

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

Богуславский В.А., Ивченко Т.Г., Зантур Сахби (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

*Аннотация.* На основании исследования закономерностей изменения тепловых потоков и температур от скорости резания и подачи установлены температурные ограничения при точении изделий из труднообрабатываемых материалов. С использованием метода линейного программирования определены оптимальные режимы резания, обеспечивающие максимальную производительность обработки, учитывающие установленные температурные ограничения.

*Ключевые слова:* оптимизация, производительность, скорость, подача, температура.

### 1. Введение

В условиях повышения нагрузок и температур, действующих в основных деталях и узлах современных машин, все большее распространение получают специальные марки нержавеющей, жаропрочных и высокопрочных сталей и сплавов. Низкая теплопроводность и высокая прочность этих материалов способствует повышению температуры и сил резания в зоне обработки и, как следствие – росту интенсивности изнашивания лезвия режущего инструмента. В связи с этим весьма актуальны исследования теплового состояния инструмента и условий его рациональной эксплуатации.

В настоящее время достаточно хорошо разработаны общие методы теплофизического анализа технологических систем, в том числе и основных закономерностей формирования тепловых потоков в зоне резания. Существующая методика анализа тепловых потоков [1] затруднительна для практического применения. Методика, представленная в работе [2], позволяет упростить решение задачи определения тепловых потоков на передней и задней поверхностях лезвия инструмента. Влияние условий обработки на закономерности формирования тепловых потоков в зоне резания при точении конструкционных сталей достаточно подробно проанализировано в работе [3]. Однако, практически отсутствует информация о влиянии параметров обработки на температуру резания, что затрудняет обоснование температурных критериев при оптимизации режимов резания, что особенно актуально для труднообрабатываемых материалов [4].

Одним из наиболее распространенных методов оптимизации в настоящее время является метод линейного программирования [5], позволяющий осуществлять одновременную оптимизацию скорости резания и подачи с учетом действующих при резании ограничений по критерию максимальной производительности. В связи с простотой и наглядностью применения этого метода весьма целесообразно для линейной целевой функции и линейных ограничений, имеющих место при оптимизации режимов резания.

Сведения, представленные в указанных работах, не охватывают область обработки специальных марок нержавеющей, жаропрочных и высокопрочных сталей и сплавов. Для этих видов материалов представляет интерес дальнейшее развитие методики определения тепловых потоков и температур в зоне резания, а также обоснование рациональных условий их обработки.

Цель представляемой работы – установление температурных ограничений при точении изделий из труднообрабатываемых материалов и определение оптимальных режимов резания, обеспечивающих максимальную производительность обработки, с учетом установленных температурных ограничений.

## 2. Основное содержание и результаты работы

В зоне резания возникают три основных источника теплоты:

- теплота деформации в зоне стружкообразования (интенсивность источника  $q_d$ ),
- теплота трения на площадке контакта между стружкой и передней поверхностью лезвия (интенсивность источника  $q_{T1}$ ),
- теплота трения между задней поверхностью лезвия и деталью (интенсивность источника  $q_{T2}$ ).

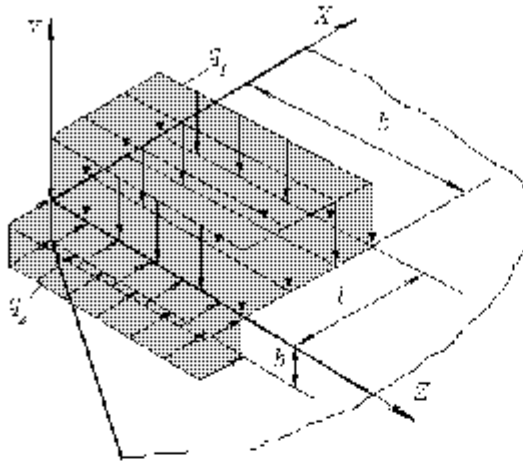


Рис. 1. Схема действия тепловых потоков на передней и задней поверхностях лезвия режущего инструмента

Температура в режущем лезвии инструмента формируется под воздействием тепловых потоков  $q_1$  и  $q_2$ , представленных на рис. 1. 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.

Плотность тепловых потоков на передней  $q_1$  и задней  $q_2$  поверхностях лезвия инструмента, принимаемая равномерно распределенной по контактным площадкам  $b \times l$  и  $b \times h$ , может быть определена следующим образом [2, 3]:

$$q_1 = - \frac{(K_1 T_u N_2 h + K_2 q_{T2} N_2 h - 1,82 K_1 K_3 \lambda_u - M_2 K_3 h)}{(1,82 K_2 K_4 \lambda_u + M_2 K_4 h - N_1 N_2 l h / \lambda_u)}; \quad q_2 = \frac{(K_3 - K_4 q_1)}{N_2 h}; \quad (1)$$

$$K_1 = (1+c) \omega_d k b' / \lambda_d V; \quad K_2 = 0,75 K_{c1} \sqrt{\omega_d h} / \lambda_d \sqrt{V},$$

$$K_3 = K_1 + 0,72 K_{c2} K_2 q_{T1} \sqrt{kl/h}; \quad K_4 = 1,82 K_2 \sqrt{kl/h} + N_1 l / \lambda_u.$$

где  $\lambda_d$ ,  $\lambda_u$ ,  $\omega_d$ ,  $\omega_u$  - коэффициенты теплопроводности и температуропроводности материалов детали и инструмента;  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $N_1$ ,  $N_2$  - безразмерные функции, определяющие нагрев площадок на передней и задней поверхностях лезвия инструмента;  $k$  - коэффициент усадки стружки;  $V$  - скорость резания;  $c$  - коэффициент, учитывающий подогрев слоев металла стружки за один оборот детали;  $T_d$  - безразмерная функция распределения температур в детали, вызванных теплотой деформации;  $b'$  - коэффициент относительного количества теплоты, уходящего в стружку;  $K_{c1}$  - коэффициент, учитывающий закон распределения плотности теплового потока на передней поверхности;  $K_{c2}$  - коэффициент, учитывающий закон распределения плотности теплового потока на задней поверхности.

Плотности тепловых потоков от сил трения на площадках контакта между стружкой и передней поверхностью лезвия инструмента  $q_{T1}$  и между задней поверхностью лезвия инструмента и деталью  $q_{T2}$ :

$$q_{T1} = 1,5 \cdot 10^6 V (P_{Z0} \sin \gamma + P_{N0} \cos \gamma) / 60 k b l; \quad q_{T2} = 2 \cdot 10^6 \sqrt{3} F V / 6 \sqrt{\pi} b h,$$

где  $P_{Z0} = P_z - F_{mp}$  - разность тангенциальной силы резания и силы трения по задней поверхности лезвия,  $P_{N0} = P_y - N$  - разность нормальной составляющей силы резания и нормальной силы на задней поверхности лезвия.

На основании представленного аналитического выражения (1) выполнены расчеты плотностей тепловых потоков на передней  $q_1$  и задней  $q_2$  поверхностях лезвия инструмента в зависимости от скорости резания  $V$  и подачи  $S$  для нержавеющей стали X18H9T и жаропрочного сплава ЭИ867, графики которых представлены на рис. 2.

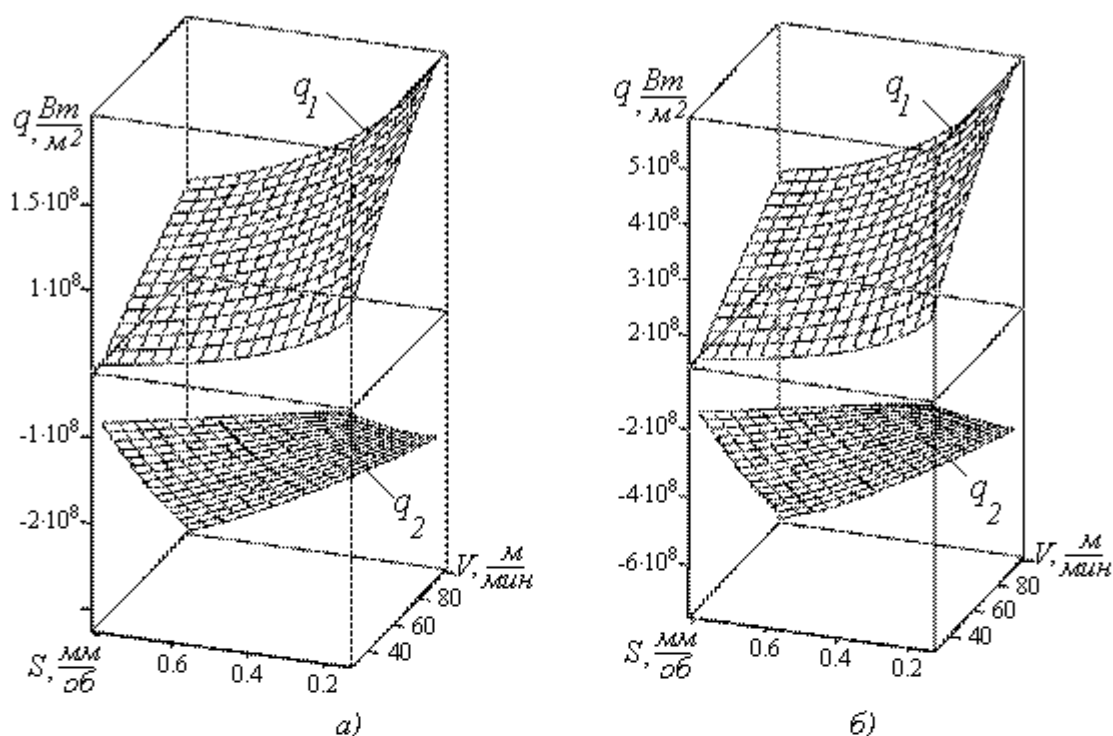


Рис. 2. Двумерные зависимости плотностей тепловых потоков на передней  $q_1$  и задней  $q_2$  поверхностях лезвия инструмента от скорости резания  $V$  и подачи  $S$  для стали X18H9T - а); сплава ЭИ867 - б)

Существенное различие (более чем в 3 раза) тепловых потоков для указанных сталей объясняется, прежде всего, различием в коэффициентах теплопроводности  $\lambda$ : для сплава ЭИ867 коэффициент  $\lambda$  в 1,7 раза меньше, чем для стали X18H9T. Кроме того, для одних и тех же условий силы резания при обработке сплава ЭИ867 почти в 2,5 раза превышают силы резания для стали X18H9T.

Отрицательное значение плотности теплового потока на задней поверхности лезвия ( $q_2 < 0$ ) свидетельствует о направлении потока в сторону детали, что способствует охлаждению лезвия.

С увеличением скорости резания тепловой поток на передней поверхности возрастает, так как пропорционально скорости увеличивается общее количество теплоты, выделяемой в зоне резания, а на задней поверхности — убывает, находясь в области отрицательных значений. С увеличением подачи тепловой поток на передней поверхности убывает, что может быть объяснено пропорциональным увеличением длины площадки контакта стружки с передней поверхностью, на задней поверхности тепловой поток также уменьшается.

Температуры на передней  $\Theta_1$  и задней  $\Theta_2$  поверхностях лезвия инструмента, формируемые под воздействием тепловых потоков  $q_1$  и  $q_2$ , а также температура резания, представляющая собой среднюю температуру на передней и задней поверхностях лезвия определяется следующим образом [1]:

$$\Theta_1 = \frac{q_1 l}{\lambda_2} M_1 + \frac{q_2 h}{\lambda_2} N_2; \quad \Theta_2 = \frac{q_2 h}{\lambda_2} M_2 + \frac{q_1 l}{\lambda_2} N_1, \quad \Theta_P = \frac{\Theta_1 l + \Theta_2 h}{l + h} \quad (2)$$

Графики двумерных зависимостей температуры резания от скорости резания  $V$  и подачи  $S$  для стали X18H9T и сплава ЭИ867 представлены на рис. 3.

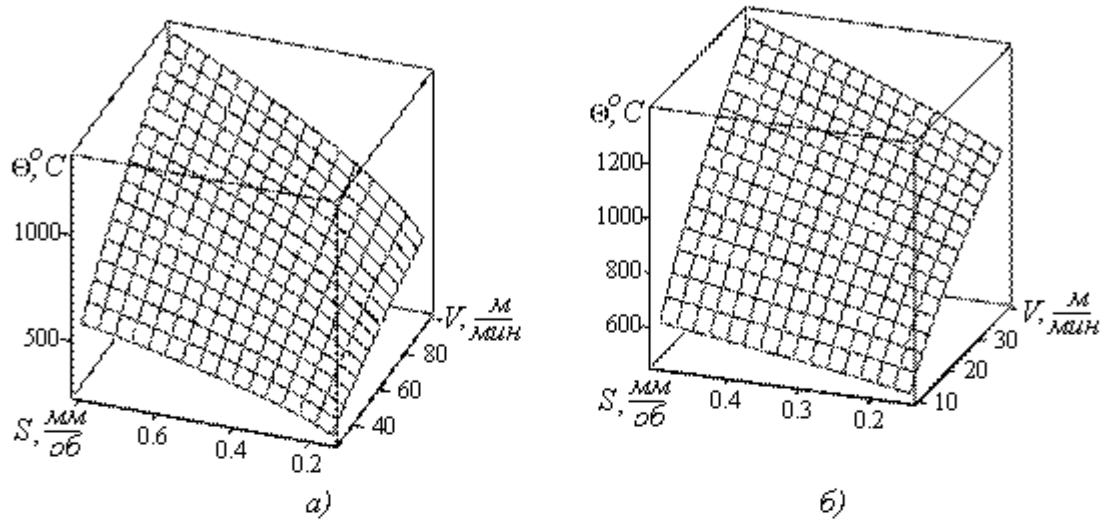


Рис. 3. Двумерные зависимости температуры резания от скорости резания  $V$  и подачи  $S$  для стали X18H9T - а); сплава ЭИ867 - б)

Существенное различие в тепловых потоках для указанных сталей объясняет и различие в температурах резания: так при скорости резания  $V = 30$  м/мин и подаче  $S = 0,3$  мм/об температура резания  $\Theta_P = 365^\circ\text{C}$  для стали X18H9T и  $\Theta_P = 987^\circ\text{C}$  для сплава ЭИ867.

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

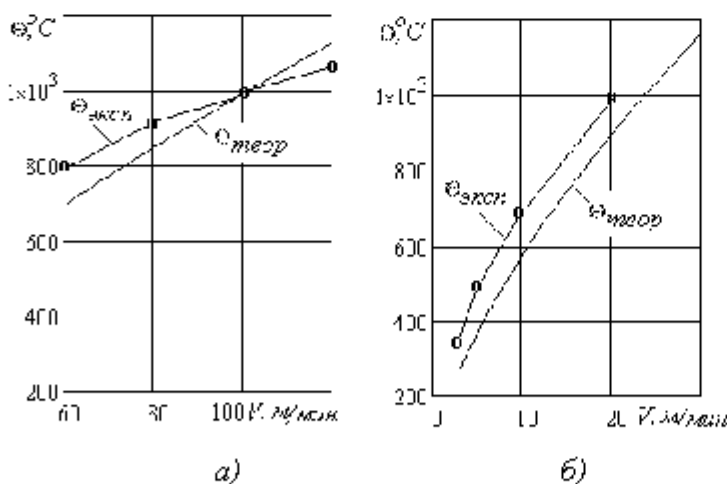


Рис. 4. Теоретические и экспериментальные зависимости температуры резания от скорости резания  $V$  для стали X18H9T - а); сплава ЭИ867 - б)

Результаты сравнения, приведенные на рис. 4, свидетельствуют о том, что с погрешностью, не превышающей 10%, для стали 12X18H10T и стали ЭИ867 теоретические зависимости температуры резания  $\Theta_{теор}$  от скорости резания  $V$  подтверждаются экспериментальными как по уровню температур, так и по характеру зависимостей.

В результате исследования двухпараметрических зависимостей температуры резания  $\Theta_P$  от скорости резания  $V$  и подачи  $S$  с использованием множественного рег-

рессионного анализа установлены (с погрешностью, не превышающей 5%) степенные зависимости  $\Theta_{P1}$  для стали X18H9T и  $\Theta_{P2}$  для сплава ЭИ867:

$$\Theta_{P1} = 57,6V^{0.71} S^{0.46}; \quad \Theta_{P2} = 256V^{0.54} S^{0.39}, \quad (4)$$

Полученные зависимости используются в качестве температурных ограничений при дальнейшей оптимизации режимов резания.

Целевая функция - производительность обработки, максимум которой достигается при минимуме основного времени, или максимуме произведения  $n s \rightarrow \max$ .

При черновой обработке рассматриваются следующие ограничения [5]:

1) по возможностям режущего инструмента, обусловленной скоростью резания, соответствующей его стойкости, которые учитывают требования к периодичности замены инструмента в связи с организационной формой обслуживания оборудования:

$$\pi D n / 1000 \leq C_V K_V / T^{m_V} t^{x_V} s^{y_V} v, \quad (5)$$

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 мощности резания, обусловленной мощностью электродвигателя привода главного движения станка  $N_{om}$ :

$$C_P K_P s^{y_P} t^{x_P} (\pi D n)^{n_P+1} / 6 \cdot 10^{3(n_P+2)} \leq N_{\dot{\eta}} \eta, \quad (6)$$

где  $C_P, K_P$  – коэффициенты и  $x_P, y_P, n_P$  – показатели, характеризующие степень влияния глубины, подачи и скорости на силу резания  $P_z$ , определяемые в зависимости от условий эксплуатации,  $\eta$  – коэффициент полезного действия передач станка;

3) по предельно допустимой температуре резания:

$$\dot{N}_t t^{x_t} s^{y_t} v^{z_t} \leq \Theta_{\dot{a}t}; \quad (7)$$

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

4) по прочности державки резца:

$$\sigma_{\dot{a}} \dot{A} l^2 / 6l \leq C_P K_P t^{x_P} s^{y_P} n^{n_P} (\pi D)^{n_P} \dot{E}_C / 1000^n, \quad (8)$$

где  $l$  – вылет державки резца,  $\sigma_{\dot{a}}$  – допустимое напряжение на изгиб для материала державки,  $B$  и  $H$  – ширина и высота державки;  $K_3$  – коэффициент, зависящий от способа закрепления детали;

5) по прочности пластины резца:

$$34 \dot{c}^{1.35} t^{0.77} \left( \sin 60^\circ / \sin \varphi \right)^{0.8} \geq C_P K_P s^{y_P} t^{x_P}, \quad (9)$$

где  $c$  – толщина пластины;  $\varphi$  – главный угол резца в плане;

б) по предельно допустимым диапазонам частоты вращения и подачи, обусловленным кинематической структурой привода главного движения и привода подач:

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}, \quad s_{\min} \leq s \leq s_{\max}. \quad (10)$$

В результате линеаризации целевой функции и ограничений путем логарифмирования определена математическая модель процесса резания, выраженная системой линейных неравенства, графически представленных на рис. 5. ( $X1 = \ln n$ ;  $X2 = \ln s$ ):

$$\begin{cases} X1 + y_V X2 \leq b_1, & b_1 = \ln \left( 1000 C_V K_V / \pi D T^{m_V} t^{x_V} \right); \\ (n_P + 1) X1 + y_P X2 \leq b_2, & b_2 = \ln \left( 6 \cdot 10^3 (n_P + 2) N_{c0} \eta / C_P K_P (\pi D)^{(n_P + 1)} t^{x_P} \right); \\ z_t X1 + y_t X2 \leq b_3, & b_3 = \ln \left( 1000 z_t \Theta_{a\eta} / \tilde{N}_t t^{x_t} (\pi D)^{z_t} \right); \\ n_P X1 + y_P X2 \leq b_4, & b_4 = \ln \left( \sigma_a \hat{A} i^2 1000^n / 6 l C_P K_P (\pi D)^{n_P} t^{x_P} \hat{E} C \right); \\ y_P X2 \leq b_5, & b_5 = \ln \left( 34 \hat{n}^{1.35} (\sin 60^\circ / \sin \varphi)^{0.8} / C_P K_P s^{y_P} t^{(x_P - 0.77)} \right); \\ X1 \geq b_6, \quad X1 \leq b_7, & \\ X2 \geq b_8, \quad X2 \leq b_9, & \\ (X1 + X2) \rightarrow \max, & b_6 = \ln n_{\min}; b_7 = \ln n_{\max}; b_8 = \ln s_{\min}; b_9 = \ln s_{\max}. \end{cases} \quad (11)$$

Пример определения оптимальных режимов резания приведен для черновой токарной обработки валов диаметром  $D = 100$  мм, длиной  $L = 200$  мм из стали X18H9T (прочность  $\sigma_s = 600$  МПа) и сплава ЭИ867- (прочность  $\sigma_s = 1150$  МПа). Обработка осуществляется сборными резцами с механическим креплением твердосплавных пластин ВК8 (геометрические параметры: главный угол в плане  $\varphi = 45^\circ$ , передний угол  $\gamma = 0^\circ$ , 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  $t = 3$  мм, износ по задней поверхности  $h = 0,2$  мм) на токарном станке 16К20Ф3 (мощность  $N_{cm} = 10$  кВт; коэффициент полезного действия  $\eta = 0,8$ ).

Для заданных условий механообработки приняты следующие коэффициенты и показатели, характеризующие степень влияния глубины, подачи и стойкости на скорость резания [5]:

- сталь X18H9T:  $C_V = 150$ ;  $x_V = 0,15$ ;  $y_V = 0,45$ ;  $m = 0,25$ ;

- сплав ЭИ867:  $C_V = 36$ ;  $x_V = 0,15$ ;  $y_V = 0,45$ ;  $m = 0,25$ ;

коэффициенты и показатели, характеризующие степень влияния глубины, подачи и скорости на силу резания [5]:

- сталь X18H9T:  $C_P = 3400$ ;  $x_P = 0,95$ ;  $y_P = 0,75$ ;  $n_P = -0,15$ ;

- сплав ЭИ867:  $C_P = 8000$ ;  $x_P = 0,95$ ;  $y_P = 0,75$ ;  $n_P = -0,15$ .

С их учетом определенные следующие значения параметров  $b_i$ :

- сталь X18H9T:  $b_1 = 5,153$ ;  $b_2 = 4,891$ ;  $b_3 = 3,452$ ;  $b_4 = 1,065$ ;  $b_5 = -0,388$ ;  $b_6 = -2,996$ ;  $b_7 = 1,03$ ;  $b_8 = 2,536$ ;  $b_9 = 7,601$ ;

- сплав ЭИ867:  $b_1 = 3,780$ ;  $b_2 = 4,035$ ;  $b_3 = 1,765$ ;  $b_4 = 0,210$ ;  $b_5 = -1,244$ ;  $b_6 = -2,996$ ;  $b_7 = 1,03$ ;  $b_8 = 2,536$ ;  $b_9 = 7,601$ .

Схема определения оптимальных режимов резания для токарной обработки стали X18H9T и сплава ЭИ867 представлена на рис. 5 ( $t = 3$  мм).

Многоугольник  $ABCDE$  на приведенном рис. 5 представляет собой область возможных решений. Целевая функция принимает максимальное значение в точке  $D$ , для которой сумма расстояний до осей ( $X1 + X2$ ) максимальна, о чем свидетельствует крайне

возможное положение линии 10, характеризующей целевую функцию. Координаты точки  $D (X1_{opt}, X2_{opt})$  является искомыми оптимальными значениями параметров, на основании которых определяются оптимальные частота вращения и подача.

Точка  $D$  является точкой пересечения ограничений по предельно допустимой температуре резания (3) и ограничения по прочности пластины реза (5).

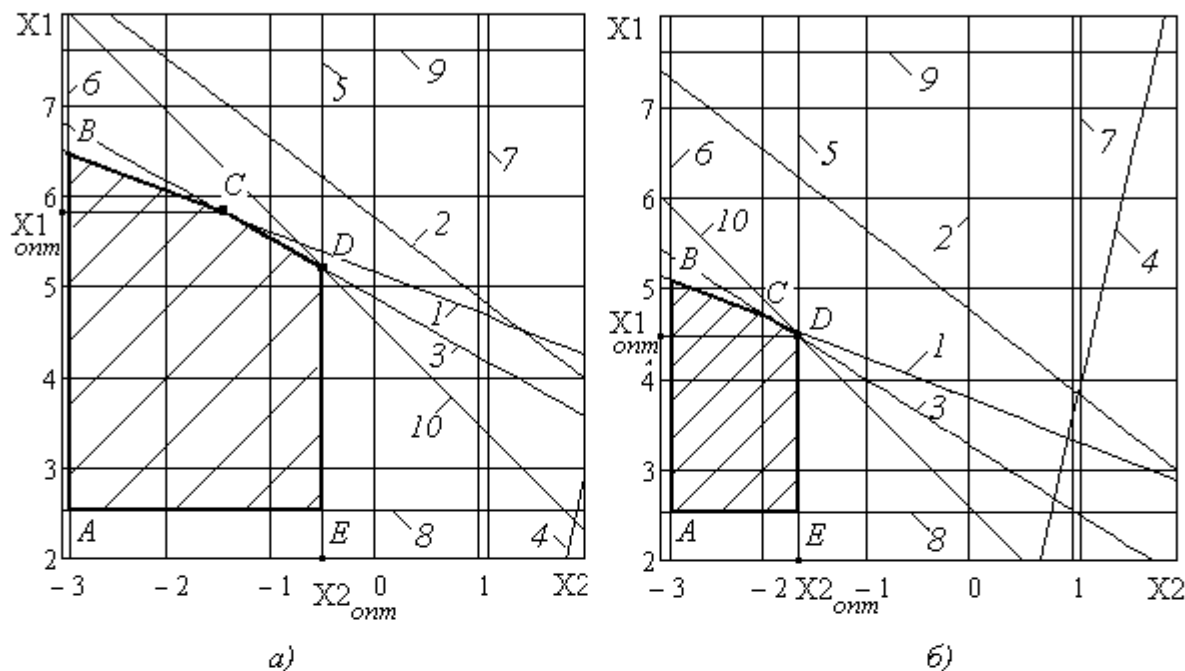


Рис. 5 – Схема определения оптимальных режимов резания для токарной обработки стали X18H9T - а); сплава ЭИ867- б)

Для заданных условий определены следующие оптимальные режимы:

- сталь X18H9T: скорость резания  $V_{opt} = 57$  м/мин, подача  $S_{opt} = 0,6$  мм/об;
- сплав ЭИ867: скорость резания  $V_{opt} = 27$  м/мин, подача  $S_{opt} = 0,2$  мм/об.

Представленный график наглядно иллюстрирует, что при черновой обработке оптимальные значения режимов резания не зависят от кинематических ограничений, указанных на графике линиями 6, 7, 8, 9, а также ограничений по режущим возможностям инструмента (1), мощности резания (2) и по прочности державки (4). Оптимальные режимы резания определяются температурными ограничениями и ограничениями по прочности режущей пластины, заданными линиями 3 и 5. В таком случае оптимальная подача и скорость резания могут быть определены аналитически:

$$S_{opt} = \left[ \frac{34 \cdot c^{1,25} \cdot t^{(0,77-x_p)} \cdot (\sin(\phi_1)/\sin(\phi))^{0,8}}{C_P \cdot K_P} \right]^{\frac{1}{y_p}}; \quad (12)$$

$$V_{opt} = \left( \frac{\Theta}{C_t} \right)^{\frac{1}{z_t}} \left[ \frac{C_P \cdot K_P}{34 \cdot c^{1,25} \cdot t^{(0,77-x_p)} \cdot (\sin(\phi_1)/\sin(\phi))^{0,8}} \right]^{\frac{y_t}{y_p z_t}}. \quad (13)$$

Полученные аналитические выражения позволяют рассчитывать оптимальные режимы резания при обработке труднообрабатываемых материалов для любых условий обработки.

### **3. Заключение.**

В результате выполненного анализа тепловых потоков и температур в зоне резания в зависимости от скорости и подачи установлены температурные ограничения при токарной обработке труднообрабатываемых материалов. Определены оптимальные режимы резания, обеспечивающие максимальную производительность обработки, учитывающие установленные температурные ограничения.

На основании проведенных исследований разработаны рекомендации по выбору оптимальных режимов резания в любых условиях токарной обработки различных труднообрабатываемых материалов.

Разработанная методика будет широко использована для прогнозирования закономерностей формирования температур в зоне обработки в зависимости от условий резания и оптимизации режимов резания с учетом температурных ограничений для различных видов обработки.

**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.

### **ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ ПІД ЧАС ТОЧІННЯ ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ З УРАХУВАННЯМ ТЕМПЕРАТУРНИХ ОБМЕЖЕНЬ**

*Богуславський В.О., Івченко Т.Г., Зантур Сакхі (ДонНТУ, м. Донецьк, Україна)*

*На підставі дослідження закономірностей зміни теплових потоків і температур від швидкості різання і подачі встановлені температурні обмеження під час точіння виробів з важкооброблюваних матеріалів. З використанням методу лінійного програмування визначені оптимальні режими різання, що забезпечують максимальну продуктивність обробки з урахуванням встановлених температурних обмежень.*

*Ключові слова: оптимізація, продуктивність, швидкість, подача, температура.*

### **OPTIMIZATION OF CUTTING AT SHARPENING OF HARD-PROCESSING MATERIALS TAKING INTO ACCOUNT TEMPERATURE LIMITATIONS**

*Boguslavskiy M.A., Ivchenko T.G., Zantur Sakhibi (DonNTU, t. Donetsk, Ukraine)*

*On the basis of research of conformities to law of change of thermal streams and temperatures from cutting speed and serve temperature limitations are set at sharpening of wares from hard-processing materials. With the use of the linear programming method the optimum regimes are certain cuttings, providing a burst performance treatments, taking into account the set temperature limitations.*

*Key words: optimization, productivity, speed, serve, temperature.*