УДК 621.91

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС НА КАРУСЕЛЬНОМ ТОКАРНО-ФРЕЗЕРНОМ ОБРАБАТЫВАЮЩЕМ ЦЕНТРЕ С ЧПУ

Беликова Е.В.

инженер-технолог-программист 1 категории,

ПАО «Калужский Турбинный Завод»,

Калуга, Россия.

Кравцов Д.С.

ведущий инженер-технолог-программист,

ПАО «Калужский Турбинный Завод»,

Калуга, Россия.

Суков Т.А.

ведущий инженер-технолог-программист,

ПАО «Калужский Турбинный Завод»,

Калуга, Россия.

Тагиев А.А.

ведущий инженер-технолог-программист,

ПАО «Калужский Турбинный Завод»,

Калуга, Россия.

Аннотация

В статье рассмотрена технология обработки крупногабаритных цилиндрических зубчатых колёс и венцов методом копирования на карусельном токарно-фрезерном обрабатывающем центре с ЧПУ. Показано, что возможна обработка как прямозубых, так и косозубых колес с припуском под последующую доработку. Приведено обоснование применения профильных пальчиковых модульных фрез с современными износостойкими покрытиями (TiAlN, AlCrN, DLC), которые позволяют повысить скорость резания на 20–25 %, улучшить качество поверхности и увеличить стойкость инструмента в 1,5–2 раза.

Ключевые слова: зубчатое колесо, карусельный обрабатывающий центр, метод копирования, профильная модульная фреза, износостойкое покрытие.

GEAR WHEEL MACHINIG TECHNOLOGY AT A TURNING AND MILLING CNC MACHINING CENTER

Belikova E.V.
engineer-technologist-programmer of the 1st category,
Kaluga Turbine Works PJSC,
Kaluga, Russia.
Kravcov D.S.
lead engineer-technologist-programmer,
Kaluga Turbine Works PJSC,
Kaluga, Russia.
Sukov T.A.
lead engineer-technologist-programmer,
Kaluga Turbine Works PJSC,
Kaluga, Russia.
Tagiev A.A.
lead engineer-technologist-programmer,
Kaluga Turbine Works PJSC,
Kaluga, Russia.

Annotation

The article discusses the technology of machining large-sized cylindrical gears and crowns by copying on a turning and milling CNC center. It is shown that it is possible to process both straight-toothed and bevel-toothed wheels with an allowance for subsequent refinement. The rationale for the use of profile finger modular milling cutters with modern wear-resistant coatings (TiAlN, AlCrN, DLC), which can increase cutting speed by 20-25%, improve surface quality and increase tool durability by 1,5-

2 times.

Keywords: gear wheel, CNC center, copying method, profile modular milling cutter, wear-resistant coating.

В машиностроении зубчатые передачи являются одним из ключевых элементов машин. Их качество напрямую влияет на надёжность, долговечность и КПД механизмов. Наиболее распространёнными методами получения зубчатого профиля являются метод обката (зубодолбление, зубофрезерование) и метод копирования (обработка фасонным инструментом). Метод обката обеспечивает высокую точность и широко применяются в серийном производстве. Однако при единичном и мелкосерийном изготовлении крупногабаритных деталей (венцов, муфт, колёс диаметром от 1 500 мм в диаметре) их использование сопряжено со значительными трудностями: высокой стоимостью специализированного инструмента (долбяков, червячных фрез), длительным циклом обработки (до 300 часов), а также требовательностью к жёсткости и точности оборудования.

В связи с этим актуальной задачей является внедрение альтернативных технологий обработки. В данной работе рассматривается пример технологии обработки крупногабаритных цилиндрических косозубых и прямозубых колес на карусельных токарно-фрезерных обрабатывающих центрах с ЧПУ. Такие станки позволяют реализовать метод копирования, обеспечивающий достаточную точность формообразования для последующих операций, а в ряде случаев для непосредственного перехода к финишной обработке.

Заготовка зубчатого колеса устанавливается на шлифованные опорные кубики, обеспечивающие точное базирование и стабильность положения детали. Расстояние от базовой поверхности заготовки до планшайбы станка должно быть достаточным для обеспечения гарантированного зазора между фрезерной головой и планшайбой, исключая возможность столкновений в процессе обработки. Фиксация осуществляется при помощи прихватов, обеспечивающих

надёжное прижатие детали за верхний торец со стороны наружного диаметра без деформации в зоне обработки. Все особенности установки детали на станке были смоделированы в среде Siemens NX (рис. 1-2).

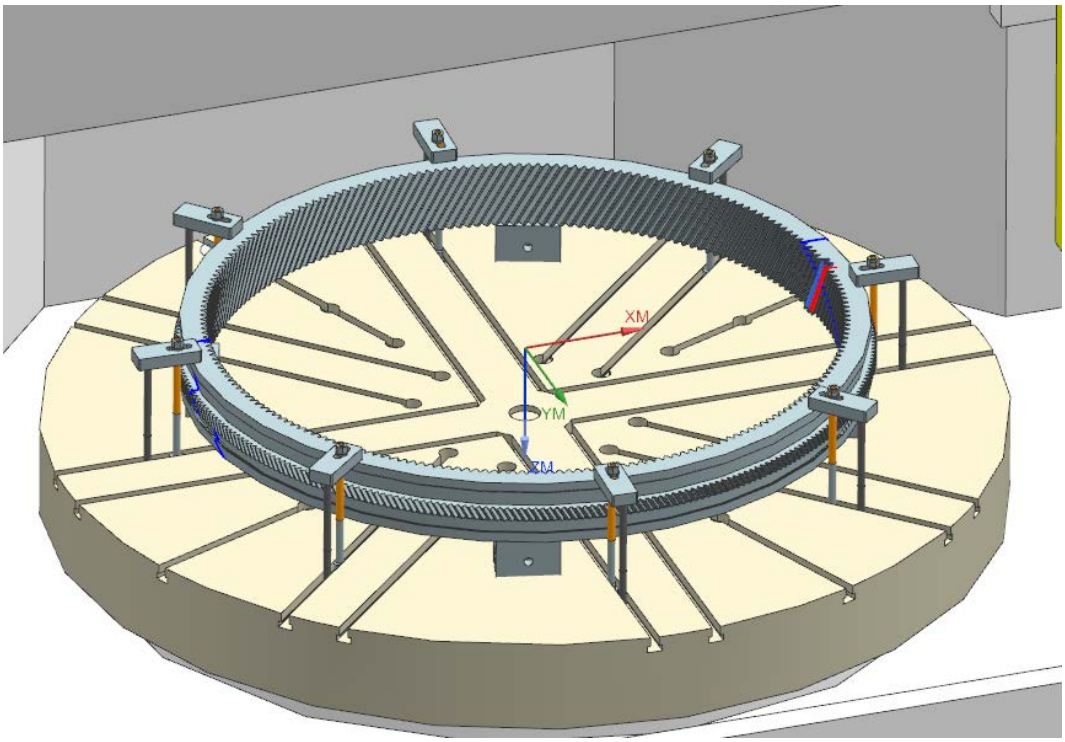

Рис. 1 – Моделирование установки детали на станке в среде Siemens NX (авторская разработка)

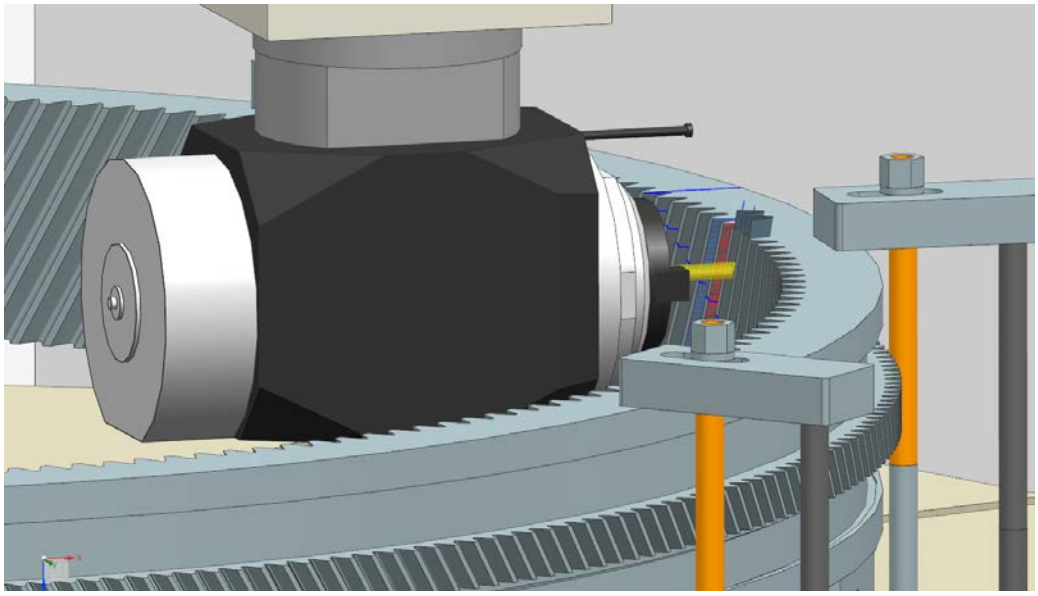

Рис. 2 – Симуляция обработки в среде Siemens NX (авторская разработка)

Обработка выполняется в три этапа:

1. Черновое фрезерование. Используются стандартные твердосплавные концевые фрезы диаметрами 4, 6, 8, 10 и 12 мм. Они последовательно снимают основной припуск по ступенчатой схеме (рис. 3), формируя «упрощённый» профиль зуба и разгружая чистовую фрезу от перегрузок. Данная схема позволяет максимально сохранить ресурс стойкости профильного инструмента. На рисунке 3 представлен промежуточный профиль зуба в зависимости от используемых фрез, где красным цветом обозначен профиль от стандартных концевых фрез, а зеленым – от профильной.

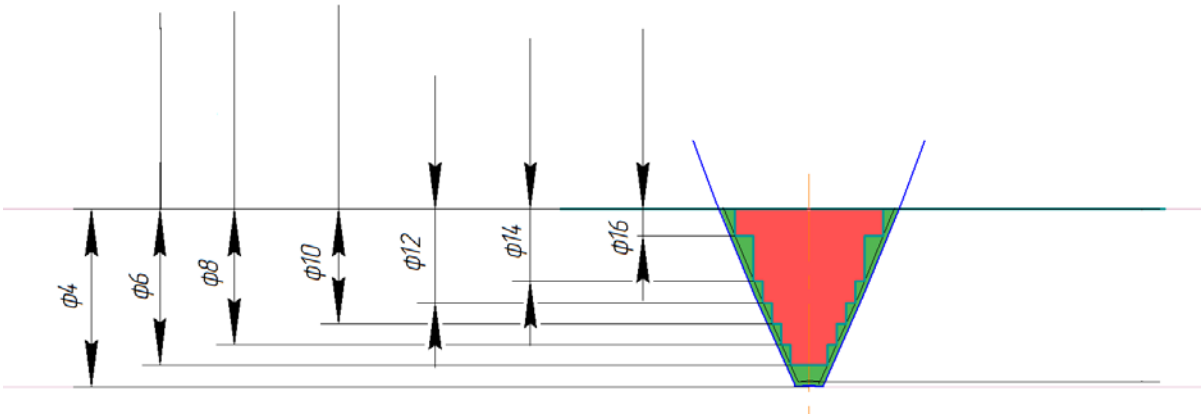

Рис. 3 – Промежуточный профиль зуба в зависимости от используемых фрез (авторская разработка)

2. Получистовое и чистовое фрезерование — выполняется профильной пальцевой модульной фрезой, геометрия которой представляет эквидистанту от требуемого эвольвентного профиля с припуском 1,5–2 мм (рис.4). Такое решение позволяет избежать пересечения траекторий отдельных фрез и обеспечивает плавное формирование контура.

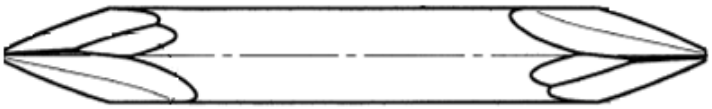

Рис. 4 - Эскиз профильной фрезы (авторская разработка)

Расчет глубин для фрез производится графически в зависимости от модуля получаемого зуба (рис. 2).

3. Контроль и переход к зубошлифовальной операции — после фрезерования проводится измерение угла наклона зубьев (в случае косозубого колеса) и размера по шарикам. Практика показывает, что при корректно выставленных параметрах эти величины укладываются в допуски, что подтверждает технологическую пригодность метода.

Для косозубых и шевронных колес, ввиду ограничений кинематики некоторых моделей карусельных центров (отсутствие перемещения по оси Y в горизонтальной фрезерной голове), может потребоваться один-два прохода на зубодолбёжном станке. Это связано с тем, что на боковых поверхностях зубьев остается неравномерный припуск. Однако объём этой доработки минимален — всего 1,5–2 мм припуска по толщине зуба, что в 3–4 раза сокращает время и износ инструмента по сравнению со стандартной технологией [2].

При изготовлении прямозубых колес чистовое фрезерование обеспечивает такой уровень точности и качества поверхности, что дополнительная зуборезная доработка (долблением или фрезерованием) не требуется — деталь может быть направлена сразу на зубошлифовальный станок. Это актуально для разгрузки зуборезного оборудования при сокращенных сроках производства [3].

В случае как косозубых, так и прямозубых колес необходима пальцевая модульная фреза. Её конструкция разрабатывается индивидуально под конкретный модуль и число зубьев, а профиль рассчитывается как эквидистанта от расчётного эвольвентного контура. При этом учитываются не только геометрические параметры, но и технологические — например, необходимость исключения заострений и обеспечения равномерного съёма материала [5].

Чтобы повысить производительность и качество обработки стоит обратить внимание на возможность нанесения износостойких покрытий. Рассмотрим наиболее эффективные варианты:

1. TiAlN (титан-алюминиевый нитрид) — покрытие толщиной 2–4 мкм, обладающее высокой термостойкостью (до 800 °C) и низким коэффициентом

трения. Позволяет увеличить скорость резания на 20–25 % по сравнению с непокрытым инструментом, особенно при обработке легированных сталей 40Х, 20ХГНМ. Стойкость фрезы возрастает в 1,5–1,8 раза.

2. AlCrN (алюминий-хромовый нитрид) — более современное покрытие, устойчивое к окислению при температурах до 900 °C. Отличается высокой адгезией к твёрдому сплаву и устойчивостью к кавитационному и абразивному износу. Особенно эффективно при прерывистом резании и обработке сталей с повышенной вязкостью. Применение AlCrN снижает вероятность налипания стружки, что улучшает качество боковой поверхности зуба (снижает *Ra* с 3,2 до 1,6–2,0 мкм при чистовом фрезеровании).

3. DLC (алмазоподобное углеродное покрытие) — аморфное покрытие с высоким содержанием sp^3-связей. Обладает исключительно низким коэффициентом трения и высокой микротвёрдостью. Хотя DLC менее термостойко (~500 °C), его применение оправдано при чистовой обработке с малыми подачами и глубинами резания. Обеспечивает достижение $Ra \leq 1{,}6$ мкм без дополнительного шлифования, а также снижает износ по задней поверхности на 40–50 % [4].

Применение качественного твёрдосплавного корпуса фрезы и современных покрытий позволяет добиться стабильного формирования профиля на протяжении 8–12 зубьев (в зависимости от модуля), при этом геометрические отклонения находятся в пределах 0,03–0,05 мм — что соответствует 7–8 степени точности по ГОСТ 1643-81 [1].

Основные преимущества технологии на карусельном центре:

1. Переход от одного типа колеса к другому осуществляется перенастройкой программы ЧПУ без смены станка или инструментального оснащения (кроме фрезы), что повышает гибкость производства;

2. Снижение зависимости от дорогого покупного инструмента (долбяков, червячных фрез) в пользу использования модульных фрез собственного производства;

3. Возможность комплексной обработки на одном оборудовании: черновое и чистовое точение (ступицы и обода) и фрезерование зубьев.

Ограничения применения данной технологии для косозубых и шевронных колес связаны в первую очередь с кинематикой станка. Например, при отсутствии линейного перемещения по оси *Y* в фрезерной головке невозможно формировать косой зуб «в один проход» - требуется последующая доработка на зуборезном оборудовании. Тем не менее, в таких случаях общая трудоёмкость остаётся ниже, чем при традиционных методах обработки.

Применение карусельного токарно-фрезерного обрабатывающего центра для предварительной обработки зубчатых колёс является технологически обоснованным и экономически целесообразным решением, особенно в условиях единичного и мелкосерийного производства крупногабаритных деталей.

Разработанная схема, основанная на последовательном применении стандартных и профильных фрез, обеспечивает получение промежуточного профиля с гарантированным припуском под последующие операции.

Использование профильных модульных фрез с износостойкими покрытиями (TiAlN, AlCrN, DLC) позволяет повысить скорость резания, улучшить качество поверхности и увеличить стойкость инструмента — без проведения дорогостоящих экспериментов, лишь за счёт грамотного выбора инструментального решения.

Таким образом, предложенная технология представляет собой эффективную альтернативу традиционным методам зубообработки и может быть рекомендована к внедрению на предприятиях, ориентированных на производство ответственных зубчатых передач в условиях ограниченных ресурсов и высоких требований к надёжности продукции.

Библиографический список:

1. ГОСТ 1643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски — М.: Стандартинформ, 2003. — 45 с.

2. Соколовский В.В. Технология производства зубчатых колёс: Учеб. пособие / В.В. Соколовский, А.Е. Дубинин. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. — 276 с.

3. Пуш А.С., Бабичев А.П. Современные методы обработки зубчатых колёс на многоосевых станках с ЧПУ // Вестник машиностроения. — 2022. — № 5. — С. 48–53.

4. Зубков В.Н., Суслов А.Г. Покрытия режущего инструмента: свойства, износ и эффективность применения // Технология машиностроения. — 2021. — № 3. — С. 12–21.

5. Дальский А.М., Худяков А.И. и др. Технология конструкционных материалов: Учебник для вузов. — 7-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. — 608 с.