

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ, ОБРАБОТАННОЙ ТОРЦОВЫМИ ФРЕЗАМИ С ДВУМЯ РЕЖУЩИМИ КРОМКАМИ

Зенкин Н.В.

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия*

Ключевые слова: фрезерование, припуск, осевая подача, толщина среза, ширина среза, режущая кромка.

Аннотация. Рассмотрено влияние технологических факторов на качество поверхности при фрезеровании торцовыми фрезами с двумя режущими кромками. Предложены математические модели расчета оптимальных режимов резания, обеспечивающих высокую производительность и требуемое качество обработки. А также рассмотрены особенности формирования следов обработки и расчет толщины среза.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE QUALITY OF THE SURFACE TREATED WITH END MILLS WITH TWO CUTTING EDGES

Zenkin N.V.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: milling, allowance, axial feed, slice thickness, slice width, cutting edge.

Abstract. The influence of technological factors on the surface quality during milling with end mills with two cutting edges is considered. Mathematical models for calculating optimal cutting modes that ensure high productivity and the required processing quality are proposed. The features of the formation of processing traces and the calculation of the slice thickness are considered.

Одним из ключевых аспектов производства крупных деталей в машиностроительной отрасли является необходимость достижения высоких показателей производительности и качества при обработке внутренних поверхностей вращения крупногабаритных заготовок после завершения металлургического цикла. Традиционно такая обработка выполняется методом точения на токарно-карусельных станках, однако этот процесс характеризуется низкой производительностью. Чтобы решить данную проблему, предлагается использовать фрезерование внутренних поверхностей торцовыми фрезами с двумя режущими кромками [1, 2], поскольку именно этот метод обеспечивает максимальную эффективность по критерию производительности и позволяет применять режимы резания с высокими скоростями и нагрузками.

Тем не менее, повышение эффективности обработки неизбежно сопряжено с рядом ограничений, обусловленных величиной и характером срезаемого припуска, возможностями используемого инструмента и технологическим оборудованием. Таким образом, возникает потребность в

разработке методики, позволяющей исследовать влияние технологических факторов на качество поверхности, полученной при обработке фрезами с двумя режущими кромками.

Фрезерование внутренних поверхностей с использованием торцовых фрез, оснащенных режущими кромками как на внешней, так и на внутренней сторонах ножей, позволяет значительно увеличить производительность обработки благодаря возможности кинематически разделить общий слой материала, подлежащего снятию. За счет варьирования диаметра заготовки и диаметра фрезы, количества режущих зубьев и их геометрии, а также положения фрезы относительно заготовки, можно добиться оптимального сочетания этих факторов, обеспечивающего наивысшую производительность и наилучшие условия работы режущих кромок [3].

Особое внимание уделяется выбору режима резания, особенно величине осевой подачи S_O , которая определяет производительность всего процесса. Выбор оптимальной величины S_O осуществляется исходя из анализа характеристик срезаемого слоя.

Процесс фрезерования предполагает образование следов от каждого зуба фрезы на обрабатываемой поверхности. Рассмотрим схему образования следа при обработке внутреннего кольца диаметром d торцовой фрезой с двумя режущими кромками диаметром D (рис. 1).

Предположим, что инструмент расположен таким образом, что его центр находится в точке O_1 . Тогда первый зуб, работающий внешней режущей кромкой, соприкасается с поверхностью детали в точке C_H , находящейся на радиусе $D/2 - t$ (где t – глубина резания), тогда как первый зуб, работающей внутренней кромкой, вступает в контакт в точке C_B , лежащей на радиусе $(D-t)/2$.

По мере вращения инструмента на угол $\omega_z = \frac{2\pi}{z}$ (где z – число зубьев фрезы), равный углу контакта, деталь поворачивается вокруг своей оси на угол $\xi = \frac{\omega_o 2\pi}{\omega_u z}$, соответствующий углу поворота детали (где ω_u – угол поворота инструмента при контакте зуба фрезы с деталью; ω_o – угол поворота детали при контакте зуба фрезы с деталью), в результате чего зуб достигает точки максимального удаления материала (точки A_H и A_B). Точка A_H расположена на радиусе $(D-t)/2$, а точка A_B – на радиусе $D/2$.

При дальнейшем вращении инструмента второй зуб повторит цикл снятия материала, достигнув точек D_H и D_B , соответствующих максимальному срезанию припуска. После полного прохождения второго зуба (точки F_H и F_B) положение центра инструмента изменится на O'_2 .

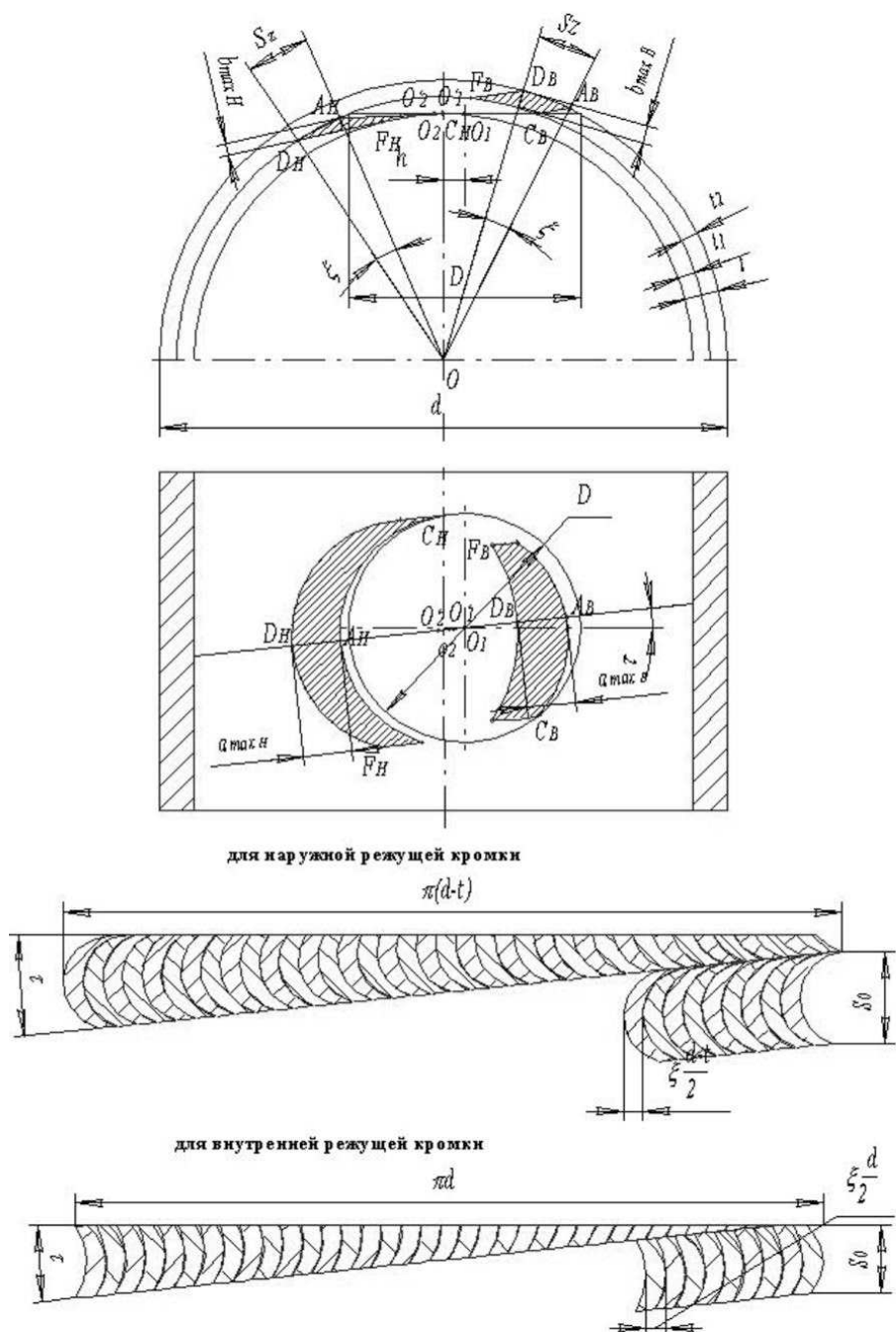


Рис. 1. Схема образования следов при обработке внутренних поверхностей вращения торцевой фрезой с двумя режущими кромками

Рассмотрим подробнее профиль внутренней поверхности кольцевой заготовки, формирующийся в результате работы внутренних режущих кромок фрезы (рис. 2).

В точке 1 начинается работа зуба фрезы по материалу детали. По мере продвижения инструмента вверх по направлению угла τ , траекторию точки 1

переносят в осевое сечение, что формирует новую позицию точки $1'$ в профиле.

Если бы движение происходило исключительно в плоскости вращения, зуб фрезы вышел бы из контакта с деталью в точке 4, симметричной точке 1 и располагающейся на расстоянии:

$$q = 2 \sqrt{\frac{D^2}{4} - \left(\frac{D}{2} + h - \sqrt{\left(\frac{d-t}{2} \right)^2 - \frac{d^2}{4} + \left(\frac{D}{2} + h \right)^2} \right)^2}, \quad (1)$$

где h – величина смещения фрезы (рис. 2).

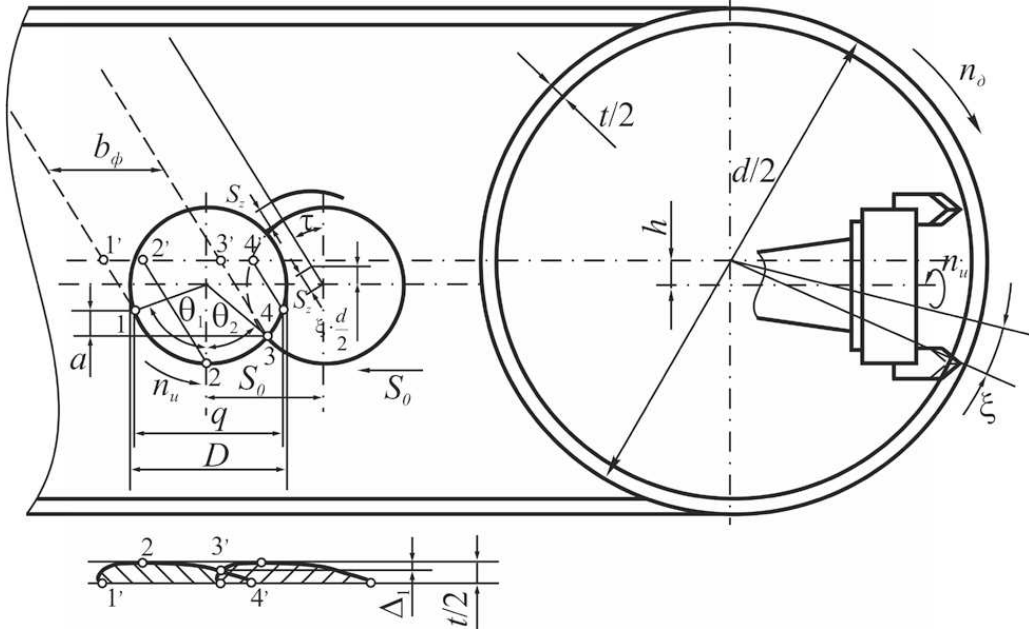


Рис. 2. Схема образования профиля внутренней поверхности вращения

Однако при наличии осевого перемещения фрезы за один оборот детали вдоль оси на расстояние $S_o < q$, зуб выйдет из контакта с деталью в точке 3, пересекаясь с окружностью радиусом $d/2$. Ширина фрезерования b_ϕ , представляющая собой расстояние между точками 1 и 3, определяется следующим выражением:

$$b_\phi = \frac{q}{2} + \frac{S_o}{2} + \frac{S_o}{2 \cdot \pi \cdot d} \left(\sqrt{D^2 - S_o^2} - \sqrt{D^2 - q^2} \right). \quad (2)$$

В точке 3 образуется небольшой выступ на поверхности детали, высота которого рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta_1 = \frac{d}{2} - \sqrt{h \sqrt{D^2 - S_o^2} + \frac{d^2 - S_o^2}{4} - D \cdot h}. \quad (3)$$

Эти неровности формируют макроскопические отклонения поверхности, влияющие на точность обработки. Допустимая величина макронеровностей

Δ_1 зависит от толщины срезаемого припуска и может быть оценена как $\Delta_1 = k \cdot t$, где коэффициент k варьируется в диапазоне от 0,1 до 0,005 в зависимости от типа операции (черновая, чистовая, финишная).

Формула (3) позволяет рассчитать наибольшую возможную величину осевой подачи S_o , соответствующую заданному уровню точности обработки:

$$S_o = 2\sqrt{\sqrt{D^2 \cdot h^2 + d^2 \cdot t^2 \cdot k^2 + 4 \cdot h^2 (D \cdot h - d \cdot t \cdot k + t^2 \cdot k^2 + h^2)} - (D \cdot h - d \cdot t \cdot k + t^2 \cdot k^2 + 2 \cdot h^2)}. \quad (4)$$

Толщина среза, возникающая при пересечении зубом фрезы траектории перемещения оси инструмента, вычисляется следующим образом:

$$a_{\max} = S_z \cdot \sin \varphi = \frac{\sqrt{\pi^2 \cdot d^2 + S_o^2 \cdot n_o \cdot \sin \varphi}}{z \cdot n_u}, \quad (5)$$

где S_z – подача на зуб; φ – угол в плане; n_o – частота вращения детали; n_u – частота вращения фрезы.

Объем металла, подлежащего удалению внутренними режущими кромками, равен $Q = \pi \cdot d \cdot t \cdot L / 2$ (где L – длина обрабатываемого отверстия). Общая длина пути, пройденного всеми режущими кромками в материале детали, составляет $l_o = l \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\xi \cdot S_o}$ (l – длина дуги контакта одной режущей кромки).

Средняя толщина среза определяется формулой:

$$a_{cp} = \frac{Q}{l_o \cdot m} = \frac{2 \cdot d \cdot n_o \cdot \pi \cdot S_o \cdot \sin \varphi}{z \cdot n_u \cdot D \left(\arcsin \frac{q}{D} + \arcsin \frac{S_o}{D} \right)}. \quad (6)$$

Здесь важно отметить зависимость средней толщины среза от осевой подачи S_o и числа оборотов детали n_o и фрезы n_u .

Выбор осевой подачи производится с учетом требований к точности обработки, согласно формуле (4), а частота вращения фрезы n_u устанавливается исходя из допустимой скорости резания $v_{\phi p}$.

Отсюда вытекает зависимость частоты вращения детали n_o от средней толщины среза и заданных значений S_o и n_u . Используя формулу (6), получаем выражение:

$$n_o = \frac{a_{cp} \cdot n_u \cdot z \cdot D \left(\arcsin \frac{q}{D} + \arcsin \frac{S_o}{D} \right)}{2 \cdot d \cdot \pi \cdot S_o \cdot \sin \varphi} = \frac{500 \cdot a_{cp} \cdot z \cdot v_{\phi p} \left(\arcsin \frac{q}{D} + \arcsin \frac{S_o}{D} \right)}{d \cdot \pi^2 \cdot S_o \cdot \sin \varphi}. \quad (7)$$

Кроме того, длину пути, проходимого каждым внутренним зубом фрезы, можно выразить как:

$$l_u = l \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\xi \cdot S_o \cdot z} = l \frac{n_u \cdot L}{S_o \cdot n_o} = \frac{\pi \cdot d \cdot L \cdot \sin \varphi}{a_{cp} \cdot z}. \quad (8)$$

Ширина среза является важной характеристикой процесса фрезерования. Она изменяется в ходе работы инструмента от нуля до определенного значения $b_{\max}$. Средняя ширина среза выражается следующим образом:

$$b = \frac{t}{2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \lambda}. \quad (9)$$

Количество одновременно работающих зубьев фрезы определяется формулой:

$$z' = [z \cdot p]. \quad (10)$$

где p – коэффициент непрерывности, зависящий от геометрии обработки и формы зуба.

Время основной обработки детали вычисляется по следующему уравнению:

$$\begin{aligned} t_o &= \frac{L}{n_d \cdot S_o} + \frac{1}{n_d} = \frac{(L + S_o) d \cdot \pi^2 \cdot \sin \varphi}{500 \cdot a_{cp} \cdot z \cdot v_{fp} \left(\arcsin \frac{q}{D} + \arcsin \frac{S_o}{D} \right)} = \\ &= \frac{1}{a_{cp} \cdot v_{fp}} f(d; t; L; D; z; \varphi; k). \end{aligned} \quad (11)$$

Помимо указанных выше дефектов, обработанная поверхность имеет дополнительные дефекты, связанные с наличием огранки, характеризуемой параметром Δ_2 . Этот дефект появляется вследствие особенностей кинематики фрезерования и может быть описан следующей зависимостью:

$$\Delta_2 = \frac{d}{2} \left(1 - \cos \frac{\xi}{2} \right). \quad (12)$$

Высота огранки зависит от многих факторов, включая соотношение диаметров детали и фрезы, глубину резания и частоту вращения инструмента.

Проведённое исследование позволило установить взаимосвязь между параметрами процесса фрезерования, геометрическими характеристиками инструмента и качеством обработанной поверхности. Разработаны математические модели, позволяющие рассчитывать предельные значения осевой подачи инструмента и определять необходимые параметры процесса для обеспечения заданной производительности и качества обработки.

Предложенная методика позволяет эффективно назначать режимы резания, учитывая требования к качеству поверхности и производственным условиям, обеспечивая достижение поставленных целей при минимизации затрат ресурсов и материалов.

Список литературы

1. Созинов А.И., Зенкин Н.В. Повышение эффективности размерной обработки внутренних поверхностей крупных кольцевых заготовок // Труды МГТУ им. Н.Э. Баумана: сборник статей. Математическое моделирование сложных технических систем. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – №274. – С. 37-43.

2. Зенкин Н.В., Щелупова О.А. Обработка внутренних поверхностей вращения фрезами с двумя режущими кромками // Электронный научно-технический журнал «Инженерный вестник». – 2012. – №7. – С. 3.
3. Зенкин Н.В., Калмыков В.В., Малышев И.Е. Фрезерование отверстий специальными фрезами // Электронный журнал: наука, техника и образование. – 2016. – №1(5). – С. 76-81.

References

1. Sozinov A.I., Zenkin N.V. Improving the efficiency of dimensional processing of internal surfaces of large annular blanks // Proceedings of Bauman Moscow State Technical University: collection of papers. Mathematical modeling of complex technical systems. – M.: Publ. house of MSTU n.a. N.E. Bauman, 1999. – No. 274. – P. 37-43.
2. Zenkin N.V., Shchelupova O.A. Processing of internal surfaces of rotation with milling cutters with two cutting edges // Electronic scientific and technical journal "Engineering Bulletin". 2012, no. 7, p. 3.
3. Zenkin N.V., Kalmykov V.V., Malyshev I.E. Milling holes with special cutters // Electronic journal: science, technology and education. 2016, no. 1(5), pp. 76-81.

Зенкин Николай Васильевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Машиностроительные технологии»	Zenkin Nikolay Vasilyevich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of mechanical engineering
nizenkin@yandex.ru	

Received 04.11.2025