

Рис. 4. Алгоритм выбора конструкции пилы

## ЛИТЕРАТУРА

1. «Процесс стружкообразования при ленточном пилении», Э. М. Дечко, С. В. Сизов, П. В. Густяков Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки. Тезисы докл. междуна. научн.-техн. конф. (Минск, 5 апр. Минск. Бизнес-офсет, 2017. – 237 с. Э. М.).
2. Формирование межзубных впадин при ленточном пилении. Э. М. Дечко, П. В. Густяков
3. [www.vimens.ru](http://www.vimens.ru), Краткий справочник специалиста ленточного пиления.

УДК 621.002

Кане М.М., Кравчук М.А.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШЕСТЕРЕН ЧЕРВЯЧНЫМИ ФРЕЗАМИ

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Беларусь*

*В статье показана актуальность проблемы совершенствования процесса зубофрезерования цилиндрических шестерён червячными фрезами в направлении повышения его производительности. Для решения этой задачи принят метод увеличения режимов резания за счёт улучшения условий работы инструмента. Для достижения поставленной цели автором предложен новый способ зубофрезерования цилиндрических шестерён с импульсной подачей. В статье описан этот способ, перечислены его особенности и преимущества, приведены зависимости для расчёта его основных характеристик.*

### Состояние вопроса. Задачи исследования

Цилиндрические зубчатые колёса относятся к числу наиболее массовых, сложных и ответственных деталей машин. Нарезание зубьев этих шестерён примерно для 90 % типоразмеров производится на зубофрезерных станках с непрерывной подачей заготовки или инструмента червячными фрезами. Основными недостатками этого процесса являются низкие производительность обработки и стойкость червячных фрез. По этой причине себестоимость и трудоёмкость данной операции составляет обычно 40 – 60 % этих показателей для всего процесса изготовления шестерни. Точность готовых цилиндрических шестерён в значительной степени формируется на операции их зубонарезания. Наши исследования показали, что для шестерён, прошедших после зубонарезания операции шевингования, химико-термической обработки, зубохонингования или зубообкатки, вклад операции зубонарезания в дисперсии параметров качества готовых шестерён достигает 49 %. Сказанное выше подтверждает актуальность задач повышения производительности и точности процесса зубофрезерования цилиндрических шестерён червячными фрезами.

### Основные результаты исследования

Для достижения поставленных целей нами предложено улучшить условия резания при зубонарезании путём использования импульсной подачи. В соответствии с предложенным способом [1] импульс осевой подачи заготовки 2 или фрезы 1 (рис. 1) происходит в момент пересопряжения соседних зубьев фрезы с заготовкой, т.е. в момент, когда один зуб (например, зуб 3) полностью (его вершина находится в точке  $\alpha$ ) или в основном (вершина в точке  $\alpha'$ ) закончил резание, а следующий зуб его ещё не начал (вершина зуба 4 находится в точке  $b$  или  $b'$  вне заготовки). Данный метод может быть использован при нарезании зубьев или шлицев червячной или дисковой модульной фрезами, желательно при попутном фрезеровании.

Предложенный метод нарезания зубьев цилиндрических шестерён позволяет существенно улучшить условия резания по сравнению с существующими методами. Это объясняется следующим:

1. После каждого импульса подачи стружку максимальной толщины снимает новый зуб фрезы, т.к. импульс подачи происходит при повороте фрезы на число зубьев  $K$ , не кратное числу зубьев фрезы  $z_0$ . Это позволяет по сравнению с традиционной схемой обработки увеличить толщину стружки, снимаемой каждым зубом, снизить температуру фрезы и заготовки и равномерно распределить нагрузку между зубьями фрезы, так как все они совершают одинаковую работу. Экспериментальная реализация предложенного метода при зубофрезеровании червячной фрезой показала, что заготовки практически не нагревались, в то время как при традиционной схеме резания их температура достигала 50 °С;

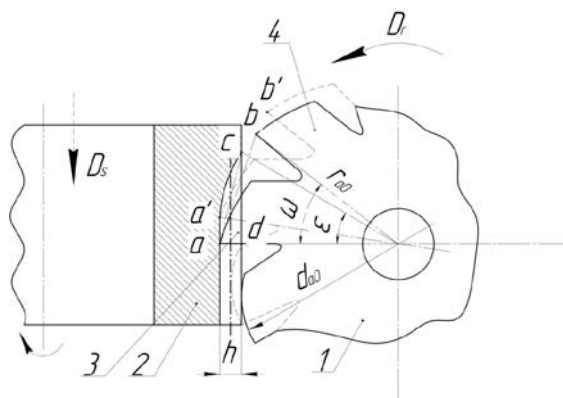


Рис. 1 Схема зубофрезерования цилиндрических шестерён с импульсной подачей

2. Отсутствие относительного перемещения фрезы и заготовки в процессе резания позволяет увеличить жесткость системы заготовка-инструмент примерно на 40 % по сравнению с традиционной схемой резания (во столько раз, как известно, жесткость любой системы в статике больше жёсткости этой системы в динамическом состоянии). Увеличение жёсткости технологической системы позволяет уменьшить деформации системы и вибрации при резании, повысить точность обработки.

3. Увеличение толщины стружки, как известно из опыта фрезерования с попутной подачей и применения прогрессивной схемы резания, способствует уменьшению удельной силы резания и приводит к повышению стойкости инструмента.

4. Резание с переменной подачей, как показали исследования для различных видов обработки [2], способствует снижению интенсивности изнашивания инструмента и повышению производительности обработки.

5. Применение данного метода облегчает автоматизацию управления величиной минутной подачи за счёт изменения величины  $K$ .

Основными характеристиками предложенного способа являются:

1. Число импульсов подачи заготовки или инструмента в минуту

$$n_{ИМП} = \frac{n_0 z_0}{K} \text{ мин}^{-1}, \quad (1)$$

где  $n_0$  – частота вращения фрезы,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $z_0$  – число реек червячной или зубьев дисковой модульной фрезы;  $K$  – целое число, не кратное  $z_0$ .

2. Величина импульса подачи  $l$ , мм

$$l = S_0 \frac{n}{n_{ИМП}} = S_0 \frac{K}{z z_0 i} \text{ мм}, \quad (2)$$

где  $S_0$  – подача на оборот заготовки,  $\text{мм/об}$ ;  $n$  – частота вращения заготовки,  $\text{об/мин}$ ;  $z$  – число зубьев нарезаемого зубчатого колеса;  $i$  – число заходов червячной фрезы.

3. Допустимая продолжительность импульса подачи из условия его выполнения в момент пересопряжения соседних зубьев фрезы с заготовкой, т.е. на участке  $bc$  (рис. 1)

$$t_{ИМП} = \frac{L}{v_r \cdot 1000} \text{ мин}, \quad (3)$$

где  $L$  – длина пути вершины зуба 4 (рис. 1) фрезы, на котором происходит импульс подачи, мм;  $v_r$  – скорость вращения фрезы,  $\text{м/мин}$ .

Значение  $L$  (длина дуги  $bc$  на рис. 1) с достаточной точностью может быть найдено как разность хорд  $ab$  и  $ac$  (рис. 1) по формуле:

$$L = ab - ac = \sqrt{2r_{a0}h} - 2r_{a0} \sin\left(\frac{\pi}{z_0}\right) \text{ мм}, \quad (4)$$

#### 4. Скорость импульсной подачи, м/мин

$$V_s = \frac{l}{t_{ИМП.Д} 1000} \text{ м/мин}, \quad (5)$$

где  $t_{ИМП.Д}$  – действительная продолжительность импульса подачи

#### 5. Минутная подача заготовки или фрезы

$$S_{МИН} = l \cdot n_{ИМП} = l \cdot n_0 \frac{z_0}{K} \text{ мм/мин} \quad (6)$$

Применение импульсного зубофрезерования для заданных размеров обрабатываемой шестерни и используемой фрезы возможно при соблюдении одного из приведенных ниже условий:  $L > 0$  или  $\omega > \varepsilon$  (рис. 1).

Нами выполнено экспериментальное исследование данного метода на модернизированном зубофрезерном полуавтомате мод. 5Б312 на Минском заводе шестерён при обработке дет. 130-1701112 ( $m = 4,25$  мм,  $z = 45$ ,  $h = 7,896$  мм) с использованием червячной фрезы, имевшей  $z_0 = 10$ ,  $r_{a0} = 50$  мм. Были приняты следующие режимы обработки:  $n_0 = 100$  мин<sup>-1</sup>,  $v_r = 30$  м/мин,  $K = 3$ ,  $n_{ИМП} = 333$  имп/мин,  $S_0 = 4$  мм/об. При этих режимах имели место параметры процесса зубонарезания с импульсной подачей:  $t_{ИМП} = 0,0058$  с.,  $l = 0,026$  мм,  $V_s = 0,43$  м/мин,  $L = 2,9$  мм. Значения  $S_{МИН}$  для принятых режимов путём изменения  $K$  могут находиться в пределах 3...26 мм/мин. Анализ этих данных свидетельствует о следующем:

1. Скорость движения импульсной подачи во много раз (примерно в 72 раза) меньше скорости главного движения резания. Поэтому импульс движения подачи без ухудшения условий резания может происходить с опережением, т.е. до момента, когда один зуб фрезы придёт в точку  $\alpha$ . При этом будет лишь незначительно уменьшаться мгновенная скорость резания. На рис. такое положение фрезы показано пунктирной линией. При этом действующая на зуб 3 сила резания должна уменьшиться до максимально допустимой с точки зрения необходимого увеличения стойкости фрезы при использовании данного метода. Значение этой силы определяется опытным путём. Использование этого явления позволяет значительно увеличить значение  $L$  и расширить область применения данного метода данных условий (8,9 мм/мин). Это свидетельствует о более широком диапазоне изменения режимов резания у предлагаемого метода по сравнению с традиционным и расширении возможностей нового метода по увеличению производительности процесса зубонарезания.

2. Максимальное значение  $S_{МИН}$ , которое можно достичь при использовании зубофрезерования с импульсной подачей при  $n_0 = 100$  об/мин,  $z = 45$ ,  $S_0 = 0,4$  мм/об составляет 26 мм/мин, что примерно в 3 раза больше по сравнению с традиционным зубофрезерованием для этих же условий ( $n_0 = 100$  об/мин,  $z_0 = 45$ ,  $S_{МИН} = 8,9$  мм/мин).

#### **Выводы**

1. Анализ процесса зубофрезерования с импульсной подачей показывает, что он позволяет по сравнению с зубофрезерованием с непрерывной подачей улучшить условия резания за счёт уменьшения удельных сил резания, температуры в зоне резания, более равномерной нагрузки на зубья фрезы, повышения жёсткости технологической системы при резании, уменьшения её деформаций и вибраций. Использование метода облегчает также автоматизацию регулирования режимов резания. Всё это способствует увеличению стойкости инструмента, повышению производительности и точности обработки.

2. Экспериментальные исследования данного процесса подтвердили его эффективность: установлено уменьшение среднего износа зубьев червячной фрезы в 1,4 раза, максимально возможного износа – в 1,6 раза, интенсивности износа зубьев – в 1,8 раза, увеличение точности зубьев – в 1,2 раза. За счёт интенсификации режимов зубофрезерования червячной фрезой его производительность может быть увеличена в 1,5 раза.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 1255315 СССР, МКИ В 23 F 5/20. Способ фрезерования цилиндрических зубчатых колёс.
2. Подураев, В. Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В. Н. Подураев – М.: Машиностроение, 1977 – 304 с.

УДК 669.716.9

Комаров А.И.<sup>1</sup>, Фролов И.С.<sup>2</sup>, Фролов Ю.И.<sup>2</sup>, Девойно О.Г.<sup>2</sup>

### ПОЛУЧЕНИЕ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ VN и ZrO<sub>2</sub> ЛАЗЕРНЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ ПОКРЫТИЯ, СФОРМИРОВАННОГО МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ

*1. Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси*

*2. Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Беларусь*

*Показано, что лазерное легирование оксидом циркония и нитридом бора керамического покрытия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, сформированного на алюминиевом сплаве В95 методом микродугового оксидирования (МДО-покрытия), позволяет получать в его поверхностном слое композиционную эвтектическую керамику. Установлено, что лазерное легирование без предварительной механической обработки покрытия (шлифования) обеспечивает получение модифицированного слоя при всех режимах лазерной обработки, не приводя к значительным оплавлениям и сколам покрытия. Лазерная обработка при легировании оксидом циркония и нитридом бора приводит также к росту доли корунда α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, что положительно сказывается на микротвердости покрытия.*

#### **Введение**

К наиболее широко используемым для изготовления деталей пар трения керамическим материалам относятся алюмооксидная керамика (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и керамика на основе диоксида циркония (ZrO<sub>2</sub>) [1, 2]. В качестве альтернативы применяются керамики на основе диоксида циркония (ZrO<sub>2</sub>) и нитрида бора VN [1]. Наряду с имеющимся у этих материалов комплексом высоких физико-механических характеристик (твердость, износостойкость, химическая стабильность) им присущи некоторые недостатки. Так, алюмооксидная керамика характеризуется самой низкой трещиностойкостью среди производимых конструкционных керамик. Диоксид циркония, напротив, обладает одним из самых высоких среди технических керамик значением трещиностойкости и предела прочности на изгиб, который составляет 700 – 1000 МПа [2]. Однако оксид циркония, в отличие от оксида алюминия, проявляет деградацию механических свойств под воздействием влаги при температурах до 300 °С. Нитрид бора, предназначен для синтеза сверхтвердых материалов, а так же применяется в качестве огнеупорного, высокотемпературного, тепло и электроизоляционного материала, твердой смазки. Он облада-