

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ЧИСТОВОМ И ТОНКОМ ТОЧЕНИИ МЕТОДОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Ивченко Т.Г., Шальская Е.Е. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Аннотация. С использованием МГП определены оптимальные режимы резания, обеспечивающие минимальную себестоимость обработки при заданном уровне качества обработанной поверхности при чистовом и тонком точении. Установлены закономерности изменения оптимальных значений подачи и скорости резания от шероховатости обработанной поверхности и радиусов при вершине лезвия инструмента.

Ключевые слова: оптимизация, себестоимость, скорость, подача, шероховатость.

1. Введение

Обеспечение качества обработанной поверхности с достижением минимальной себестоимости механической обработки - важнейшая задача, решаемая при проектировании технологических процессов изготовления деталей. Одним из резервов снижения себестоимости является выбор рациональных параметров процесса резания. В связи с этим весьма актуальны исследования по определению оптимальных режимов резания, обеспечивающих для заданных условий обработки и требований к качеству обработанных поверхностей минимальную себестоимость.

Одним из наиболее распространенных методов оптимизации в настоящее время является метод линейного программирования [1], позволяющий осуществлять одновременную оптимизацию скорости резания и подачи с учетом действующих при резании ограничений по критерию максимальной производительности. Обязательным условием использования этого метода является возможность линеаризации целевой функции и ограничений. Для линейной целевой функции и линейных ограничений достаточно хорошо разработан и широко используется графический метод поиска оптимальных режимов резания [2], а также предложены аналитические зависимости оптимальных режимов резания от условий обработки [3]. Несмотря на простоту и наглядность, этот метод не позволяет решать задачи оптимизации режимов резания в случае нелинейной целевой функции, каковой является себестоимость обработки деталей.

Такого недостатка лишен метод геометрического программирования (МГП), нашедший широкое применение для поиска оптимальных проектных решений в различных областях инженерных исследований, но недостаточно распространенный в теории механообработки [2]. В связи с этим представляет интерес дальнейшее развитие МГП применительно к задачам оптимизации режимов резания для различных условий обработки.

Цель представляемой работы – с использованием МГП определить оптимальные режимы резания, обеспечивающие минимальную себестоимость обработки при заданном уровне качества обработанной поверхности при чистовом и тонком точении.

2. Основное содержание и результаты работы

Основное требование МГП состоит в том, что все компоненты задачи оптимизации должны быть выражены количественно в виде обобщенных положительных полиномов, называемых позиномами, от управляемых параметров. Возможность использования МГП для оптимизации режимов резания обусловлена тем, что целевая функция и ограничения могут быть представлены в виде суммы компонентов, каждый из которых выражается степенной функцией:

$$V_i = C_i X_1^{\alpha_{i1}} X_2^{\alpha_{i2}} \dots X_j^{\alpha_{ij}} \dots X_m^{\alpha_{im}} \quad (i=1\dots n), (j=1\dots m), \quad (1)$$

где C_i - положительная константа; X_j - оптимизируемые параметры; α_{ij} - произвольные вещественные числа; n – количество компонентов; m - количество параметров.

В соответствии с МГП задачи оптимизации формулируются следующим образом:

1) прямая задача МГП

- минимизировать $g(x) = \sum C_i \prod_j X_j^{\alpha_{ij}}$ при ограничениях $X_j > 0, C_i > 0$;

2) двойственная задача МГП

- максимизировать $V(W) = \prod_i (C_i / W_i)^{W_i}$ при ограничениях $\sum_i W_i = 1, \sum_i \alpha_{ij} W_i = 0$.

В этих выражениях $g(x)$ - прямая функция, $V(W)$ – двойственная функция $V(W)$, W_i - положительные веса.

В противоположность другим методам оптимизации в МГП вначале находят экстремум целевой функции и относительный вклад каждой компоненты в его значение, а затем - оптимальные значения переменных параметров.

В представляемой работе в качестве критерия оптимизации принимается переменная часть себестоимости обработки детали режущим инструментом за один проход, зависящая от режимов резания:

$$C = At_o + At_c t_o / T, \quad (2)$$

где A - себестоимость станка - минуты, t_o - основное время обработки; t_c - время смены инструмента; T - стойкость инструмента.

Целевая функция, выражающая зависимость переменной части себестоимости от режимов резания, с учетом известных соотношений основного времени обработки и стойкости инструмента с режимами, имеет вид:

$$C = A \frac{\pi DL \Delta}{1000 V S t} + At_c \frac{\pi DL \Delta}{1000 C_T} V^{\frac{1}{m}-1} S^{\frac{y_v}{m}-1} t^{\frac{x_v}{m}-1}, \quad (3)$$

где D, L - диаметр и длина обрабатываемой поверхности; Δ припуск на обработку; V - скорость резания; S – подача; t – глубина резания; C_T – коэффициент и x_v, y_v, m – показатели, характеризующие степень влияния глубины t , подачи S и стойкости T на скорость резания V , определяемые в зависимости от условий обработки.

В настоящей работе решается задача двухпараметрической оптимизации, то есть задача определения оптимальных значений скорости резания и подачи при заданной глубине резания в условиях однопроходной обработки ($t = \Delta$).

Тогда целевая функция может быть представлена следующим образом:

$$C = C_{01} V^{-1} S^{-1} + C_{02} V^{k_V} S^{k_S}, \quad (3)$$

где коэффициенты $C_{01} = A \frac{\pi DL}{1000}$; $C_{02} = At_c \frac{\pi DL}{1000 C_T} t^{\frac{x_v}{m}}$; $k_V = \frac{1}{m} - 1$; $k_S = \frac{y_v}{m} - 1$.

Для чистовой и тонкой токарной обработки необходимо учитывать ограничение по предельно допустимой шероховатости обработанной поверхности R_a :

$$k_0 S^{k_1} (90 + \gamma)^{k_4} r^{k_2} V^{k_3} \leq R_a, \quad (4)$$

где k_0, k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициент и показатели, которые характеризуют степень влияния подачи S , радиуса при вершине r , скорости V и переднего угла γ на шероховатость обработанной поверхности R_a , обусловленные условиями обработки.

Это ограничение необходимо представить в следующем виде:

$$C_{11} S^{k_1} V^{k_3} \leq 1, \quad (5)$$

где коэффициент $C_{11} = k_0 (90 + \gamma)^{k_4} r^{k_2} / R_a$.

Математическая модель задачи оптимизации скорости резания и подачи при чистовом и тонком точении представляется следующим образом:

1) прямая задача МГП - минимизировать

$$g(V, S) = C_{01} V^{-1} S^{-1} + C_{02} V^{k_V} S^{k_S} \quad (6)$$

при ограничениях $V > 0, S > 0, C_{01} > 0, C_{02} > 0$;

2) двойственная задача МГП - максимизировать

$$V(W) = \left(\frac{C_{01}}{W_{01}} \right)^{W_{01}} \left(\frac{C_{02}}{W_{02}} \right)^{W_{02}} C_{11}^{W_{11}} \quad (7)$$

при ограничениях

$$\begin{aligned} W_{01} + W_{02} &= 1; \\ -W_{01} + k_V W_{02} + k_3 W_{11} &= 0; \\ -W_{01} + k_S W_{02} + k_1 W_{11} &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Согласно МГП на первом этапе оптимизации скорости резания и подачи решается система линейных уравнений (8), имеющая единственное решение:

$$\begin{aligned} W_{01} &= \frac{k_S k_3 - k_V k_1}{k_S k_3 - k_V k_1 + k_3 - k_1}; \\ W_{02} &= \frac{k_3 - k_1}{k_S k_3 - k_V k_1 + k_3 - k_1}; \\ W_{11} &= \frac{W_{01}(1 + k_V) - k_V}{k_3}. \end{aligned} \quad (9)$$

Особенность МГП является возможность уже на первом этапе решения оценить вклад каждой составляющей целевой функции в общую себестоимость C - (3). Стои-

мость первой составляющей, связанной с машинной обработкой оценивается весомостью W_{01} , а составляющей, связанной со сменой инструмента - W_{02} .

Далее вычисляется экстремум целевой функции, для чего рассчитывается максимум двойственной функции $V(W)$ - (7). На основании найденного экстремума целевой функции составляется система линейных уравнений для определения оптимальных режимов резания:

$$V(W)W_{01} = C_{01}V^{-1}S^{-1}; \quad (10)$$

$$V(W)W_{02} = C_{02}V^{k_V} S^{k_S}.$$

В результате решения этой системы определяются оптимальные подача S_0 и скорость резания V_0 :

$$S_0 = \left(\frac{W_{01}^{k_V} W_{02} V(W)^{k_V + 1}}{C_{01}^{k_V} C_{02}} \right)^{1/(k_S - k_V)}; \quad V_0 = \left(\frac{W_{01}^{k_S} W_{02} V(W)^{k_S + 1}}{C_{01}^{k_S} C_{02}} \right)^{1/(k_V - k_S)} \quad (11)$$

Примеры определения оптимальных режимов резания, обеспечивающих минимальную себестоимость, приведены для токарной обработки вала (наружное продольное точение) диаметром $D = 100$ мм, длиной $L = 250$ мм из стали 45 на токарно-винторезном станке с ЧПУ 16К20Ф3. Для этих условий принято: себестоимость станка - минуты $A = 0,5$ коп/мин., время смены инструмента $t_c = 1$ мин.

Для чистовой обработки используются сборные резцы с механическим креплением пластин из твердого сплава Т15К6 (передний угол $\gamma = 0^\circ$, радиус при вершине $r = 1$ мм); глубина резания $t = 2$ мм; требуемая шероховатость обработанной поверхности $R_a = 3,2$ мкм. Для указанных условий обработки приняты следующие коэффициенты и показатели, которые характеризуют степень влияния глубины, подачи и стойкости на скорость резания: $C_V = 350$, $x_v = 0,15$, $y_v = 0,35$, $m = 0,2$. Тогда $C_T = 525 \cdot 10^{10}$, $k_V = 4$, $k_S = 0,75$ [4].

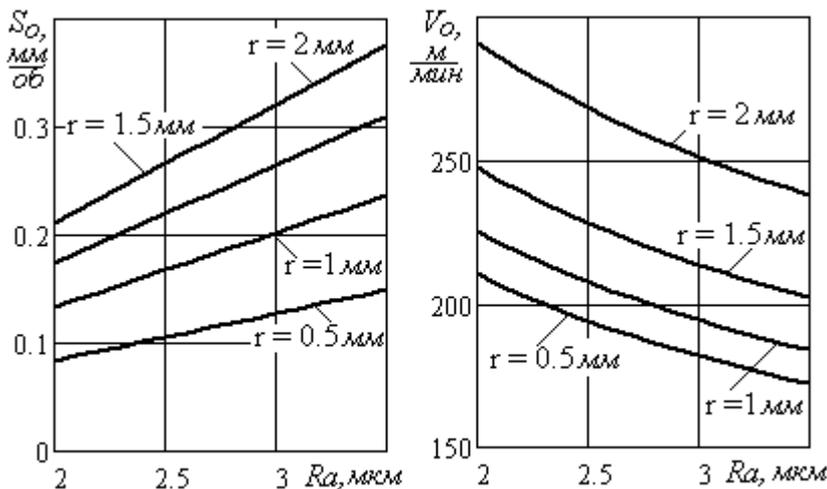


Рис.1. Графики зависимости оптимальных значений подачи S_0 и скорости резания V_0 от шероховатости обработанной поверхности R_a для различных радиусов при вершине r при чистовом точении

Коэффициенты и показатели, которые характеризуют степень влияния подачи, переднего угла, радиуса при вершине и скорости резания на шероховатость обработанной поверхности: $k_0 = 7,0$; $k_1 = 0,85$; $k_2 = -0,65$; $k_3 = -0,36$; $k_4 = 0,15$ [5].

Представленные на рис.1 графики свидетельствуют о том, что оптимальная подача S_0 увеличивается с увеличением шероховатости поверхности R_a и радиуса при

вершине r ; оптимальная скорость резания V_O увеличивается с увеличением радиуса при вершине r и уменьшается с увеличением шероховатости поверхности R_a .

Расчетные значения коэффициентов $C_{O1} = 392,7$, $C_{O2} = 1,257 \cdot 10^{-10}$, $C_{I1} = 4,296$. Коэффициенты весомостей, определенные в соответствии с формулой (9), равны: $W_{O1} = 0,752$, $W_{O2} = 0,248$, $W_{I1} = 0,666$.

Оптимальные значения подачи и скорости резания, рассчитанные в соответствии с формулами (11) и (12) равны: $S_O = 0,216$ мм/об, $V_O = 209$ м/мин.

Для тонкого точения используются резцы, оснащенные эльбором (передний угол $\gamma = 0^\circ$, радиус при вершине $r = 0,5$ мм); глубина резания $t = 0,5$ мм; требуемая шероховатость поверхности $R_a = 0,8$ мкм. Для указанных условий обработки приняты следующие коэффициенты и показатели: $C_T = 52,6 \cdot 10^4$, $k_V = 0,65$, $k_S = -0,5$ [6].

Коэффициенты и показатели, которые характеризуют степень влияния подачи, переднего угла, радиуса при вершине и скорости резания на шероховатость обработанной поверхности: $k_0 = 0,16$; $k_1 = 0,59$; $k_2 = -0,29$; $k_3 = -0,19$; $k_4 = 0,66$ [5].

Расчетные значения коэффициентов $C_{O1} = 392,7$, $C_{O2} = 1,257 \cdot 10^{-10}$, $C_{I1} = 4,766$. Коэффициенты весомостей, определенные в соответствии с формулой (9), равны: $W_{O1} = 0,27$; $W_{O2} = 0,73$, $W_{I1} = 1,076$.

Оптимальные значения подачи и скорости резания, рассчитанные в соответствии с формулами (11) и (12) равны: $S_O = 0,116$ мм/об, $V_O = 145$ м/мин.

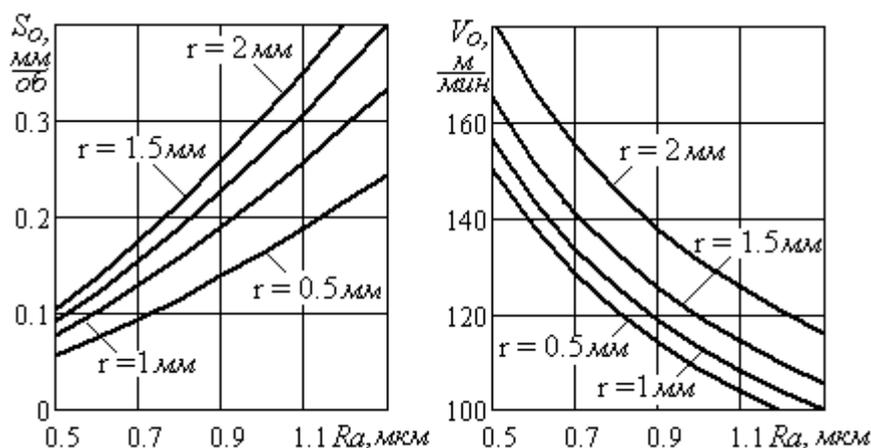


Рис.2. Графики зависимости оптимальных значений подачи S_O и скорости резания V_O от шероховатости обработанной поверхности R_a для различных радиусов при вершине r при тонком точении

монотонностей изменения оптимальных режимов следует, что большие значения скорости резания и подачи для заданного уровня шероховатости могут быть приняты для больших радиусов при вершине, что при минимальной себестоимости обработки будет обеспечивать более высокую производительность.

Наличие аналитических зависимостей для определения оптимальных режимов резания существенно упрощает разработку рекомендаций по выбору рациональных условий обработки, что особенно актуально для чистового и тонкого точения.

Таким образом, представленная методика позволяет для любых условий чистового и тонкого точения выполнять расчеты оптимальных режимов резания, обеспечивающих минимальную себестоимость обработки.

Для тонкого точения, также как и для чистового, оптимальная подача S_O увеличивается с увеличением шероховатости поверхности R_a и радиуса при вершине r ; оптимальная скорость резания V_O увеличивается с увеличением радиуса при вершине r и уменьшается с увеличением шероховатости поверхности R_a (рис.2).

Из анализа установленных закономерностей

3. Заключение

С использованием МГП аналитически определены оптимальные режимы резания, обеспечивающие минимальную себестоимость обработки при заданном уровне качества обработанной поверхности при чистовом и тонком точении.

На основании разработанной методики установлены закономерности изменения оптимальных значений подачи и скорости резания от шероховатости обработанной поверхности и радиусов при вершине.

Разработанная методика определения оптимальных режимов резания может быть широко использована для любых видов обработки.

Список литературы: 1. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. - М.: Машиностроение. 1989. - 296с. 2. Оптимизация и управление процессом резания: / О.С. Кроль, Г.Л. Хмеловский. - К.: УМК ВО, 1991. - 140с. 3. Ивченко Т.Г., Дубоделова О.С. Исследование возможностей комбинированной лезвийной и отделочно-упрочняющей обработки по повышению качества поверхностного слоя и производительности // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. - Донецк: ДонНТУ, 2006. Вып. 31. - С.140-146. 4. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Суслова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. - М.: Машиностроение. - 2001. Т. 2. - 944 с. 5. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. - 84с. 6. Лезвийный инструмент из сверхтвердых материалов: Справ./ Под ред. Н.В. Новикова-К.:Техніка.1988.-108с.

Надійшла до редколегії 04.02.2010 р.

OPTIMIZATION CUTTING CONDITIONS IN FINISHING AND FINE TURNING METHOD OF GEOMETRIC PROGRAMMING

Ivchenko T.G., Shalskay E.J., (DonNTU, t. Donetsk, Ukraine)

Optimum cutting conditions to ensure minimum cost of processing a given level of quality of the machined surface during finishing and fine turning determined using the MGP. Regularities of changes in the optimal values of feed and cutting speed on the roughness of the machined surfaces and radii at the top of the blade tools are installed on the basis of the developed technique.

Key words: optimization, cost, speed, feed, roughness.

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ ПІД ЧАС ЧИСТОВОГО Й ТОНКОГО ТОЧІННЯ МЕТОДОМ ГЕОМЕТРИЧНОГО ПРОГРАМУВАННЯ

Івченко Т.Г., Шальська О.Є. (ДонНТУ, м. Донецьк, Україна)

З використанням МГП визначені оптимальні режими різання, що забезпечують мінімальну собівартість обробки при заданому рівні якості обробленої поверхні під час чистового й тонкого точіння. На підставі розробленої методики встановлені закономірності зміни оптимальних значень подачі й швидкості різання від шорсткості обробленої поверхні й радіусів при вершині леза інструмента.

Ключеві слова: оптимізація, собівартість, швидкість, подача, шорсткість.