

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Печенкина М. В. «Многокоординатное формообразование фрезерованием зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной кривизны», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»

Актуальность темы диссертации

Совершенствование схем и методов зубообработки традиционно ведётся с расчётом на специализированное зубообрабатывающее и резьбообрабатывающее оборудование: предполагается, что именно в этом случае обеспечиваются одновременно и высокие показатели качества обработки, и высокая производительность (как следствие и хорошие экономические показатели). Следование этому подходу неизбежно влечёт за собой появление ограничений, обусловленных геометрией и кинематикой указанного оборудования, что стало привычной частью соответствующих математических моделей. Альтернатива этому подходу связана с применением многокоординатных металлорежущих станков типа "обрабатывающий центр", получивших большое развитие и распространение в последние десятилетия. Высокие производительность и точность обработки, богатые кинематические возможности этого класса станков, возможности программного управления ими и интеграции их с CAD/CAM-системами создают хорошие предпосылки для развития новых схем и технологий зубообработки. Однако развитие в значительной мере сдерживается отсутствием или недостаточной развитостью соответствующих математических моделей формообразования боковых поверхностей зубьев зубчатых колёс – элементов, обладающих сложной геометрией как в продольном направлении, так и в профиле. Известные к настоящему времени работы в этой области содержали модели, в которых управление движением осуществлялось одновременно по трём координатам, что, с одной стороны, резко ограничивало возможности управления геометрией формируемых зубьев, а с другой – не учитывало в полной мере возможности современной пятикоординатной обработки.

В этой связи диссертационная работа Михаила Владимировича Печенкина, направленная на восполнение отмеченных пробелов, является актуальной и представляет несомненный научный и практический интерес. Её актуальность дополнительно повышается тем, что в ней рассматривается формообразование зубьев сравнительно редкого и, возможно, перспективного вида зубчатых колёс – колёс с гиперболоидными делительными поверхностями.

Оценка содержания диссертации, ее внутреннего единства и завершенности

Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов и заключения, списка литературы и приложения. Объем работы составляет 99 страниц основного текста, содержит 4 таблицы, 40 рисунков, список литературы из 192 наименований и приложения на 11 страницах. Автореферат и 10 печатных работ в достаточной мере отражают основные результаты диссертации.

Обстоятельный анализ предметной области, предпринятый автором в **первой главе** работы, позволил:

– обосновать выбор объекта, для которого технология зубообработки является проблемной стороной – зубчатые колёса с гиперboloидными делительными поверхностями, для зубьев которых характерны существенно переменные кривизны и в продольном, и в профильном направлении, и переменная ширина впадины;

– выявить конструктивно-технологические особенности объекта технологической разработки, в частности, сложность применения традиционных схем формообразования, связанную, главным образом, с необходимостью организации сложного пространственного движения концевой инструмента относительно заготовки колеса с гиперboloидной поверхностью (поверхностью вершин зубьев);

– обосновать выбор принципиальной схемы и оборудования для формообразования зубьев – концевым инструментом на пятикоординатном станке типа "обрабатывающий центр";

– выбрать принципиальный подход к моделированию формообразования – аналитический метод расчёта, нацеленный на интеграцию с CAD/CAM-системами и последующее кодирование программ, управляющих обработкой зубьев.

Выводами из предпринятого анализа стали цель и задачи исследований, описанных в последующих главах работы.

Математическая модель боковой поверхности зуба, представленная автором **во второй главе**, состоит из модели образующей – прямой или, при необходимости модификации поверхностей, кривой второго порядка (дуги окружности или эллипса) и модели её сложного движения – вращения вокруг оси парного колеса и согласованного движения вдоль направляющей (гиперболы, являющейся, в свою очередь, образующей делительной поверхности колеса). Работоспособность модели автор демонстрирует примером расчёта.

Третья глава работы посвящена, главным образом, адаптации математической модели формируемого зуба к заданию параметров установки и движения концевой инструмента на пятикоординатном станке с ЧПУ. Для этого в математической модели предлагается, по сути, определять координаты двух точек, принадлежащих оси инструмента, через координаты точек, касательные векторы и вектор относительной скорости образующей (производящей) линии, учитывая при этом радиус используемого инструмента (концевой фрезы). Очевидно, автор делает при этом допущение о том, что линия касания производящей и формируемой поверхностей пренебрежимо мало отличается от производящей линии, принятой для образования модели формируемого зуба. В этой же главе изложен алгоритм расчета и ввода полученных координат вектора ориентации инструмента в программное обеспечение для подготовки управляющих программ при реализации разработанной кинематики формообразования.

В четвертой главе приводятся разработанные автором способ предварительного формообразования зубьев модульными дисковыми и пальцевыми фрезами и метод приближённой оценки радиуса профилирования концевой фрезы, обеспечивающего профильную модификацию зубьев, с

учётом погрешностей профиля и шага зубьев, смещения средней плоскости зубчатого колеса, шероховатости боковой поверхности зубьев, деформации изгиба зубьев под действием нагрузки. В главе также представлены результаты экспериментального нарезания колеса с гиперболоидной делительной поверхностью на пятикоординатном станке с ЧПУ, позволившие дать некоторые рекомендации относительно схемы и стратегии обработки зубьев.

В целом представленная диссертация обладает внутренним единством и является завершённой научно-квалификационной работой, в которой изложена новая научно обоснованная технологическая разработка, имеющая существенное значение для развития страны – усовершенствованный метод фрезерования зубьев на пятикоординатном станке с ЧПУ, обладающих изменяющейся кривизной как в продольном направлении, так и в профильном.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна

Обоснованность научных положений и выводов и рекомендаций достигается:

- использованием в качестве исходных данных материалов государственных стандартов, общепризнанных справочных материалов и материалов, полученных автором в результате изучения и анализа монографий, результатов фундаментальных и системных исследований, опубликованных в основополагающих трудах Литвина Ф. Л., Гольдфарба В. И., Лагутина С. А., Шевелевой Г. И. и других отечественных и зарубежных ученых;
- опорой выводов на имеющуюся и многократно проверенную практику проектирования и производства зубчатых передач, апробированные методы проектирования процессов формообразования и режущих инструментов для них, накопленную практику многокоординатной обработки (выводы первой главы);
- использованием хорошо апробированных в теории и практике проектирования и производства зубчатых передач и теории формообразования сложнопрофильных поверхностей понятий, правил и исходных математических моделей производящих линий и поверхностей и кинематики их относительных движений при формообразовании (положения, изложенные во второй и третьей главах);
- верной оценкой тенденций и факторов, действующих в технологии зубообработки и логической связью с выводами и рекомендациями, сделанными в четвертой главе.

Достоверность полученных автором результатов обеспечивается корректным использованием математического аппарата и результатами компьютерного моделирования и практического эксперимента по формообразованию зубьев зубчатых колес на заготовках вида однополостной гиперболоид вращения с использованием станков с ЧПУ. Результаты работы не противоречат работам других авторов, дополняя и развивая эти работы.

Работа прошла широкую апробацию. По материалам диссертации опубликованы 10 научных трудов, в том числе статьи в журналах «Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева», «Фундаменталь-

ные исследования», «Современные проблемы науки и образования» которые входят в Перечень ВАК, получено 2 патента на изобретение, 1 патент на полезную модель. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на 4-х международных научных конференциях.

В диссертации получены следующие **новые научные результаты**:

1. Математическая модель зуба зубчатого колеса с гиперболоидной делительной поверхностью, полученного при помощи производящей линии, совершающей сложное движение, которое состоит из вращения с воображаемым парным зубчатым колесом и движения по направляющей кривой (гиперболе).

2. Метод определения ориентации и параметров движения инструмента при пятикоординатной обработке зуба зубчатого колеса с гиперболоидной делительной поверхностью на станке с ЧПУ.

Диссертационная работа Печенкина М. В. обладает, кроме того, **практической значимостью** благодаря:

- разработанному алгоритму подготовки управляющей программы соответствующей предложенной математической модели процесса формообразования;
- разработанному способу предварительной обработки зубьев колёс с гиперболоидными делительными поверхностями дисковыми и пальцевыми фрезами;
- разработанным управляющим программам для пятикоординатной обработки зубьев концевым инструментом;
- практически реализованному нарезанию реального зубчатого колеса с гиперболоидной делительной поверхностью и данной на этой основе рекомендации по стратегии обработки зубьев.

Замечания по диссертации

1. Де-факто принятое в третьей главе работы допущение о том, что производящая линия, используемая в математической модели зуба, оказывается близкой к профилю производящей поверхности, к сожалению, не получило должного аналитического или численного обоснования.
2. Остались не сформулированными в явном виде условия сопряжённости (обеспечения касания главных поверхностей зубьев при заданном передаточном отношении во всех фазах зацепления) зубчатых колёс, формируемых по предложенной схеме.
3. При оценке необходимой модификации автор алгебраически складывает технологические погрешности и изгибные деформации зубьев (с. 86, формула (4.25)) – это приём для пространственного зацепления требует более строгого обоснования (справедливости ради, следует отметить, что при этом автор претендует на оценку уровня или порядка требуемой локализации контакта, следовательно речь идёт о приближённой оценке).
4. Вычисляя изгибную деформацию зуба (с. 88), автор считает зуб балкой, но балкой зуб является с большой долей условности, с большими поправками в модель, и в теории зубчатых передач известны подходы к учёту этого обстоятельства для разных видов зубчатых колёс (наиболее основательно этот вопрос рассмотрен в трудах проф. Э. Л. Айрапетова). Оправданием для сделанного автором упрощения также является приближённость оценки.

5. В работе имеются неудачные фразы и неточные формулировки, например:

- анализ ряда конструктивных и технологических особенностей зубчатых передач (1-я глава) во многом дан без конкретизации того, к каким видам зубчатых передач он относится, а, между тем, указанные особенности далеко не всегда являются общими для всех зубчатых передач;
- с. 48, последний абзац – «прямолинейной образующей линии»;
- с. 74, 1-й абзац – требует пояснения фраза "инструмент не интерферирует с соседним зубом";
- с. 76, 1-й абзац: "переменного окружного шага и модуля" – вероятно, имеется в виду, "переменного вдоль образующей делительного (или начального) гиперboloида";
- с. 88, в формуле (4.28) для момента инерции зуба-балки его длина принята равной ширине венца, но зуб в рассматриваемой передаче практически всегда будет косым (иметь наклон по отношению к образующей поверхности впадин);
- с. 90 и рис. 4.7: термин "торцовое биение гиперboloида вращения" – у используемого гиперboloида вращения нет торцовых или близких к торцовым участков.

Отмеченные недочёты не являются определяющими в оценке работы, они либо относятся не к защищаемым положениям, а к вопросам, имеющим подчинённое или вспомогательное значение, или являются совершенно негрубыми, не мешающими восприятию сути, ошибками оформительского плана.

О соответствии диссертации критериям «Положения о порядке присуждения ученых степеней»

В целом диссертация Печенкина М. В. представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, обладающую внутренним единством и оформленную в виде специально подготовленной рукописи. Диссертация и автореферат написаны грамотным русским техническим языком. Предложенные автором решения аргументированы и оценены по сравнению с известными решениями. В материалах диссертации содержатся сведения о практическом использовании полученных автором результатов, что подтверждается реализацией формообразования зубьев зубчатых колес на основе заготовки вида однополостной гиперboloид вращения на пятикоординатном станке с ЧПУ. Оформление диссертации качественное и соответствует установленным требованиям. Диссертация хорошо проиллюстрирована.

Основные результаты диссертации достаточно полно опубликованы в период с 2005 по 2014 гг. в 10 научных трудах, 3 из которых относятся к рецензируемым изданиям по перечню ВАК, получено 2 патента на изобретение, 1 патент на полезную модель. Содержание автореферата полностью отражает основные положения, выводы и рекомендации диссертации.

При использовании материалов, принадлежащих другим ученым, Печенкин М. В. ссылался на автора и источник заимствования. Автором отмечено, что участие соавтора Абзалова А. Р. в написании 2-х научных статей носило консультативный характер.

Заключение

В диссертации Печенкина М. В. изложено новая научно обоснованная технологическая разработка, имеющая существенное значение для развития страны – усовершенствованный метод фрезерования зубьев, нарезаемых с использованием пятикоординатного станка с ЧПУ на колёсах с гиперболоидными делительными поверхностями и обладающих изменяющимися кривизнами в продольном и профильном направлениях.

По актуальности темы, научной новизне и обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, научной и практической значимости полученных результатов можно сделать вывод о том, что представленная диссертация отвечает критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Печенкин М. В. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

Д-р техн. наук (05.02.18 – Теория механизмов и машин),
профессор, заведующий кафедрой
конструкторско-технологической подготовки
машиностроительных производств ФГБОУ ВО
«Ижевский государственный технический
университет имени М. Т. Калашникова»,
426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, д.7
e-mail: truba@istu.ru



Е. С. Трубачев

Подпись официального оппонента заверяю
Ученый секретарь
12 мая 2016 г.



В. А. Алексеев