

УДК 621.9: 658.5

Т.Г. Ивченко, канд. техн. наук, доцент, Е.О. Лыхманюк, студент
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина
Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: tm@mech.dgtu.donetsk.ua

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОНКОГО ТОЧЕНИЯ ЗАКАЛЕННЫХ СТАЛЕЙ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

С использованием методов линейного и геометрического программирования осуществлена оптимизация режимов тонкого точения закаленных сталей по критериям максимальной производительности и минимальной себестоимости с учетом температурных ограничений. Выполнен сравнительный анализ возможностей повышения производительности и снижения себестоимости при снятии температурных ограничений.

Ключевые слова: оптимизация, себестоимость, производительность, ограничения.

1. Введение

Повышение эффективности механической обработки деталей машин - важнейшая задача машиностроения. Известна высокая эффективность использования современных сверхтвердых инструментальных материалов на финишных операциях, в том числе на операциях тонкого точения [1], которая, прежде всего, зависит от правильного выбора рациональных режимов резания. В связи с этим, представленная работа, посвященная оптимизации режимов тонкого точения закаленных сталей, весьма актуальна.

В настоящее время для оптимизации режимов резания широко используются методы линейного и нелинейного программирования [2], позволяющие осуществлять одновременную оптимизацию скорости резания и подачи с учетом действующих ограничений по критериям максимальной производительности и минимальной себестоимости.

Сравнительный анализ оптимальных режимов резания, определенных по критерию максимальной производительности методом линейного программирования (МЛП) и по критерию минимальной себестоимости методом геометрического программирования (МГП), свидетельствует о существенном различии оптимальных по разным критериям режимов тонкого точения чугунов резцами из киборита [3]. Представляет интерес дальнейшее развитие указанной методики сравнительного анализа для различных инструментальных и обрабатываемых материалов, в том числе для закаленных сталей.

Результаты расчетов оптимальных по критерию минимальной себестоимости режимов резания с использованием МГП [4], полученные для чистового и тонкого точения стали 45, не учитывают температурных ограничений. Достаточно хорошо разработана методика учета температурных ограничений при оптимизации режимов резания при черновом, чистовом и тонком точении различных обрабатываемых материалов с использованием МЛП [5]. Существенное расширение возможностей МГП с учетом температурных ограничений обосновано при оптимизации режимов резания черновой и чистовой токарной обработки незакаленной стали 45 [6]. Весьма целесообразно дальнейшее развитие указанной методики для закаленных сталей.

Цель работы – определение и сравнительный анализ оптимальных по критериям максимальной производительности и минимальной себестоимости режимов резания при тонком точении закаленных сталей.

2. Основное содержание и результаты работы

Основные закономерности протекания процесса резания при тонком точении закаленных сталей ($HRC\ 60 - 62$), описывающие зависимости стойкости режущего инструмента T , температуры резания Θ и шероховатости обработанной поверхности R_a от скорости резания V , подачи S и глубины резания t выражаются следующим образом [1]:

$$T = \frac{2,46 \cdot 10^4 K_M}{V^{1,65} t^{0,3} S^{0,5}}; \quad \Theta = 490 t^{0,09} S^{0,12} V^{0,2}; \quad R_a = 24,7 t^{0,10} S^{1,3} r^{-0,42}, \quad (1)$$

где K_M – коэффициент, учитывающий свойства обрабатываемых материалов ($K_M = 1$ для стали Р6М5, $K_M = 1,1$ для стали Р18, $K_M = 0,4$ для стали 40Х).

При оптимизации режимов резания по критерию максимальной производительности целевая функция выражается следующим образом: $n \cdot S \rightarrow \max$. Основные ограничения при тонком точении – по возможностям режущего инструмента, по температуре резания, по шероховатости обработанной поверхности и кинематические. В результате линеаризации целевой функции и ограничений математическая модель процесса резания выражается системой линейных неравенств ($X1 = \ln n$; $X2 = \ln S$):

$$\begin{cases} X1 + y_V X2 \leq b_1; \\ n_t X1 + y_t X2 \leq b_2; \\ y_r X2 \leq b_3; \\ X1 \geq b_4, \quad X1 \leq b_5; \\ X2 \geq b_6, \quad X2 \leq b_7; \\ (X1 + X2) \rightarrow \max, \end{cases} \quad \begin{cases} b_1 = \ln(1000 C_V K_V / \pi D T^m t^{x_v}); \\ b_2 = \ln(1000^{n_t} \Theta / C_\Theta (\pi D)^{n_t} t^{x_t}); \\ b_3 = \ln(R_a / C_R t^{x_r} r^{n_r}); \\ b_4 = \ln n_{\min}; \quad b_5 = \ln n_{\max}; \\ b_6 = \ln S_{\min}; \quad b_7 = \ln S_{\max}, \end{cases} \quad (2)$$

где D – диаметр обработки, C_V, K_V, x_v, y_v, m – коэффициенты и показатели, характеризующие степень влияния глубины t , подачи S , стойкости T на скорость резания V ; C_Θ, x_t, y_t, n_t – коэффициент и показатели, характеризующие степень влияния глубины t , подачи S скорости V и на температуру резания Θ ; C_R, x_r, y_r, n_r – коэффициент и показатели, характеризующие степень влияния глубины t , подачи S , радиуса при вершине инструмента r на шероховатость обработанной поверхности R_a ; $n_{\min}, n_{\max}, S_{\min}, S_{\max}$ – предельно допустимые диапазоны частот вращения и подач на станке.

В результате решения системы линейных неравенств (2) установлены оптимальные подача S_{ol} и скорость резания V_{ol} :

$$S_{ol} = \left(R_a / C_R t^{x_r} r^{n_r} \right)^{1/y_r}; \quad V_{ol} = \begin{cases} \left(\Theta / C_\Theta t^{x_t} S_o^{y_t} \right)^{1/n_t}, & \Theta < \Theta_o; \\ C_V K_V / T^m t^{x_v} S_o^{y_v}, & \Theta \geq \Theta_o, \end{cases} \quad (3)$$

где Θ_o – граничное значение температуры резания, свидетельствующее о необходимости учета температурного ограничения:

$$\Theta_o = C_\Theta \left(C_V K_V / T^m t^{x_v} \right)^{n_t} \left(R_a / C_R t^{x_r} r^{n_r} \right)^{(y_v n_t - y_t)/y_r} t^{x_t}. \quad (4)$$

Для обеспечения минимальной себестоимости в качестве критерия оптимальности принимается переменная часть себестоимости обработки, зависящая от режимов резания:

$$C_o = At_o + At_c t_o / T + A_u t_o / T, \quad (5)$$

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

При определении оптимальных значений скорости резания и подачи с заданной глубиной резания t в условиях однопроходной обработки с учетом температурных ограничений целевая функция выражается следующим образом [6]:

$$C = V^{-1} S^{-1} + MK_{\Theta}^{-1/mn_t} V^{k_V} S^{k_S}, \quad (6)$$

где $M = (t_c + A_u/A) \left(t^{x_v} / C_V K_V \right)^{1/m}$; $k_V = 1/m - 1$; $k_S = y_v/m - 1$; $K_{\Theta} = \Theta_{don}/\Theta$ - коэффициент снижения температуры резания Θ при превышении ею допустимого уровня Θ_{don} .

Ограничение по шероховатости при оптимизации режимов тонкого точения с использованием МГП представляется в виде:

$$C_1 S^{y_r} \leq 1, \quad (7)$$

где $C_1 = C_R t^{x_r} r^{n_r} / R_a$.

Оптимальные подача S_{o2} и скорость резания V_{o2} определяются в результате решения системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} V(W)W_{01} = V^{-1}S^{-1}; \\ V(W)W_{02} = MK_{\Theta}^{-1/mn_t} V^{k_V} S^{k_S}, \end{cases} \quad (8)$$

где $V(W) = (1/W_{01})^{W_{01}} \left(MK_{\Theta}^{-1/mn_t} / W_{02} \right)^{W_{02}} C_1^{W_{11}}$ - специальная функция; W_{01} , W_{02} , W_{11} - коэффициенты весовостей, определяемые из системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} W_{01} + W_{02} = 1; \\ -W_{01} + k_V W_{02} = 0; \\ -W_{01} + k_S W_{02} + y_r W_{11} = 0; \end{cases} \quad W_{01} = \frac{k_V}{1+k_V}; \quad W_{02} = \frac{1}{1+k_V}; \quad W_{11} = \frac{W_{01}(1+k_S) - k_S}{y_r}. \quad (9)$$

С учетом преобразований $W_{01} = 1 - m$, $W_{02} = m$, $W_{11} = (1 - y_v)/y_r$.

В результате решения системы линейных уравнений (8) установлены оптимальные подача S_{o2} и скорость резания V_{o2} :

$$S_{o2} = C_1^{-1/y_r}; \quad V_{o2} = \begin{cases} \left(m/(1-m) MK_{\Theta}^{-1/mn_t} \right)^m S_o^{y_v}, & K_{\Theta o} \leq 1, \\ \left(m/(1-m) M \right)^m S_o^{y_v}, & K_{\Theta o} \geq 1 \end{cases} \quad (10)$$

где $K_{\Theta o} = \Theta_{don}/\Theta(V_o, S_o)$ – граничное значение коэффициента, свидетельствующее о необходимости учета температурного ограничения:

$$K_{\Theta o} = \Theta_o / C_{\Theta} \left(\frac{m}{(1-m)M} \right)^m \left(\frac{C_R t^{x_r} r^{n_r}}{R_a} \right)^{(y_v n_t - y_t)/y_r} t^{x_t}. \quad (11)$$

Выполняя ряд преобразований, в окончательном виде получаем:

$$S_{o2} = \left(R_a / C_R t^{x_r} r^{n_r} \right)^{1/y_r}; \quad V_{o2} = \begin{cases} \left(\Theta / C_{\Theta} t^{x_t} S_o^{y_t} \right)^{1/n_t}, & K_{\Theta o} \leq 1, \\ \left(m / (1-m) M \right)^m S_o^{y_v}, & K_{\Theta o} \geq 1 \end{cases} \quad (11)$$

В результате сравнительного анализа зависимостей оптимальных подач и скоростей резания от условий обработки, определяемых по различным критериям – максимальной производительности (3) и минимальной себестоимости (11) установлено:

оптимальная подача не зависит от выбора критерия оптимальности и определяется ограничением по шероховатости (это справедливо в том случае, когда скорость резания несущественно влияет на шероховатость и не учитывается в этом ограничении);

оптимальная скорость резания не зависит от выбора критерия оптимальности в том случае, когда она определяется с учетом температурного ограничения в условиях, превышения фактической температурой резания допустимого уровня;

оптимальная по критерию максимальной производительности скорость резания, определяемая с учетом ограничения по режущим свойствам инструмента при температурах резания, ниже допустимого уровня, превышает скорость резания, оптимальную по критерию минимальной себестоимости. Коэффициент превышения:

$$k = [(1-m)(t_c + A_u/A)/mT]^m. \quad (12)$$

Расчеты оптимальных режимов резания, обеспечивающих максимальную производительность и минимальную себестоимость тонкого точения закаленных сталей при указанных ранее параметрах процесса резания (1) выполнены для следующих условий:

резцы из эльбора - главный угол в плане $\varphi = 35^\circ$, вспомогательный угол в плане $\varphi_l = 15^\circ$, передний угол $\gamma = -10^\circ$, задний угол $\alpha = 15^\circ$, радиус при вершине $r = 0,8\text{мм}$; глубина резания $t = 0,5\text{мм}$; шероховатость поверхности $R_a = 1,25\text{мкм}$; стоимость станкоминуток $A = 5\text{коп/мин}$; стоимость 1 периода стойкости инструмента $A_u = 500\text{ коп/период}$; время смены инструмента $t_c = 5\text{мин}$).

Оптимальные режимы резания с учетом температурных ограничений: $S_o = 0,1\text{мм/об}$; $V_o = 64,4\text{м/мин}$. Оптимальные скорости резания без учета температурных ограничений по критерию максимальной производительности - $V_{o1} = 88, 2\text{м/мин}$; по критерию минимальной себестоимости - $V_{o2} = 81,6\text{м/мин}$. Температуры резания для этих скоростей составляют соответственно $\Theta_1 = 852^\circ\text{C}$, $\Theta_2 = 839^\circ\text{C}$.

Учет температурных ограничений приводит к снижению оптимальных режимов резания, а, следовательно, к снижению производительности и повышению себестоимости обработки. Эффективным способом снижения температур резания и снятия температурных ограничений является использование смазочно-охлаждающих сред (СОТС),

которые при тонком точении закаленных сталей резцами из сверхтвёрдых инструментальных материалов целесообразно подавать в зону резания в распыленном состоянии.

Количественная оценка повышения эффективности обработки при тонком точении при снятии температурных ограничений может быть выполнена на основании коэффициентов повышения производительности K_P и снижения себестоимости K_C :

$$K_P = \frac{C_V K_V (C_{\Theta} t^{x_t} S_o^{y_t})^{1/n_t}}{\Theta^{1/n_t} T^{m_t} x_v S_o^{y_v}}; \quad K_C = \frac{1 + M V_o^{k_v+1} S_o^{k_s+1}}{1 + M K_{\Theta}^{-1/mn_t} V_o^{k_v+1} S_o^{k_s+1}}. \quad (13)$$

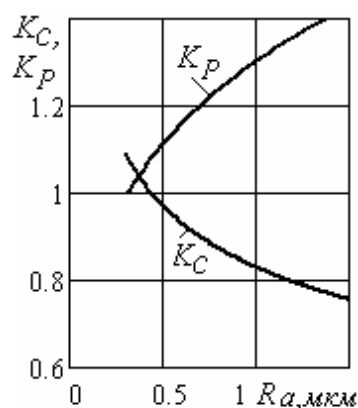


Рис. 1. Зависимость коэффициентов снижения себестоимости и повышения производительности от шероховатости R_a

Графики коэффициентов снижения себестоимости K_C и повышения производительности K_P в зависимости от шероховатости обработанной поверхности R_a , представленные на рис. 1, позволяют количественно оценить повышение эффективности тонкого точения при снятии температурных ограничений.

При снижении требований к шероховатости обработанной поверхности (увеличении параметра R_a) коэффициент снижения себестоимости K_C уменьшается, коэффициент повышения производительности K_P – возрастает, что свидетельствует о необходимости снижения температуры и целесообразности использования СОТС. В области малых значений параметра R_a (менее 0,5 мкм) коэффициенты повышения производительности K_P и снижения себестоимости K_C близки к 1 ($K_P \approx 1$, $K_C < 1$), что свидетельствует о нецелесообразности снижения температуры.

Графики зависимости оптимальных значений подачи S_o и скорости резания V_o от шероховатости обработанной поверхности R_a (рис. 2) позволяют регламентировать оптимальные режимы тонкого точения для различных условий обработки.

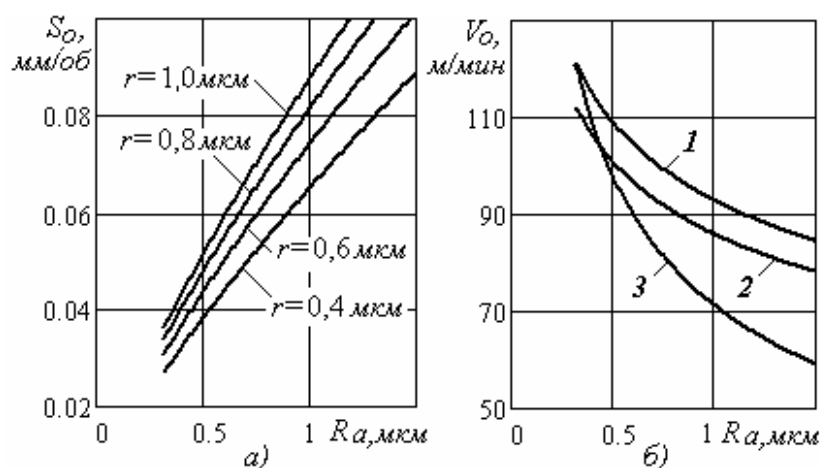


Рис. 2. Влияние параметра шероховатости R_a на оптимальные подачи S_o для различных радиусов при вершине $r - a$); на оптимальные по различным критериям скорости резания $V_o - б)$

Графики оптимальных скоростей резания V_o , не учитывающих температурные ограничения представлены для различных критериев: максимальной производительности – 1, минимальной себестоимости – 2.

Учет температурных ограничений снижает оптимальные скорости резания – 3, тем сильнее, чем больше параметр R_a .

Выводы. С ис-

пользованием методов линейного и геометрического программирования осуществлена оптимизация режимов тонкого точения закаленных сталей по критериям максимальной производительности и минимальной себестоимости с учетом температурных ограничений. Выполнен сравнительный анализ оптимальных подач и скоростей резания, определенных по различным критериям оптимальности. Обоснована возможность повышения производительности тонкого точения в 1,4 раза, снижение себестоимости в 1.3 раза за счет снятия температурных ограничений

Разработанная методика может быть использована для любых видов обработки.

Список литературы:

1. Режущие инструменты, оснащенные сверхтвердыми и керамическими материалами, и их применение: [Справочник] / В.П. Жедь, Г.В. Боровский, Я.А. Музыкант, Г.М. Ипполитов. — М.: Машиностроение, 1987. — 320с.
2. Оптимизация и управление процессом резания: / О.С. Кроль, Г.Л. Хмеловский. — К.: УМК ВО, 1991. — 140с.
3. Івченко Т.Г. Двохкритеріальна оптимізація режимів різання під час обробки чавунів інструментами з надтвердих матеріалів / Т.Г. Івченко, Є.В. Полякова // Прогресивные технологии и системы машиностроения:— Донецк: ДонНТУ, 2011. Вып. 41. — С.152-158.
4. Івченко Т.Г. Оптимізація режимів резання при чистовом и тонком точении методом геометрического программирования / Т.Г. Івченко, Е.Е. Шальская // Прогресивные технологии и системы машиностроения:— Донецк: ДонНТУ, 2010. Вып. 39. — С.91-97.
5. Івченко 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. Івченко Т.Г. Учет температурных ограничений при оптимизации режимов резания методом геометрического программирования / Т.Г. Івченко // Прогресивные технологии и системы машиностроения:— Донецк: ДонНТУ, 2014. Вып. 1(47). — С.144-148.

Надійшла до редколегії 3.12.2014.

T.G. Ivchenko, E.O. Lechmanuk

INCREASE OF THE FINE TURNING EFFICIENCY OF HARD-TEMPERED STEELS FOR AN ACCOUNT OF CUTTING REGIMS OPTIMIZATION

With the use of the linear and geometrical programming method, the optimization of the cutting regimes on the maximum productivity and minimum prime price criterions taking into account the action of temperature limitations is carried out. The comparative analysis of possibilities of the productivity increase and prime price decline is executed due to the removal of temperature limitations.

Key words: optimization, prime price, productivity, limitations.

Т.Г. Івченко, Е.О. Лихманюк

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТОНКОГО ТОЧІННЯ ЗАГАРТОВАНИХ СТАЛЕЙ ЗА РАХУНОК ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ

З використанням методів лінійного та геометричного програмування здійснена оптимізація режимів різання по критеріям максимальної продуктивності та мінімальної собівартості з урахуванням дії температурних обмежень. Виконаний порівняльний аналіз можливостей підвищення продуктивності та зниження собівартості за рахунок зняття температурних обмежень.

Ключові слова: оптимізація, собівартість, продуктивність, обмеження.