

УДК 621.941.1

doi: 10.18698/0536-1044-2022-8-13-23

Разработка полиномиальных уравнений для выходных показателей точения

С.В. Грубый

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Development of Polynomial Equations for Output Indicators of Turning

S.V. Grubyu

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрена методика аппроксимации значительных по объему исходных данных полиномиальными уравнениями для выходных показателей точения сборными резцами. Входные переменные — скорость и глубина резания, подача, износ инструмента и главный угол в плане — включены в состав уравнения в кодированном виде. К выходным показателям отнесены скорость изнашивания инструмента, составляющие силы резания и ее температура. Исходные данные получены расчетным путем на основании анализа общей модели изнашивания инструмента и содержат более 28 000 значений по каждому показателю. Разработанные полиномиальные уравнения предназначены для расчета или оптимизации режимных параметров точения протяженных поверхностей со сложным профилем. Используемые алгоритмы и аналогичные полиномиальные уравнения можно применять для аппроксимации исходных данных по различным видам механической обработки.

Ключевые слова: аппроксимация исходных данных, полиномиальные уравнения, режимные параметры точения, сборный резец, скорость изнашивания инструмента, сила и температура резания

The article considers a technique for approximating significant initial data by polynomial equations for the output indicators of turning with prefabricated cutters. Input variables — speed and depth of cut, feed, tool wear and lead angle — are included in the equation in a coded form. The output indicators include the tool wear rate, the force components and the cutting temperature. The initial data were obtained by calculation based on the analysis of the general tool wear model and contain more than 28,000 values for each indicator. The developed polynomial equations are designed for calculating or optimizing the operating parameters of turning extended surfaces with a complex profile. The algorithms used and similar polynomial differential equations are recommended for approximating the initial data for various types of mechanical processing.

Keywords: approximating the initial data, polynomial equations, operating parameters of turning, prefabricated cutter, tool wear rate, cutting force and temperature

Назначение режимных параметров механической обработки можно рассматривать как многостадийный процесс, включающий в себя следующие этапы: выбор производственных и инструментальных фирм по справочной литературе и рекомендациям; расчет по методикам,

изложенным, например, в учебном пособии [1]; оптимизация как выбор лучшего варианта из возможных.

В общем виде методы оптимизации достаточно полно рассмотрены в специальной научной и учебной литературе. Эти методы посто-

янно развиваются вследствие усложнения задач управления процессом механической обработки. Так, в работах [2, 3] приведены основные понятия, теоремы и методы решения задач многокритериальной оптимизации. Допустимые варианты технологии и режимных параметров выбирают исходя из результатов многокритериального анализа. Методы оптимизации применяют в совокупности с методами компьютерного моделирования и программирования, используя различные программные продукты CAD/CAM/CAE/PDM-систем [4] и др.

Традиционная методика расчета режимов резания на операциях механической обработки основана на применении степенных уравнений для определения скорости и составляющих силы резания, крутящего момента и параметров шероховатости обработанной поверхности с табличными значениями параметров, входящих в состав этих уравнений.

Использование степенных уравнений имеет существенные недостатки:

- малое количество вариантов обрабатываемых (ОМ) и инструментальных материалов (ИМ) по отдельным видам обработки, для которых известны значения этих режимных параметров;
- использование поправочных коэффициентов для расширения области применения степенных уравнений по маркам ОМ и ИМ, геометрическим параметрам инструмента, что может привести к значительным погрешностям;
- отсутствие учета износа инструмента в степенных зависимостях, в то время как этот параметр оказывает существенное влияние на выходные показатели.

Наряду со степенными зависимостями для аппроксимации экспериментальных или расчетных данных широко используют полиномиальные уравнения [5, 6]. Применяют методы повышения точности аппроксимирующих полиномов путем увеличения степени полинома и количества членов, разбиения исходных данных на несколько частей и др. [7]. Разрабатывают или используют алгоритмы прикладных задач аппроксимации, реализуемые, например, в программной среде MATLAB [8].

Цель исследования — разработка полиномиальных уравнений, устанавливающих связь между входными переменными и выходными показателями точения и аппроксимирующих значительный объем экспериментальных или расчетных данных.

В работе [9] предложено использовать автоматизированный расчет скорости изнашивания, износа и периода резания (стойкости) инструмента, составляющих силы резания и шероховатости поверхности, что позволяет оперативно получать результаты для любого варианта исходных данных. В основу автоматизированного расчета положена модель стружкообразования пластичных материалов с условной плоскостью сдвига, положение которой относительно направления скорости резания задано углом сдвига.

В учебном пособии [10] получена формула для расчета среднего значения угла сдвига, учитывающая влияние параметров срезаемого слоя и упругих свойств ОМ и ИМ. Угол сдвига принят переменным вдоль кромки, что позволяет детально представить форму поверхности сдвига и стружки, а также выполнить расчет силы стружкообразования.

Через силы стружкообразования определены суммарные составляющие силы резания, действующие на резец со стороны передней поверхности. Контактные давления найдены через силы резания и площади контакта на поверхностях лезвия с учетом общепринятых эпюр их распределения. Силы, действующие на задней поверхности, вычислены через контактные давления и средний коэффициент трения. Тангенциальная P_z , радиальная P_y и осевая P_x составляющие силы резания учитывают их воздействие со стороны передней и задней поверхностей.

В расчетах разупрочнение под действием температуры различных марок сталей и сплавов учтено по результатам испытаний, приведенным в справочной литературе. Для каждой марки ОМ подобрано уравнение, аппроксимирующее влияние температуры. Разупрочнение ИМ также учтено при моделировании процесса.

Для теплофизического расчета рассмотрены источники теплоты деформации в зоне стружкообразования и трения на передней и задней контактных площадках. Определены интенсивности итоговых тепловых потоков и температуры деформации (на поверхности сдвига) на передней и задней поверхностях.

Температура резания отражает усредненный вклад температур контактных площадок. Для выбранной пары ИМ — ОМ влияние режимных параметров сказывается через изменение температуры резания, а следовательно, и физических параметров материалов.

Установленные количественные связи и внутренние аппроксимации физической модели позволяют охарактеризовать процесс изнашивания задней поверхности инструмента с помощью скорости изнашивания в направлении вектора скорости резания (тангенциальной) I_{nt} , мм/мин. Для расчета скорости изнашивания и износа инструмента использован обобщенный параметр, справедливость применения которого подтверждена для разных групп ОМ в монографии [11].

В качестве обобщенного параметра предложено отношение скорости резания инструмента v , м/с, к твердости по Виккерсу HV, МПа, в функции температуры резания T_p , °С:

$$x = v / HV(T_p).$$

Функционально скорость изнашивания связана с обобщенным параметром $I_{nt} = f(x)$ степенными уравнениями для отдельных групп ОМ: конструкционных углеродистых или легированных сталей и сплавов, титановых сплавов и закаленных сталей. Эти уравнения используются для расчета скорости изнашивания, износа и стойкости инструмента. Методика расчета кривых износа численным интегрированием раскрыта в учебном пособии [9].

Установленные количественные связи и внутренние аппроксимации позволяют рассчитать скорость изнашивания инструмента по его задней поверхности. Значения скорости изнашивания соответствуют значению износа и использованы для вычисления стойкости инструмента путем численного интегрирования.

Полиномиальные уравнения применены для обработки массивов исходных расчетных данных. Рассмотрены полиномиальные уравнения аппроксимирующей исходное значение функции в i -й точке факторного пространства

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

или в матричном виде

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

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

Для расчета коэффициентов полиномиальных уравнений использован метод стохастической аппроксимации (МСА), являющийся

обобщением метода наименьших квадратов на большой объем данных. МСА не накладывает ограничений на число и расположение точек в факторном пространстве, на количество, порядок, вид взаимодействия факторов и число членов моделей [11].

Алгоритм МСА предусматривает выполнение вычислительных процедур, в соответствии с которым матрица коэффициентов уточняется на каждой итерации последовательно и многократно по каждой опытной точке, а программный алгоритм предписывает цикл по базе данных до тех пор, пока средняя погрешность аппроксимации не станет меньше заданной.

Общую процедуру МСА можно представить в виде

$$\mathbf{B}_r = \mathbf{B}_{r-1} + g_r \cdot \mathbf{f}(x_i) \cdot [y_i - \mathbf{B}'_{r-1} \cdot \mathbf{f}(x_i)], \quad (1)$$

где r — номер итерации, $r = 1, 2 \dots$; g_r — последовательность положительных стремящихся к нулю чисел.

Алгоритм МСА (1) использован для аппроксимации расчетных значений скорости изнашивания инструмента, тангенциальной составляющей силы и температуры резания, как показано в учебном пособии [9].

Для каждого варианта исходных данных (геометрических параметров инструмента, ИМ, ОМ) принята следующая последовательность расчета:

- формирование сетки, содержащей 125 расчетных точек в факторном пространстве размерных переменных: скорости резания v , м/мин, глубины резания t , мм, подачи s , мм/об;
- автоматизированный расчет в каждой точке зависимостей скорости изнашивания по задней поверхности инструмента I_{nt} , его износа по задней поверхности h_z , температуры резания T_p , тангенциальной P_z или радиальной P_y составляющих силы резания от времени τ ; каждая зависимость включает в себя 25 расчетных точек, вследствие чего формируется общая исходная матрица для последующей аппроксимации выходных показателей в виде текстового файла, состоящего из 3125 строк, каждая из которых содержит значения входных размерных переменных и расчетных показателей (v , t , s , h_z , I_{nt} , τ , T_p , P_z);
- аппроксимация каждой выходной переменной (скорости изнашивания инструмента, температуры резания, тангенциальной составляющей силы резания) одинаковым по структуре полиномиальным уравнением.

Полиномиальное уравнение включает в себя 41 член и записывается для каждого выходного показателя в общем виде

$$y_1 = \ln(I_{nt}) = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_{41}x_2x_3x_5^2;$$

$$y_2 = \ln(P_z) = \dots;$$

$$y_3 = \ln(T_p) = \dots$$

Коэффициенты полиномиальных уравнений рассчитываются по алгоритму МСА (1) с процедурой кодирования переменных:

$$\begin{aligned} x_1 &= 1; \\ x_2 &= C_{od}(v, v_{\max}, v_{\min}); \\ x_3 &= C_{od}(t, t_{\max}, t_{\min}); \\ x_4 &= C_{od}(s, s_{\max}, s_{\min}); \\ x_5 &= C_{od}(h_z, h_{z\max}, h_{z\min}). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь C_{od} — функция кодирования, которая переводит размерные переменные в безразмерные так, что минимальное значение (min) соответствует -1 , а максимальное (max) — $+1$:

$$\begin{aligned} x_i &= C_{od}(p_i, p_{i\max}, p_{i\min}) = \\ &= 2 \frac{\ln p_i - \ln p_{i\max}}{\ln p_{i\max} - \ln p_{i\min}} + 1, \end{aligned} \quad (3)$$

где p_i , $p_{i\max}$ и $p_{i\min}$ — текущее, максимальное и минимальное значение размерной переменной соответственно.

Для примера в табл. 1 приведены максимальные и минимальные (предельные) значения переменных для двух пар материалов ИМ — ОМ: твердый сплав Т15К6 — углеродистая сталь 45 и твердый сплав ВК6М — коррозионностойкая сталь 12Х18Н10Т. Приняты условия обработки сборным резцом, оснащенный сменной многогранной пластиной, (далее сборный резец) формы WNUM-100412; главный угол в плане $\varphi = 90^\circ$.

Матрицы полиномов и коэффициентов для уравнения $y = \ln(I_{nt})$, аппроксимирующего скорость изнашивания задней поверхности сборного резца, для двух пар материалов ИМ — ОМ приведены в табл. 2. Здесь введены следующие обозначения: K_1 — коэффициенты для пары материалов твердый сплав Т15К6 — сталь 45;

K_2 — коэффициенты для пары материалов твердый сплав ВК6М — коррозионностойкая сталь 12Х18Н10Т. Переменные указаны в кодированном (безразмерном) виде (2) с предельными значениями, взятыми из табл. 1.

Выполнен анализ стойкости токарных сборных резцов. Использованы полиномиальные уравнения, характеризующие скорость изнашивания задней поверхности инструмента, с полиномами и коэффициентами, приведенными в табл. 2. Условия точения приняты одинаковыми: скорость резания $v = 80$ м/мин; глубина $t = 2$ мм, подача $s = 0,3$ мм/об.

Задавая дискретное значение по износу, устанавливали связь износа по задней поверхности, скорости изнашивания сборного резца и времени обработки для двух пар ИМ — ОМ: твердый сплав ВК6М — коррозионностойкая сталь 12Х18Н10Т и твердый сплав Т15К6 — сталь 45 (рис. 1). Приняв в качестве критерия затупления износ $h_z = 0,3$ мм, определили стойкость инструмента: 27,7 и 60,0 мин соответственно.

Изменяя условия расчета, можно получить зависимости, отражающие влияние скорости резания, ее глубины и подачи на стойкость сборного резца. В качестве примера на рис. 2 приведены зависимости стойкости от скорости резания сборного резца для указанных пар ИМ — ОМ, глубины резания и подачи.

Поверхность заготовки для токарной обработки состоит из цилиндрических, торцевых, конических, сферических поверхностей. Наибольшую сложность для расчета режимных параметров представляет сферическая поверхность, так как углы в плане токарного резца изменяются при его движении вдоль образующей.

Имеется ряд литературных источников, в частности монография [12], где приведены результаты расчета режимных параметров точения таких поверхностей с применением степенных уравнений. Таким образом, в методику расчета режимных параметров заложены недостатки, присущие степенным уравнениям, указанные ранее.

Таблица 1

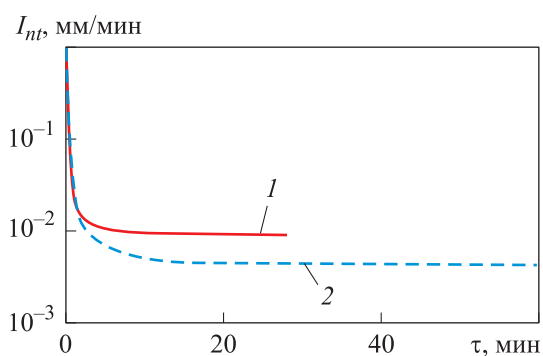
Предельные значения переменных

| ИМ | ОМ | v_{\max} , М/МИН | v_{\min} , М/МИН | t_{\max} , ММ | t_{\min} , ММ | s_{\max} , ММ/ОБ | s_{\min} , ММ/ОБ | $h_{z\max}$, ММ | $h_{z\min}$, ММ |
|-------|-----------|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|
| Т15К6 | Сталь 45 | 330 | 60 | 4 | 0,7 | 0,5 | 0,07 | 0,5 | 0,02 |
| ВК6М | 12Х18Н10Т | 280 | 40 | 4 | 0,7 | 0,5 | 0,10 | 0,5 | 0,02 |

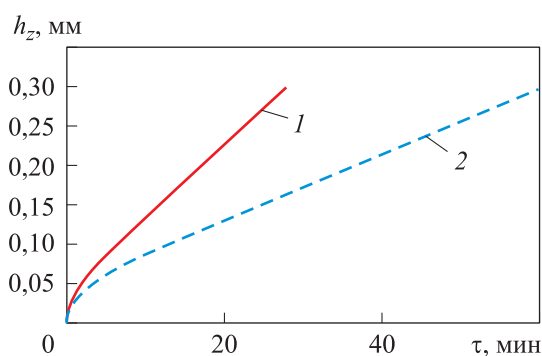
Таблица 2

Матрицы полиномов и коэффициентов для уравнения скорости изнашивания задней поверхности сборного резца $y = \ln(I_{nt})$

| Номер члена уравнения | Полином | K_1 | K_2 | Номер члена уравнения | Полином | K_1 | K_2 |
|-----------------------|-------------|---------|---------|-----------------------|----------------|---------|---------|
| 1 | x_1 | -4,1240 | -4,0891 | 22 | $x_2x_4^2$ | -0,0761 | 0,0582 |
| 2 | x_2 | 2,4110 | 2,8148 | 23 | $x_2x_3^2$ | -0,0216 | -0,0680 |
| 3 | x_3 | 0,3521 | 0,4069 | 24 | $x_2x_5^2$ | -0,8479 | -1,0627 |
| 4 | x_4 | 0,5874 | 0,5739 | 25 | $x_4x_5^2$ | -0,2439 | -0,2075 |
| 5 | x_5 | -0,4612 | -0,4201 | 26 | $x_2^2x_5$ | -0,1146 | -0,1899 |
| 6 | x_2^2 | 0,2707 | 0,4743 | 27 | $x_4^2x_5$ | 0,0227 | 0,0222 |
| 7 | x_4^2 | 0,0216 | -0,0730 | 28 | $x_3^2x_5$ | -0,0559 | -0,0904 |
| 8 | x_5^2 | 1,0663 | 1,0942 | 29 | $x_3x_5^2$ | -0,1441 | -0,1863 |
| 9 | x_3x_4 | 0,0296 | -0,0483 | 30 | x_2^4 | -0,2070 | -0,3565 |
| 10 | x_2x_3 | 0,1184 | 0,2025 | 31 | x_4^4 | -0,0532 | 0,1098 |
| 11 | x_2x_4 | 0,1692 | 0,0574 | 32 | x_5^4 | 0,4165 | 0,4000 |
| 12 | x_2x_5 | 0,3709 | 0,4077 | 33 | $x_2x_3x_4x_5$ | -0,0171 | -0,0574 |
| 13 | x_4x_5 | 0,1269 | 0,0771 | 34 | $x_2x_5^3$ | 0,5922 | 0,7426 |
| 14 | x_3x_5 | 0,0542 | 0,0244 | 35 | $x_4x_5^3$ | 0,1211 | 0,0531 |
| 15 | x_2^3 | 0,2247 | 0,3638 | 36 | $x_3x_5^3$ | 0,0747 | 0,1058 |
| 16 | x_4^3 | 0,0690 | -0,0680 | 37 | $x_2^3x_5$ | -0,1598 | -0,2043 |
| 17 | x_3^3 | 0,0491 | 0,0924 | 38 | $x_4^3x_5$ | -0,0987 | -0,0570 |
| 18 | x_5^3 | -1,2292 | -1,2172 | 39 | $x_3^3x_5$ | -0,0446 | -0,0586 |
| 19 | $x_2x_3x_4$ | -0,0219 | -0,0752 | 40 | $x_2^2x_5^2$ | 0,1815 | 0,2022 |
| 20 | $x_2^2x_3$ | 0,0176 | 0,0257 | 41 | $x_2x_3x_5^2$ | -0,0126 | -0,0575 |
| 21 | $x_2^2x_4$ | 0,0311 | 0,0002 | - | - | - | - |



а



б

Рис. 1. Зависимости скорости изнашивания I_{nt} (а) и износа по задней поверхности h_z (б) сборного резца от времени обработки τ для двух пар ИМ — ОМ:

1 — твердый сплав ВК6М — коррозионностойкая сталь 12Х18Н10Т; 2 — твердый сплав Т15К6 — сталь 45

В полиномиальные уравнения добавлены члены, учитывающие влияние главного угла в плане сборного резца. Для расчета скорости

изнашивания инструмента I_{nt} , мм/мин, тангенциальной P_z и радиальной P_y составляющих силы резания, Н, температуры резания T_p , °С,

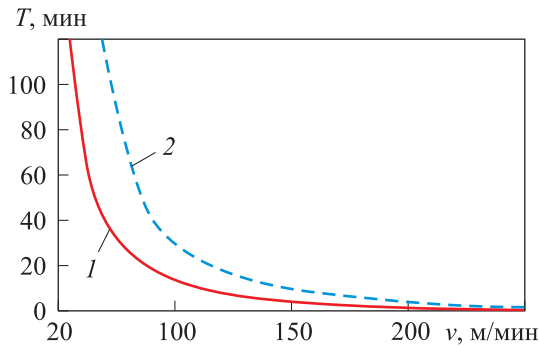


Рис. 2. Зависимости стойкости T от скорости резания v сборного резца для двух пар ИМ — ОМ: 1 — твердый сплав ВК6М — коррозионностойкая сталь 12Х18Н10Т; 2 — твердый сплав Т15К6 — сталь 45

разработаны одинаковые по структуре полиномиальные уравнения, каждое из которых содержит 51 член:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= \ln(I_{nt}) = f(v, t, s, h_z, \varphi) = b_1 x_1 + \\
 &+ b_2 x_2 + \dots + b_{41} x_2 x_3 x_5^2 + b_{42} x_6 + \dots + b_{51} x_4^2 x_6; \\
 y_2 &= \ln(P_z) = \dots; \\
 y_3 &= \ln(T_p) = \dots; \\
 y_4 &= \ln(P_y) = \dots; \\
 f_1 &= I_{nt} = \exp(y_1); \\
 P_z &= \exp(y_2); \\
 T_p &= \exp(y_3); \\
 P_y &= \exp(y_4).
 \end{aligned} \quad (4)$$

Переменные включены в состав уравнения в кодированном виде:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= 1; \\
 x_2 &= C_{od}(v, v_{\max}, v_{\min}); \\
 x_3 &= C_{od}(t, t_{\max}, t_{\min}); \\
 x_4 &= C_{od}(s, s_{\max}, s_{\min}); \\
 x_5 &= C_{od}(h_z, h_{z\max}, h_{z\min}); \\
 x_6 &= C_{od}(\varphi, \varphi_{\max}, \varphi_{\min}).
 \end{aligned} \quad (5)$$

В системе уравнений (5) функция кодирования задана выражением (3), а предельные значения переменных для сборного резца из твердого сплава ВК6М и заготовки из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т приведены в табл. 3.

Расчет коэффициентов полиномиальных уравнений выполнен аналогично ранее рассмотренному:

- формирование сетки из 125 расчетных точек в факторном пространстве переменных: скорость v , м/мин, глубина t , мм, подача s , мм/об с предельными значениями, указанными в табл. 3;

- расчет для каждого сочетания параметров v , t , s зависимостей $I_{nt} = f(\tau)$, $h_z = f(\tau)$, $T_p = f(\tau)$, $P_z = f(\tau)$, $P_y = f(\tau)$, состоящих из 25 расчетных точек; формирование исходной матрицы в виде текстового файла, имеющего 3125 строк, каждая из которых содержит значения входных размерных переменных и расчетных показателей (v , t , s , h_z , I_{nt} , τ , T_p , P_z , P_y);

- повтор (9 раз) перечисленных процедур для главного угла в плане сборного резца $\varphi = 1,66$; 1,57; 1,31; 1,05; 0,79; 0,52; 0,35; 0,26 и 0,17 рад с формированием общей исходной матрицы, состоящей из 28 125 строк, каждая из которых содержит значения входных переменных, включая главный угол в плане сборного резца в радианах, и расчетные выходные показатели;

- расчет коэффициентов уравнений (4) по алгоритму МСА (1).

Матрицы полиномов и коэффициентов полиномиальных уравнений для сборного резца формы WNUM-120612 из твердого сплава ВК6М при точении заготовки из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т приведены в табл. 4. Здесь введены следующие обозначения: K_I , K_{P_z} , K_{T_p} и K_{P_y} — коэффициенты для уравнений $y_1 = \ln(I_{nt})$, $y_2 = \ln(P_z)$, $y_3 = \ln(T_p)$ и $y_4 = \ln(P_y)$ соответственно. Кодирование переменных выполнено по выражениям (5) с предельными значениями, указанными в табл. 3.

Таблица 3

Предельные значения переменных для сборного резца из твердого сплава ВК6М и заготовки из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т

| Параметр | Значение |
|------------------------------------|----------|
| Скорость резания, м/мин: | |
| максимальная v_{\max} | 280 |
| минимальная v_{\min} | 40 |
| Глубина резания, мм: | |
| максимальная t_{\max} | 4,0 |
| минимальная t_{\min} | 0,7 |
| Подача, мм/об: | |
| максимальная s_{\max} | 0,5 |
| минимальная s_{\min} | 0,1 |
| Износ по задней поверхности, мм: | |
| максимально допустимый $h_{z\max}$ | 0,50 |
| минимальный $h_{z\min}$ | 0,02 |
| Главный угол в плане, рад: | |
| максимальный φ_{\max} | 1,658 |
| минимальный φ_{\min} | 0,175 |

Таблица 4

Матрицы полиномов и коэффициентов полиномиальных уравнений для сборного резца формы WNUM-120612 из твердого сплава ВК6М при точении заготовки из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т

| Номер члена уравнения | Полином | K_I | K_{P_2} | K_{T_p} | K_{P_y} |
|-----------------------|----------------|---------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | x_1 | -4,7270 | 6,9088 | 6,4222 | 6,3563 |
| 2 | x_2 | 2,7645 | -0,1652 | 0,1895 | -0,2033 |
| 3 | x_3 | 0,1167 | 0,8237 | 0,0862 | 0,7895 |
| 4 | x_4 | 0,4555 | 0,7384 | 0,2612 | 0,6270 |
| 5 | x_5 | -0,4483 | 0,0585 | -0,0274 | 0,4694 |
| 6 | x_2^2 | 0,3656 | 0,0432 | 0,0918 | 0,0378 |
| 7 | x_4^2 | 0,4005 | 0,0280 | 0,1215 | 0,1190 |
| 8 | x_5^2 | 1,5470 | 0,0545 | -0,0089 | 0,2423 |
| 9 | x_3x_4 | 0,0234 | -0,0161 | -0,0277 | -0,0399 |
| 10 | x_2x_3 | 0,1014 | -0,0148 | -0,0103 | -0,0010 |
| 11 | x_2x_4 | 0,1388 | -0,0068 | -0,0284 | -0,0333 |
| 12 | x_2x_5 | 0,2314 | 0,0039 | 0,0063 | 0,0703 |
| 13 | x_4x_5 | -0,0147 | -0,0304 | -0,0134 | -0,0746 |
| 14 | x_3x_5 | -0,0278 | -0,0143 | -0,0135 | -0,0545 |
| 15 | x_2^3 | 0,1623 | 0,0175 | 0,0586 | 0,0160 |
| 16 | x_4^3 | 0,0954 | 0,0116 | 0,0314 | 0,0433 |
| 17 | x_3^3 | 0,0391 | 0,0093 | 0,0109 | 0,0449 |
| 18 | x_5^3 | -1,3144 | 0,0260 | 0,0086 | 0,0468 |
| 19 | $x_2x_3x_4$ | 0,0055 | 0,0034 | -0,0124 | -0,0047 |
| 20 | $x_2^2x_3$ | 0,0125 | -0,0006 | -0,0014 | 0,0014 |
| 21 | $x_2^2x_4$ | 0,0219 | 0,0031 | -0,0054 | -0,0065 |
| 22 | $x_2x_4^2$ | 0,0684 | 0,0046 | 0,0082 | 0,0145 |
| 23 | $x_2x_3^2$ | -0,0011 | 0,0016 | -0,0037 | -0,0065 |
| 24 | $x_2x_5^2$ | -1,0439 | 0,0020 | 0,0062 | 0,0157 |
| 25 | $x_4x_5^2$ | -0,2024 | -0,0232 | -0,0093 | -0,0266 |
| 26 | $x_2^2x_5$ | -0,1784 | -0,0074 | 0,0013 | 0,0026 |
| 27 | $x_4^2x_5$ | -0,0055 | 0,0003 | 0,0031 | -0,0112 |
| 28 | $x_3^2x_5$ | -0,0057 | 0,0235 | -0,0095 | -0,0017 |
| 29 | $x_3x_5^2$ | -0,1259 | -0,0103 | -0,0088 | -0,0147 |
| 30 | x_2^4 | -0,2400 | -0,0321 | -0,1034 | -0,0245 |
| 31 | x_4^4 | -0,2660 | -0,0297 | -0,1065 | -0,1278 |
| 32 | x_5^4 | 0,1440 | 0,0067 | 0,0058 | -0,0109 |
| 33 | $x_2x_3x_4x_5$ | -0,0656 | -0,0143 | -0,0026 | -0,0323 |
| 34 | $x_2x_5^3$ | 0,8026 | -0,0004 | 0,0034 | -0,0057 |
| 35 | $x_4x_5^3$ | 0,1422 | -0,0080 | 0,0004 | 0,0038 |
| 36 | $x_3x_5^3$ | 0,0751 | -0,0053 | -0,0026 | 0,0019 |
| 37 | $x_2^3x_5$ | -0,0180 | -0,0025 | -0,0070 | -0,0010 |
| 38 | $x_4^3x_5$ | -0,0217 | -0,0022 | -0,0046 | -0,0035 |
| 39 | $x_3^3x_5$ | -0,0086 | 0,0017 | -0,0010 | 0,0066 |

Окончание таблицы 4

| Номер члена уравнения | Полином | K_I | K_{P_z} | K_{T_p} | K_{P_y} |
|-----------------------|-----------------|---------|-----------|-----------|-----------|
| 40 | $x_2^2 x_5^2$ | 0,1695 | -0,0052 | -0,0016 | 0,0000 |
| 41 | $x_2 x_3 x_5^2$ | -0,0421 | -0,0033 | -0,0052 | 0,0029 |
| 42 | x_6 | -0,1968 | -0,3172 | 0,0368 | -0,3266 |
| 43 | x_6^2 | 0,0710 | -0,0065 | -0,0119 | -0,3786 |
| 44 | x_6^3 | 0,8513 | 0,2268 | 0,2625 | 0,1179 |
| 45 | $x_3 x_6$ | 0,1777 | -0,0020 | 0,0546 | -0,1945 |
| 46 | $x_4 x_6$ | -0,0557 | -0,0964 | -0,0689 | -0,2152 |
| 47 | $x_3 x_4 x_6$ | -0,0531 | -0,0144 | -0,0441 | -0,0371 |
| 48 | $x_3 x_6^2$ | 0,1882 | 0,0431 | 0,0572 | -0,1933 |
| 49 | $x_4 x_6^2$ | -0,1275 | 0,0055 | -0,0587 | 0,0437 |
| 50 | $x_3^2 x_6$ | -0,0460 | -0,0271 | -0,0386 | -0,0703 |
| 51 | $x_4^2 x_6$ | -0,1242 | 0,0214 | -0,0496 | 0,0168 |

Таблица 5

Показатели, характеризующие точность аппроксимации исходных данных полиномиальными уравнениями

| Показатель | Значение | | | Уравнение линии тренда |
|-------------------|--------------|-------------|------------------------|------------------------|
| | Максимальное | Минимальное | Среднее арифметическое | |
| I_{nt} , мм/мин | 13,4 | 0,0004 | 0,044 | $y = 0,945x^{0,984}$ |
| P_z , Н | 8207,5 | 136,5000 | 52,100 | $y = 0,994x$ |
| T_p , °C | 1436,4 | 286,0000 | 35,100 | $y = 0,992x$ |
| P_y , Н | 8014,7 | 44,6000 | 105,300 | $y = 0,958x$ |

Интегрально точность аппроксимации исходных данных полиномиальными уравнениями характеризуют такие показатели, как максимальное, минимальное, среднее арифметическое значения и уравнение линии тренда (табл. 5).

Расчеты выполнены для всех уравнений при числе точек $N = 28\ 125$. Линии трендов приближаются к линейным, коэффициенты корреляции по этим линиям $R > 0,96$.

В качестве примера на рис. 3 показана связь исходных (перед аппроксимацией) P_{zi} и расчетных (полученных путем расчета по полиномиальному уравнению с соответствующими коэффициентами, указанными в табл. 4) P_{zp} значений тангенциальной составляющей силы резания.

С помощью полиномиальных уравнений можно рассчитать выходные показатели — значения соответствующих функций при любом сочетании переменных в пределах значений, указанных в табл. 3. В частности, по рас-

четным значениям скорости изнашивания инструмента численным интегрированием можно построить зависимость износ — стойкость (кривую износа) и таким образом определить

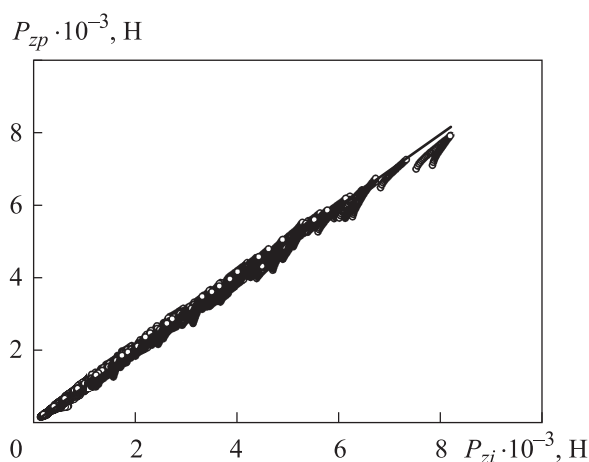


Рис. 3. Связь исходных P_{zi} и расчетных P_{zp} значений тангенциальной составляющей силы резания при числе точек $N = 28\ 125$

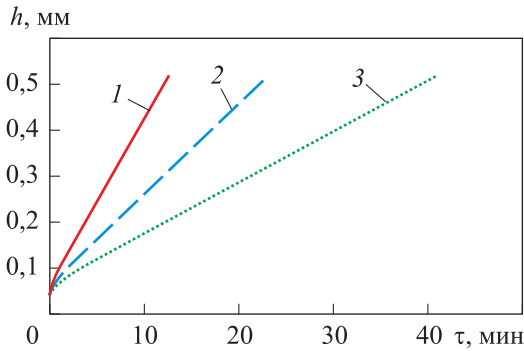


Рис. 4. Расчетные зависимости износа сборного резца по задней поверхности h_z от времени τ при главном угле в плане $\varphi = 1,57$ (1), $0,79$ (2) и $0,17$ рад (3)

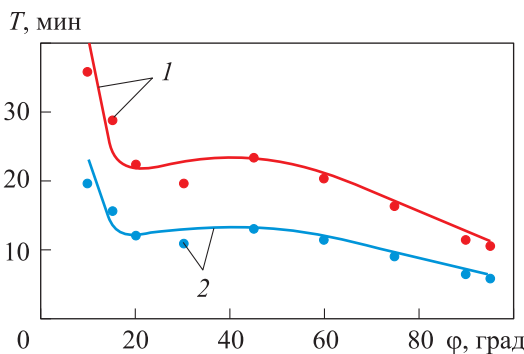


Рис. 5. Расчетные (кривые) и исходные (точки) зависимости стойкости T от главного угла в плане φ сборного резца при максимально допустимом износе по задней поверхности $h_{z\max} = 0,5$ (1) и $0,3$ мм (2)

стойкость, соответствующую установленной максимально допустимому значению износа сборного резца по задней поверхности.

Расчетные зависимости износа сборного резца по задней поверхности h_z от времени τ при главном угле в плане $\varphi = 1,57, 0,79$ и $0,17$ рад приведены на рис. 4.

Подтверждена установленная экспериментально тенденция к увеличению стойкости инструмента с уменьшением главного угла в плане [11]. Зависимости стойкости сборного резца от главного угла в плане при максимально допустимом износе по задней поверхности $h_{z\max} = 0,5$ и $0,3$ мм, полученные путем расчета по аппроксимирующему полиномиальному уравнению скорости изнашивания инструмента, приведены на рис. 5. Там же обозначены исходные значения стойкости сборного резца.

Необходимо учитывать, что для главного угла в плане $\varphi = 10^\circ$ и глубины резания $t = 2$ мм ширина срезаемого слоя $b = 11,8$ мм. Поэтому следует выбирать размеры сменной многогран-

ной пластины с соответствующей длиной режущей кромки.

Характер зависимости $T = f(\tau)$ соответствует зависимости температуры резания стойкости сборного резца от главного угла в плане, которая оказывает наибольшее влияние на скорость его изнашивания. На рис. 6 показана расчетная (полученная путем расчета по полиномиальному уравнению с коэффициентами, указанными в табл. 4) зависимость температуры резания T_p от главного угла в плане φ сборного резца при максимально допустимом износе по задней поверхности $h_{z\max} = 0,5$ мм.

Как видно из рис. 6, с уменьшением угла в плане средняя температура резания падает, что приводит к снижению скорости изнашивания и соответствующему увеличению стойкости инструмента.

Зависимости тангенциальной P_z и радиальной P_y составляющих силы резания от главного угла в плане сборного резца при износе по задней поверхности $h_z = 0,5$ и $0,1$ мм приведены на рис. 7.

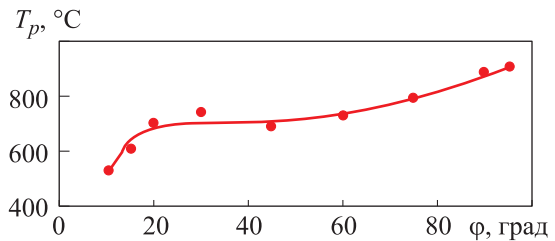


Рис. 6. Расчетная (кривая) и исходная (точки) зависимости температуры резания T_p от главного угла в плане φ сборного резца при максимально допустимом износе по задней поверхности $h_{z\max} = 0,5$ мм

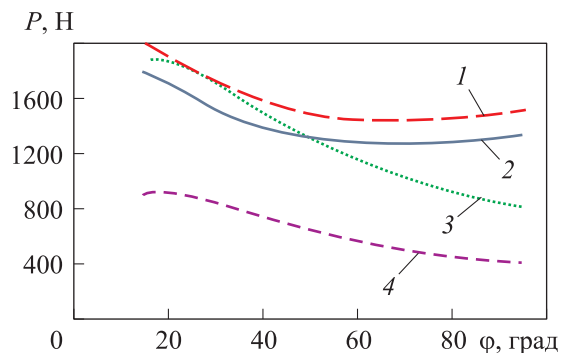


Рис. 7. Зависимости тангенциальной P_z (1, 2) и радиальной P_y (3, 4) составляющих силы резания от главного угла в плане сборного резца при различных значениях износа по задней поверхности:
1, 3 — $h_z = 0,5$ мм; 2, 4 — $h_z = 0,1$ мм

Для неизношенного резца радиальная составляющая силы резания меньше, чем тангенциальная. С увеличением износа радиальная составляющая значительно растёт, приближаясь по значениям к тангенциальной составляющей при малых главных углах в плане сборного резца. Возрастание составляющих силы резания с ростом износа необходимо учитывать при анализе мощности и крутящего момента, расчете погрешностей обработки, проверочных расчетах технологических приспособлений для закрепления детали на станке.

Разработанные полиномиальные уравнения можно использовать для оптимизации режимных параметров точения деталей со сложным профилем, например, со сферической протяженной поверхностью. К таким деталям относятся полусферы шар-баллонов, которые перед сваркой обтачивают по наружной и внутренней поверхностям.

При подаче сборного резца вдоль образующей его скорость изнашивания изменяется вследствие изменения главного угла в плане, скорости резания и износа по задней поверхности. Соответствующим образом изменяются составляющие силы резания и ее температура. Количественно изменение этих показателей можно отразить через предложенные полиномиальные уравнения.

Выводы

1. Разработаны полиномиальные уравнения, предназначенные для расчета или оптимизации режимных параметров точения протяженных поверхностей со сложным профилем.

2. Предложенные алгоритмы и аналогичные полиномиальные уравнения рекомендованы для аппроксимации большого объема экспериментальных или расчетных данных по различным видам механической обработки.

Литература

- [1] Безъязычный В.Ф., Аверьянов И.Н., Кордюков А.В. *Расчет режимов резания*. Рыбинск, РГАТА, 2009. 185 с.
- [2] Коротченко А.Г., Кумагина Е.А., Сморякова В.М. *Введение в многокритериальную оптимизацию*. Нижний Новгород, ННГУ, 2017. 55 с.
- [3] Ногин В.Д. *Принятие решений при многих критериях*. Санкт-Петербург, ЮТАС, 2007. 104 с.
- [4] Пестрецов С.И. *Компьютерное моделирование и оптимизация процессов резания*. Тамбов, Изд-во ТГТУ, 2009. 104 с.
- [5] Заикин П.В., Погореловский М.А., Микшина В.С. Аппроксимация эмпирических функций полиномами высших порядков. *Вестник кибернетики*, 2015, № 4, с. 129–134.
- [6] Шведов А.С. Аппроксимация функций с помощью нейронных сетей и нечетких систем. *Проблемы управления*, 2018, № 1, с. 21–29.
- [7] Петрянин Д.Л., Юрков Н.К. Повышение точности моделей аппроксимации. *Надежность и качество сложных систем*, 2016, № 2, с. 59–66.
- [8] Масловская А.Г. *Аппроксимация функций в задачах обработки экспериментальных данных*. Благовещенск, Амурский гос. ун-т, 2021. 51 с.
- [9] Грубый С.В. *Расчет режимов резания для операций механической обработки*. Москва, Вологда, Инфра-Инженерия, 2021. 200 с.
- [10] Грубый С.В. *Моделирование процесса резания твердосплавными и алмазными резцами*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 107 с.
- [11] Грубый С.В. *Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 149 с.
- [12] Боршова Л.В., Пегашкин В.Ф., Миронова М.В. *Оптимизация процесса механической обработки деталей сложного профиля*. Нижний Тагил, НТИ, 2019. 150 с.

References

- [1] Bez'yazychnyy V.F., Aver'yanov I.N., Kordyukov A.V. *Raschet rezhimov rezaniya* [Calculation of cutting regimes]. Rybinsk, RGATA Publ., 2009. 185 p. (In Russ.).

- [2] Korotchenko A.G., Kumagina E.A., Smoryakova V.M. *Vvedenie v mnogokriterial'nyuyu optimizatsiyu* [Introduction into multicriteria optimization]. Nizhniy Novgorod, NNGU Publ., 2017. 55 p. (In Russ.).
- [3] Nogin V.D. *Prinyatie resheniy pri mnogikh kriteriyakh* [Multicriteria decision making]. Sankt-Petersburg, YuTAS Publ., 2007. 104 p. (In Russ.).
- [4] Pestretsov S.I. *Komp'yuternoe modelirovanie i optimizatsiya protsessov rezaniya* [Computer modelling and optimization of cutting processes]. Tambov, Izd-vo TGTU Publ., 2009. 104 p. (In Russ.).
- [5] Zaikin P.V., Pogorelovskiy M.A., Mikshina V.S. Approximation of experimental data functions by high order polynomial. *Vestnik kibernetiki* [Proceedings in Cybernetics], 2015, no. 4, pp. 129–134. (In Russ.).
- [6] Shvedov A.S. Function approximation using neural networks and fuzzy systems. *Problemy upravleniya* [Control Sciences], 2018, no. 1, pp. 21–29. (In Russ.).
- [7] Petryanin D.L., Yurkov N.K. Increasing the precision of approximation models. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability & Quality of Complex Systems], 2016, no. 2, pp. 59–66. (In Russ.).
- [8] Maslovskaya A.G. *Approksimatsiya funktsiy v zadachakh obrabotki eksperimental'nykh dannykh* [Function approximation in problems of experimental data processing]. Amurskiy gos. un-t Publ., 2021. 51 p. (In Russ.).
- [9] Grubby S.V. *Raschet rezhimov rezaniya dlya operatsiy mekhanicheskoy obrabotki* [Calculation of cutting regimes for operation of mechanical processing]. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2021. 200 p. (In Russ.).
- [10] Grubby S.V. *Modelirovanie protsessa rezaniya tverdospлавными i алмазными режущими* [Modelling of cutting process with carbide and diamond cutters]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2010. 107 p. (In Russ.).
- [11] Grubby S.V. *Optimizatsiya protsessa mekhanicheskoy obrabotki i upravlenie rezhimnymi parametrami* [Optimization of mechanical treatment process and control on regime parameters]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 149 p. (In Russ.).
- [12] Borshova L.V., Pegashkin V.F., Mironova M.V. *Optimizatsiya protsessa mekhanicheskoy obrabotki detaley slozhnogo profilya* [Optimization of mechanical processing process of parts with complex profile]. Nizhniy Tagil, NTI Publ., 2019. 150 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 21.02.2022

Информация об авторе

ГРУБЫЙ Сергей Витальевич — доктор технических наук, заведующий кафедрой «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: grusv@yandex.ru).

Information about the author

GRUBYI Sergei Vitalyevich — Doctor of Science (Eng.), Head of the Department of Tool Engineering and Technologies. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: grusv@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Грубый С.В. Разработка полиномиальных уравнений для выходных показателей точения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 8, с. 13–23, doi: 10.18698/0536-1044-2022-8-13-23

Please cite this article in English as:

Grubby S.V. Development of Polynomial Equations for Output Indicators of Turning. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 8, pp. 13–23, doi: 10.18698/0536-1044-2022-8-13-23