

УДК 621.9: 658.5

Т.Г. Ивченко, канд. техн. наук, доц.

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: [tm@mech.dgtu.donetsk.ua](mailto:tm@mech.dgtu.donetsk.ua)

## 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 оптимизации режимов резания с учетом температурных ограничений разработана только для метода линейного программирования. Установлено, что температурные ограничения существенно снижают оптимальные режимы резания. 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:

$$C = At_o + At_ct_o / T + A_u t_o / T, \quad (1)$$

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  $C_1 = C_P K_P t^{x_P} / 34 K_\phi c^{1.35} t^{0.77}$ ;  $y_i = y_P$ ;  $C_2 = k_o (90 + \gamma)^{k_3} r^{k_2} / R_a$ ;  $y_i = k_1$ ;  $c$  – толщина пластины  $\phi$ - главный угол в плане;  $C_P, K_P, x_P, y_P$  - коэффициенты и показатели, характеризующие степень влияния глубины и подачи на силу резания  $P_z$ ,  $K_\phi = (\sin 60^\circ / \sin \phi)^{0.8}$  - коэффициент, учитывающий влияние главного угла в плане  $\phi$ ;  $k_o, k_1, k_2, k_3$ , – коэффициент и показатели, характеризующие степень влияния подачи  $S$ , радиуса при вершине  $r$  и переднего угла  $\gamma$  на шероховатость обработанной поверхности  $R_a$ .

Температурное ограничение в зависимости от режимов резания имеет вид:

$$\Theta = C_\Theta V^{n_t} S^{y_t} t^{x_t}, \quad (4)$$

где  $C_\Theta, n_t, y_t, x_t$  – коэффициенты и показатели, характеризующие степень влияния скорости резания, подачи и глубины на температуру резания  $\Theta$ .

Особенностью температурных ограничений является их существенное влияние на стойкость режущего инструмента, то есть непосредственно на критерий оптимальности (1). При превышении температурой резания  $\Theta$  допустимого уровня  $\Theta_o$ , ( $K_\Theta = \Theta_o/\Theta$  - 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:

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

Согласно МГП на первом этапе оптимизации скорости резания и подачи решается система линейных уравнений для определения коэффициентов весовостей  $W_{0I}, W_{0L}, W_{1I}$ , 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  $K_{\Theta o} = \Theta_{don}/\Theta(V_o, S_o)$  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  $V_o$ :

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

Пример определения оптимальных режимов резания, обеспечивающих минимальную себестоимость, приведен для черного и чистового точения стали 45. Усло-

вия обработки: резцы Т5К10 и Т15К6 (главный угол резца в плане  $\varphi = 90^\circ$ , радиус при вершине  $r = 1\text{мм}$ ); глубина резания  $t_{\text{черн}} = 3\text{мм}$ ;  $t_{\text{чист}} = 1\text{мм}$ ; толщина пластины  $s = 4,76\text{мм}$ ; шероховатость поверхности  $R_a = 3,2\text{мкм}$ ; стоимость станкоминуты  $A = 5\text{коп/мин}$ ; стоимость 1 периода стойкости инструмента  $A_u = 5\text{ коп/период}$ ; время смены инструмента  $t_c = 1\text{мин}$ .

Для учета температурных ограничений приняты следующие зависимости температуры резания от режимов обработки ( $\Theta_1$  – для чернового точения,  $\Theta_2$  – для чистового точения) [6]:

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

Оптимальные режимы резания без учета температурных ограничений:

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

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

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  $\Theta_o = 800^\circ\text{C}$ . 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:  $V_{o\Theta_{\text{черн}}} = 107\text{м/мин}$ ;  $V_{o\Theta_{\text{чист}}} = 128\text{м/мин}$ .

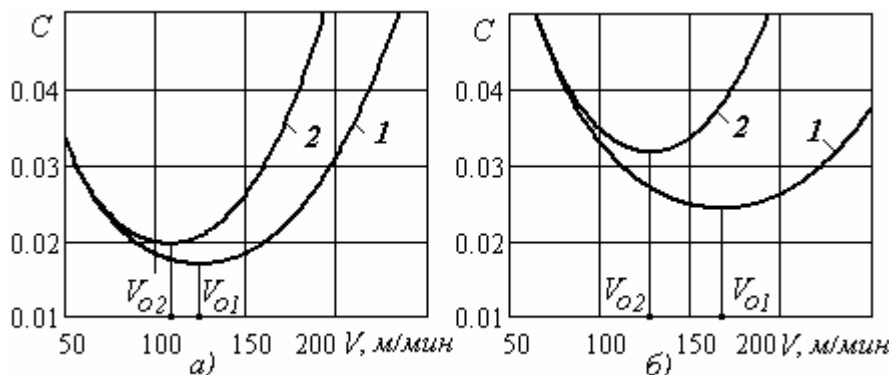


Рис. 1. Зависимость себестоимости обработки от скорости резания без учета температурных ограничений - 1, с учетом - 2 в условиях черновой обработки - а), чистовой - б)

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  $C_{\Theta}$ . 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 снижения себестоимости  $K_C = C/C_{\Theta}$ :

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

Графики зависимости коэффициента снижения себестоимости от коэффициента снижения температуры  $K_{\Theta}$  для чернового и чистового точения представленные на рис. 2, позволяют количественно оценить эффективность снижения себестоимости при снятии температурных ограничений.

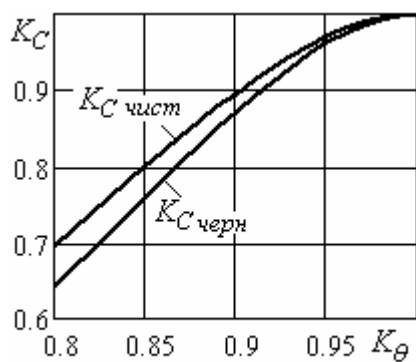


Рис. 2. Зависимость коэффициента снижения себестоимости от коэффициента снижения температуры

при чистовом и тонком точении методом геометрического программирования / Т.Г. Івченко, Е.Е. Шальская // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2010. – Вып. 39. – С.91-97.

3. Івченко Т.Г. Использование метода геометрического программирования для расчета оптимальных режимов резания при точении / Т.Г. Івченко // Научный вестник ДГМА. – 2011. – №1 (5 Е). – С. 47–52.

4. Івченко Т.Г. Оптимизация режимов резания при точении труднообрабатываемых материалов с учетом температурных ограничений / Зантур Сахби, В.А. Богуславский, Т.Г. Івченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2010. – Вып. 39. – С.77-84.

5. Івченко Т.Г. Оптимізація параметрів процесу різання з обліком температурних обмежень / Т.Г. Івченко // Научный вестник ДГМА. – 2012. – №1 (9 Е). – С. 72-77.

6. Івченко 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.

Надійшла до редакції 10.02.2014

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 MODES WITH THE METHOD OF GEOMETRICAL PROGRAMMING

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

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

**Выводы.** Усовершенствована методика оптимизации режимов резания методом геометрического программирования по критерию минимальной себестоимости при точении с учетом температурных ограничений. Для условий чернового 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. Кроль О.С. Оптимизация и управление процессом резания / О.С. Кроль, Г.Л. Хмеловский. – К.: УМК ВО, 1991. – 140 с.

2. Івченко Т.Г. Оптимизация режимов резания

при чистовом и тонком точении методом геометрического программирования / Т.Г. Ів-

ченко, Е.Е. Шальская // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2010.

– Вып. 39. – С.91-97.

3. Івченко Т.Г. Использование метода геометрического программирования для

расчета оптимальных режимов резания при точении / Т.Г. Івченко // Научный вестник

ДГМА. – 2011. – №1 (5 Е). – С. 47–52.

4. Івченко Т.Г. Оптимизация режимов резания при точении труднообрабатываемых

материалов с учетом температурных ограничений / Зантур Сахби, В.А. Богуслав-

ский, Т.Г. Івченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2010. –

Вып. 39. – С.77-84.

5. Івченко Т.Г. Оптимізація параметрів процесу різання з обліком температурних

обмежень / Т.Г. Івченко // Научный вестник ДГМА. – 2012. – №1 (9 Е). – С. 72-77.

6. Івченко Т.Г. Визначення впливу режимів точіння на температуру різання в різ-

них умовах механічної обробки / Т.Г. Івченко // Практика и перспективы развития

партнерства в сфере высшей школы. – Донецк: ДонНТУ, 2013. Т. 2. – С.121 - 125.

Надійшла до редакції 10.02.2014

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 аналітич-

ні 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 MODES

WITH THE METHOD OF GEOMETRICAL PROGRAMMING

With the use of the geometrical programming method the optimization of the cutting modes on the mini-

um prime price criterion taking into account the action of temperature limitations is carried out. Analytical

dependences of optimum feed and cutting speed on the parameters of turning process are determined. The analy-

sis of the possibilities of prime price decline due to the removal of temperature limitations is made.

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