

УДК 621.941.1.001

С. В. ГРУБЫЙ, д-р техн. наук (МГТУ им. Н. Э. Баумана), e-mail: grusv@yandex.ru

Разработка полиномиальных уравнений характеристик резания для концевой фрезеровки коррозионно-стойкой стали

Представлена методика расчета характеристик резания при фрезеровании концевой фрезой заготовок из коррозионно-стойкой стали. Расчет основан на анализе параметров зоны стружкообразования и учитывает разупрочнение обрабатываемого материала под действием температуры резания. Расчетные значения стойкости инструмента и крутящего момента аппроксимированы полиномиальными уравнениями, которые использованы для расчета технологических ограничений и оптимизации режима фрезерования.

Ключевые слова: коррозионно-стойкая сталь, фрезерование, концевая фреза, твердый сплав, крутящий момент, износ, стойкость, полиномиальное уравнение.

The analysis methodic of cutting characteristics at milling by end mill of billets from corrosion resistant steel is presented. The calculation is based on analysis of chip formation zone parameters and takes into account softening of the machined material under action of cutting temperature. The calculation values of tool resistance and torque moment are approximated by polynomial equations, which are used for analysis of technological limitations and optimization of a milling mode.

Keywords: corrosion resistant steel, milling, end mill, hard alloy, torque moment, wear, resistance, polynomial equation.

В аэрокосмической промышленности и машиностроении широко применяют детали различного назначения и разных габаритных размеров из коррозионно-стойкой стали. В связи этим актуальна задача повышения производительности и эффективности механической обработки этих деталей. Один из способов решения этой задачи — использование на многокоординатных станках с программным управлением на оптимальных режимах резания фрез прогрессивных конструкций из современных инструментальных материалов.

При проектировании операции фрезерования рассчитывают режимы резания и технологические ограничения по мощности, крутящему моменту, стойкости инструмента. Для таких расчетов используют полученные в результате специальных исследований количественные уравнения того или иного вида, связывающие характеристики резания

и режимные (управляемые) параметры. Например, на протяжении длительного периода предметом многочисленных исследований является расчет силовых параметров фрезерования. Так, в литературном обзоре работы [1] приведена модель расчета сил резания, предложенная М. Weck, К. Teipel (1977 г.), для которой сила резания записывается как $F = K_a p h$, где a_p — осевая глубина резания, h — толщина срезаемого слоя. Константа K зависит от обрабатываемого материала, скорости резания и определяется экспериментально. Этот подход расширил Y. Altintas, предложивший выражение для расчета сил в виде: $F = K_a p h + K_e a_p$, где K_e — константа, т.е. при $h = 0$ второе слагаемое учитывает влияние режущей кромки [2].

S. A. Tobias, G. Stepan предложили нелинейную зависимость силы от толщины срезаемого слоя [1]: $F = K_a p h^x$, где x — второй экспериментально определяемый параметр.

R. P. N. Faassen использовал комбинацию ряда моделей для тангенциальной и радиальной составляющих силы резания в виде [3]:

$$\left. \begin{aligned} F_t &= K_t a_p h^x + K_{te} a_p; \\ F_r &= K_r a_p h^x + K_{re} a_p, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где коэффициенты K_t , K_{te} , K_r , K_{re} и показатель степени x определены экспериментально.

Развитием изложенного подхода является расширение в настоящее время зарубежными инструментальными фирмами методика расчета сил резания через удельную силу, изложенная подробно в справочнике по обработке резанием GARANT [4]. Согласно этой методике для любого вида лезвийной обработки, в том числе фрезерования, тангенциальная составляющая силы резания может быть определена как

$$F_c = b h K_c K_f = b h^{(1-m)} k_{c11} K_f, \quad (2)$$

где b и h — ширина и толщина срезаемого слоя; K_c — удельная сила резания; K_f — поправочный коэффициент; k_{c11} — удельная сила, приходящаяся на единицу площади среза; m — показатель степени.

Значения удельной силы резания K_c и показателя степени m приведены для групп обрабатываемых материалов в справочной литературе, достаточно подробно — в справочнике [4].

В отечественной справочной литературе для расчета тангенциальной силы P_z фрезерования и скорости v резания используют степенные уравнения вида:

$$\left. \begin{aligned} P_z &= \frac{C_p t^x S_z^y B^u z^p K_p}{d^q n^w}, \\ v &= \frac{C_v d^q K_v}{T^m t^x S_z^y B^u z^p} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где C_p, C_v — постоянные; K_p, K_v — поправочные коэффициенты; T — стойкость инструмента; t — глубина резания; S_z — подача на зуб; B — ширина фрезерования; z — число зубьев фрезы; d — диаметр фрезы; n — частота вращения шпинделя. Показатели степеней в общем случае являются дробными числами.

Серьезным недостатком выражений типа (1)÷(3) является то, что они отражают и обобщают результаты экспериментальных данных, соответствующих конкретным условиям механической обработки. Изменение этих условий принято отражать поправочными коэффициентами, что математически означает пропорциональное масштабирование нелинейных уравнений и может привести к значительным погрешностям аппроксимации.

Кроме того, чтобы получить уравнения (3), необходимо провести значительное число трудоемких экспериментов по однофакторной или многофакторной схемам и учесть влияние шести переменных. Вследствие значительной трудоемкости экспериментальных исследований в литературных источниках отсутствуют уравнения, подобные уравнениям (3), в частности для характеристик резания при фрезеровании современных конструкционных материалов твердосплавными фрезами прогрессивных конструкций.

Обзор литературных источников показал необходимость развития аналитических методов расчета силовых параметров, температуры, износа и стойкости инструмента и других характеристик процесса резания. В статье приведена методика, позволяющая без дополнительных экспериментов рассчитать основные характеристики резания при фрезеровании твердосплавными концевыми фрезами заготовок из коррозионно-стойкой стали. А также разработана методика аппроксимации для получения с высокой точностью многофакторных полиномиальных уравнений, используя полученные расчетные данные.

Расчет характеристик резания при фрезеровании концевой фрезой

Методики расчета параметров резания, разработанные автором статьи, изложены в ряде работ. Например, для условий межоперационного точения конструкционных сталей сборными резцами и для условий сверхточной обработки поверхностей из цветных металлов и сплавов алмазными резцами расчетные методики приведены в учебных пособиях [5, 6]. На их основе рассчитаны характеристики резания для цельной твердосплавной концевой фрезы при обработке пазов и карманов в заготовках из алюминиевых сплавов [7, 8]. В настоящей статье основные положения этих методик обобщены и распространены на случай применения твердосплавной концевой фрезы при обработке заготовок из коррозионно-стойкой стали.

Основной особенностью расчета характеристик резания является возможность учета механических характеристик инструментального и обрабатываемого материалов и их разупрочнения под действием температуры резания, а научная новизна заключается в расчете скорости изнашивания задней поверхности зуба инструмента с последующим расчетом его износа и стойкости.

Подробные схемы, поясняющие расчет толщин среза и сил резания при фрезеровании концевой фрезой, приведены в работах [7, 8]. На рис. 1 в упрощенном виде показана режущая кромка зуба фрезы, состоящая из трех участков: винтовой кромки 1—2 с углом ω_0 наклона к оси фрезы на цилиндрической части; радиусной кромки 2—3 с радиусом r ; торцевой кромки 3—4 под вспомогательным углом ϕ_1 в плане. Радиусная кромка 2—3 разбита на несколько участков, каждый из которых находится на своем радиусе R_i относительно оси фрезы. При горизонтальной подаче торцевая кромка не оказывает влияния на силы резания. Кинематическая схема фрезерования предусматривает вращение фрезы с частотой n и вспомогательное движение подачи D_S (см. рис. 1).

Система координат XYZ с началом в точке 2 имеет ось X по направлению оси фрезы (на рисунке не показана), ось Y по направлению радиуса, ось Z по направлению скорости резания.

На винтовой кромке 1—2 и для каждого участка радиусной кромки 2—3 определены результирующие силы стружкообразования R_c и R_{ci} через касательную силу в плоскости сдвига. Так, для кромки 1—2 сила стружкообразования направлена под углом ω к скорости резания и составляет:

$$R_c = \frac{\tau_p ab}{\sin \beta \cos(\beta + \omega)}, \quad (4)$$

где τ_p — касательные напряжения в плоскости сдвига; β — средний угол сдвига; a, b — толщина и ширина срезаемого слоя.

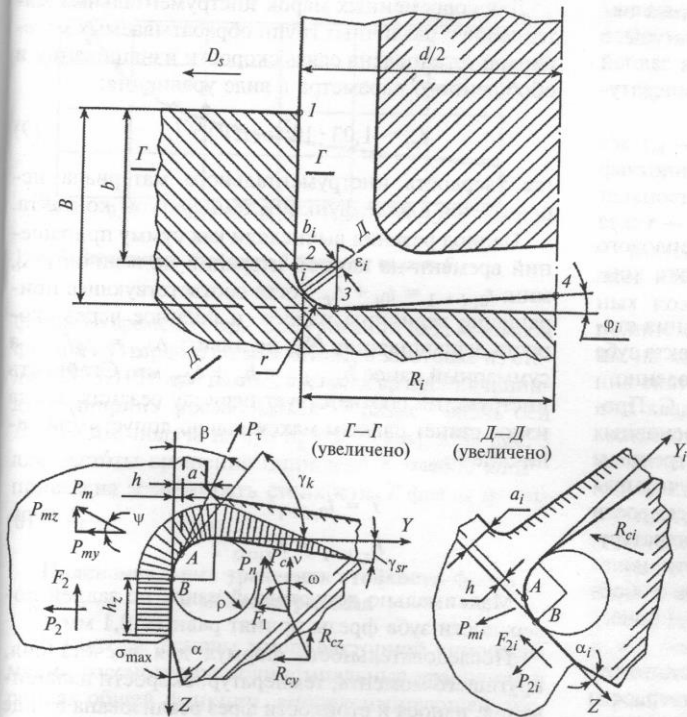


Рис. 1. Схема для расчета сил резания при фрезеровании

Для коррозионно-стойкой стали марки 12Х18Н10Т приняты:

связь касательного напряжения с пределом прочности $\tau_p = 0,9\sigma_b$, МПа;

связь твердости и прочности $HB = \sigma_b/0,345$;

разупрочнение под действием температуры T_d в плоскости сдвига $\sigma_b = 657 - 0,41 T_d$;

уменьшение модуля упругости под действием температуры в плоскости сдвига $E = 200 - 0,077 T_d$, ГПа.

Сила стружкообразования имеет тангенциальные и радиальные составляющие (на рис. 1 не показаны): $R_{cz} = R_c \sin \omega$; $R_{cy} = R_c \cos \omega$. Также из геометрических соотношений определены касательные и нормальные составляющие силы на передней поверхности инструмента: $F_1 = R_c \sin(\omega + \gamma)$; $P_n = R_c \cos(\omega + \gamma)$, где γ — средний передний угол инструмента. Длину контакта стружки с передней поверхностью приняли $l_1 = 2a/\sin \beta$.

Максимальное контактное давление на режущей кромке, выраженное через нормальную силу на передней поверхности и площадь контакта, имеет вид:

$$\sigma_{\max} = \frac{P_n(n_1 + 1)}{l_1 b} \quad (5)$$

Здесь n_1 — показатель степени в выражении для эпюры контактного давления $\sigma_p = \sigma_{\max}(1 - m)^{n_1}$,

где m — относительное расстояние от режущей кромки до точки контакта вдоль передней поверхности инструмента; l_1 — длина контакта стружки. Приняли, что показатель степени $n_1 = 1$, т. е., контактное нормальное давление на передней поверхности распределено по треугольной эпюре. Используя расчетные значения нормального давления, определим результирующую силу P_m на дуге радиусом ρ округления кромки, а также нормальную P_2 и касательную F_2 силы на задней поверхности инструмента:

$$\left. \begin{aligned} P_m &= \sigma_{\max} ABb; \\ P_2 &= \sigma_{\max} h_z b; \\ F_2 &= P_2 f_{tr}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где f_{tr} — коэффициент трения; AB — длина дуги по кромке; b — ширина срезаемого слоя; h_z — износ.

Коэффициент трения по задней поверхности приняли равным молекулярной составляющей: $f_{tr} = (\tau_0/HB + \beta_0)$ (аппроксимации параметров τ_0, β_0 от температуры приведены в учебном пособии [6]). Общая длина контакта по задней поверхности: $l_2 = AB + h_z$.

Главная (тангенциальная) составляющая силы резания определена суммированием по соответствующим направлениям сил, действующих на передней поверхности, дуге округления кромки и на задней поверхности:

$$P_{z1-2} = R_{cz} + P_{mz} + F_2 \quad (7)$$

Аналогично выражения (4)–(7) использованы для расчета главной составляющей силы резания по участкам на радиусной кромке 2–3.

Тогда интегрально можно рассчитать суммарный крутящий момент, действующий на зуб фрезы:

$$M = \frac{P_{z1-2} d}{2000} + \sum_{i=1}^k \frac{P_{zi} R_i}{1000} \quad (8)$$

где d — диаметр фрезы; R_i — радиус участка на кромке 2–3; P_{z1-2} — тангенциальная составляющая силы на кромке 1–2; P_{zi} — тангенциальная составляющая силы на участке кромки 2–3; k — число участков на кромке 2–3.

Если на дуге контакта одновременно находятся несколько зубьев, соответствующие силы необходимо включить в суммирование по выражению (8).

Расчет теплофизических параметров резания выполнен по методике А. Н. Резникова [9]. Для этого на каждой режущей кромке зуба фрезы определены: интенсивности q_d, q_{1r}, q_{2r} тепловых по-

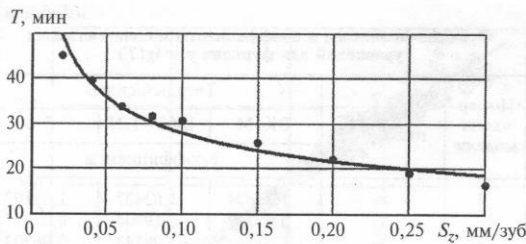


Рис. 3. Зависимость стойкости T фрезы от подачи S_z

фрезы во времени τ при фрезеровании паза концевой фрезой из твердого сплава ВК6М, в заготовке из стали 12Х18Н10Т при разных частотах вращения шпинделя (ширина фрезерования — размер вдоль оси $B = 10$ мм, подача на зуб $S_z = 0,08$ мм), а на рис. 3 для частоты вращения шпинделя $n = 1500$ мин⁻¹ приведена зависимость стойкости T фрезы от подачи S_z .

Полиномиальные уравнения стойкости фрезы и момента резания

В качестве основы многофакторной аппроксимации рассмотрены полиномиальные уравнения в рамках общей функции, аппроксимирующей экспериментальное значение в i -й точке факторного пространства:

$$y_i = \eta(x_i) = \sum_{j=1}^k b_j f_{ij}(x_i); \quad i = 1, 2, \dots, N$$

или в матричном виде

$$y = \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{f}(\mathbf{x}),$$

где N — общее число точек; k — число коэффициентов (членов) модели; x_i — матрица-столбец входных переменных; $f_{ij}(x_i)$ — функции (полиномы); b_j — неизвестные коэффициенты; \mathbf{B} — матрица коэффициентов.

Для расчета коэффициентов полиномиальных многофакторных моделей использован метод стохастической аппроксимации (МСА), который по существу является обобщением метода наименьших квадратов на большие размерности (преимущества и особенности МСА применительно к зависимостям резания металлов подробно разобраны в работах автора).

Алгоритм МСА предусматривает осуществление вычислительных процедур, при которых матрица коэффициентов уточняется на каждой итерации последовательно и многократно по каждой опытной точке, а программный алгоритм предписывает продолжение цикла по базе данных до тех пор, пока средняя погрешность аппроксимации не станет меньше заданной. Общую процедуру для из-

менения матрицы коэффициентов по алгоритму МСА можно представить в виде:

$$\mathbf{B}_r = \mathbf{B}_{r-1} + g_r \cdot \mathbf{f}(x_i) \cdot [y_{ei} - \mathbf{B}_{r-1}^T \cdot \mathbf{f}(x_i)], \quad (11)$$

где y_{ei} — исходное значение функции в i -й точке факторного пространства; g_1, \dots, g_r — последовательность положительных стремящихся к нулю чисел; r — номер итерации.

Метод стохастической аппроксимации позволяет найти новую последовательность неизвестных коэффициентов, составляющих матрицу \mathbf{B} полиномиальной модели, путем уточнения матрицы на каждой итерации без составления и решения систем уравнений, присущих методу наименьших квадратов. Число коэффициентов матрицы \mathbf{B} соответствует числу членов модели, задаваемых матрицей \mathbf{f} функций полиномов для набора значений факторов x_i в каждой опытной точке. Расчетная программа предусматривает ввод значений положительных чисел g_r и d_d , а также взаимодействует с текстовым файлом исходных данных, содержащим N строк последовательных чисел — значений факторов и соответствующего им исходного значения функции в каждой строке. Матрица \mathbf{B} коэффициентов уточняется с использованием данных каждой строки исходного файла в соответствии с выражением (11). После использования всех N строк файла выполняется расчет средней погрешности аппроксимации, которая сравнивается с предыдущим значением этой погрешности, а их разность согласуется с заданным числом d_d .

При реализации метода (11) полиномиальные уравнения можно классифицировать как адаптивные и видоизменять их путем добавления или исключения членов (факторов). Так, при разработке уравнений стойкости полиномиальная модель последовательно усложнялась от линейной до модели третьего порядка.

Полиномиальная модель третьего порядка для пяти исследуемых переменных включает 45 членов и имеет общий вид:

$$y = \lg T = b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_6 x_6 + \dots + b_{44} x_6^2 x_4^2 + b_{45} x_6^2 x_5^2, \quad (12)$$

где T — стойкость, мин; $x_1 = 1$ — фиктивная переменная.

Остальные переменные x_2, \dots, x_6 включены в уравнение (12) в кодированном (безразмерном) виде в соответствии с общей процедурой:

$$x_i = C_{od}(x_{in}, x_{max}, x_{min}) = \frac{2(\lg x_{in} - \lg x_{max})}{\lg x_{max} - \lg x_{min}} + 1, \quad (13)$$

где x_{in} — натуральное значение соответствующей переменной; x_{max}, x_{min} — максимальное и минимальное значения.

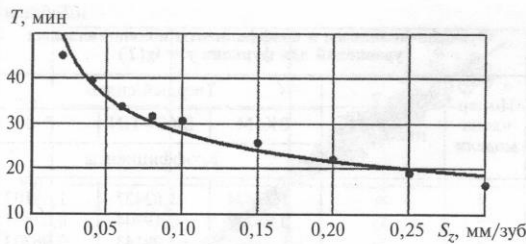


Рис. 3. Зависимость стойкости T фрезы от подачи S_z

фрезы во времени τ при фрезеровании паза концевой фрезой из твердого сплава ВК6М, в заготовке из стали 12Х18Н10Т при разных частотах вращения шпинделя (ширина фрезерования — размер вдоль оси $B = 10$ мм, подача на зуб $S_z = 0,08$ мм), а на рис. 3 для частоты вращения шпинделя $n = 1500$ мин⁻¹ приведена зависимость стойкости T фрезы от подачи S_z .

Полиномиальные уравнения стойкости фрезы и момента резания

В качестве основы многофакторной аппроксимации рассмотрены полиномиальные уравнения в рамках общей функции, аппроксимирующей экспериментальное значение в i -й точке факторного пространства:

$$y_i = \eta(x_i) = \sum_{j=1}^k b_j f_{ij}(x_i); \quad i = 1, 2, \dots, N$$

или в матричном виде

$$y = \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{f}(\mathbf{x}),$$

где N — общее число точек; k — число коэффициентов (членов) модели; x_i — матрица-столбец входных переменных; $f_{ij}(x_i)$ — функции (полиномы); b_j — неизвестные коэффициенты; \mathbf{B} — матрица коэффициентов.

Для расчета коэффициентов полиномиальных многофакторных моделей использован метод стохастической аппроксимации (МСА), который по существу является обобщением метода наименьших квадратов на большие размерности (преимущества и особенности МСА применительно к зависимостям резания металлов подробно разобраны в работах автора).

Алгоритм МСА предусматривает осуществление вычислительных процедур, при которых матрица коэффициентов уточняется на каждой итерации последовательно и многократно по каждой опытной точке, а программный алгоритм предписывает продолжение цикла по базе данных до тех пор, пока средняя погрешность аппроксимации не станет меньше заданной. Общую процедуру для из-

менения матрицы коэффициентов по алгоритму МСА можно представить в виде:

$$\mathbf{B}_r = \mathbf{B}_{r-1} + g_r \cdot \mathbf{f}(x_i) \cdot [y_{ei} - \mathbf{B}_{r-1}^T \cdot \mathbf{f}(x_i)], \quad (11)$$

где y_{ei} — исходное значение функции в i -й точке факторного пространства; g_1, \dots, g_r — последовательность положительных стремящихся к нулю чисел; r — номер итерации.

Метод стохастической аппроксимации позволяет найти новую последовательность неизвестных коэффициентов, составляющих матрицу \mathbf{B} полиномиальной модели, путем уточнения матрицы на каждой итерации без составления и решения систем уравнений, присущих методу наименьших квадратов. Число коэффициентов матрицы \mathbf{B} соответствует числу членов модели, задаваемых матрицей \mathbf{f} функций полиномов для набора значений факторов x_i в каждой опытной точке. Расчетная программа предусматривает ввод значений положительных чисел g_r и d_d , а также взаимодействует с текстовым файлом исходных данных, содержащим N строк последовательных чисел — значений факторов и соответствующего им исходного значения функции в каждой строке. Матрица \mathbf{B} коэффициентов уточняется с использованием данных каждой строки исходного файла в соответствии с выражением (11). После использования всех N строк файла выполняется расчет средней погрешности аппроксимации, которая сравнивается с предыдущим значением этой погрешности, а их разность согласуется с заданным числом d_d .

При реализации метода (11) полиномиальные уравнения можно классифицировать как адаптивные и видоизменять их путем добавления или исключения членов (факторов). Так, при разработке уравнений стойкости полиномиальная модель последовательно усложнялась от линейной до модели третьего порядка.

Полиномиальная модель третьего порядка для пяти исследуемых переменных включает 45 членов и имеет общий вид:

$$y = \lg T = b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_6 x_6 + \dots + b_{44} x_6^2 x_4^2 + b_{45} x_6^2 x_5^2, \quad (12)$$

где T — стойкость, мин; $x_1 = 1$ — фиктивная переменная.

Остальные переменные x_2, \dots, x_6 включены в уравнение (12) в кодированном (безразмерном) виде в соответствии с общей процедурой:

$$x_i = C_{od}(x_{in}, x_{\max}, x_{\min}) = \frac{2(\lg x_{in} - \lg x_{\max})}{\lg x_{\max} - \lg x_{\min}} + 1, \quad (13)$$

где x_{in} — натуральное значение соответствующей переменной; x_{\max}, x_{\min} — максимальное и минимальное значения.

Таблица 2

Функции-полиномы и коэффициенты полиномиальных уравнений для функции $y = \lg(T)$

| Номер члена модели | Функции-полиномы | Твердый сплав | | |
|--------------------|------------------|---------------|----------|----------|
| | | ВК6М | ВК6—TiN | P10 |
| | | Коэффициенты | | |
| 1 | x_1 | 1,73834 | 1,62427 | 1,38102 |
| 2 | x_2 | 0,08277 | 0,19304 | 0,07807 |
| 3 | x_3 | -1,21845 | -1,09143 | -0,96703 |
| 4 | x_4 | -0,08779 | -0,17526 | -0,04954 |
| 5 | x_5 | -0,15862 | -0,35595 | -0,15543 |
| 6 | x_6 | -0,10059 | -0,21186 | -0,10091 |
| 7 | x_2^2 | -0,02212 | -0,04929 | 0,001 |
| 8 | x_3^2 | -0,00339 | 0,02081 | 0,06872 |
| 9 | x_4^2 | 0,00178 | 0,02216 | 0,04203 |
| 10 | x_5^2 | -0,06859 | -0,2218 | -0,09368 |
| 11 | x_6^2 | 0,00765 | 0,00781 | 0,02014 |
| 12 | x_2x_3 | 0,07677 | 0,23047 | 0,06536 |
| 13 | x_2x_6 | 0,0274 | 0,10192 | 0,00588 |
| 14 | x_2x_4 | 0,01557 | 0,0226 | -0,04664 |
| 15 | x_2x_5 | 0,06247 | 0,21063 | 0,07488 |
| 16 | x_3x_4 | -0,06179 | -0,18425 | -0,04889 |
| 17 | x_3x_5 | -0,09933 | -0,28791 | -0,10863 |
| 18 | x_3x_6 | -0,05605 | -0,16036 | -0,03569 |
| 19 | x_4x_5 | -0,04984 | -0,1787 | -0,06181 |
| 20 | x_4x_6 | -0,01812 | -0,07387 | 0,00229 |
| 21 | x_6x_5 | -0,03632 | -0,13694 | -0,02581 |
| 22 | x_3^3 | -0,13957 | -0,20502 | -0,18566 |
| 23 | x_4^3 | 0,00645 | 0,02351 | 0,01183 |
| 24 | x_5^3 | 0,00688 | -0,04892 | -0,07108 |
| 25 | x_6^3 | -0,00522 | -0,0151 | -0,0091 |
| 26 | $x_2x_3^2$ | 0,01636 | -0,02141 | 0,00229 |
| 27 | $x_2x_6^2$ | -0,00869 | -0,02022 | -0,00999 |
| 28 | $x_2x_4^2$ | -0,00013 | -0,05034 | -0,03757 |
| 29 | $x_2x_5^2$ | 0,01876 | 0,10171 | 0,05003 |
| 30 | $x_3x_2^2$ | -0,01142 | -0,03452 | -0,00525 |
| 31 | $x_3x_4^2$ | 0,0062 | 0,0138 | 0,0047 |
| 32 | $x_3x_5^2$ | -0,05114 | -0,17653 | -0,07842 |
| 33 | $x_3x_6^2$ | 0,00573 | 0,01029 | 0,00731 |
| 34 | $x_4x_2^2$ | -0,01371 | -0,00139 | 0,00264 |
| 35 | $x_4x_3^2$ | -0,02118 | -0,02651 | -0,02294 |
| 36 | $x_4x_5^2$ | -0,00901 | -0,07936 | -0,04042 |
| 37 | $x_4x_6^2$ | 0,00834 | 0,01779 | 0,00697 |
| 38 | $x_5x_2^2$ | -0,00041 | -0,0026 | 0,00091 |
| 39 | $x_5x_3^2$ | -0,04934 | -0,08341 | -0,04994 |
| 40 | $x_5x_4^2$ | -0,00035 | -0,00736 | 0,00027 |
| 41 | $x_5x_6^2$ | 0,0014 | -0,00221 | 0,00333 |
| 42 | $x_6x_2^2$ | -0,00966 | -0,03472 | -0,00864 |
| 43 | $x_6x_3^2$ | -0,01682 | -0,0069 | -0,00912 |
| 44 | $x_6x_4^2$ | 0,0088 | 0,02135 | 0,00721 |
| 45 | $x_6x_5^2$ | -0,01412 | -0,06946 | -0,01127 |

Примечание. Кодирование переменных – по выражениям (14).

В соответствии с процедурой (13) связь кодированных и натуральных значений переменных, входящих в уравнение (12), принимает вид:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= 1; \\ x_2 &= C_{od}(d; 40; 4); \\ x_3 &= C_{od}(v; 200; 25) \text{ — для ВК8, ВК6М}; \\ x_3 &= C_{od}(v; 250; 50) \text{ — для ВК6—TiN, P10}; \\ x_4 &= C_{od}(t; 16; 2); \\ x_5 &= C_{od}(S_z; 0,3; 0,02); \\ x_6 &= C_{od}(B; 20; 2,5), \end{aligned} \right\} (14)$$

где d — диаметр фрезы, мм; v — скорость резания, м/мин; t — глубина фрезерования (размер, перпендикулярный оси фрезы), мм; S_z — подача, мм/зуб; B — ширина, мм.

Предварительно была программно сформирована "сетка" сочетаний пяти рассмотренных переменных на пяти уровнях каждой переменной, всего $N = 5^5 = 3125$ точек в пределах минимальных и максимальных значений по процедурам (14). Из этих точек исключены технически невыполнимые точки по условию $t > d$, т. е. для фрезерования концевой фрезой его глубина не может быть больше диаметра фрезы. По оставшимся $N = 2500$ точкам сочетаний переменных выполнен расчет стойкости (10) и крутящего момента (8), и таким образом были сформированы исходные базы данных для аппроксимации полиномиальными уравнениями. Из исходной базы данных дополнительно были исключены точки с очень малыми значениями стойкости.

Последовательно рассмотрены следующие полиномиальные модели для расчета стойкости: линейная, квадратичная, квадратичная со взаимодействиями переменных, третьего порядка со взаимодействиями переменных. Модели последовательно усложнялись для анализа и уменьшения погрешностей аппроксимации. В табл. 1 приведены результаты анализа. Для каждой модели указаны: число k членов; средняя квадратичная погрешность Q_{ksr} ; средняя арифметическая погрешность Q_{ar} ; соот-

Таблица 1

Результаты анализа аппроксимации стойкости концевых фрез полиномиальными уравнениями

| Модель | Число членов k | Погрешность, мин | | Связь расчетных и исходных значений |
|--------------------------------------|------------------|------------------|----------|-------------------------------------|
| | | Q_{ksr} | Q_{ar} | |
| Линейная | 6 | 28,2 | 8,8 | $T_p = 1,11 T_i$ |
| Квадратичная | 11 | 25,3 | 8,3 | $T_p = 1,09 T_i$ |
| Квадратичная со взаимодействиями | 21 | 6,8 | 2,7 | $T_p = 0,99 T_i$ |
| Третьего порядка со взаимодействиями | 45 | 5,4 | 2,4 | $T_p = 1,00 T_i$ |

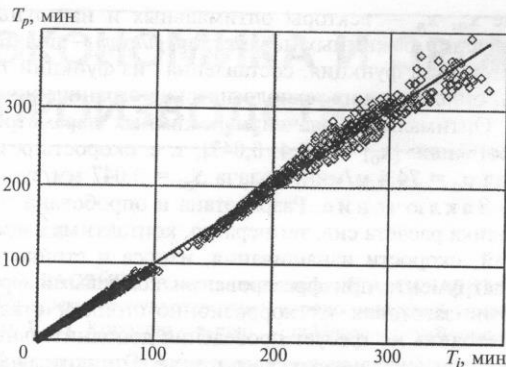


Рис. 4. Связь исходных значений стойкости T_i фрезы по базе данных и расчетных значений T_p по полиномиальному уравнению третьего порядка

ношение расчетного значения T по полиномиальному уравнению с исходным значением из базы данных. Следует отметить, что при переходах от линейной модели до модели третьего порядка погрешность уменьшилась в несколько раз.

В табл. 2 приведены функции-полиномы, составляющие модель третьего порядка со взаимодействиями переменных для расчета стойкости, и даны коэффициенты, соответствующие различным маркам твердых сплавов и рассчитанные по алгоритму (11).

В качестве примера на рис. 4 графически показана связь между исходными значениями стойкости T_i по базе данных и расчетными значениями T_p по полиномиальному уравнению, представленному в табл. 2 для твердого сплава марки ВК6М. Связь — практически линейная, характеристики связи и погрешности аппроксимации приведены в табл. 1, число точек $N = 2450$.

Аналогичные результаты аппроксимации получены для крутящего момента.

Анализ полиномиальных уравнений

В основу анализа уравнений положено построение линий уровня соответствующих функций в координатной плоскости "скорость резания — подача". Для построения линии уровня использована стандартная функция MATLAB *contour*. На рис. 5 для условий фрезерования заготовки из стали марки 12Х18Н10Т концевой фрезой из ВК6М приведены линии уровня, соответствующие стойкости $T = 30, 90, 150$ мин. Для расчета использовано полиномиальное уравнение (12) с соответствующими коэффициентами, приведенными в табл. 2 (диаметр фрезы $d = 16$ мм, глубина резания $t = 16$ мм, ширина фрезерования $B = 10$ мм).

Из графиков видно существенное влияние скорости резания на стойкость фрезы. Подача также влияет на стойкость, но в меньшей степени, чем скорость.

Аналогичный характер имеют линии уровня для различных значений диаметра фрезы, глубины резания, ширины фрезерования.

На рис. 6 приведены линии уровня стойкости $T = 90$ мин для концевой фрезы из разных твердых сплавов: мелкозернистого ВК6М, особо мелкозернистого Р10, с износостойким покрытием ВК6-TiN. Графики количественно подтверждают, что особо мелкозернистые твердые сплавы и твердые сплавы с износостойким покрытием позволяют значительно повысить скорость фрезерования.

Разработанные уравнения использованы для оптимизации режимных параметров фрезерования. Рассмотрена операция фрезерования паза на заготовке из стали марки 12Х18Н10Т концевой фрезой из особо мелкозернистого сплава Р10, диаметр фрезы $d = 16$ мм, глубина фрезерования $t = 16$ мм, ширина фрезерования $B = 10$ мм. В качестве целевой функции оптимизации принята минимизация штучного времени на операции.

Рассмотрены технологические ограничения:

по стойкости инструмента $F_1 = T(v, S_2) - T_z$, где $T(v, S_2)$ — стойкость по полиномиальному уравнению (12) с коэффициентами по табл. 2; $T_z = 90$ мин — минимальная стойкость;

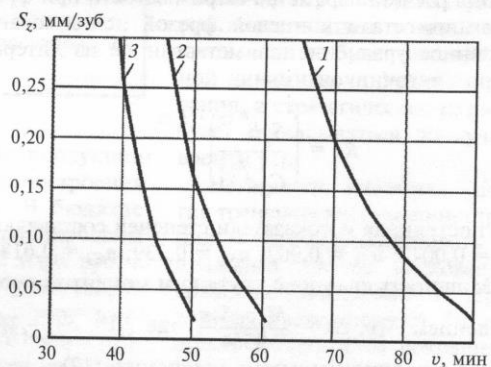


Рис. 5. Линии уровня, соответствующие стойкости $T = 30$ (1), 90 (2), 150 мин (3) твердосплавной концевой фрезы при обработке заготовки из коррозионно-стойкой стали

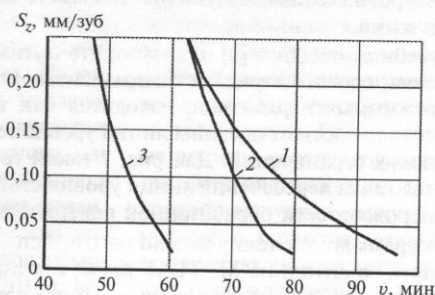


Рис. 6. Линии уровня, соответствующие стойкости $T = 90$ мин концевых фрез из твердых сплавов ВК6-TiN (1), Р10 (2), ВК6М (3) при обработке заготовки из коррозионно-стойкой стали

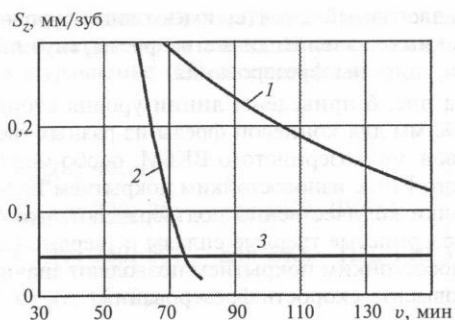


Рис. 7. Линии уровня, соответствующие технологическим ограничениям:

1 — мощности привода станка $N = 7,5$ кВт; 2 — стойкости $T = 90$ мин; 3 — шероховатости $Ra = 3$ мкм

по шероховатости обработанной поверхности $F_2 = Ra_z - Ra(v, S_z)$, где $Ra_z = 3$ мкм — заданная шероховатость обработанной поверхности; $Ra(v, S_z)$ — шероховатость как функция скорости и подачи;

по мощности привода станка $F_3 = N_z - N(v, S_z)$, где $N_z = 7,5$ кВт — заданная мощность привода станка, $N(v, S_z)$ — мощность как функция скорости и подачи.

Для расчета параметра шероховатости при фрезеровании стали концевой фрезой использовано степенное уравнение, заимствованное из литературных источников:

$$Ra = \left(\frac{S_z B^{n_{S2}}}{C_S d^{n_{S1}}} \right)^{1/n_{S3}},$$

где постоянная и показатели степеней составляют: $C_S = 0,0043$; $n_{S1} = 0,902$; $n_{S2} = 0,339$; $n_{S3} = 0,618$.

Мощность связана с крутящим моментом соотношением $N(v, S) = \frac{M(v, S)n}{9554}$, где $M(v, S)$ — момент по полиномиальному уравнению (12).

Для иллюстрации решения на рис. 7 в координатной плоскости "скорость — подача" приведены линии уровня соответствующих технологических ограничений.

В учебном пособии [6] показано, что оптимальная точка, соответствующая оптимальному значению режимных параметров, находится как точка пересечения соответствующих линий уровня технологических ограничений. Для рис. 7 такой точкой является точка пересечения линии уровня стойкости и шероховатости обработанной поверхности.

Программно эту точку можно найти, используя стандартную функцию MATLAB *fsolve*, предназначенную для решения системы нелинейных уравнений:

$$[x_0] = fsolve(@funvsp, [x_n]),$$

где x_0, x_n — векторы оптимальных и начальных значений режимных параметров, *funvsp* — пользовательская функция, составленная из функций F_1, F_2 , описывающих технологические ограничения.

Оптимальные значения режимных параметров составили: $[x_0] = [74,4; 0,047]$, т. е. скорость резания $v_0 = 74,4$ м/мин, подача $S_{z0} = 0,047$ мм/зуб.

Заключение. Разработана и опробована методика расчета сил, температур, контактных давлений, скорости изнашивания, износа и стойкости инструмента при фрезеровании концевыми фрезами заготовок из коррозионно-стойкой стали. Методика не требует проведения дополнительных экспериментальных исследований. Отличительной особенностью методики является учет влияния разупрочнения обрабатываемого и инструментального материалов под действием температуры резания. Методика может быть распространена на другие виды и условия обработки.

Расчетные значения стойкости и крутящего момента резания аппроксимированы многофакторными полиномиальными моделями.

Полиномиальные модели рекомендованы для расчета или оптимизации режимных параметров фрезерования.

Оптимальные значения режимных параметров найдены как точка пересечения технологических ограничений по стойкости инструмента и шероховатости обработанной поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Rott O., Homberg D., Mense C. A comparison of analytical cutting force models // Preprint N. 1151, WIAS, Berlin, 2006. 23 p.
2. Altintas Y. Manufacturing Automation. Cambridge University Press, 2000. 286 p.
3. Prediction of regenerative chatter by modelling and analysis of high-speed milling / R. P. H. Faassen, N. van de Wouw, J. A. J. Oosterling, H. Nijmeijer // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 43 (2003). P. 1437–1446.
4. GARANT. Справочник по обработке резанием. http://www.hoffmann-group.com/fileadmin/catalog/en/BK_ZHB_2009_en/blaetterkatalog/index.html.
5. Грубый С. В. Моделирование процесса резания твердосплавными и алмазными резцами: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 107 с.
6. Грубый С. В. Физические закономерности процесса изнашивания твердосплавных и алмазных инструментов: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. 123 с.
7. Грубый С. В., Зайцев А. М. Исследование концевых фрез при фрезеровании корпусных деталей из алюминиевых сплавов // Наука и образование. Электронное научно-техническое издание. 2013. № 12. <http://technomag.bmstu.ru/doc/634375.html>
8. Грубый С. В., Зайцев А. М. Обоснование условий фрезерования карманов в корпусных деталях из алюминиевых сплавов // Наука и образование. Электронное научно-техническое издание. 2014. № 5. <http://technomag.bmstu.ru/doc/709770.html>
9. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.