

ОПТИМИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИИ ТОРЦОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.А. Хоменко, А.О. Черданцев, П.О. Черданцев

Изложены принципы построения имитационной математической модели процесса торцового фрезерования. Предложен способ оптимизации операции торцового фрезерования по критерию максимальной производительности.

Ключевые слова: имитационное моделирование, торцовое фрезерование, торцовая фреза, качество поверхности, оптимизация, процесс резания.

Проектирование технологических операций в современном производстве осуществляется с помощью решения задач оптимизации. В частности, операция торцового фрезерования может быть спроектирована с учетом различных критериев оптимизации [1]. Результат оптимизации напрямую зависит от точности и гибкости моделей применяемых при расчетах.

Задача оптимизации операции торцового фрезерования может быть решена в несколько этапов:

- выбор оптимизируемого параметра;
- назначение неизменяемых в ходе оптимизации параметров;
- выбор изменяемых параметров и диапазонов их изменения;

- назначение ограничивающих факторов, и расчет зависимостей для построения номограммы;

- построение номограммы;
- определение по номограмме максимально допустимого значения оптимизируемого параметра.

Наиболее гибкими и, соответственно, применимыми для оптимизационных задач являются имитационные модели, которые воспроизводят процесс механической обработки, позволяя отслеживать его развитие во времени.

Нами была разработана имитационная математическая модель процесса торцового фрезерования. Структура модели приведена на рисунке 1.

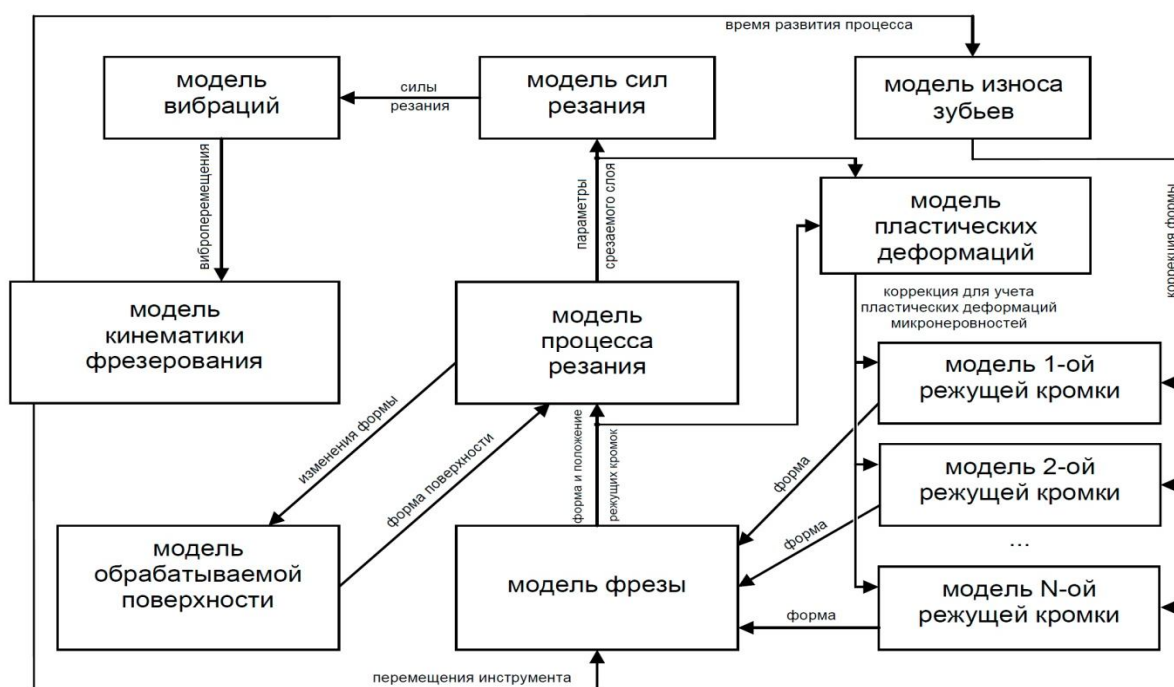


Рисунок 1 – Структура имитационной модели

В состав модели входят следующие модели:

- модель обрабатываемой поверхности;
- модели режущих кромок;
- модель фрезы;
- модель кинематики фрезерования;
- модель процесса резания;
- модель пластических деформаций;
- модель сил резания;
- модель вибраций;
- модель износа зубьев.

Все эти модели связаны друг с другом информационными потоками и взаимодействуют на каждом шаге итерационного расчета по времени.

Модель обрабатываемой поверхности представляется в виде топографической карты микронеровностей. Поверхность (рисунок 2) описывается следующими параметрами: размеры участка вдоль осей X и Y ; шаги сетки вдоль осей X и Y ; координаты X и Y нижней левой точки участка. Топографическая карта микронеровностей представляет собой матрицу высот поверхности в узлах сетки относительно идеальной поверхности детали.

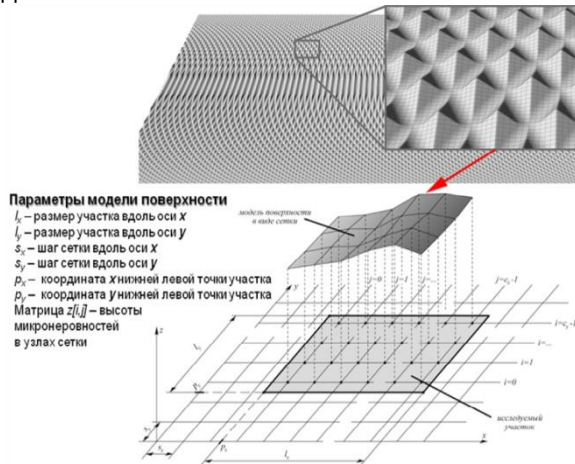


Рисунок 2 – Модель обрабатываемой поверхности

Модели режущих кромок каждой из пластин (рисунок 3) описываются следующими параметрами: радиус при вершине; угол при вершине; длина режущей кромки, – и представляет собой матрицу точек режущей кромки с количеством строк равным количеству точек, и столбцами соответствующими координатам X и Y .

Модель конструкции фрезы включает в себя параметры режущих зубьев, положение и ориентация которых в пространстве описывается следующими величинами: диаметр вершин лезвия; положение вершины лезвия в

осевом направлении; угловое положение вершины лезвия; главный угол в плане; радиальный передний угол; осевой передний угол. По этим параметрам точки матриц режущих кромок пластин преобразуются в набор матриц, описывающих координаты точек режущих кромок торцевой фрезы.

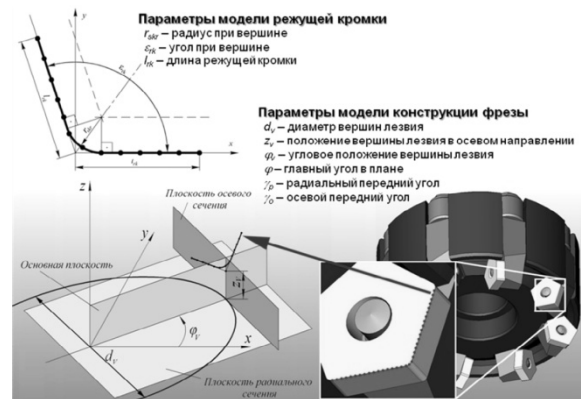


Рисунок 3 – Модель фрезы и режущих кромок

В модели кинематики фрезерования (рисунок 4) используется дискретный способ задания перемещений. Заданная точность расчета определяет максимально возможное перемещение точек режущей кромки за один шаг, которое в свою очередь с учетом скорости резания определяет шаг по времени между соседними расчетными положениями.

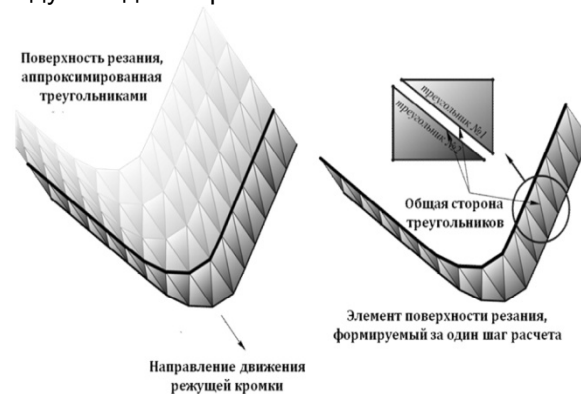


Рисунок 4 – Модель кинематики фрезерования

Отрезки режущей кромки, перемещаясь во времени, переходят в новые положения в пространстве, в результате формируется поверхность резания. Чтобы минимизировать расчетную сложность модели не в ущерб требуемой точности, поверхность резания аппроксимируется парами треугольников с общими сторонами.

Модель процесса резания. Поверхность детали, представляемая в виде набора от-

ОПТИМИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИИ ТОРЦОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

резков с длинами равными высотам микронеровностей, на каждом расчетном шагу подвергается усечению треугольниками поверхности резания. Основой вычислительной части модели является задача поиска пересечения треугольника и отрезка (рисунок 5). Решение этой задачи определяет, происходит ли процесс съема металла участком режущей кромки в данном положении в определенный момент времени. Если имеется точка пересечения отрезка с треугольником, то соответствующая этому отрезку высота микронеровности принимает новое значение.

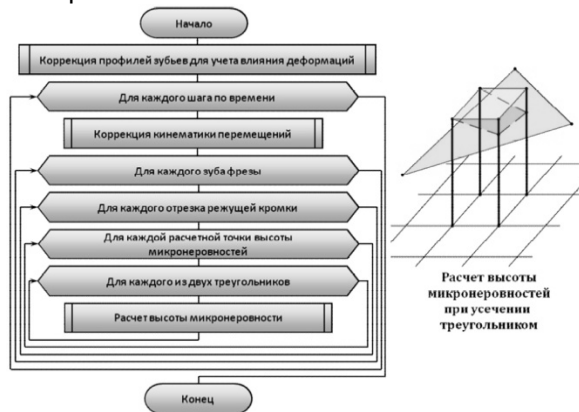


Рисунок 5 – Алгоритм имитации процесса резания

Полный расчет описывается многократно повторяющимися вложенными последовательностями действий. Для каждого шага по времени, для каждого зуба инструмента, для каждого отрезка его режущей кромки, для каждой расчетной точки высоты микронеровностей, для каждого из двух треугольников решается описанная выше задача.

Для каждого момента времени рассчитывается площадь металла, срезаемая зубьями. Для учета влияния пластических деформаций при расчете модели инструмента корректируется соответствующим образом форма главной режущей кромки, так как пластические деформации проходят именно сквозь поверхность, сформированную главной режущей кромкой предыдущего зуба. Величина коррекции принимается пропорциональной площади срезаемого слоя с коэффициентом зависящим от физико-механических свойств материала.

Модель расчета сил резания основана на модели, предложенной В.М. Свиным [2]. Одним из её существенных недостатков является способ расчета параметров срезаемого слоя. В предлагаемой нами модели эти параметры могут быть рассчитаны с необходимой точностью, для любых форм и ориен-

таций режущих пластин. Известно [3], что при фрезеровании площадь срезаемого слоя зубом фрезы меняется вместе с изменением его углового положения. Так же площадь срезаемого слоя определяется формой исходной поверхности и глубиной резания. При фрезеровании прерывистых поверхностей влияние изменений площади срезаемого слоя на величины сил резания особо существенно.

Модель сил резания представлена в виде следующих эмпирических зависимостей

$$\begin{cases} F_{\tau} = 5166 \cdot a^{0.77} \cdot b \cdot v^{-0.16}, \\ F_r = 12088 \cdot a^{0.662} \cdot b^{0.998} \cdot v^{-0.395}, \\ F_o = 1635 \cdot a^{0.6} \cdot b^{0.9} \cdot v^{-0.3}, \end{cases}$$

где F_{τ}, F_r, F_o – тангенциальная, радиальная и осевая составляющие силы резания, (Н); v – скорость резания, (м/мин); a, b – толщина и ширина срезаемого слоя, (мм). Степенные и линейные коэффициенты учитывают свойства обрабатываемого материала и могут быть получены экспериментальным путем практически для любого материала на основе анализа установившегося процесса резания [4].

Вибрации в технологической системе могут иметь совершенно различный характер. Основной причиной возникновения вибраций является воздействие силы резания, закон изменения которой носит достаточно сложный характер. Вследствие этого практически невозможно найти аналитические зависимости позволяющие провести расчет вибраций для произвольно заданных инструмента, заготовки и режима резания.

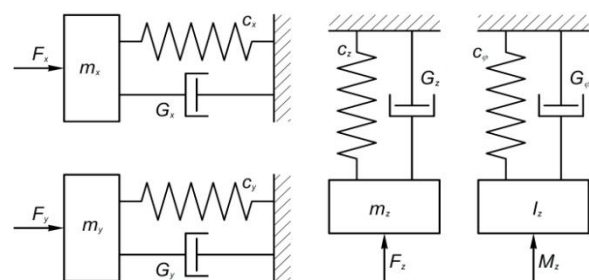


Рисунок 6 – Модель вибраций

На рисунке 6 представлена модель вибраций. Предполагается, что станок, приспособление и деталь достаточно жесткие чтобы пренебречь их колебаниями, а фреза совершает линейные колебания относительно всех трех осей и крутильные колебания вокруг оси z . Такое представление технологической системы может быть выражено с помощью системы дифференциальных уравнений.

$$\begin{cases} m_x \ddot{x} + G_x \dot{x} + c_x x = F_x \\ m_y \ddot{y} + G_y \dot{y} + c_y y = F_y \\ m_z \ddot{z} + G_z \dot{z} + c_z z = F_z \\ I_z \ddot{\varphi} + G_\varphi \dot{\varphi} + c_\varphi \varphi = M_z \end{cases}$$

где m_x, m_y, m_z - приведенные массы; I_z - приведенный момент инерции; G_x, G_y, G_z, G_φ - приведенные коэффициенты демпфирования; c_x, c_y, c_z, c_φ - приведенные жесткости; F_x, F_y, F_z - силы резания; M_z - момент сил резания относительно оси z ; x, y, z, φ - виброперемещения.

В предлагаемой нами модели решение системы дифференциальных уравнений осуществляется численным методом Рунге-Кутты 4-го порядка, так как значения сил резания и крутящего момента в модели представляются дискретно.

Модель износа инструмента включает в себя взаимосвязь периода стойкости фрезы и режимов резания: минутной подачи и скорости резания.

Одной из важных особенностей торцового фрезерования является то, что при увеличении минутной подачи и частоты вращения фрезы в одинаковое количество раз траектория движения зубьев фрезы не меняется, а изменяется лишь скорость протекания процесса резания. Вследствие этого основным параметром режима резания, определяющим шероховатость поверхности является подача на зуб S_z , которая зависит как от величины минутной подачи S_m , так и от частоты вращения фрезы n :

$$S_z = \frac{S_m}{z \cdot n}, \text{ где } z - \text{ количество зубьев.}$$

Необходимо отметить, что скорость резания прямолинейно зависит от частоты вращения фрезы.

Вышесказанное делает возможным получать на основании расчетов по предложенной модели зависимость связывающую величину максимального среднего арифметического отклонения профиля Ra на обрабатываемой поверхности с величиной подачи на зуб S_z для любой фрезы имеющей произвольные конструктивные и геометрические параметры. Полученные в результате численных экспериментов зависимости позволяют проводить оптимизацию операции торцового фрезерования по различным критериям.

Рассмотрим пример оптимизации операции торцового фрезерования по критерию максимальной производительности. Производительность определяется величиной минутной подачи, соответственно максимальное значение минутной подачи обеспечивает наибольшую производительность.

Выбираем параметры, не изменяемые в ходе оптимизации. Рассмотрим пример обработки детали из стали 45 торцовой фрезой с четырьмя зубьями, оснащенной пластинами из твердого сплава T15K6 диаметром $D = 50\text{мм}$ с параметрами $\varphi = 67^\circ, r = 0,8\text{мм}, \gamma_p = 5^\circ, \gamma_o = 5^\circ$, глубина резания $t = 1\text{мм}$.

На следующем этапе определим изменяемые параметры. В связи с тем, что частота вращения шпинделя определяет в конечном результате скорость резания для оптимизации решено использовать варьирование скорости резания в диапазоне $V = 100 \dots 250\text{м/мин}$ и величину минутной подачи в диапазоне $S_m = 600 \dots 2000\text{мм/мин}$.

В качестве ограничений используем заданное значение среднего арифметического отклонения профиля $Ra_{\text{заданное}}$ и стойкость торцового фрезы $T_{\text{заданное}}$:

$$\begin{cases} S_m \rightarrow \max \\ Ra \leq Ra_{\text{заданное}} \\ T \leq T_{\text{заданное}} \end{cases}$$

Следующий этап заключается в подготовке данных для построения номограммы, позволяющей выявить оптимальный вариант. Необходимы зависимости среднего арифметического отклонения профиля и стойкости инструмента от скорости резания и минутной подачи для заданного сочетания исходных параметров. Зависимость $V(S_m, Ra)$ является линейной и имеет вид:

$$V = \frac{S_m \cdot \pi \cdot D}{1000 \cdot z \cdot S_z(Ra_{\text{заданное}})},$$

Зависимость $S_z(Ra_{\text{заданное}})$ получается в табличном виде из результатов численного эксперимента.



Рисунок 7 – Зависимость $S_z(Ra_{\text{заданное}})$

ОПТИМИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИИ ТОРЦОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

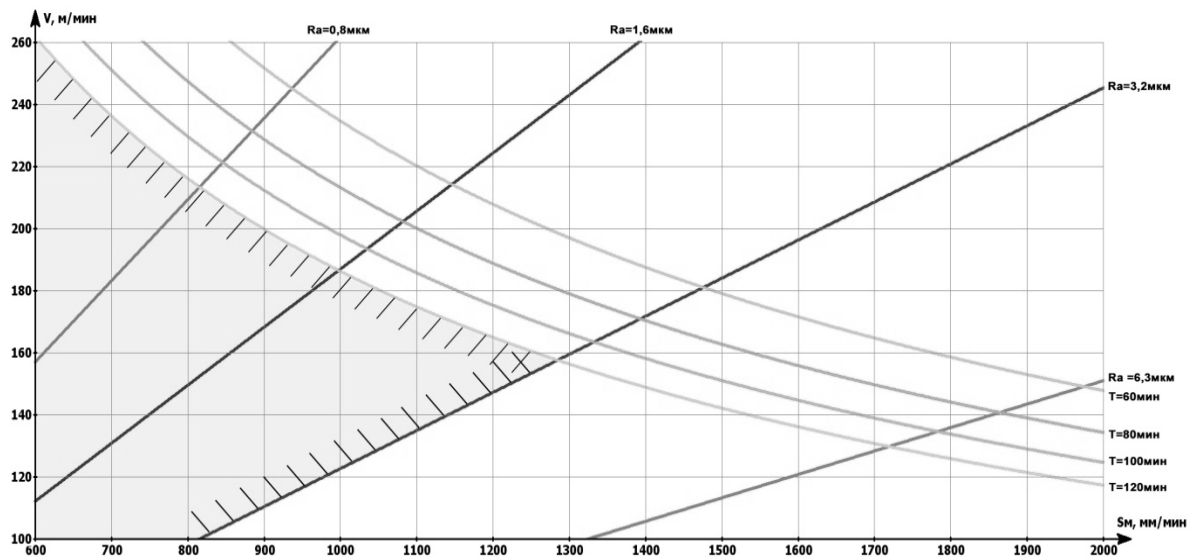


Рисунок 8 – Номограмма определения максимальной производительности

Для определения периода стойкости на основании справочных данных была использована зависимость

$$V = 92 \cdot 10^3 S_m^{-0,67} T^{-0,33}$$

где T – стойкость фрезы, (мин); V – скорость резания, (м/мин); S_m – минутная подача, (мм/мин).

В качестве примера использованы следующие численные значения стойкости инструмента T : 60; 80; 100; 120 минут. Для среднего арифметического отклонения профиля использованы значения Ra : 6,3; 3,2; 1,6; 0,8 мкм. Для выбранных значений строится номограмма определения максимальной производительности.

Следуя по кривой для заданного значения шероховатости, выбирается наибольшее значение минутной подачи удовлетворяющее требованиям периода стойкости торцовой фрезы.

Например, при заданной стойкости инструмента $T = 120$ мин. и среднем арифметическом отклонении профиля $Ra = 3,2$ мкм по номограмме видно что оптимальным будет значение минутной подачи около $S_m \approx 1250$ мм/мин. Этой подаче соответствует скорость резания $V = 160$ м/мин. Зная скорость резания рассчитываем частоту вращения фрезы по формуле:

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D};$$

где D – диаметр фрезы, мм; n – частота вращения фрезы, об/мин; v – скорость резания м/мин;

Получаем $n = \frac{1000 \cdot 160}{3,14 \cdot 50} = 1018$ об/мин, округ-

ляем до $n = 1000$ об/мин. Рассчитываем величину подачи на зуб

$$S_z = \frac{1250}{4 \cdot 1000} = 0,3 \text{ мм/зуб.}$$

Проверяем по зависимости $S_z(Ra_{\text{заданное}})$ на рисунке 7 что при рассчитанной подачи на зуб среднее арифметическое отклонение профиля составляет около 3 мкм и не превышает заданного $Ra = 3,2$ мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков А.М. Повышение производительности операций торцового фрезерования на станках с ЧПУ путем управления отклонениями формы и волнистостью плоских корпусных деталей. дис. к.т.н. Челябинск, Челябинский государственный университет, 1993.
2. Свинин В.М. Имитационное моделирование колебаний технологической системы при торцовом фрезеровании с модулированной скоростью резания. Высокие технологии в машиностроении, материалы Всероссийской научн-техн конференции – Самара, 2007 с. 187-189.
3. Высокопроизводительная обработка металлов резанием. – М.: издательство «Полиграфия», 2003. – 301 с.
4. Кувшинский В.В. Фрезерование. Москва, машиностроение, 1977. 240с.

В.А. ХОМЕНКО, А.О. ЧЕРДАНЦЕВ, П.О. ЧЕРДАНЦЕВ

Хоменко Валерий Андреевич, д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», tar_otm@mail.ru.

Черданцев Алексей Олегович, инженер кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», hypertigr@mail.ru, с.т. 8-913-211-3957.

Черданцев Павел Олегович, к.т.н., старший преподаватель кафедры «Теоретическая механика и механика машин» ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», p004092@yandex.ru.