

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ

Авторы: Богуславский В.А., Ивченко Т.Г., Зантур Сахби

Источник: Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Випуск 7(166). - Донецьк, ДонНТУ, 2010.- С.9-16.

Аннотация

Представлена методика расчета температуры резания при точении труднообрабатываемых материалов с использованием различных смазочно-охлаждающих жидкостей. Установлены характер и степень их влияния на температуру резания, а также на оптимальные режимы резания, обеспечивающие максимальную производительность обработки. Выполнена оценка эффективности применения смазочно-охлаждающих жидкостей на основании коэффициента повышения производительности обработки.

Введение

Низкая обрабатываемость специальных марок нержавеющей, жаропрочных и высокопрочных сталей и сплавов, широко распространенных в деталях и узлах современных машин, обуславливает высокую трудоемкость и низкую себестоимость их изготовления. В связи с этим весьма актуальны исследования возможностей повышения производительности и снижения себестоимости обработки этих материалов за счет применения различных смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ).

Высокие температуры в зоне обработки, возникающие из-за низкой теплопроводности труднообрабатываемых материалов, определяют необходимость исследования температурных ограничений на режимы резания при их оптимизации. Существующая методика расчета тепловых потоков и температур в зоне резания не дает возможности учитывать охлаждающее и смазывающее действие СОЖ [1, 2, 3]. Для этих видов материалов представляет интерес дальнейшее развитие методики определения температур в зоне резания при использовании СОЖ.

Одним из способов повышения производительности обработки является одновременная оптимизация скорости резания и подачи с помощью метода линейного программирования [4] по критерию максимальной производительности. Однако, имеющиеся работы по оптимизации не охватывают область обработки специальных марок нержавеющей, жаропрочных и высокопрочных сталей и сплавов. Существующие рекомендации по выбору рациональных параметров обработки этих материалов содержат ограниченные сведения о влиянии СОЖ на режимы резания [5]. Недостаточно информации и по оценке достижимого уровня повышения производительности при применении различных СОЖ, что затрудняет обоснование их выбора в различных условиях обработки.

Для труднообрабатываемых материалов представляет интерес дальнейшее развитие методики оптимизации режимов резания с учетом температурных ограничений при использовании различных СОЖ.

Цель представляемой работы – установить влияние СОЖ на температуру резания и оптимальные по производительности режимы резания при точении изделий из труднообрабатываемых материалов, а также оценить возможность повышения производи-

тельности их обработки при использовании различных СОЖ.

Основное содержание и результаты работы

Температура в лезвии инструмента формируется под воздействием тепловых потоков q_1 и q_2 , возникающих в зоне резания вследствие деформации стружкообразования, трения на площадках контакта между стружкой и передней поверхностью лезвия и трения между задней поверхностью лезвия и деталью, представленных на рис. 1.

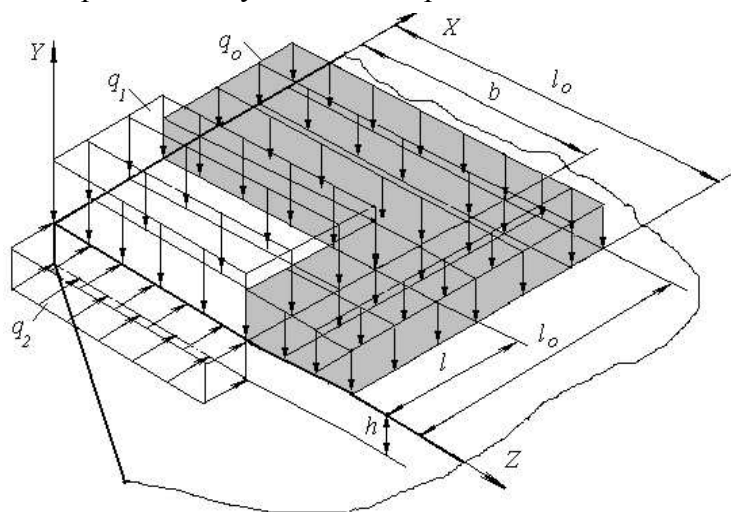


Рис. 1. Схема действия тепловых потоков на передней и задней поверхностях лезвия инструмента с применением СОЖ

Ось X в рассматриваемой системе координат ориентируется в направлении передней поверхности перпендикулярно главной режущей кромке; l - длина контактной площадки в направлении схода стружки; h - износ по задней поверхности; b - ширина среза.

За счет применения СОЖ, подаваемой свободным поливом со стороны передней поверхности, образуется поток теплоты с равномерным по площадке $l_0 \times l_0$ распределением плотности тепловыделения q_0 . С учетом действия потока теплоты q_0

средние температуры на передней и задней поверхностях лезвия определяются следующим образом [1]:

$$\begin{aligned} \Theta_1 &= \frac{M_1 l}{\lambda_{\text{д}}} (q_1 + q_{01}) + \frac{N_2 h}{\lambda_{\text{д}}} q_2 - \frac{M_o l_0}{\lambda_{\text{д}}} q_0; \\ \Theta_2 &= \frac{M_2 h}{\lambda_{\text{д}}} q_2 + \frac{N_1 l}{\lambda_{\text{д}}} (q_1 + q_{01}) - \frac{N_o l_0}{\lambda_{\text{д}}} q_0 \end{aligned} \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{д}}$ - коэффициент теплопроводности инструмента; M_1, M_2, N_1, N_2 - безразмерные функции, определяющие нагрев площадок на передней и задней поверхностях лезвия инструмента; M_o, N_o - безразмерные функции, определяющие охлаждение площадки на передней поверхности под действием СОЖ.

В соответствии с законом Ньютона - Рихмана, описывающим процесс конвективного теплообмена, поток теплоты, возникающий при действии СОЖ:

$$q_0 = \alpha_o \Theta_{\text{ср}}, \quad (2)$$

где α_o - коэффициент теплоотдачи на поверхности контакта инструмента с СОЖ; $\Theta_{\text{ср}}$ - средняя температура на этой поверхности.

Для расчета коэффициента теплоотдачи при подаче СОЖ в зону резания свободным поливом, используется уравнение [1]:

$$\alpha_o = C \lambda_o w^m / l_o^x v^z \omega_o^n, \quad (3)$$

где λ_o , ω_o - коэффициенты теплопроводности и температуропроводности среды; C , m , n , x , y , z - коэффициент и показатели степеней, зависящие от способа подачи среды в зону обработки; l_o - характерный размер: $l_o = BH/2(B+H)$; B - ширина, H - высота державки резца; w - скорость потока; ν - коэффициент кинематической вязкости среды; показатели степени $x = (1-m)$, $z = (m-n)$;

В связи с тем, что температура поверхностей лезвия инструмента превышает 100°C , при определении коэффициента теплоотдачи необходимо учитывать изменение агрегатного состояния жидкости. Коэффициент теплоотдачи в кипящую жидкость α_k :

$$\alpha_{\hat{\delta}} = 3,33 \cdot 10^6 (\Theta_S - 100)^{-1,43}, \quad \text{при } \Theta_S \geq 120^\circ\text{C}. \quad (4)$$

Движение жидкости относительно инструмента вносит изменения в процесс кипения. Приведенный коэффициент теплоотдачи α_{np} , учитывающий совместное влияние кипения и конвективного теплообмена:

$$\alpha_{i\hat{\delta}} = \alpha_o [(4\alpha_o + \alpha_{\hat{\delta}})/(5\alpha_o - \alpha_{\hat{\delta}})], \quad \text{при } 0,5\alpha_o \leq \alpha_{\hat{\delta}} \leq 2\alpha_o. \quad (5)$$

где α_k и α_o - независимо рассчитанные коэффициенты теплоотдачи при кипении и при конвективном теплообмене соответственно.

Для определения плотности тепловыделения q_o необходимо использовать заранее неизвестное значение средней температуры Θ_{cp} поверхности контакта инструмента с СОЖ. Для ее определения принимаем: $\Theta_{cp} = m_o \Theta_1$; $m_o = \rho^{-0,86}$, $\rho = 2l_o/(b+l)$ - безразмерный параметр, сопоставляющий размеры зоны охлаждения с размерами контактной площадки стружки с лезвием инструмента; Θ_1 - средняя температура на передней поверхности лезвия. Тогда плотность тепловыделения равна:

$$q_{o1} = \alpha_o m_o \Theta_1. \quad (6)$$

Плотности тепловых потоков на передней q_1 и задней q_2 поверхностях лезвия инструмента, принимаемые равномерно распределенной по контактными площадкам bxl и bxh , определяются в соответствии с методикой, представленной в [2, 3]:

Температура резания представляет собой среднюю температуру на передней и задней поверхностях лезвия:

$$\Theta = (\Theta_1 l + \Theta_2 h)/(l + h). \quad (7)$$

В результате исследования зависимостей температуры резания Θ от скорости резания V и подачи S с использованием множественного регрессионного анализа при обработке стали X18H9T с различными СОЖ установлены (с погрешностью, не превышающей 5%) следующие степенные зависимости:

$$\text{при обработке без СОЖ } \Theta_{\hat{\delta}i\hat{\delta}} = 53,5V^{0,71}S^{0,51};$$

$$\text{при обработке с использованием в качестве СОЖ эмульсола Э-2 - } \Theta_{COЖ1};$$

$$\text{при обработке с использованием в качестве СОЖ эмульсола НГЛ-205 } \Theta_{COЖ2};$$

$$\text{при обработке с использованием в качестве СОЖ эмульсола СДМ, у - } \Theta_{COЖ3};$$

$$\Theta_{\hat{N}i\hat{E}1} = 38,2V^{0,72}S^{0,53}; \quad \Theta_{\hat{N}i\hat{E}2} = 34,6V^{0,72}S^{0,53}; \quad \Theta_{\hat{N}i\hat{E}3} = 38,2V^{0,72}S^{0,53}.$$

На основании представленных зависимостей выполнены расчеты температур резания в зависимости от скорости резания V при обработке нержавеющей стали X18H9T с различными СОЖ, графики которых представлены на рис. 2.

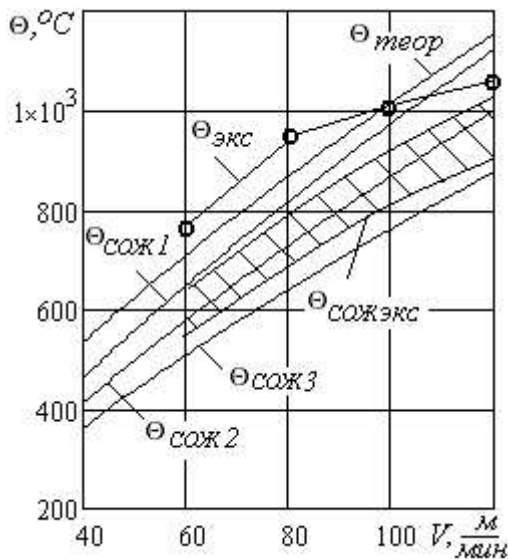


Рис.2. Графики зависимости температуры резания от скорости при обработке стали X18H9T с различными СОЖ

Расчеты выполнялись для следующих условий: инструментальный материал - твердый сплав марки ВК8 (геометрические параметры: главный угол в плане $\varphi = 45^\circ$, передний угол $\gamma = 12^\circ$); ширина и высота державки резца $B = 20\text{мм}$, $H = 25\text{мм}$; глубина резания $t = 2\text{мм}$; подача $S = 0,4\text{ мм/об}$; износ по задней поверхности $h = 0,2\text{мм}$. Рассчитанное для этих условий значение приведенного коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{пр}} = 4 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Проверка адекватности полученных зависимостей выполнена путем сравнения теоретических зависимостей с результатами экспериментов, представленных в [4].

Результаты сравнения, приведенные на рис. 2, свидетельствуют о том, что с погрешностью, не превышающей 10%, теоретическая зависимость температуры резания $\Theta_{\text{теор}}$ от скорости резания V при обработке без СОЖ подтверждается экспериментальной $\Theta_{\text{экс}}$ как по уровню температур, так и по характеру зависимостей.

Результаты экспериментальных исследований температур в зависимости от скорости резания V для различных СОЖ представлены на рис.2 заштрихованной зоной, также достаточно хорошо совпадающей с расчетными зависимостями.

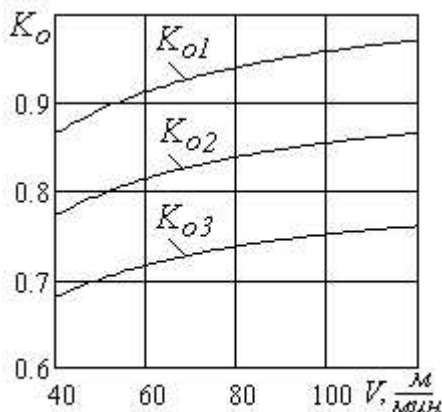


Рис.3. Графики зависимости коэффициента снижения температуры резания от скорости при обработке стали X18H9T с различными СОЖ

Для оценки эффективности действия СОЖ вводится коэффициент снижения температуры резания:

$$K_o = \Theta_{\text{экс}} / \Theta_{\text{теор}} \quad (8)$$

Графики зависимостей коэффициента снижения температуры K_o резания от скорости V для различных СОЖ представлены на рис. 3.

Снижение температуры резания при обработке с использованием в качестве СОЖ эмульсола Э-2 достигается преимущественно за счет охлаждающего эффекта СОЖ. При использовании эмульсола НГЛ-205, состоящего из масляного раствора сульфоната натрия и пассивирующих добавок водорастворимых ингибиторов коррозии - нитрита натрия и тринатрийфосфата, к охлаждающему эффекту добавляется

эффект смазывающий, что усиливает снижение температуры $\Theta_{\text{СОЖ2}}$. Наибольший эффект снижения температуры $\Theta_{\text{СОЖ3}}$ наблюдается при использовании эмульсола СДМ,у, представляющего собой безводную систему содержащую масло, сульфат натрия, во-

дорастворимые ингибиторы коррозии и небольшое количество (до 3 %) дисульфида молибдена (в качестве противоизносной присадки), прошедшего ультразвуковую обработку. Наличие дисульфида молибдена существенно повышает смазывающее действие СОЖ, что и обеспечивает максимальное снижение температуры резания.

Полученные коэффициенты используются для учета действия различных СОЖ в температурных ограничениях при дальнейшей оптимизации режимов резания.

В качестве целевой функции при оптимизации режимов резания принимается производительность обработки, максимум которой достигается при минимуме основного времени, или максимуме произведения $n \cdot s \rightarrow \max$. В настоящей работе рассматриваются следующие основные ограничения режимов резания при обработке труднообрабатываемых материалов [5]:

1) по возможностям режущего инструмента, обусловленной скоростью резания, соответствующей его стойкости:

$$\pi D n / 1000 \leq C_V K_V / T^{m_v} t^{x_v} s^{y_v}, \quad (9)$$

где D – диаметр обработки, C_V, K_V – коэффициенты и x_v, y_v, m_v – показатели, которые характеризуют степень влияния глубины t , подачи s и стойкости T на скорость резания v , определяемые в зависимости от условий эксплуатации; n – частота вращения;

2) по предельно допустимой температуре резания:

$$\tilde{N}_t t^{x_t} s^{y_t} v^{z_t} \leq \Theta_{\text{äiä}}; \quad (10)$$

где C_t – постоянный коэффициент, z_t, y_t, x_t – показатели степени, характеризующие влияние на температуру скорости резания, подачи и глубины резания.

3) по прочности пластины резца:

$$34 \tilde{n}^{1.35} t^{0.77} \left(\sin 60^\circ / \sin \varphi \right)^{0.8} \geq C_P K_P s^{y_P} t^{x_P}, \quad (11)$$

где c – толщина пластины; φ – главный угол резца в плане; C_P, K_P – коэффициенты и x_P, y_P – показатели, характеризующие степень влияния глубины и подачи на силу резания P_z , определяемые в зависимости от условий эксплуатации.

В результате линеаризации целевой функции и ограничений путем логарифмирования определена математическая модель процесса резания, выраженная системой линейных неравенства, графически представленных на рис. 4. ($X1 = \ln n$; $X2 = \ln s$):

$$\begin{cases} X1 + y_V X2 \leq b_1, & b_1 = \ln \left(1000 C_V K_V / \pi D T^{m_v} t^{x_v} \right); \\ z_t X1 + y_t X2 \leq b_2 & b_2 = \ln \left(1000^{z_t} \Theta_{\text{äiä}} / \tilde{N}_t t^{x_t} (\pi D)^{z_t} \right); \\ y_P X2 \leq b_3, & \\ (X1 + X2) \rightarrow \max, & b_3 = \ln \left(34 \tilde{n}^{1.35} \left(\sin 60^\circ / \sin \varphi \right)^{0.8} / C_P K_P s^{y_P} t^{(x_P - 0.77)} \right); \end{cases} \quad (12)$$

Пример определения оптимальных режимов резания приведен для черновой токарной обработки вала диаметром $D = 100$ мм, длиной $L = 200$ мм из стали X18H9T (прочность $\sigma_s = 600$ МПа). Обработка осуществляется сборными резцами с механическим креплением твердосплавных пластин ВК8 (геометрические параметры: главный угол в плане $\varphi = 45^\circ$, передний угол $\gamma = 12^\circ$, толщина пластины $c = 4,76$ мм, ширина и высота державки $B = 20$ мм, $H = 25$ мм, вылет резца $l = 25$ мм, стойкость $T = 30$ мин., глу-

бина резания $t = 2\text{мм}$, износ по задней поверхности $h = 0,2\text{мм}$) на токарном станке 16К20Ф3. При обработке с СОЖ используется эмульсол СДМ,у.

Для заданных условий механообработки приняты следующие коэффициенты и показатели, характеризующие степень влияния глубины, подачи и стойкости на скорость резания [4]: $C_V = 150$; $x_v = 0,15$; $y_v = 0,45$; $m = 0,25$; $K_V = 1,2$;

коэффициенты и показатели, характеризующие степень влияния глубины, подачи и скорости на силу резания [4]: $C_P = 3400$; $x_p = 0,95$; $y_p = 0,75$; $n_p = -0,15$; $K_P = 0,8$;

С их учетом определены следующие значения параметров b_i :

- при обработке без СОЖ: $b_1 = 5,214$; $b_2 = 3,527$; $b_3 = -0,092$; $b_4 = -2,996$; $b_5 = 1,03$; $b_6 = 2,536$; $b_7 = 7,601$.

- при обработке с СОЖ: $b_1 = 5,397$; $b_2 = 4,073$; $b_3 = 1,765$; $b_4 = -2,996$; $b_5 = 1,03$; $b_6 = 2,536$; $b_7 = 7,601$.

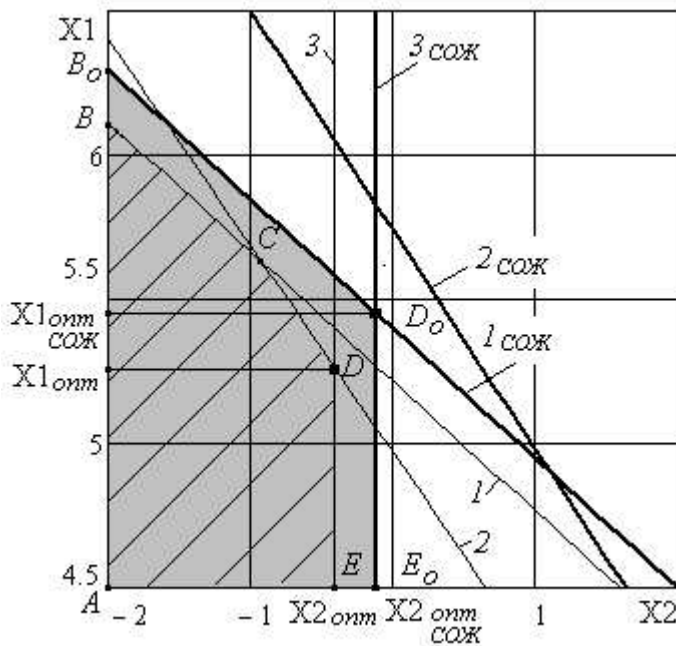


Рис. 4 – Схема определения оптимальных режимов резания при токарной обработке стали X18H9T с применением СОЖ

пературе резания (2) и ограничения по прочности пластины резца (3). За счет использования СОЖ температурное ограничение (2) снимается, точка D_0 является точкой пересечения ограничений по режущим возможностям инструмента (1) и ограничения по прочности пластины резца (3), вследствие чего оптимальные значения как подачи, так и скорости резания возрастают, что приводит и к повышению производительности обработки.

Для заданных условий определены следующие оптимальные режимы:

- при обработке без СОЖ: скорость $V_{opt} = 62$ м/мин, подача $S_{opt} = 0,65$ мм/об;

- при обработке с СОЖ: скорость $V_{opt} = 73$ м/мин, подача $S_{opt} = 0,8$ мм/об.

Оптимальные режимы резания - подача и скорость резания могут быть определены аналитически:

$$S_{opt} = \left[34c^{1,25} t^{(0,77-x_p)} (\sin(\phi_1)/\sin(\phi))^{0,8} / C_P K_P \right]^{1/y_p}; \quad (13)$$

Схема определения оптимальных режимов резания при точении стали X18H9T представлена на рис. 4.

Многоугольник $ABCDE$ представляет собой область возможных решений при обработке без СОЖ, многоугольник $AB_0D_0E_0$ - при обработке с СОЖ. Целевая функция принимает максимальное значение в точке D , для которой сумма расстояний до осей $(X1+X2)$ максимальна. Координаты точек $D (X1_{opt}, X2_{opt})$ и $D_0(X1_{opt}, X2_{opt})$ являются искомыми оптимальными значениями параметров, на основании которых определяются оптимальные частота вращения и подача.

Точка D является точкой пересечения ограничений по предельно допустимой тем-

$$V_{\text{ндо}} = \left(\frac{\Theta}{C_t} \right)^{\frac{1}{z_t}} \left[\frac{C_P K_P}{34c^{1,25} t^{(0,77-x_p)} (\sin(\phi_1)/\sin(\phi))^{0,8}} \right]^{\frac{y_t}{y_p z_t}}. \quad (14)$$

$$V_{\text{ндо}} \hat{N} \hat{A} E = \left(\frac{C_V K_V}{T^{m_t} X_V} \right) \cdot \left(\frac{C_P K_P}{34c^{1,25} t^{(0,77-x_p)} ((\sin(\phi_1)/\sin(\phi)))^{0,8}} \right)^{\frac{y_v}{y_p}}. \quad (15)$$

Полученные аналитические выражения позволяют рассчитывать оптимальные режимы резания при обработке труднообрабатываемых материалов для любых условий обработки. На их основании может быть определен коэффициент повышения производительности обработки труднообрабатываемых материалов при использовании СОЖ:

$$K_{\dot{I}} = \left(\frac{C_V K_V}{T^{m_t} X_V} \right) \left(\frac{C_t}{\Theta} \right)^{\frac{1}{z_t}} \left(\frac{1}{K_P} \right)^{\frac{1}{y_P}} \left(\frac{C_P K_P t^{(x_p-0,77)}}{34c^{1,25} ((\sin(\phi_1)/\sin(\phi)))^{0,8}} \right)^{\frac{y_v z_t - y_t}{y_p z_t}}. \quad (16)$$

Графики изменения коэффициента повышения производительности K_{Π} при токарной обработке стали Х18Н9Т с применением различных СОЖ в зависимости от глубины резания и стойкости, представленные на рис. 5, свидетельствуют о том, что с их увеличением производительность обработки снижается.

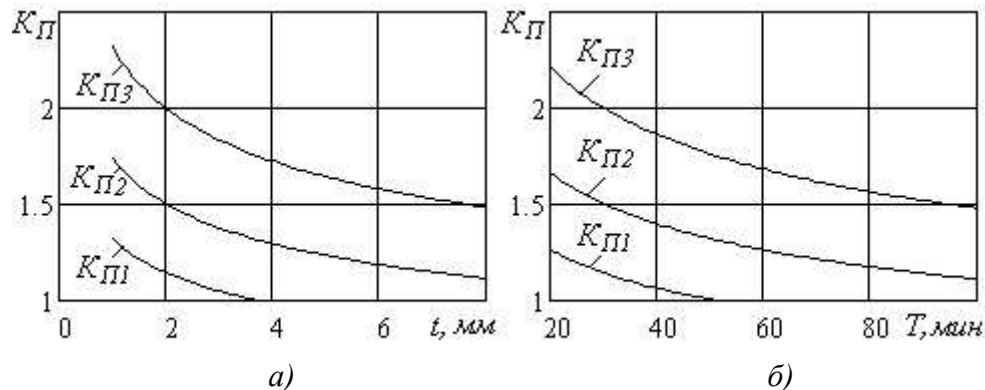


Рис. 5. Графики изменения коэффициента роста производительности K_{Π} при токарной обработке стали Х18Н9Т с применением различных СОЖ в зависимости от глубины резания – а) и стойкости – б)

На основании представленного коэффициента повышения производительности обработки может быть выполнена оценка эффективности применения различных СОЖ.

Заключение.

С использованием разработанной методики расчета температуры резания при точении выполнена оценка возможности снижения температуры при обработке труднообрабатываемых материалов с применением различных СОЖ. Установлено влияние СОЖ на оптимальные режимы резания, обеспечивающие максимальную производительность обработки,

Полученные аналитические выражения для расчета оптимальных режимов резания обеспечивают возможность количественной оценки повышения производительности

сти обработки изделий из труднообрабатываемых материалов при использовании различных СОЖ.

На основании выполненных исследований разработаны рекомендации по выбору оптимальных режимов резания в любых условиях токарной обработки различных труднообрабатываемых материалов, в том числе с использованием различных СОЖ.

Разработанная методика быть использована для оптимизации режимов резания при различных видах обработки с применением СОЖ.

Список литературы

1. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. - М.: Машиностроение, 1990. –288с.

2. Ивченко Т.Г. Исследование закономерностей формирования тепловых потоков в зоне резания при точении // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Вип.20. – Краматорськ: ДДМА, 2006.- С.88-94.

3. Ивченко Т.Г. Влияние условий обработки на закономерности формирования тепловых потоков в зоне резания при точении // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Випуск 5. - Донецьк, ДонНТУ, 2008.- С.23-29.

4. Гуревич В.Я. Режимы резания труднообрабатываемых материалов. – М.: Машиностроение, 1986. - 240с.

5. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. - М.: Машиностроение. 1989. - 296с.