

УЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ МЕТОДОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

С использованием метода геометрического программирования осуществлена оптимизация режимов резания по критерию минимальной себестоимости с учетом действия температурных ограничений. Установлены аналитические зависимости оптимальных подач и скоростей резания от параметров процесса точения. Выполнен анализ возможностей снижения себестоимости за счет снятия температурных ограничений.

Ключевые слова: оптимизация, себестоимость, точение, ограничения, температура.

1. Введение

Достижение минимальной себестоимости механической обработки деталей машин - важнейшая задача, решаемая при проектировании технологических процессов. 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.

В настоящее время для оптимизации режимов резания в случае нелинейной целевой функции, каковой является себестоимость обработки деталей, применяются методы нелинейного программирования, одним из которых является метод геометрического программирования (МГП) [1]. Использование этого метода позволяет осуществлять одновременную оптимизацию скорости резания и подачи с учетом действующих при резании ограничений по критерию минимальной себестоимости. Методика оптимизации режимов резания с использованием МГП, представленная в работах [2, 3], дает аналитическое решение определения режимов резания при черновом, чистовом и тонком точении. Однако эта методика не учитывает весьма важных температурных ограничений, что требует ее дальнейшего развития.

Необходимость учета температурных ограничений при обработке резанием обоснована многочисленными исследованиями [4, 5], свидетельствующими о достаточно высоких температурах резания, существенно превышающих допустимый уровень. Однако методика оптимизация режимов резания с учетом температурных ограничений разработана только для метода линейного программирования. Представляет интерес анализ возможностей учета температурных ограничений при оптимизации режимов резания с использованием МГП.

Цель работы - усовершенствование МГП для оптимизации режимов резания при точении с учетом температурных ограничений, а также оценка возможностей снижения себестоимости обработки при их устранении.

2. Основное содержание и результаты работы

При оптимизации режимов резания с использованием МГП в качестве критерия оптимальности принимается переменная часть себестоимости обработки детали режущим инструментом за один проход, зависящая от режимов резания:

$$\tilde{N} = At_o + At_{\tilde{n}}t_o / T + A_u t_o / T, \quad (1)$$

где A - себестоимость станкоминуты; A_u – стоимость одного периода стойкости инструмента T ; t_o - основное время обработки; t_c - время смены инструмента;

При решении задачи двухпараметрической оптимизации, то есть определения оптимальных значений скорости резания и подачи с заданной глубиной резания в условиях однопроходной обработки, целевая функция имеет:

$$C = V^{-1}S^{-1} + MV^{k_V} S^{k_S}, \quad (2)$$

где $M = (t_c + A_u/A)t^{x_V/m} / C_V^{1/m}$; $k_V = 1/m - 1$; $k_S = y_V/m - 1$; C_V – коэффициент, x_V, y_V, m – показатели, характеризующие степень влияния глубины t , подачи S и стойкости T на скорость резания V .

Основные ограничения при оптимизации режимов резания с использованием МГП представляются в виде:

$$C_i S^{y_i} \leq 1, \quad (3)$$

где для ограничений по прочности пластины при черновом точении и по шероховатости обработанной поверхности при чистовом точении коэффициенты C_i и параметры y_i соответственно $C_1 = C_P K_P t^{x_P} / 34 K_\varphi \tilde{n}^{1.35} t^{0.77}$; $y_i = y_P$; $C_2 = k_o (90 + \gamma)^{k_3} r^{k_2} / R_a$; $y_i = k_l$;

c – толщина пластины φ - главный угол в плане; C_P, K_P, x_P, y_P - коэффициенты и показатели, характеризующие степень влияния глубины и подачи на силу резания P_z , $K_\varphi = (\sin 60^\circ / \sin \varphi)^{0.8}$ - коэффициент, учитывающий влияние главного угла в плане φ ; k_o, k_l, k_2, k_3 , – коэффициент и показатели, характеризующие степень влияния подачи S , радиуса при вершине r и переднего угла γ на шероховатость обработанной поверхности R_a .

Температурное ограничение в зависимости от режимов резания имеет вид:

$$\Theta = C_\Theta V^{n_\Theta} S^{y_\Theta} t^{x_\Theta}, \quad (4)$$

где $C_\Theta, n_\Theta, y_\Theta, x_\Theta$ – коэффициенты и показатели, характеризующие степень влияния скорости резания, подачи и глубины на температуру резания Θ .

Особенностью температурных ограничений является их существенное влияние на стойкость режущего инструмента, то есть непосредственно на критерий оптимальности (1). При превышении температурой резания Θ допустимого уровня Θ_o ($K_\Theta = \Theta_o / \Theta$ - коэффициент снижения температуры резания) необходимо снижать режимы резания и прежде всего – скорость резания. Это приводит к изменению стойкости инструмента, что должно быть учтено в целевой функции. При необходимости учета температурных ограничений, коэффициент M_T в целевой функции определяется следующим образом:

$$M_T = (t_c + A_u/A)t^{x_V/m} / C_V^{1/m} K_\Theta^{1/mn_\Theta} = M K_\Theta^{-1/mn_\Theta}. \quad (5)$$

Согласно МГП на первом этапе оптимизации скорости резания и подачи решается система линейных уравнений для определения коэффициентов весомерностей W_{01}, W_{01}, W_{11} , которая при ограничениях по прочности пластины и шероховатости обработанной поверхности имеет вид:

$$\begin{cases} W_{01} + W_{02} = 1; \\ -W_{01} + k_V W_{02} = 0; \\ -W_{01} + k_S W_{02} + y_p W_{11} = 0. \end{cases} \quad \begin{cases} W_{01} + W_{02} = 1; \\ -W_{01} + k_V W_{02} = 0; \\ -W_{01} + k_S W_{02} + k_1 W_{11} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Общие решения этой системы при ограничениях по прочности пластины и шероховатости обработанной поверхности:

$$W_{01} = \frac{k_V}{1 + k_V}; \quad W_{02} = \frac{1}{1 + k_V}; \quad W_{11} = \frac{W_{01}(1 + k_S) - k_S}{y_i}. \quad (7)$$

Экстремум целевой функции, или максимум функции $V(W)$:

$$V(W) = (1/W_{01})^{W_{01}} (M/W_{02})^{W_{02}} C_i^{W_{11}} \quad (8)$$

Система линейных уравнений для определения оптимальных режимов резания:

$$\begin{cases} V(W)W_{01} = V^{-1}S^{-1}; \\ V(W)W_{02} = MV^{k_V} S^{k_S}. \end{cases} \quad (9)$$

Оптимальные подача S_o и скорость резания V_o :

$$S_o = \left(\frac{W_{01}^{k_V} W_{02} V(W)^{k_V+1}}{M} \right)^{1/(k_S - k_V)}; \quad V_o = \left(\frac{W_{01}^{k_S} W_{02} V(W)^{k_S+1}}{M} \right)^{1/(k_V - k_S)}. \quad (10)$$

Подставляя рассчитанные значения коэффициентов весомостей $W_{01}=1 - m$, $W_{02}=m$ и выполняя ряд преобразований, в окончательном виде для заданных ограничений C_i оптимальные подачу и скорость резания V_o определяем следующим образом:

$$S_o = C_i^{-1/y_i}; \quad V_o = \left(\frac{m}{(1-m)M} \right)^m C_i^{y_v/y_i}. \quad (11)$$

Необходимости учета температурных ограничений определяется в случае, если коэффициент $K_{\Theta_o} = \Theta_{дон}/\Theta(V_o, S_o)$ не превышает 1:

$$K_{\Theta_o} = \Theta_o / C_{\Theta} \left(\frac{m}{(1-m)M} \right)^m C_i^{(y_v n_t - y_t)/y_i} t^{x_t} \leq 1. \quad (12)$$

С учетом температурных ограничений оптимальная скорость резания V_o :

$$V_0 = \begin{cases} \left(\frac{m}{1-m} MK_{\Theta}^{-1/mn_t} \right)^m S_0^{y_v}, & K_{\Theta_0} \leq 1 \\ \left(\frac{m}{1-m} M \right)^m S_0^{y_v}, & K_{\Theta_0} \geq 1 \end{cases} \quad (13)$$

Пример определения оптимальных режимов резания, обеспечивающих минимальную себестоимость, приведен для чернового и чистового точения стали 45. Условия обработки: резцы Т5К10 и Т15К6 (главный угол резца в плане $\varphi = 90^\circ$, радиус при вершине $r = 1$ мм); глубина резания $t_{черн} = 3$ мм; $t_{чист} = 1$ мм; толщина пластины $s = 4,76$ мм; шероховатость поверхности $R_a = 3,2$ мкм; стоимость станкоминуты $A = 5$ коп/мин; стоимость 1 периода стойкости инструмента $A_u = 5$ коп/период; время смены инструмента $t_c = 1$ мин.

Для учета температурных ограничений приняты следующие зависимости температуры резания от режимов обработки (Θ_1 – для чернового точения, Θ_2 – для чистового точения) [6]:

$$\Theta_1 = 138 K_{\Theta} V^{0,39} S^{0,34} t^{0,1}; \quad \Theta_2 = 187 K_{\Theta} V^{0,34} S^{0,32} t^{0,1} \quad (14)$$

Оптимальные режимы резания без учета температурных ограничений:

для черновой обработки: $S_{очерн} = 0,6$ мм/об; $V_{очерн} = 124$ м/мин;

для чистовой обработки: $S_{очист} = 0,3$ мм/об; $V_{очист} = 167$ м/мин.

Температуры резания для рассчитанных оптимальных режимов резания, как для черновой обработки ($\Theta_1 = 847^\circ\text{C}$), так и для чистовой ($\Theta_2 = 876^\circ\text{C}$), превышают допустимый уровень температур $\Theta_0 = 800^\circ\text{C}$. Необходимые коэффициенты снижения температуры резания $K_{\Theta_1} = 0,95$ – для чернового точения, $K_{\Theta_2} = 0,9$ – для чистового точения. Скорости резания с учетом температурных ограничений: $V_{о\Theta_1} = 107$ м/мин; $V_{о\Theta_2} = 128$ м/мин.

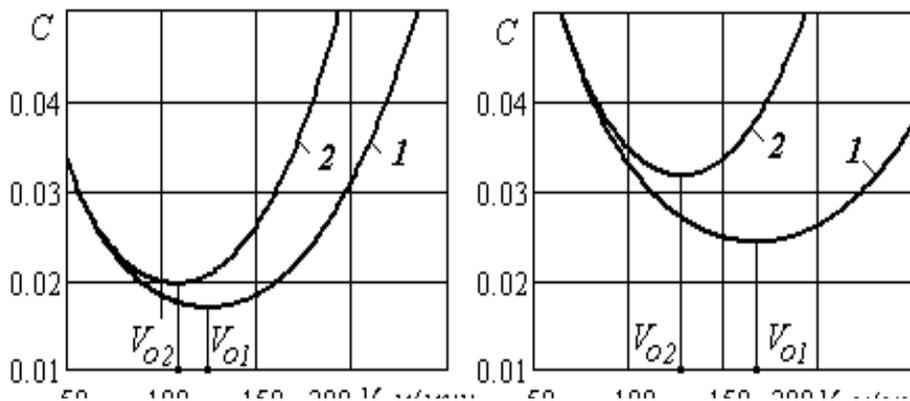


Рис. 1. Зависимость себестоимости обработки от скорости резания без учета температурных ограничений - 1, с учетом - 2 в условиях черновой обработки - а), чистовой - б)

Из графика, представленного на рис. 1, следует, что минимальная себестоимость имеет место при оптимальных режимах резания, причем для чистовой обработки себестоимость выше, чем черновой.

Учет температурных ограничений приводит к

снижению оптимальных режимов резания и повышению себестоимости обработки C_{Θ} . Эффективным способом снижения температур резания и снятия температурных ограничений является использование смазочно-охлаждающих средств (СОТС).

Количественная оценка возможностей снижения себестоимости при снятии температурных ограничений может быть выполнена на основании коэффициента сниже-

ния себестоимости $K_C = C/C_\Theta$:

$$K_C = \left(V^{-1} S^{-1} + M V^{k_V} S^{k_S} \right) / \left(V^{-1} S^{-1} + M K_\Theta^{-1/mn_t} V^{k_V} S^{k_S} \right). \quad (15)$$

Графики зависимости коэффициента снижения себестоимости от коэффициента снижения температуры K_Θ для черного и чистового точения представлены на рис. 2, позволяют количественно оценить эффективность снижения себестоимости при снятии температурных ограничений.

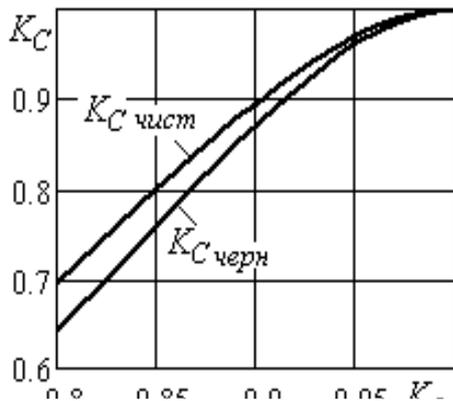


Рис. 2. Зависимость коэффициента снижения себестоимости от коэффициента снижения температуры

Рис. 2. Зависимость коэффициента снижения себестоимости от коэффициента снижения температуры

Выводы. Усовершенствована методика оптимизации режимов резания методом геометрического программирования по критерию минимальной себестоимости при точении с учетом температурных ограничений. Для условий черного чистового точения выполнена оценка возможностей снижения себестоимости для токарной обработки при устранении температурных ограничений.

Разработанная методика может быть использована для любых видов обработки.

Список литературы:

1. Оптимизация и управление процессом резания: / О.С. Кроль, Г.Л. Хмеловский. – К.: УМК ВО, 1991. – 140с.
2. Ивченко Т.Г. Оптимизация режимов резания при чистовом и тонком точении методом геометрического программирования / Т.Г. Ивченко, Е.Е. Шальская // Прогрессивные технологии и системы машиностроения:– Донецк: ДонНТУ, 2010. Вып. 39. – С.91-97.
3. Ивченко Т.Г. Использование метода геометрического программирования для расчета оптимальных режимов резания при точении / Т.Г. Ивченко // Научный вестник ДГМА. – Краматорск: ДГМА, 2011. – №1 (5 Е). – С. 47–52.
4. Ивченко Т.Г. Оптимизация режимов резания при точении труднообрабатываемых материалов с учетом температурных ограничений / Зантур Сахби, В.А. Богуславский, Т.Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения:– Донецк: ДонНТУ, 2010. Вып. 39. – С.77-84.
5. Ивченко Т.Г. Оптимізація параметрів процесу різання з обліком температурних обмежень / Т.Г. Івченко // Научный вестник ДГМА. – Краматорск: ДГМА, 2012. – №1 (9 Е). – С. 72-77.
6. Ивченко Т.Г. Визначення впливу режимів точіння на температуру різання в різних умовах механічної обробки / Т.Г. Івченко // Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы. – Донецк: ДонНТУ, 2013. Т. 2. – С.121 - 125.

Т.Г. Івченко

УРАХУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ОБМЕЖЕНЬ ПІД ЧАС ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ МЕТОДОМ ГЕОМЕТРИЧНОГО ПРОГРАМУВАННЯ

З використанням методу геометричного програмування здійснена оптимізація режимів різання по критерію мінімальної собівартості з урахуванням дії температурних обмежень. Встановлені аналітичні залежності оптимальних подач і швидкостей різання від параметрів процесу точіння. Виконаний аналіз можливостей зниження собівартості за рахунок зняття температурних обмежень.

Ключові слова: оптимізація, собівартість, точіння, обмеження, температура.

T.G. Ivchenko

ACCOUNT OF TEMPERATURE LIMITATIONS DURING OPTIMIZATION OF CUTTING REGIMS WITH METHOD OF GEOMETRICAL PROGRAMMING

With the use of the geometrical programming method the optimization of the cutting regimes on the minimum prime price criterion taking into account the action of temperature limitations is carried out. Analytical dependences of optimum cutting feed and speed from the parameters of turning process are set. The analysis of possibilities of prime price decline is executed due to the removal of temperature limitations.

Key words: optimization, prime price, turning, limitations, temperature.

Поступила в редколлегию _____