей операцией. При этом наибольшие трудности возникают при обработке поверхностей зубьев. На взгляд диссертанта (и в этом с ним согласен оппонент) технические трудности подобного рода могут и должны решаться с помощью новых методов окончательной обработки зубчатых колес.

Совершенствование инновационных технологий, в том числе процесса окончательной обработки прецизионных зубчатых колес, должно решать следующие задачи: снижение трудоемкости изготовления, повышение точности и производительности обработки прежде всего за счет увеличения точности и сокращения затрат на полирование поверхностей зубьев зубчатых

колес. В настоящее время существует большое многообразие разработок подобных технологий. Этот факт обуславливает сложности в повышении уровня эффективности производства прецизионных зубчатых колес.

В качестве альтернативы существующей технологии изготовления прецизионных зубчатых колес на двух отдельных операциях зубошлифования и зубохонингования широкое распространение в промышленно развитых странах получила технология совмещенного зубошлифования и полирования на одной операции с использованием станков фирмы Reishauer. В России подобная технология делает только первые шаги. Основные преимущества применения данной технологии сводятся к существенному повышению производительности и улучшению качества обрабатываемой поверхности зубьев. Однако товаропроизводители данной технологии, инструментов и оборудования не раскрывают рациональные аспекты их использования, а именно: по выбору элементов режима шлифования и полирования, а также технологии изготовления режущего инструмента.

Учитывая, что конечное достижение требуемых показателей качества и эксплуатационных характеристик данных изделий во многом зависит от химсостава и термообработки данных деталей, даже наличие самого прогрессивного на рассматриваемый момент времени оборудования и инструмента, требует весьма трудоемких исследований по выбору рациональных режимов резания. Поэтому, несомненно, тема диссертационного исследования Н.А. Ворожцовой является актуальной.

### 3. Научный уровень и научная ценность диссертации

Необходимо отметить, что соискатель поставил и решил весьма сложную задачу математического моделирования контактного взаимодействия инструмента с заготовкой на основе рационального использования результатов правильно построенного плана экспериментов.

Постановка такой задачи уже предопределяет научную новизну данных исследований. В отличие от выполненных ранее работ по близкой тематике в других научных школах, насколько известно оппоненту, ранее не предпринимались столь серьёзные комплексные исследования, включающие в себя разработку:

- оценки закономерности и взаимосвязи величины шероховатости боковых поверхностей зубьев при радиальных и продольных подачах червячного круга от величины, образующегося при этом пятна контакта, что позволит обосновать рациональное распределение припуска для плавного уменьшения высотных параметров шероховатости;

- доказательств, что распределение припуска с уменьшением радиальной подачи уменьшает площадь пятна контакта профиля зуба и червячного круга. В свою очередь, это обеспечивает постепенное уменьшение высотных параметров шероховатости обработанной поверхности зуба.

- эмпирических моделей взаимосвязи шероховатости, точности, производительности от режимов зубошлифования в цикле зубополирования и

рациональных режимов окончательной обработки по критериям минимальной шероховатости по параметру Ra.

***Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.***

Диссертация Ворожцовой Натальи Андреевны содержит 6 основных выводов, которые основываются на результатах исследований соответствующих глав диссертации. Первый вывод были сделаны на основе анализа научно-технической литературы результатов главы 1. Для первого вывода, по мнению оппонента, недостаточно представлено результатов исследований в диссертационной работе. Второй и пятый выводы вытекают из результатов исследований главы 4. Третий вывод связан с методикой экспериментальных исследований, представленной в главе 3. Четвертый вывод носит общий характер и представляют обычную констатацию фактов.

Таким образом, выводы и результаты, в основном, положительно характеризуют работу, и подтверждают достоверность разработанных научных положений.

***Оценка новизны и достоверности.***

Новизна научных положений диссертационной работы Н.А. Ворожцовой сводится к следующему:

1. Выполнено моделирование и расчет пятна контакта, возникающего при непрерывном обкатном зубошлифовании боковых поверхностей зубьев цилиндрических зубчатых колес с червячным кругом, с условием ступенчатого снятия припуска и изменяющихся режимах резания.

2. Установлены закономерности и взаимосвязи величины параметра шероховатости Ra боковых поверхностей зубьев при изменении радиальных и продольных подач червячного круга и, образующейся при этом площади пятна контакта, что позволило обосновать распределение припуска для плавного снижения шероховатости.

3. Доказано, что распределение припуска по циклам с уменьшением радиальной подачи уменьшает площадь пятна контакта профиля зуба и червячного круга, что обеспечивает постепенное уменьшение параметра шероховатости Ra обработанной поверхности зуба.

4. Экспериментально подтверждено, что применение совмещенной обработки шлифовально-полировальными червячными кругами обеспечивает повышение точности эвольвентного профиля зубчатого венца на 1-2 степени по сравнению с применяемым процессом зубохонингования, что связано с сокращением числа переустановок зубчатого колеса.

Научные положения, выводы и рекомендации диссертационной работы Ворожцовой Н.А.. подтверждены результатами экспериментальных



исследований и опытно-промышленных испытаний, выполненных как в лабораторных и в производственных условиях. Достоверность теоретических положений и результатов экспериментальных исследований подтверждена заключениями по диссертационной работе на ряде промышленных предприятий.

#### **4. Практическая ценность работы**

Основным практическим результатом выполненных соискателем исследований, является разработка технологических рекомендаций по рациональному использованию режимов совмещенной обработки шлифовально-полировальным червячным кругом при серийном изготовлении прецизионных цилиндрических зубчатых колес и их практическая реализация в производственных условиях АО «Редуктор-ПМ» (г. Пермь).

Кроме того, результаты диссертационных исследования были предложены для использования при изучении курса «Технология машиностроения» ФГАОУ ВО ПНИПУ.

#### **5. Публикации и апробация работы**

По материалам выполненных исследований опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, внесённых в перечень журналов и изданий, утверждённых Высшей аттестационной комиссией РФ. Работа и её отдельные результаты неоднократно докладывались на международных и всероссийских научно-технических конференциях в период с 2019 по 2021 г. г. Это дает основание считать, что диссертация прошла необходимую апробацию и нашла соответствующее отражение в публикациях

#### **6. Оформление материалов диссертации**

Диссертация написана в целом на квалифицированном уровне, снабжена достаточным количеством иллюстративного материала, ссылками на авторов и источники, откуда заимствованы отдельные результаты. Автор диссертации умеет структурно-содержательно оформить выводы, показать результативность выполненных исследований.

Автореферат в полном объёме отражает содержание диссертационной работы и позволяет ознакомиться со всеми основными результатами, полученными лично автором, а также выводами и рекомендациями, вытекающими из проведенных исследований.

#### **7. Замечания по диссертационной работе.**

1. В диссертационной работе и автореферате отсутствует расчет необходимого числа параллельных опытов и измерений, а оценка параметров

качества зубьев зубчатых колес по одному образцу с учетом погрешностей измерительных приборов не позволяет делать утверждения о достоверности полученных результатов.

2. К сожалению соискатель не привёл прямых доказательств адекватности разработанных основных математических моделей реальному процессу совмещенной окончательной обработки зубошлифованием и зубополированием.

3. В диссертационной работе отсутствует информация о рассмотрении и утверждении расчета экономической эффективности от внедрения результатов исследований на АО «Редуктор-ПМ».

## 8. Заключение

Диссертационная работа Ворожцовой Н.А. является законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение научной и практической задачи, значимой для соответствующей отрасли науки, внедрение результатов которой вносит значительный вклад в развитие экономики страны и повышение её обороноспособности.

Работа выполнена на высоком научно-техническом уровне. Степень апробации результатов работы путем опубликования основных положений в печати, выступлений на научно-технических конференциях и внедрения в действующее производство - достаточна. Общая подготовленность и научный потенциал соискателя весьма высок.

Сделанные выше замечания не снижают важности полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Таким образом, представленная диссертация Ворожцовой Натальи Андреевны по актуальности, научно-техническому уровню, степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, их достоверности и новизне, значению для теории и практики соответствует п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842.

Диссертация соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней и званий и требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6. – «Технология машиностроения»

Заслуженный работник Высшей школы РФ

д.т.н., профессор

Киселев Е.С.

Подпись профессора кафедры «Инновационные технологии машиностроения»

ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»

**ЗАВЕРЯЮ**

Начальник управления кадрового обеспечения

Макарова О.А.

Киселев Евгений Степанович

432027, г. Ульяновск, ул. Северный Вентура, 5 +7(960)776-05-52, [Kec.ulstu@mail.ru](mailto:Kec.ulstu@mail.ru)