

УТВЕРЖДАЮ:

Ректор ГОСУДАРСТВЕННОЙ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНЕЦКИЙ
ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ТРАНСПОРТА»

д-р техн. наук, профессор
Чепцов М.Н.
« 03 » 2020 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации Грубки Романа Михайловича на тему: «Теоретические основы повышения точности обработки цилиндрических колес путем ориентированной многокоординатной пространственной модификации зубьев», представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения

1. Актуальность для науки и практики

Машиностроение как отрасль непрерывно развивается в стремлении обеспечить максимальную производительность и минимальную себестоимость изделий для заданных условий обработки и требований к качеству. Совершенствуются при этом как конструкции изделий машиностроения, так и применяемое при их изготовлении технологическое оборудование, технологическое оснащение и режущий инструмент. Вместе с тем расширение технологических возможностей оборудования, создаваемого на базе многофункциональных систем с ЧПУ, приводит к развитию и совершенствованию технологических методов формообразования деталей. Не являются исключением и процессы конструирования и изготовления зубчатых колес различных видов и назначения, в том числе и цилиндрических зубчатых колес.

Актуальность темы работы определяется недостаточной проработанностью вопросов по проектированию цилиндрических передач, построенных на базе пространственной модификации зубьев одного из звеньев, способных компенсировать комплекс перемещений и поворотов, вызванных наличием погрешностей и деформаций элементов передач, и проектированию соответствующих элементов технологического обеспечения процессов формообразования зубчатых венцов. Для широкого применения пространственных зацеплений цилиндрических колес необходима разработка универсальных комплексных модификаций зубьев, использование единообразного математического описания, как самих геометрий боковой поверхности зубьев, так и процессов, происходящих во время формообразования зубчатых венцов и во время эксплуатации изделий.

зубчатыми венцами. Развитие методов анализа процессов зубообработки затрудняет сложность как геометрии самих изделий, геометрии режущего инструмента, так и кинематики относительных движений инструмента и заготовки в процессе формообразования.

Развитие техники и технологии приводит к повышению требований к показателям надежности, долговечности, нагрузочной способности при сохранении или уменьшении габаритных размеров цилиндрических зубчатых передач. Выполнение указанных требований возможно за счет увеличения точности зубчатых колес, что не всегда экономически целесообразно, или за счет изменения конструкции элементов передач, в том числе модификацией боковой поверхности зубьев. И сегодня для практического использования пространственных цилиндрических зубчатых передач требуется наличие таких методов описания процессов формообразования, зависимостей для задания геометрии рабочих поверхностей зубьев и режущего инструмента, которые позволяют полностью использовать возможности современного технологического оборудования при применении современных компьютерных технологий.

Зубчатые колеса являются одними из самых сложных и трудоемких в изготовлении деталей, поэтому возрастает роль внедрения таких мероприятий в условиях всех типов машиностроительных производств, которые направлены на повышения производительности и точности изготовления зубчатых венцов. При современном уровне развития компьютерных технологий и с появлением многокоординатных станков с ЧПУ появилась возможность создания и применения цилиндрических зубчатых передач с пространственными геометриями боковой поверхности зубьев на базе зацеплений, способных компенсировать все возможные перемещения взаимодействующих зубчатых венцов, вызванные наличием погрешностей изготовления, монтажа и деформациями под действием рабочих нагрузок.

Основное внимание в работе уделено исследованию важной проблемы - повышению точности многокоординатного фрезерования пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических колес, зацепления на основе которых способны компенсировать комплекс перемещений, вызванных наличием погрешностей изготовления, монтажа и деформаций элементов зубчатых передач в процессе эксплуатации, за счет пространственного подхода к решению технологических задач и аналитического описания взаимосвязи элементов процесса формообразования.

Предложенные в работе выводы и рекомендации направлены на дальнейшее совершенствование цилиндрических зубчатых передач путем перехода к пространственному рассмотрению процессов, происходящих в реальном зацеплении с учетом возникающих технологических и эксплуатационных факторов, реализации комплексного конструкторско-технологического подхода в решении задач проектирования зубчатых зацеплений и совершенствования процессов формообразования зубчатых венцов с пространственной модификацией зубьев. Пространственная постановка технологических задач нарезания зубчатых венцов с пространственными модификациями зубьев позволяет расширить технологические возможности

существующего зуборезного оборудования и в полной мере использовать возможности зубообрабатывающих станков с ЧПУ при обеспечении высокой точности нарезаемых зубчатых венцов. Для осуществления контроля таких зубчатых венцов необходимо использование комплексных цифровых измерительных устройств, которые позволяют определять геометрию изделий целиком и, в частности, геометрию боковой поверхности зубьев. При этом необходимо иметь соответствующий математический аппарат, который позволит выполнить обработку измерительной информации и сравнить результаты измерений с соответствующими теоретическими значениями.

2. Основные научные результаты и их значимость для науки и производства

Основные научные результаты, полученные автором:

1. Предложена методология синтеза внешнего и внутреннего зацеплений цилиндрических колес, способных компенсировать комплексное действие погрешностей и деформаций элементов зубчатых передач.

2. Предложен пространственный подход к решению задач формообразования цилиндрических колес зубофрезерованием методом копирования, позволяющий повысить геометрическую точность пространственно-модифицированных зубьев.

3. Разработана методика аналитического определения координат точек пространственной траектории относительного перемещения режущего инструмента, работающего по методу копирования.

4. Разработана методика определения параметров срезаемого слоя при многокоординатном зубофрезеровании методом копирования, основанная на пространственном подходе к решению задачи формообразования.

5. Предложен пространственный подход к решению задач формообразования цилиндрических колес зубофрезерованием методом обкатки, позволяющий повысить геометрическую точность пространственно-модифицированных зубьев.

6. Разработана методика аналитического определения координат точек пространственной траектории относительного перемещения РИ, работающего по методу обкатки.

7. Разработана система повышения надежности, долговечности и нагрузочной способности цилиндрических зубчатых передач на базе функционально-ориентированного конструкторско-технологического подхода.

8. Предложено развитие кинематического метода синтеза пространственных зацеплений цилиндрических зубчатых колес, компенсирующих комплексное действие погрешностей и деформаций элементов зубчатых передач.

9. Разработаны элементы технологического обеспечения функционально-ориентированного конструкторско-технологического подхода изготовления пространственно-модифицированных зубчатых венцов цилиндрических колес при многокоординатном зубофрезеровании методами копирования и обкатки.

10. Установлены закономерности процесса формообразования, позволяющие повысить геометрическую точность нарезания пространственно-модифицированных зубьев.

11. Предложено, с целью сокращения сроков выполнения работ по конструкторско-технологической подготовке производства изделий с пространственно-модифицированными зубчатыми венцами, боковую поверхность зуба описывать семейством трехмерных сплайнов Безье.

12. Разработаны теоретические основы получения и обработки измерительной информации на технологических операциях контроля геометрических параметров пространственно-модифицированных зубчатых венцов цилиндрических колес с использованием цифровой измерительной техники.

13. Классифицированы виды модификаций элементов зубчатых венцов и способы формообразования модифицированных зубьев цилиндрических колес.

Значимость результатов исследований для науки заключается в том, что установлены закономерности процесса формообразования зубьев с комплексной пространственной геометрией и связь кинематики относительных движений режущего инструмента и заготовки, структуры пространственной геометрии зубьев и геометрии режущей кромки инструмента при обработке зуборезными фрезами, работающими как по методу копирования, так и по методу обкатки. Полученные результаты применимы для многокоординатной обработки зубчатых венцов, в том числе и с предложенной в работе, комплексной пространственной модификацией зубьев, зацепления на основе которой способны компенсировать комплекс перемещений и поворотов, вызванных наличием погрешностей и деформаций элементов зубчатых передач. Разработанные элементы технологического обеспечения функционально-ориентированного конструкторско-технологического подхода изготовления пространственно-модифицированных зубчатых венцов цилиндрических колес при многокоординатном зубофрезеровании методами копирования и обкатки и установленные в работе закономерности процесса формообразования, позволяющие повысить геометрическую точность нарезания пространственно-модифицированных зубьев при перемещении, например, червячной фрезы по пространственной траектории на 21,2%, а максимальные отклонения толщины зубьев снизить на 12,3% по сравнению с линейной траекторией относительного перемещения РИ.

Практическое значение результатов работы определяется тем, что перемещение режущего инструмента по пространственной криволинейной траектории при многокоординатном зубофрезеровании пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических колес методами копирования и обкатки приводит к повышению геометрической точности нарезания зубьев. Отклонение координат по толщине зуба составляет: при обработке дисковой модульной фрезой - для специально спрофилированного РИ до 3%, для стандартного РИ - до 5%; при обработке червячной фрезой с перемещением РИ по пространственной траектории максимальное $\pm 9,3\%$; в пределах активной боковой поверхности зубьев - $\pm 6,3\%$. Предложенный в работе функционально-ориентированный конструкторско-технологический подход повышения

надежности, долговечности и нагрузочной способности цилиндрических зубчатых передач, позволяет осуществлять как сквозное, так и итерационное проектирование цилиндрических зубчатых колес с пространственно-модифицированными зубьями, способных компенсировать комплекс погрешностей и деформаций элементов передач. Представленные в работе рекомендации по проектированию передач внешнего и внутреннего пространственных зацеплений цилиндрических колес, позволяют создавать зацепления с высокими эксплуатационными характеристиками за счет обеспечения линейного контакта зубьев и исключения кромочного контакта и способные компенсировать комплекс погрешностей и деформаций элементов зубчатых передач. Для сокращения сроков выполнения конструкторской и технологической подготовки производства таких изделий в работе предложено выполнять аппроксимацию боковой поверхности зубьев сплайнами Безье. Относительная погрешность в определении координат при этом не превышает 1%. Изложенные в работе рекомендации по разработке элементов технологического обеспечения и по определению параметров для настройки зубофрезерных станков позволяют проектировать технологические процессы изготовления зубчатых венцов цилиндрических колес, как с предложенной пространственной геометрией, так и с геометрией, приближенной к ней, в условиях всех типов производств, в том числе на существующем серийном оборудовании стандартным РИ. Разработаны алгоритмы назначения режимных параметров обработки пространственно-модифицированных зубьев методом копирования, позволяющие снизить трудоемкость расчетных операций. Рекомендации по контролю геометрических параметров пространственно-модифицированных зубчатых венцов, позволяют автоматизировать обработку результатов измерений, с учетом непрерывного изменения толщины зубьев в зависимости от координат по их высоте и длине, с применением цифровой измерительной техники.

Результаты работы внедрены в производственные процессы предприятий ДНР и Российской Федерации, что обеспечивает значительный экономический эффект.

3. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

1. Полученные в работе результаты решения пространственной задачи многокоординатного формообразования зубчатых венцов с пространственно-модифицированными зубьями в части определения параметров сечения среза считаем в перспективе целесообразным применить для оценки возможности повышения производительности зубофрезерования особенно узковенцовых зубчатых колес.

2. Для предложенной в работе комплексной пространственной модификации зубьев целесообразно провести оценку ее применимости в плане определения границ компенсирующей способности или в части создания специальных пространственных передач, при передаче вращательного движения между скрещивающимися валами.

4. Общие замечания

В качестве замечаний можно отметить следующее.

1. В работе следовало бы более детально раскрыть вопрос повышения надежности и долговечности зубчатых колес с предложенной комплексной пространственной модификацией зубьев и передач на их основе, а также привести численные значения этих показателей.

2. Как недостаток отмечаем, что созданная система повышения надежности, долговечности и нагрузочной способности цилиндрических зубчатых передач на базе функционально-ориентированного конструкторско-технологического подхода в явном виде не содержит модуля прогнозирования и дальнейшего учета при проектировании естественного износа и приработки активной боковой поверхности зубьев которые возникают в процессе эксплуатации зубчатых колес и передач.

3. В работе недостаточное внимание уделено исследованиям зарубежных авторов по созданию высоконагруженных зацеплений цилиндрических колес в условиях наличия погрешностей и деформаций и разработке элементов технологического обеспечения изготовления зубчатых венцов с пространственно-модифицированными зубьями и чем их методики и технологические решения отличаются от применяемых в отечественной промышленности.

4. Целесообразно было бы описание модификаций зубьев зубчатых колес (п.1.3.1.1 и п.1.3.1.2) сопровождать для наглядности иллюстративным материалом.

5. Как влияет огранка реально нарезаемых зубьев методом обкатки на точность профиля модифицированного зуба?

5. Заключение

Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой решена актуальная, имеющая важное значение научно-техническая проблема повышения точности многокоординатного фрезерования пространственно-модифицированных зубьев цилиндрических колес, способных компенсировать комплекс перемещений, вызванных наличием погрешностей изготовления, монтажа и деформаций элементов зубчатых передач в процессе эксплуатации, за счет пространственного подхода к решению технологических задач и аналитического описания взаимосвязи геометрии боковой поверхности зубьев, геометрии режущего инструмента и траекторий относительного перемещения инструмента и заготовки в процессе формообразования.

Полученные диссертантом новые научные результаты имеют существенное значение для фундаментальной науки и практики в области технологии машиностроения, а также для развития технологии производства и повышения точности элементов цилиндрических зубчатых передач с пространственно-модифицированными зубьями. Выводы и рекомендации достаточно обоснованы.

В целом, диссертационная работа отвечает требованиям п. 2.1 «Положения о присуждении ученых степеней», соответствует специальности 05.02.08 – Технология машиностроения, а ее автор Грубка Роман Михайлович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры «Подвижной состав железных дорог» ГОСУДАРСТВЕННОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНЕЦКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА» «21» 02 2020 г., протокол № 2.

Д-р техн. наук, профессор,
зав. кафедры «Подвижной состав железных дорог» ГОСУДАРСТВЕННОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНЕЦКИЙ ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА»
(ДНР, 283018, г. Донецк,
ул. Горная, дом 6, ДонИЖТ;
тел.: +38 062 319-21-76;
institut-transporta@mail.ru)

Паламарчук Н.В.

Я, Паламарчук Николай Владимирович, согласен на автоматизированную обработку персональных данных приведенных в этом документе

Подпись проф Паламарчук Н.В.
удостоверено:



С. Н. Тонзарук