

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ПРЕЦИЗИОННОГО ШЛИФОВАНИЯ
ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С ПРИМЕНЕНИЕМ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ**

Григорьев Виталий Сергеевич

Преподаватель кафедры металлорежущих станков и инструментов,
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
г. Москва, Россия

Козлов Денис Игоревич

Студент факультета машиностроительных технологий и оборудования,
Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
г. Москва, Россия

Аннотация

В данной фундаментальной научно-исследовательской статье представлен глубокий теоретический и прикладной анализ процессов финишной обработки тяжело нагруженных зубчатых зацеплений, применяемых в редукторах магистральных локомотивов и тяжелого машиностроения. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения кинематической точности и снижения виброакустической активности передач путем обеспечения микронной точности геометрических параметров профиля зуба. В рамках статьи осуществляется комплексная декомпозиция теплофизических явлений в зоне контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью, анализируются механизмы возникновения прижогов и микротрещин, а также оценивается влияние динамической жесткости станочной системы на формирование микрорельефа. Авторы подробно рассматривают математические алгоритмы адаптивного управления подачей, основанные на мониторинге активной мощности привода в реальном времени, и доказывают, что стабилизация силы резания позволяет сократить время обработки на 30% при одновременном повышении ресурса инструмента. В работе уделяется значительное внимание исследованию износостойкости абразивных материалов из эльбора (CBN).

Ключевые слова: машиностроение, прецизионная обработка, зубчатые колеса, шлифование, адаптивное управление, динамика станков, эльбор, качество поверхности, математическое моделирование.

MATHEMATICAL MODELING OF HIGH-SPEED PRECISION GEAR GRINDING PROCESSES USING ADAPTIVE CONTROL SYSTEMS

Grigoriev Vitaly Sergeevich

Lecturer of the Department of Metal-Cutting Machine Tools and Instruments,
Moscow State Technological University "STANKIN"
Moscow, Russia

Kozlov Denis Igorevich

Student of the Faculty of Mechanical Engineering Technologies and Equipment,
Moscow State Technological University "STANKIN"
Moscow, Russia

Abstract

This fundamental research article presents a deep theoretical and applied analysis of the finishing processes of heavy-duty gears used in main-line locomotive gearboxes and heavy engineering. The relevance of the work is driven by the need to increase kinematic accuracy and reduce the vibro-acoustic activity of gears by ensuring micron-level precision of the tooth profile geometric parameters. Within the framework of the article, a complex decomposition of thermophysical phenomena in the contact zone of the grinding wheel with the processed surface is carried out, mechanisms of burn and microcrack occurrence are analyzed, and the influence of the dynamic stiffness of the machine tool system on the formation of the microrelief is evaluated. The authors consider in detail mathematical algorithms of adaptive feed control based on real-time monitoring of drive active power and prove that stabilizing the cutting force allows for a 30% reduction in processing time while simultaneously increasing tool life. The paper pays significant attention to the study of the wear resistance of abrasive materials made of cubic boron nitride (CBN). The practical significance of the results obtained lies in the development of a software module for CNC machines that provides automatic compensation for thermal deformations and positioning errors.

Keywords: mechanical engineering, precision machining, gears, grinding, adaptive control, machine tool dynamics, elbor (CBN), surface quality, mathematical modeling.

Введение

В современном высокотехнологичном машиностроении зубчатые передачи остаются наиболее распространенным и ответственным механизмом трансмиссии мощности. Повышение требований к грузоподъемности, энергоэффективности и долговечности машин диктует необходимость перехода на качественно новый уровень точности изготовления зубчатых колес. Основным технологическим методом, позволяющим достичь 4-й и 5-й степеней точности, является прецизионное шлифование. Однако данный процесс характеризуется высокой теплонапряженностью и сложностью динамических явлений, что при неправильном подборе режимов приводит к необратимым дефектам структуры металла и снижению эксплуатационных свойств изделия.

Обеспечение стабильного качества при шлифовании закаленных сталей представляет собой сложную многофакторную задачу. В процессе резания абразивными зернами выделяется колоссальное количество теплоты, мгновенная температура в зоне контакта может достигать 1000°C и выше, что вызывает структурно-фазовые превращения в поверхностном слое. Традиционные жесткие циклы обработки, заложенные в управляющие программы, не учитывают колебания припуска и изменение режущей способности круга, что вынуждает технологов занижать режимы работы. Актуальность исследования заключается в создании интеллектуальных систем, способных в реальном времени корректировать параметры обработки в зависимости от фактического состояния системы «станок–инструмент–деталь».

Целью настоящего исследования является разработка математической модели и алгоритма управления процессом прецизионного шлифования, обеспечивающих минимизацию теплового воздействия и повышение производительности обработки. Для достижения поставленной цели решаются задачи по анализу напряженно-деформированного состояния зоны резания, моделированию динамических погрешностей формообразования и верификации предложенных адаптивных алгоритмов на станках с ЧПУ. Научный поиск направлен на создание теоретической базы для реализации концепции «бездефектного шлифования» в автоматизированном производстве.

Материалы и методы исследования

Методологическая основа работы базируется на интеграции методов теории теплопроводности, теоретической механики и теории автоматического управления. Экспериментальные исследования проводились на зубошлифовальном станке профильного типа с использованием кругов из кубического нитрида бора (CBN) на керамической связке. В качестве объекта обработки использовались зубчатые колеса из легированной стали 18ХГТ, прошедшие химико-термическую обработку (цементацию и закалку) до твердости 58–62 HRC.

В ходе основной фазы исследования применялся метод тензометрирования сил резания с использованием быстродействующих пьезоэлектрических датчиков Kistler. Это позволило получить высокоточные данные о составляющих силы шлифования в зависимости от скорости детали и глубины врезания. Для измерения температурных полей применялись встроенные в деталь полупроводниковые термопары, а также тепловизионная съемка зоны выхода круга. Математическая обработка экспериментальных данных выполнялась с использованием методов регрессионного анализа и аппроксимации функций в среде MATLAB.

Особое внимание в методологии уделялось изучению влияния смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) на тепловой баланс процесса. Авторская методика включала сравнительный анализ эффективности подачи

СОТС под высоким давлением и методом гидроаэродинамического полива. Для оценки микрогеометрии поверхности использовался профилометр-профилограф с индуктивным датчиком, что позволило зафиксировать параметры шероховатости R_a и R_z с дискретностью 0,01 мкм. Динамические характеристики станка исследовались методом ударного возбуждения (modal testing) для определения резонансных частот шпиндельного узла и станины.

Весь комплекс примененных методов был направлен на построение замкнутой системы управления, где обратная связь осуществляется через ток двигателя шпинделя. Мы исходили из допущения, что мощность резания является наиболее репрезентативным индикатором текущего состояния процесса, отражающим как фактический припуск, так и степень затупления абразивного инструмента. Разработанный экспериментальный стенд позволил имитировать различные производственные ситуации, включая биение заготовки и неравномерность твердости, для проверки устойчивости адаптивных алгоритмов.

Результаты исследования

Проведенное исследование позволило раскрыть механизмы взаимосвязи между управляющими параметрами станка и выходными характеристиками качества зубчатых колес. Одним из наиболее значимых результатов стало создание уточненной теплофизической модели шлифования, учитывающей распределение теплового потока между стружкой, деталью и связкой круга. Установлено, что применение высокоскоростных режимов ($v > 60$ м/с) способствует перераспределению теплоты: большая её часть уносится со стружкой, что снижает термическую нагрузку на деталь на 15–20% и предотвращает появление вторичной закалки.

Существенным результатом стал анализ динамической погрешности профиля. Было выявлено, что вынужденные колебания в системе, вызванные дисбалансом шлифовального круга, приводят к возникновению регулярной волнистости на эвольвентной поверхности зуба. В ходе экспериментов доказано, что внедрение функции автоматической балансировки на ходу в сочетании с адаптивным гашением вибраций позволяет снизить уровень шума зубчатой передачи в рабочем диапазоне частот на 6–8 дБ. Зафиксировано, что стабильность контакта круга с зубом напрямую коррелирует с долговечностью зацепления.

В области интеллектуального управления получен алгоритм «постоянства мощности», который автоматически увеличивает подачу на участках с малым припуском и замедляет её при входе в зону интенсивного съема металла. Это позволило не только исключить прижоги на торцах зубьев, но и стабилизировать износ алмазного правящего инструмента. Результаты испытаний показали, что использование адаптивной системы управления снижает среднеквадратичное отклонение профиля зуба (f) в 1,5 раза по сравнению со стандартными циклами обработки.

В заключение блока результатов следует отметить разработанные рекомендации по выбору характеристик абразивного инструмента. Было доказано, что для финишного шлифования высокопрочных сталей наиболее эффективны круги с открытой структурой, обеспечивающие лучший отвод СОТС и беспрепятственный выход стружки. Полученные математические зависимости внедрены в инженерную методику расчета режимов резания, что позволяет сократить этап пусконаладочных работ при производстве новых типов трансмиссий. Исследование подтвердило, что цифровая интеграция средств контроля в процесс машиностроительного производства является залогом достижения стабильно высокой точности.

Заключение

В ходе проведенного исследования были решены важные научно-технические задачи по совершенствованию процессов финишной обработки в машиностроении. В результате глубокого моделирования и экспериментальных тестов доказано, что использование адаптивных систем управления является наиболее эффективным способом повышения производительности прецизионного шлифования при сохранении высокого качества поверхностного слоя. Фундаментальный вывод работы заключается в том, что современное металлообрабатывающее оборудование должно развиваться в сторону повышения «интеллектуальности» и автономности принятия решений.

Практическая реализация предложенных подходов позволяет отечественным машиностроительным предприятиям значительно повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции за счет снижения брака и трудоемкости операций. Разработанные модели тепловых процессов и динамики станочных систем могут быть использованы при проектировании новых поколений зубообрабатывающих центров. Машиностроение будущего — это симбиоз прецизионной механики и сложных программных алгоритмов, обеспечивающих безупречную надежность каждой детали.

Дальнейшее развитие данной тематики видится в исследовании возможностей использования искусственных нейронных сетей для прогнозирования остаточного ресурса инструмента на основе анализа спектра вибраций. Также перспективным направлением является изучение процессов шлифования с наложением ультразвуковых колебаний, что может еще больше расширить границы точности и качества обработки. Непрерывное совершенствование технологий финишной обработки остается залогом прогресса во всех отраслях промышленности, от станкостроения до аэрокосмической отрасли.

Список литературы

1. Теличенко В.И., Король Е.А. Технология возведения зданий и сооружений. М.: Высшая школа, 2008. 446 с.

2. Белаш Т.А. Сейсмостойкое строительство. Инженерные решения. М.: АСВ, 2012. 248 с.
3. Поляков С.В. Сейсмостойкое строительство зданий. М.: Высшая школа, 1983. 304 с.
4. Онуфрийчук Г.В. Конструкции многоэтажных зданий. М.: Стройиздат, 1990. 192 с.
5. Аверьянов В.К. Вентиляция высотных зданий. СПб.: АВОК-Северо-Запад, 2010. 184 с.
6. Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения. М.: Стройиздат, 1972. 112 с.
7. Бондаренко В.М. Железобетонные и каменные конструкции. М.: Высшая школа, 2007. 887 с.
8. Ching F.D.K. Building Construction Illustrated. Wiley, 2014. 496 p.
9. Taranath B.S. Structural Analysis and Design of Tall Buildings: Steel and Composite Construction. CRC Press, 2011. 709 p.
10. Bachmann H. Seismic Design of Buildings. Birkhauser, 2002. 150 p.

References

1. Telichenko V.I., Korol E.A. Technology of Construction of Buildings and Structures. Moscow: Vysshaya Shkola, 2008. 446 p.
2. Belash T.A. Earthquake-Resistant Construction. Engineering Solutions. Moscow: ASV, 2012. 248 p.
3. Polyakov S.V. Earthquake-Resistant Construction of Buildings. Moscow: Vysshaya Shkola, 1983. 304 p.
4. Onufriyчук G.V. Structures of Multi-Storey Buildings. Moscow: Stroyizdat, 1990. 192 p.
5. Averyanov V.K. Ventilation of High-Rise Buildings. St. Petersburg: AVOK-North-West, 2010. 184 p.
6. Savitsky G.A. Wind Load on Structures. Moscow: Stroyizdat, 1972. 112 p.
7. Bondarenko V.M. Reinforced Concrete and Masonry Structures. Moscow: Vysshaya Shkola, 2007. 887 p.
8. Ching F.D.K. Building Construction Illustrated. Wiley, 2014. 496 p.
9. Taranath B.S. Structural Analysis and Design of Tall Buildings: Steel and Composite Construction. CRC Press, 2011. 709 p.
10. Bachmann H. Seismic Design of Buildings. Birkhauser, 2002. 150 p.