

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПО КРИТЕРИЯМ МИНИМАЛЬНОЙ СЕБЕСТОИМОСТИ И МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРИ ТОНКОМ ТОЧЕНИИ ИНСТРУМЕНТАМИ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Шальская Е.Е., Полякова Е.В., Ивченко Т.Г. (каф. ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Применение сверхтвердых инструментальных материалов (СТМ) при обработке деталей машин является существенным резервом повышения эффективности современного машиностроительного производства. Несмотря на большое количество исследований в этом направлении, вопросы оптимизации режимов резания остаются достаточно актуальными.

Наиболее распространенными методами оптимизации в настоящее время являются методы линейного (МЛП) и геометрического (МГП) программирования [1], позволяющие осуществлять одновременную оптимизацию скорости резания и подачи с учетом действующих при резании ограничений по критериям максимальной производительности или минимальной себестоимости. Обязательным условием использования МЛП является возможность линеаризации целевой функции и ограничений. Для поиска оптимальных режимов резания в этом случае используются как графические, так и аналитические методы расчетов [2]. В случае нелинейной целевой функции, каковой является себестоимость обработки деталей, весьма целесообразно применение МГП, для которого также возможно получение аналитического решения [3]. Представляет интерес дальнейшее развитие и сравнение МЛП и МГП применительно к задачам оптимизации режимов резания при тонком точении инструментами из СТМ.

Цель работы – определить оптимальные режимы резания, обеспечивающие минимальную себестоимость и максимальную производительность обработки при заданном уровне качества обработанной поверхности при тонком точении с использованием резцов, оснащенных эльбором Р.

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

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

где  $A$  - себестоимость станко - минуты,  $A_u$  – стоимость одного периода стойкости инструмента;  $t_o$ - 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:

$$C = A \frac{\pi D L \Delta}{1000 V S t} + A t_c \frac{\pi D L \Delta}{1000 C_T} V^{\frac{1}{m}-1} S^{\frac{y}{m}-1} t^{\frac{x}{m}-1} + A_u \frac{\pi D L \Delta}{1000 C_T} V^{\frac{1}{m}-1} S^{\frac{y}{m}-1} t^{\frac{x}{m}-1}, \quad (2)$$

где  $D$ ,  $L$  - диаметр и длина обрабатываемой поверхности;  $\Delta$  припуск на обработку;  $V$  - скорость резания;  $S$  – подача;  $t$  – глубина резания;  $C_T$  – коэффициент и  $x$ ,  $y$ ,  $m$  – 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  $C_{01} = A \frac{\pi DL}{1000}$ ;  $C_{02} = (At_c + A_u) \frac{\pi DL}{1000 C_T} t^{\frac{x}{m}}$ ;  $k_V = 1/m - 1$ ;  $k_S = y/m - 1$ .

Для тонкого точения необходимо учитывать ограничение по предельно допустимой шероховатости обработанной поверхности  $R_a$ :

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

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  $\gamma$  на шероховатость обработанной поверхности  $R_a$ .

Это ограничение необходимо представить в следующем виде:

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

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

Оптимальные значения подачи  $S_{o1}$  и скорости резания  $V_{o1}$  определяются так:

$$S_{o1} = \left( W_{01}^{k_V} W_{02} V (W)_M^{k_V + 1} / M \right)^{1/(k_S - k_V)}; \quad V_{o1} = \left( W_{01}^{k_S} W_{02} V (W)_M^{k_S + 1} / M \right)^{1/(k_V - k_S)}, \quad (6)$$

где  $M = (t_c + A_u / A) t^{\frac{x_V}{m}} / C_T$ ,  $(W)_M = \left( \frac{1}{W_{01}} \right)^{W_{01}} \left( \frac{M}{W_{02}} \right)^{W_{02}} C_{11}^{W_{11}}$ ;

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

При оптимизации режимов резания с использованием МЛП в качестве целевой функции принимается производительность обработки, максимум которой достигается при минимуме основного времени, или максимуме произведения  $n \cdot S \rightarrow \max$  ( $n$  – частота вращения). При обработке инструментами из СТМ рассматриваются ограничения по возможностям режущего инструмента, по допустимой шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  и кинематические. Математическая модель процесса резания выражается системой линейных неравенств:

$$\begin{cases} X_1 + y_V X_2 \leq b_1, & b_1 = \ln(1000 C_V K_V / \pi D T^m t^x); \\ k_3 X_1 + k_2 X_2 \leq b_2 & b_2 = \ln(R_a r^{k_2} (\pi D / 1000)^{k_3} / k_o (90 + \gamma)^{k_4}); \\ X_1 \geq b_3, X_1 \leq b_4, & (7) \\ X_2 \geq b_5, X_2 \leq b_6, & b_3 = \ln n_{min}; b_4 = \ln n_{max}; \\ (X_1 + X_2) \rightarrow \max, & \end{cases}$$

$$b_5 = \ln S_{min}; b_6 = \ln S_{max};$$

$$X1 = \ln n; X2 = \ln S,$$

где  $n_{min}$ ,  $n_{max}$ ,  $S_{min}$ ,  $S_{max}$  - предельно допустимые частоты вращения и подачи;  $C_V$ ,  $K_V$  - коэффициенты, определяемые в зависимости от условий обработки

На основании анализа ограничений, для любых условий токарной обработки инструментами из сверхтвёрдых материалов оптимальная подача  $S_{o2}$  и скорость резания  $V_{o2}$  могут быть определены следующим образом:

$$S_{o2} = \left[ \frac{R_a C_V^{k_3} K_V^{k_3} r^{k_2}}{k_0 T^{mk_3} t^{x_1 k_3} (90 + \gamma)^{k_4}} \right]^{\frac{1}{k_3 + \gamma k_1}}; V_{o2} = \frac{C_V K_V}{T^m t^{x_1}} \left[ \frac{k_0 T^{mk_3} t^{x_1 k_3} (90 + \gamma)^{k_4}}{R_a C_V^{k_3} K_V^{k_3} r^{k_2}} \right]^{\frac{\gamma}{k_3 + \gamma k_1}}. \quad (8)$$

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

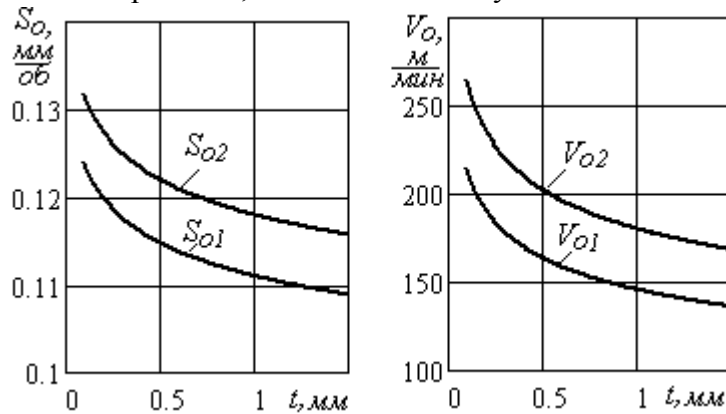


Рис.1. Графики зависимости оптимальных значений подачи  $S_o$  и скорости резания  $V_o$  от глубины резания  $t$  при тонком точении, рассчитанные по МГП и МЛП

обеспечивающих минимальную себестоимость (МГП).

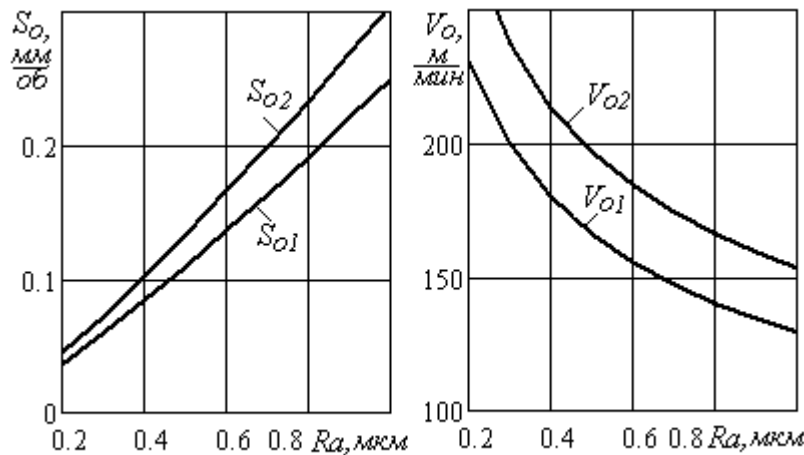


Рис.2. Графики зависимости оптимальных значений подачи  $S_o$  и скорости резания  $V_o$  от шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  при тонком точении, рассчитанные по МГП и МЛП

Закономерности изменения оптимальных значений подачи и скорости резания от глубины резания и шероховатости поверхности, рассчитанных по двум различным методикам – МГП (1) и МЛП (2), представлены на рис.1 и 2. Оптимальные значения режимов резания, обеспечивающие максимальную производительность (МЛП), превышают оптимальные значения режимов резания,

В результате расчетов установлено, что оптимальная подача уменьшается с повышением глубины резания и растет с увеличением шероховатости поверхности, оптимальная скорость резания уменьшается как с увеличением глубины резания, так и с увеличением шероховатости.

Расчеты оптимальных режимов резания вы-

полнены для обработки закаленной стали 45 (*HRC* 48) на станке 16К20Ф3 ( $A = 5$  коп/мин.,  $A_u = 15$  коп;  $t_c = 1$  мин) резцами из эльбора *P* (передний угол  $\gamma = -10^\circ$ , радиус при вершине  $r = 0,5$  мм); глубина резания  $t = 0,5$  мм; шероховатость поверхности  $R_a = 0,63$  мкм. Для указанных условий обработки приняты следующие коэффициенты и показатели:  $C_V = 2,933 \cdot 10^3$ ;  $K_V = 0,7$ ;  $x = 0,182$ ;  $v = 0,303$ ;  $m = 0,606$ ;  $k_0 = 0,16$ ;  $k_1 = 0,59$ ;  $k_2 = 0,29$ ;  $k_3 = 0,19$ ;  $k_4 = 0,66$ . При расчетах по МГП значения коэффициентов  $C_{01} = 362,7$ ,  $C_{02} = 0,65$ ;  $C_{11} = 16,3$ ,  $W_{01} = 0,28$ ;  $W_{02} = 0,72$ ,  $W_{11} = 0,853$ .

Оптимальные значения подачи и скорости резания, рассчитанные в соответствии с формулами (6) по МГП, равны:  $S_{01} = 0,115$  мм/об,  $V_{01} = 163$  м/мин; в соответствии с формулами (8) по МЛП:  $S_{02} = 0,122$  мм/об,  $V_{02} = 200$  м/мин.

На основании установленных аналитических зависимостей для определения оптимальных режимов резания могут быть рассчитаны коэффициенты изменения себестоимости  $K_C$  и производительности  $K_{II}$  обработки при отклонении выбранных режимов резания от их оптимальных значений  $S = kS_o$ ,  $V = kV_o$ . ( $k$  – степень отклонения):

$$K_C = \frac{C_{01}V^{-1}S^{-1} + C_{02}V^{k_V}S^{k_S}}{C_{01}V_{01}^{-1}S_{01}^{-1} + C_{02}V_{01}^{k_V}S_{01}^{k_S}}; \quad K_{II} = \frac{VS}{V_{02}S_{02}} \quad (9)$$

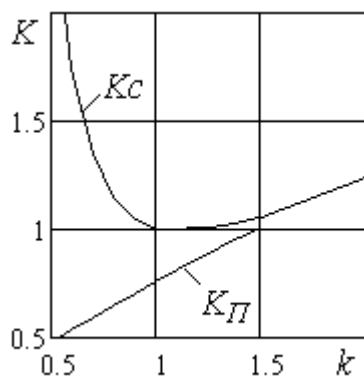


Рис. 3. Зависимость коэффициентов изменения себестоимости  $K_C$  и производительности  $K_{II}$  обработки от степени отклонения режимов резания от оптимальных  $k$

Из графика, представленного на рис. 3, следует, что минимальная себестоимость обработки ( $K_C = 1$ ) имеет место при  $k = 1$ , то есть при оптимальных режимах резания. При отклонении режимов резания, как в меньшую, так и в большую сторону от оптимальных, себестоимость увеличивается. В сравнении с режимами резания, обеспечивающими минимальную себестоимость, режимы, при которых достигается максимум производительности ( $K_{II} = 1$ ), значительно выше:  $k = 1,5$ . Дальнейшее их повышение ограничено шероховатостью обработанной поверхности.

При работе на режимах, обеспечивающих минимальную себестоимость, потери производительности составляют 25%. При работе на режимах, обеспечивающих максимальную производительность, потери себестоимости составляют 5%.

Таким образом, представленная методика позволяет для любых условий тонкого точения выполнять расчеты оптимальных режимов резания, обеспечивающих как минимальную себестоимость обработки, так и максимальную производительность. Разработанная методика определения оптимальных режимов резания может быть использована для любых видов обработки.

**Список литературы:** 1. Кроль О.С., Хмелевский Г.Л. Оптимизация и управление процессом резания. Учеб. Пособие.- К.: УМК ВО, 1991. - 140с. 2. Рудина И.А., Петряева И.А., Ивченко Т.Г. Оптимизация режимов резания при обработке деталей инструментами из сверхтвердых материалов. ИНЖЕНЕР: / Донецк: ДонНТУ, 2006, № 7. - С.177-178. 3. Ивченко Т.Г., Шальская Е.Е. Оптимизация режимов резания при чистовом и

тонком точении методом геометрического программирования // Прогрессивные технологии и системы машиностроения:– Донецк: ДонНТУ, 2010. Вып. 39. – С.