

Изменение напряженного состояния задней поверхности зуба фрезы при торцевом фрезеровании

Разработана имитационная модель формирования напряженного состояния на задней поверхности зуба торцевой фрезы, которая показала периодический характер напряжений по мере его перемещения в процессе резания.

Ключевые слова: торцевое фрезерование, фреза, задняя поверхность, напряженное состояние, изнашивание, имитационная модель.

A simulation model of the stress state formation on the tooth clearance surface of face-milling cutter has been elaborated. The model has shown a periodic character of stresses as the tooth is moved in the cutting process.

Keywords: face milling, milling cutter, the clearance surface, the stress state, wear, simulation model.

Составляющую силы резания, действующую на задней поверхности режущей части инструмента, формируют напряжения на задней поверхности зуба фрезы, которые изменяются в процессе резания по мере продвижения режущего клина.

Цель исследования — расчетная оценка изменения напряженного состояния на задней поверхности зуба фрезы при торцевом фрезеровании.

На рис. 1, а (см. обложку) представлена обобщенная в теории резания кинематическая схема резания в системе координат зуба фрезы [1]. Торцевое фрезерование — процесс несвободного резания, при котором имеет место переменная толщина среза. На рис. 1, б (см. обложку) показана кинематическая схема резания в системе координат зуба фрезы. Сечения 1—1, 2—2 и 3—3 отображают формирование срезаемого слоя вдоль режущей кромки зуба фрезы.

Получить расчетную схему можно, используя метод имитационного моделирования, сформулированный в работах [2, 3] и развитый применительно к точению в работах [4—7], а к торцевому фрезерованию — в работах [8—15].

Метод основывается на решении задачи упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала, которое происходит вследствие перемещения режущего клина вплоть до разрушения обрабатываемого материала. В механике сплошных сред данная задача относится к задачам теории пластичности при кинематических граничных условиях.

Расчетным путем определены напряженное состояние в обрабатываемом материале область напряженного состояния, а также напряжения на передней и задней поверхностях режущего клина в зависимости от его перемещения и прочностных свойств обрабатываемого материала. Схему формируем применительно к имитационной модели про-

цесса резания при торцевом фрезеровании с учетом износа задней поверхности зуба фрезы. Внешние воздействия, обуславливающие напряженно-деформированное состояние обрабатываемого материала, формируются в результате перемещения зуба фрезы.

Расчетная схема для формирования пространственной схемы резания представлена на рис. 2 (см. обложку), где $\Phi_2(x, y, z) = y = 0$; $\Phi_3(x, y, z) = z = 0$; $\Phi_4(x, y, z) = z = l_d$; $\Phi_5(x, y, z) = y = a - b_d$. Так как рассматриваются напряжения на задней поверхности зуба фрезы, то целесообразна постановка задачи в напряжениях.

Напряженное состояние деформируемого тела и условия равновесия описываются уравнениями объемной деформации Бельтрами—Митчелла в декартовых координатах [16]:

$$\begin{cases} \Delta\sigma_x + \frac{3}{1+\mu}\frac{\partial^2\sigma}{\partial x^2} = 0; & \Delta\sigma_y + \frac{3}{1+\mu}\frac{\partial^2\sigma}{\partial y^2} = 0; \\ \Delta\sigma_z + \frac{3}{1+\mu}\frac{\partial^2\sigma}{\partial z^2} = 0; \\ \Delta\tau_{xy} + \frac{3}{1+\mu}\frac{\partial^2\sigma}{\partial x\partial y} = 0; & \Delta\tau_{yz} + \frac{3}{1+\mu}\frac{\partial^2\sigma}{\partial y\partial z} = 0; \\ \Delta\tau_{xz} + \frac{3}{1+\mu}\frac{\partial^2\sigma}{\partial x\partial z} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ — оператор Лапласа;
 $\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3}$.

Напряженное состояние формируется в результате перемещения зуба фрезы, что задается через граничные условия, обусловленные перемещением границы:

$$\begin{cases} u = (0, 0, u); & \dot{u} = (0, 0, v) \quad \forall (x, y, z) \in \Phi_1; \\ u = (0, 0, u); & \dot{u} = (0, 0, v) \quad \forall (x, y, z) \in \Phi_2; \\ u = 0; & \dot{u} = 0 \quad \forall (x, y, z) \in \Phi_3; \\ u = 0; & \dot{u} = 0 \quad \forall (x, y, z) \in \Phi_4; \\ u = 0; & \dot{u} = 0 \quad \forall (x, y, z) \in \Phi_5; \\ u = 0; & \dot{u} = 0 \quad \forall (x, y, z) \in \Phi_6, \end{cases} \quad (2)$$

где Φ_1 и Φ_2 — передняя и задняя поверхности режущей части инструмента; Φ_3 — Φ_6 — границы расчетной области.

В граничных условиях (2) для поверхности $\Phi_2(x, y, z)$ при перемещении u задано ограничение: граница движется вдоль оси z со скоростью v .

Для математического описания граничного условия с учетом трения на поверхности $\Phi_2(x, y, z)$ запишем модуль вектора нормальной составляющей силы резания [16]:

$$|\bar{R}_n| = \bar{n} \bar{R} \sqrt{\cos^2 nx + \cos^2 ny + \cos^2 nz} \quad (3)$$

и модуль вектора касательной составляющей [1]:

$$|\bar{R}_t| = \sqrt{[(\sigma_{xx} - \sigma_n)\cos nx + \tau_{xy}\cos ny + \tau_{xz}\cos nz]^2 + [\tau_{yx}\cos nx + (\sigma_{yy} - \sigma_n)\cos ny + \tau_{zy}\cos nz]^2 + [\tau_{zx}\cos nx + \tau_{yz}\cos ny + (\sigma_{zz} - \sigma_n)\cos nz]^2}. \quad (4)$$

Связь касательной и нормальной составляющих запишем через коэффициент трения [16]:

$$|\bar{R}_t| = f|\bar{R}_n|. \quad (5)$$

Таким образом, зависимости (3)—(5) отображают математическое описание процесса трения на поверхности $\Phi_2(x, y, z)$.

Начальные условия в перемещениях для заготовки:

$$t = 0 \rightarrow \bar{u} = (0, 0, 0); \quad \dot{u} = v; \quad \ddot{u} = 0. \quad (6)$$

Связь уравнений деформации (1) и перемещения (6) в теории упругости и пластичности устанавливает уравнения Коши [16]:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; & \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; & \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}; \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}; & \gamma_{yz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}; & \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x}. \end{cases} \quad (7)$$

Эта же связь описывается законом Гука [16]:

$$\begin{cases} \sigma_x = E \left[\frac{\varepsilon_x}{(1+\mu)} + \frac{\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \right]; \\ \sigma_y = E \left[\frac{\varepsilon_y}{(1+\mu)} + \frac{\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \right]; \\ \sigma_z = E \left[\frac{\varepsilon_z}{(1+\mu)} + \frac{\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \right]; \\ \tau_{xy} = G\gamma_{xy}; \quad \tau_{yz} = G\gamma_{yz}; \quad \tau_{zx} = G\gamma_{zx}. \end{cases} \quad (8)$$

Модули упругости E и пластичности $E_{пл}$ (модуль упругости второго рода), а также коэффициент Пуассона μ и модуль сдвига G в формулах (8) связаны выражениями [16]:

$$\left. \begin{aligned} E &= \frac{2G}{1+\mu}; \\ E_{пл} &= (\sigma_B - \sigma_T) \left(\varepsilon_k - \frac{\sigma_T}{E} \right), \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где σ_B — деформационное упрочнение; σ_T — предел текучести; ε_k — разрушающая деформация.

Исследования упругопластических свойств конструкционных материалов (сталей и сплавов) показали [17], что сопротивляемость материалу разрушению является функцией от интенсивности деформаций, скорости деформирования и температуры деформируемого материала:

$$\sigma_i = \Phi(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i, T). \quad (10)$$

Здесь σ_i — обобщенное эквивалентное напряжение (в теории пластичности — интенсивность напряжений) определяется через компоненты тензора напряжений [16]:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}; \quad (11)$$

ε_i — обобщенная деформация (в теории пластичности — интенсивность деформации) [16]:

$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{1}{2}[(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2] + \frac{3}{4}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)}; \quad (12)$$

$\dot{\varepsilon}_i$ — скорость деформирования; T — температура материала.

Механические свойства сталей и сплавов для разных скоростей деформирования задаются диаграммой деформационного упрочнения (рис. 3). Точка B соответствует разрушающей деформации ε_k , где интенсивность деформаций достигает предельной величины и происходит разрушение элементарного объема. Температурно-скоростные прочностные характеристики сталей и сплавов приведены в справочнике [18].

Таким образом, совокупность уравнений (2)—(12) представляет собой математическое постановку задачи определения напряжений на задней поверхности зуба торцевой фрезы в результате ее контакта с заготовкой при перемещении зуба фрезы при резании.

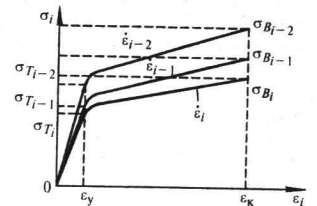


Рис. 3. Зависимость деформационного упрочнения стали ($\dot{\varepsilon}_i < \dot{\varepsilon}_{i-1} < \dot{\varepsilon}_{i-2}$)

Для решения поставленной задачи целесообразно использовать метод конечных элементов с помощью пакета программ ANSYS. Для этого в среде ANSYS LS DYNA необходимо задать все параметры задачи средствами ANSYS LS DYNA и построить сетку конечных элементов. При разбиении применялась неравномерная сетка конечных элементов SOLID 164 призматической формы.

Программа ANSYS LS DYNA позволяет рассчитывать все характеристики деформационного и напряженного состояния обрабатываемого материала по заданной прочностной характеристике $\sigma_i = f(\epsilon_i, T, \dot{\epsilon}_i)$ и определить напряжения на задней поверхности зуба фрезы.

Изменение напряженного состояния на задней поверхности зуба фрезы

Для анализа напряжений на задней поверхности в зависимости от перемещения зуба фрезы выполнен расчет напряженного состояния для некоторого промежутка времени. Исходные данные: геометрия зуба фрезы — передний угол $\gamma = 0$, задний угол $\alpha = 7^\circ$; размер площадки изнашивания зуба фрезы $l_3 = 0,4$ мм; скорость резания $v = 450$ м/мин; подача на зуб фрезы $S_Z = 0,1$ мм/зуб; материал заготовки — Сталь 45.

Далее рассчитали поля интенсивности напряжений для 91 момента времени. Шаг расчета 0,2 мкс соответствует перемещение зуба фрезы $\Delta z = 3 \cdot 10^{-6}$ мм.

Для каждого шага расчета построены поля интенсивности напряжений. На рис. 4 (см. обложку) приведены несколько характерных полей напряжений, рассчитанных с помощью ANSYS LS DYNA, которые иллюстрируют характер изменений напряженного состояния по мере продвижения зуба фрезы.

Расчеты по полученной математической модели показали, что напряженное состояние обрабатываемого материала по мере продвижения зуба фрезы изменяется и по величине, и по характеру. До 11-го шага расчета напряжения постепенно возрастают, достигая максимального значения, что соответствует 2 мкс (см. рис. 4, б). Затем напряжения снижаются (с 12 до 69 шага) и вновь возрастают, достигая максимальных значений на 75-м шаге, что соответствует 14,8 мкс (см. рис. 4, з).

Таким образом, анализ показал, что напряженное состояние на задней поверхности инструмента изменяется периодически по мере перемещения зуба торцевой фрезы. Интервал между максимальными напряжениями составил 64 шага, т. е. 2,6 мкс, что соответствует $\approx 0,12$ мм перемещения зуба фрезы. Периодический характер напряженного состояния был отмечен применительно к точению и

в работе [3], что согласуется со строением стружки. Это же наблюдается и при торцевом фрезеровании.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Грановский Г. И., Грановский В. Г. Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985. 304 с.
2. Блэк Д. Т. Модель напряжений пластического течения при резании металла // Тр. американского общества инж.-механиков. 1979. № 4. С. 124–126.
3. Кудинов В. А. Схема стружкообразования (динамическая модель процесса резания) // Станки и инструмент. 1992. № 11. С. 26–29.
4. Кошин А. А. Теория точности и оптимизация многоинструментной токарной обработки: Дис. ... д-ра техн. наук. Челябинск. 1995. 385 с.
5. Кошин А. А. Элементы математической теории резания металлов // Вестник ЮУрГУ. 2003. № 9. С. 102–111.
6. Vahid K. Modelling and Simulation of Mechanical Cutting // Doctoral Thesis. Instituteten för Maskinteknik Avdelningen för Datorstödd maskinkonstruktion. 2001. № 28. 36 с.
7. Vahid K., Lundblad M., Lindgren L.-E. Numerical and Experimental Analysis of Orthogonal Metal Cutting // Doctoral Thesis. Instituteten för Maskinteknik Avdelningen för Datorstödd maskinkonstruktion. 2001. № 28. 7 с.
8. Гузев В. И., Пименов Д. Ю. Нестационарность напряженного состояния на задней поверхности зуба фрезы, обусловленная деформациями в зоне сдвига // Технология машиностроения. 2010. № 7. С. 20–24.
9. Пименов Д. Ю., Гузев В. П., Кошин А. А. Влияние режимов резания на напряжения на задней поверхности инструмента // СТИН. 2011. № 8. С. 26–33.
10. Пименов Д. Ю., Гузев В. И., Кошин А. А. Анализ напряжений на задней поверхности зуба торцевой фрезы в зависимости от режимов резания // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 1 (285). С. 51–58.
11. Пименов Д. Ю., Гузев В. И., Кошин А. А. Влияние режимов резания на напряжения на задней поверхности инструмента // СТИН. 2011. № 8. С. 26–33.
12. Пименов Д. Ю., Гузев В. И., Кошин А. А. Исследование напряжений на задней поверхности зуба торцевой фрезы // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2011. № 4. С. 136–146.
13. Пименов Д. Ю., Гузев В. И., Кошин А. А. Напряжения на задней поверхности инструмента при разных режимах резания // Прогрессивные технологии в машиностроении. 2011. С. 81–91.
14. Пименов Д. Ю., Гузев В. П., Кошин А. А. Определение сил, действующих на задней поверхности режущей части инструмента // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 2/2 (286). С. 80–90.
15. Пименов Д. Ю. Разработка модели эпюры напряжений на задней поверхности зуба фрезы // Технология машиностроения. 2010. № 1. С. 48–52.
16. Биргер И. А. Прочность, устойчивость, колебания. Т. 1 / Под ред. И. А. Биргера, Я. Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1968. 831 с.
17. Корчак С. Н. Теоретические основы влияния технологических факторов на повышение производительности шлифования стальных деталей: Дис. ... д-ра техн. наук. Челябинск. 1971. 372 с.
18. Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1976. 488 с.

“Библиотека Машиностроителя”

www.lib-bkm.ru