

**Дослідження процесів механічного оброблення матеріалів та розробка прогресивних способів їх реалізації**

УДК 621.9: 658.5

В.А. БОГУСЛАВСКИЙ (канд. техн. наук, доц. проф.)

Т.Г. ИВЧЕНКО (канд. техн. наук, доц.)

ЗАНТУР САХБИ (асп.)

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД**

Представлена методика расчета температуры резания при точении труднообрабатываемых материалов с использованием различных смазочно-охлаждающих технологических сред. 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 технологических сред на основании коэффициента повышения производительности обработки.

**производительность, смазочно-охлаждающие жидкости, температура, оптимизация****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 технологических сред (СОТС).

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 действия СОТС [1, 2, 3]. Для этих видов материалов представляет интерес дальнейшее развитие методики определения температур в зоне резания при использовании СОТС.

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 СОТС на режимы резания [5]. Недостаточно информации и по оценке достижимого уровня повышения производительности при применении различных СОТС, 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 СОТС.

Цель представляемой работы – установить влияние СОТС на температуру резания и оптимальные по производительности режимы резания при точении изделий из труд-

нообрабатываемых материалов, а также оценить возможность повышения производительности их обработки при использовании различных СОТС.

**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  $lxb$  ( $l$  - длина контактной площадки,  $b$  - ширина среза) и трения между задней поверхностью лезвия и деталью  $lxb$  ( $h$  - длина контактной площадки, равная износу по задней поверхности), представленных на рис. 1.

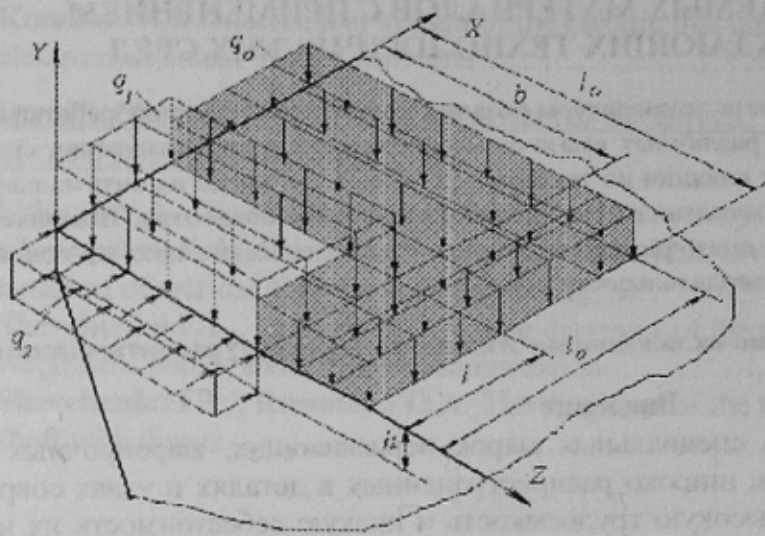


Рис. 1. Схема действия тепловых потоков на передней и задней поверхностях лезвия инструмента с применением СОТС

Ось  $X$  в рассматриваемой системе координат ориентируется в направлении передней поверхности перпендикулярно главной режущей кромке реза.

За счет применения СОТС, подаваемой свободным поливом со стороны передней поверхности, образуется поток теплоты с равномерным по площадке  $l_0x l_0$  распределением плотности тепловыделения  $q_0$ . С учетом действия потока теплоты  $q_0$  средние температуры на передней и задней поверхностях лезвия определяются следующим образом [1]:

$$\begin{aligned} \Theta_1 &= \frac{M_1 l}{\lambda_w} (q_1 + q_{01}) + \frac{N_2 h}{\lambda_w} q_2 - \frac{M_0 l_0}{\lambda_w} q_0; \\ \Theta_2 &= \frac{M_2 h}{\lambda_w} q_2 + \frac{N_1 l}{\lambda_w} (q_1 + q_{01}) - \frac{N_0 l_0}{\lambda_w} q_0 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\lambda_w$  - коэффициент теплопроводности инструмента;  $M_1, M_2, N_1, N_2$  - безразмерные функции, определяющие нагрев площадок на передней и задней поверхностях лезвия инструмента;  $M_0, N_0$  - безразмерные функции, определяющие охлаждение площадки на передней поверхности под действием СОТС.

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

$$q_0 = \alpha_o \Theta_{cp} \quad (2)$$

где  $\alpha_o$  - коэффициент теплоотдачи на поверхности контакта инструмента с СОТС;  $\Theta_{cp}$  - средняя температура на этой поверхности.

Для расчета коэффициента теплоотдачи при подаче СОТС 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  $\lambda_o, \omega_o$  - 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;  $v$  - коэффициент кинематической вязкости среды; показатели степени  $x = (1-m), z = (m-n)$ .

В связи с тем, что температура поверхностей лезвия инструмента превышает  $100^\circ\text{C}$ , при определении коэффициента теплоотдачи необходимо учитывать изменение агрегатного состояния жидкости. Коэффициент теплоотдачи в кипящую жидкость  $\alpha_k$ :

$$\alpha_k = 3.33 \cdot 10^6 (\Theta_s - 100)^{-1.43}, \quad \text{при } \Theta_s \geq 120^\circ\text{C}. \quad (4)$$

Движение жидкости относительно инструмента вносит изменения в процесс кипения. Приведенный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{\text{пр}}$ , учитывающий совместное влияние кипения и конвективного теплообмена:

$$\alpha_{\text{пр}} = \alpha_o [(4\alpha_o + \alpha_k) / (5\alpha_o - \alpha_k)], \quad \text{при } 0.5\alpha_o \leq \alpha_k \leq 2\alpha_o. \quad (5)$$

где  $\alpha_k$  и  $\alpha_o$  - независимо рассчитанные коэффициенты теплоотдачи при кипении и при конвективном теплообмене соответственно.

Для определения плотности тепловыделения  $q_o$  необходимо использовать заранее неизвестное значение средней температуры  $\Theta_{\text{ср}}$  поверхности контакта инструмента с СОТС. Для ее определения принимаем:  $\Theta_{\text{ср}} = m_o \Theta_i$ ;  $m_o = \rho^{-0.86}$ ,  $\rho = 2l_o/(b+l)$  - безразмерный параметр, сопоставляющий размеры зоны охлаждения с размерами контактной площадки стружки с лезвием инструмента;  $\Theta_i$  - средняя температура на передней поверхности лезвия. Тогда плотность тепловыделения равна:

$$q_o = \alpha_o m_o \Theta_i. \quad (6)$$

Плотности тепловых потоков на передней  $q_1$  и задней  $q_2$  поверхностях лезвия инструмента, принимаемые равномерно распределенными по контактным площадкам  $bx/l$  и  $bx/h$ , 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  $\Theta$  от скорости резания  $V$  и подачи  $S$  с использованием множественного регрессионного анализа при обработке стали X18H9T с различными СОТС установлены (с погрешностью, не превышающей 5%) следующие степенные зависимости:

$$\text{при обработке без СОТС } \Theta_{\text{один}} = 53,5 V^{-0.71} S^{0.51};$$

$$\text{при обработке с использованием в качестве СОТС эмульсола Э-2 - } \Theta_{\text{СОТС } 1};$$

$$\text{при обработке с использованием в качестве СОТС эмульсола НГЛ-205 - } \Theta_{\text{СОТС } 2};$$

$$\text{при обработке с использованием в качестве СОТС эмульсола СДМ, у - } \Theta_{\text{СОТС } 3};$$

$$\Theta_{\text{СОТС } 1} = 38,2 V^{-0.75} S^{0.53}; \quad \Theta_{\text{СОТС } 2} = 34,6 V^{-0.72} S^{0.53}; \quad \Theta_{\text{СОТС } 3} = 31 V^{-0.72} S^{0.53}.$$

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

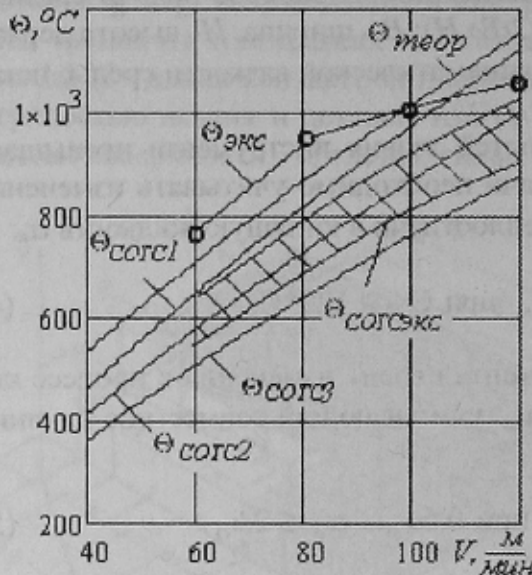


Рис.2. Графики зависимости температуры резания от скорости при обработке стали X18H9T с различными СОТС

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

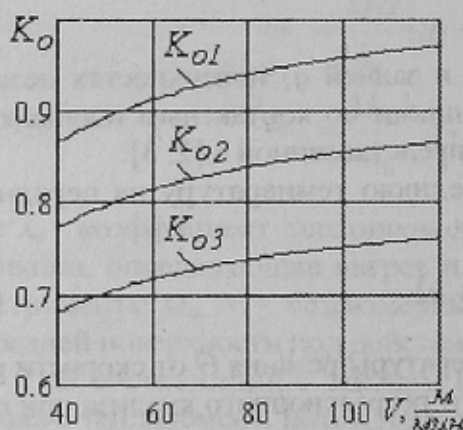


Рис.3. Графики зависимости коэффициента снижения температуры резания от скорости при обработке стали X18H9T с различными СОТС

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 реза  $B = 20\text{мм}$ ,  $H = 25\text{мм}$ ; 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  $\alpha_{пр} = 410^4\text{ Вт/м}^2\cdot^\circ\text{C}$ .

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  $\Theta_{теор}$  от скорости резания  $V$  при обработке без СОТС подтверждается экспериментальной  $\Theta_{экс}$  как по уровню температур, так и по характеру зависимостей.

Для оценки эффективности действия СОТС вводится коэффициент снижения температуры резания:

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

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

Снижение температуры резания при обработке с использованием в качестве СОТС эмульсии на базе эмульсола Э-2 достигается преимущественно за счет охлаждающего эффекта СОТС. При использовании эмульсии на базе эмульсола НГЛ-205, состоящего из масляного раствора сульфата натрия и пассивирующих добавок водорастворимых ингибиторов коррозии - нитрита натрия и тринатрийфосфата,

к охлаждающему эффекту добавляется эффект смазывающий, что усиливает снижение температуры  $\Theta_{СОТС2}$ . Наибольший эффект снижения температуры  $\Theta_{СОТС3}$  наблюдается



при использовании эмульсии на базе эмульсола СДМ,у, представляющего собой безводную систему содержащую масло, сульфонат натрия, водорастворимые ингибиторы коррозии и небольшое количество(до 3 %) дисульфида молибдена (в качестве противозносной присадки), прошедшего ультразвуковую обработку. Наличие дисульфида молибдена, наряду с охлаждающим эффектом, существенно повышает смазывающее действие СОТС, что и обеспечивает максимальное снижение температуры резания.

Полученные коэффициенты используются для учета действия различных СОТС 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, обусловленным 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:

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

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 реза:

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

где  $c$  – толщина пластины;  $\varphi$ - главный угол реза 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 неравенств, графически представленных на рис. 4. ( $X1 = \ln n, X2 = \ln s$ ):

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

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., глубина резания  $t = 2$  мм, износ по задней поверхности  $h = 0,2$  мм) на токарном станке 16К20ФЗ. При обработке с СОТС 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 СОТС:  $b_1 = 5,214$ ;  $b_2 = 3,527$ ;  $b_3 = -0,092$ ;  $b_4 = -2,996$ ;  $b_5 = 1,03$ ;  $b_6 = 2,536$ ;  $b_7 = 7,601$ .

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

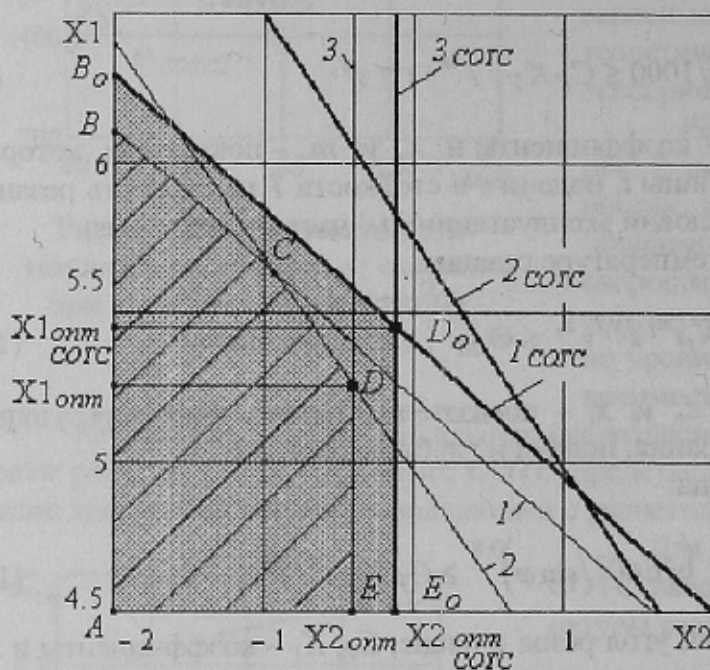


Рис. 4 – Схема определения оптимальных режимов резания при токарной обработке стали X18H9T с применением СОТС

ратуре резания (2) и ограничения по прочности пластины резца (3). За счет использования СОТС 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 СОТС: скорость  $V_{opt} = 62$  м/мин, подача  $S_{opt} = 0,65$  мм/об;
- при обработке с СОТС: скорость  $V_{opt} = 73$  м/мин, подача  $S_{opt} = 0,8$  мм/об.

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

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

Многоугольник  $ABCDE$  представляет собой область возможных решений при обработке без СОТС, многоугольник  $AB_0D_0E_0$  - при обработке с СОТС. 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 температуре



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

$$V_{opt} = \left( \frac{\Theta}{C_t} \right)^{1/z_t} \left[ \frac{C_p K_p}{34c^{1,25} t^{(0,77-x_p)} (\sin(\phi_1)/\sin(\phi))^{0,8}} \right]^{1/y_p z_t} \quad (14)$$

$$V_{opt\ COTS} = \left( \frac{C_V K_V}{T^m t^{x_V}} \right) \cdot \left( \frac{C_p K_p}{34c^{1,25} t^{(0,77-x_p)} ((\sin(\phi_1)/\sin(\phi)))^{0,8}} \right)^{1/y_p} \quad (15)$$

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 СОТС:

$$K_{\Pi} = \left( \frac{C_V K_V}{T^m t^{x_V}} \right) \left( \frac{C_t}{\Theta} \right)^{1/z_t} \left( \frac{1}{K_p} \right)^{1/y_p} \left( \frac{C_p K_p t^{(x_p-0,77)}}{34c^{1,25} ((\sin(\phi_1)/\sin(\phi)))^{0,8}} \right)^{1/y_p z_t - 1/y_p} \quad (16)$$

Графики изменения коэффициента повышения производительности  $K_{\Pi}$  при токарной обработке стали X18H9T с применением различных СОТС в зависимости от глубины резания и стойкости, представленные на рис. 5, свидетельствуют о том, что с их увеличением производительность обработки снижается.

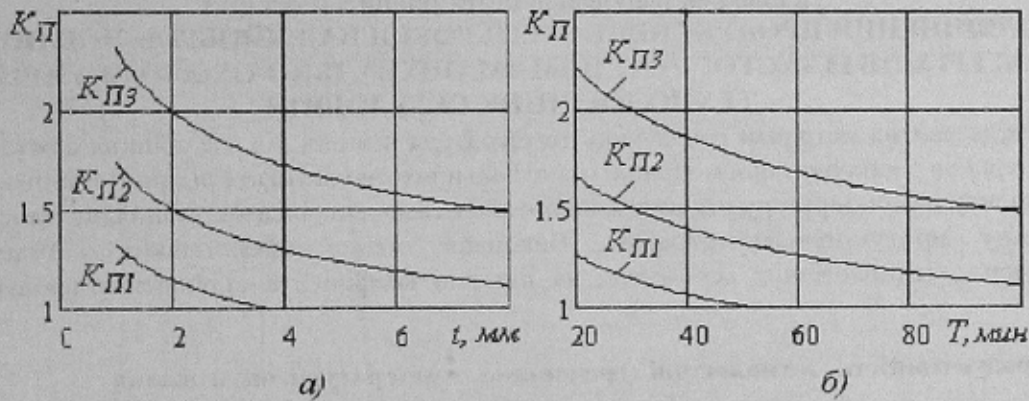


Рис. 5. Графики изменения коэффициента роста производительности  $K_{\Pi}$  при токарной обработке стали X18H9T с применением различных СОТС в зависимости от глубины резания – а) и стойкости – б)

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

**Заключение**

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

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

обработки изделий из труднообрабатываемых материалов при использовании различных СОТС.

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 СОТС.

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

#### Список литературы

1. Резников А.Н. Тепловые процессы в технологических системах / А.Н. Резников, Л.А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
2. Ивченко Т.Г. Исследование закономерностей формирования тепловых потоков в зоне резания при точении / Т.Г. Ивченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – 2006. – Вип.20. – С. 88 – 94.
3. Ивченко Т.Г. Влияние условий обработки на закономерности формирования тепловых потоков в зоне резания при точении / Т.Г. Ивченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2008. – Вип. 5. – С.23 – 29.
4. Гуревич В.Я. Режимы резания труднообрабатываемых материалов / В.Я. Гуревич. – М.: Машиностроение, 1986. – 240 с.
5. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 1989. – 296с.

**В.О. БОГУСЛАВСЬКИЙ, Т.Г. ІВЧЕНКО, ЗАНТУР САХЫ**

Донецький національний технічний університет

#### **ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЗМАЩУВАЛЬНО-ОХОЛОДЖУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ**

Представлена методика розрахунку температури різання під час точіння важкооброблюваних матеріалів з використанням різних змащувально-охолоджуючих рідин. Встановлені характер і їх впливу на температуру різання, а також на оптимальні режими різання, що забезпечують максимальну продуктивність обробки. Виконана оцінка ефективності змащувально-охолоджуючих технологічних середовищ на підставі коефіцієнта підвищення продуктивності обробки.

**продуктивність, технологічні середовища, температура, оптимізація**

**V.A. BOGUSLAVSKIY, T.G. IVCHENKO, ZANTUR SAKHBI**

Donetsk National Technical University

#### **INCREASE OF THE PRODUCTIVITY OF HARD-PROCESSING MATERIALS TREATMENT WITH THE USE OF CUTTING FLUID**

The method of calculation of cutting temperature at sharpening of hard-processing materials is presented with the use of different cutting fluid. Character and degree of their influence on the cutting temperature are set, and also on the optimum cuttings, providing the burst performance of treatment. The estimation of efficiency of cutting fluid application is executed on the basis of coefficient of increase of the treatment productivity.

**productivity, cutting fluid, temperature, optimization**

Рецензент: Калафатова Л.П.

Надійшла до редакції: 05.03.19