

УДК 621.9: 658.5

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

УЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

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, учитывая установленные температурные ограничения.

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

T. G. Ivchenko, O. V. Pashuk

ACCOUNT OF TEMPERATURE LIMITATIONS DURING OPTIMIZATION OF CUTTING REGIMES OF HARD-PROCESSING MATERIALS

On the basis of research of conformities to law of change of thermal streams and temperatures from cutting speed and feed 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 productivity, taking into account the set temperature limitations.

Keyword: optimization, productivity, speed, feed, cutting temperature.

1. Введение

Широкое распространение специальных марок нержавеющей, жаропрочных и высокопрочных сталей и сплавов в связи с ростом нагрузок и температур в основных деталях и узлах современных машин обуславливает и актуальность задач по повышению эффективности их обработки. Низкая теплопроводность и высокая прочность этих материалов способствует увеличению температур и сил резания, снижению стойкости режущего инструмента, что приводит к высокой трудоемкости и низкой себестоимости их обработки [1].

Высокие температуры в зоне обработки, возникающие из-за низкой теплопроводности труднообрабатываемых материалов, определяют необходимость исследования температурных ограничений на режимы резания при их оптимизации. В настоящее время достаточно хорошо разработаны общие методы теплофизического анализа технологических систем, в том числе и основных закономерностей формирования тепловых потоков и температур в зоне резания [2, 3]. Существующая методика позволяет установить влияние параметров обработки на температуру резания, и обосновать температурные ограничения при оптимизации режимов резания, что особенно актуально для труднообрабатываемых материалов [4].

Представляет интерес дальнейшее исследование температурных ограничений для специальных марок нержавеющей, жаропрочных и высокопрочных сталей и сплавов и учет этих ограничений при оптимизации режимов резания с использованием метода линейного программирования, что позволит уточнить оптимальные условия их обработки и выявить резервы роста производительности [5].

Цель работы – оптимизация режимов резания различных труднообрабатываемых материалов по критерию максимальной производительности обработки с учетом дейст-

вующих температурных ограничений.

2. Основное содержание и результаты работы

Для исследования температурных ограничений используется известная методика расчета тепловых потоков и температур в зоне резания [2, 3]. Температура резания Θ представляет собой среднюю температуру на передней Θ_1 и задней поверхностях лезвия Θ_2 , которые формируются под воздействием тепловых потоков q_1 и q_2 , равномерно распределенной по контактным площадкам bxl и bxh (b - ширина среза, l - длина контакта стружки с передней поверхностью, h - износ по задней поверхности):

$$\Theta_1 = \frac{q_1 l}{\lambda_e} M_1 + \frac{q_2 h}{\lambda_e} N_2; \quad \Theta_2 = \frac{q_2 h}{\lambda_e} M_2 + \frac{q_1 l}{\lambda_e} N_1, \quad \Theta = \frac{\Theta_1 l + \Theta_2 h}{l + h}, \quad (1)$$

где $q_1 = \frac{K_1 K_3 \lambda_u - K_2 N_2 h + K_1 M_2 h}{K_3 K_4 \lambda_u + M_2 K_4 h - N_1 N_2 l h / \lambda_u}; \quad q_2 = \frac{(K_1 - K_4 q_1) \lambda_u}{N_2 h};$

$$K_1 = \frac{(1+c)\omega_a k b' q_a}{\lambda_a V} + \frac{K_{c1} q_{1T}}{\lambda_a} \sqrt{\frac{\omega_a k l}{V}}; \quad K_2 = \frac{(1+c)\omega_a k b' q_a T_a}{\lambda_a V} + \frac{K_{c2} q_{2T}}{\lambda_a} \sqrt{\frac{\omega_a h}{V}};$$

$$K_3 = 1,82 K_{c2} \sqrt{\omega_a h / V} / \lambda_a; \quad K_4 = 1,3 K_{c1} \sqrt{\omega_a k l / V} / \lambda_a + M_1 l / \lambda_u.$$

$\lambda_d, \lambda_u, \omega_d, \omega_u$ - 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}, K_{c2} - коэффициенты, учитывающий закон распределения плотности теплового потока на передней и задней поверхностях; q_{1T}, q_{2T} - плотности тепловых потоков на контактных площадках на передней и задней поверхностях лезвия инструмента.

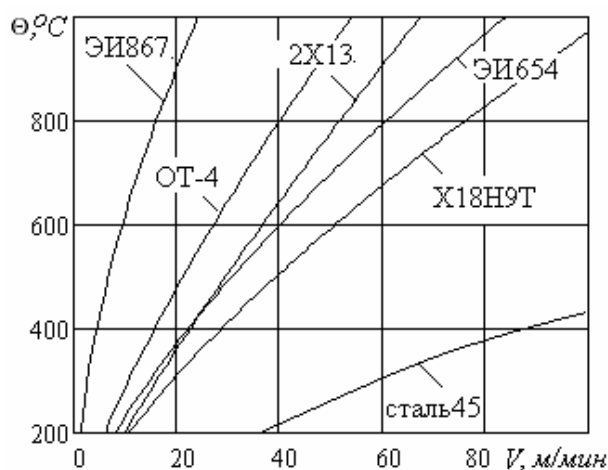


Рисунок 1. Графики зависимости температуры резания Θ от скорости V при обработке различных материалов

Результаты расчетов температуры резания Θ в зависимости от скорости V при обработке различных труднообрабатываемых материалов приведены на рис. 1.

Расчеты выполнялись для следующих условий: твердый сплав ВК8 (геометрические параметры: главный угол в плане $\varphi = 45^\circ$, передний угол $\gamma = 12^\circ$; глубина резания $t = 3$ мм; подача $S = 0,3$ мм/об; износ по задней поверхности $h = 0,2$ мм).

Графики, представленные на рис. 1, свидетельствуют о том, что в определенном для каждого материала диапазоне изменения скорости температура резания достигает предельно

допустимого уровня 800°C, что требует учета температурных ограничений.

При оптимизации режимов резания в качестве целевой функции принимается производительность обработки, максимум которой достигается при максимуме произведения частоты вращения n и подачи S : $n \cdot S \rightarrow \max$. В качестве ограничений приняты:

- 1) ограничения по возможностям режущего инструмента;
- 2) ограничения по предельно допустимой мощности резания, обусловленной мощностью привода главного движения N ;
- 3) ограничения по предельно допустимой температуре резания Θ ;
- 4) ограничения по прочности пластины резца;
- 5) ограничения по предельно допустимым частотам вращения и подачам:
($n_{\min} \leq n \leq n_{\max}$, $s_{\min} \leq s \leq s_{\max}$).

Математическая модель процесса резания выражается системой линейных неравенств ($X1 = \ln n$; $X2 = \ln s$):

$$\begin{cases} X1 + y_V X2 \leq b_1, & b_1 = \ln(1000 C_V K_V / \pi D T^m t^{x_V}); \\ (n_P + 1)X1 + y_P X2 \leq b_2, & b_2 = \ln(6 \cdot 10^3 (n_P + 2) N \eta / C_P K_P (\pi D)^{(n_P + 1)} t^{x_P}); \\ z_t X1 + y_t X2 \leq b_3, & b_3 = \ln(1000^{z_t} \Theta / N_{\Theta} t^{x_t} (\pi D)^{z_t}); \\ y_P X2 \leq b_4, & \\ (X1 + X2) \rightarrow \max, & b_4 = \ln(34 n^{1.35} K_{\phi}^{0.8} / C_P K_P t^{(x_P - 0.77)}), \end{cases} \quad (2)$$

где D – диаметр обработки, C_V, K_V – коэффициенты и x_V, y_V, m – показатели, характеризующие степень влияния глубины t , подачи S и стойкости T на скорость резания V ; C_P, K_P – коэффициенты и x_P, y_P, n_P – показатели, характеризующие степень влияния глубины t , подачи S и скорости V на силу резания P_z ; η – коэффициент полезного действия передач станка; C_{Θ} – постоянный коэффициент и z_b, y_b, x_t – показатели степени, характеризующие влияние скорости резания V , подачи S и глубины резания t на температуру; $K_{\phi} = \sin 60 / \sin \phi$; c – толщина пластины; ϕ – главный угол резца в плане.

Основные параметры в ограничениях по возможностям режущего инструмента, по предельно допустимой мощности резания, по прочности пластины резца принимаются в соответствии с нормативно – справочной литературой [1].

Температурные ограничения определяются с использованием множественного регрессионного анализа зависимости температуры от режимов резания на основании выполненных исследований температур (1) для различных обрабатываемых материалов, графически представленных на рис. 1. Результаты расчета температурных ограничений представлены в табл. 1.

Схемы определения оптимальных режимов резания для токарной обработки нержавеющей стали X18H9T и 2X13 в сравнении со сталью 45 представлены на рис. 2, жаропрочных сплавов ЭИ654 и ЭИ867, а так же титанового сплава ОТ-4 – на рис. 3.

Установлено, для стали 45 искомыми оптимальными значениями параметров являются координаты точки $C(X1_o, X2_o)$ - точки пересечения ограничений по режущим возможностям инструмента (1) и прочности пластины (4). Температура резания не лимитирует оптимальные режимы резания (в указанном диапазоне параметров (рис. 1) температура не превышает допустимого уровня 800°C).

Для всех труднообрабатываемых материалов искомыми оптимальными значениями параметров являются координаты точки $D(X1_o, X2_o)$ - точки пересечения ограниче-

ний по предельно допустимой температуре резания (3) и прочности пластины (4).

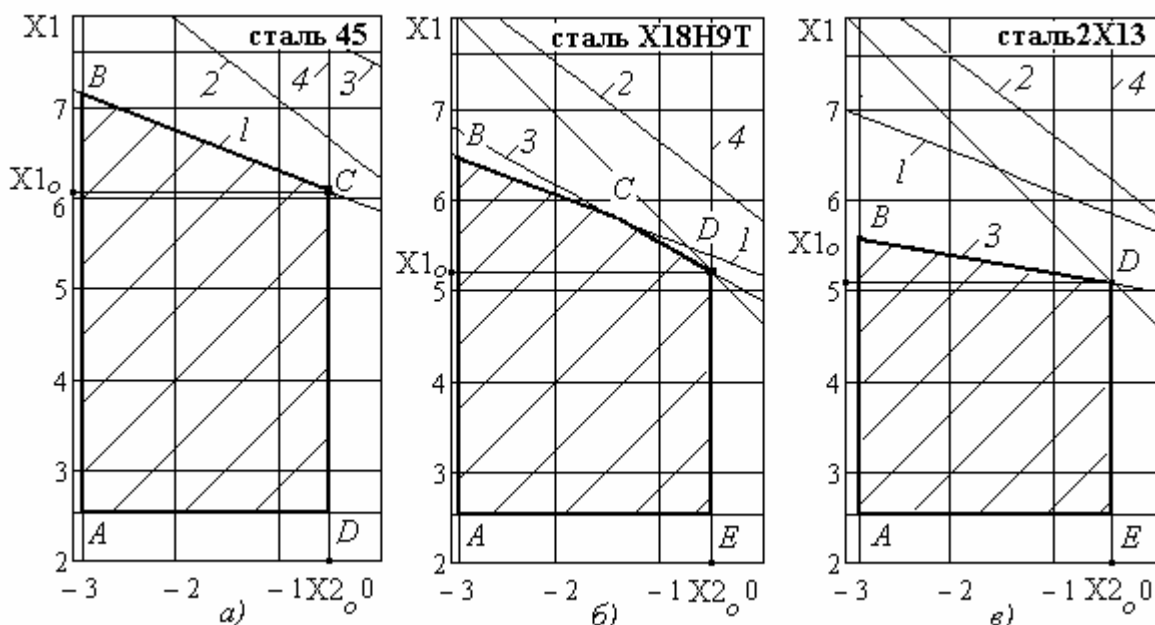


Рисунок 2. Схемы определения оптимальных режимов резания токарной обработки нержавеющей стали X18H9T - б) и 2X13 - в) в сравнении со сталью 45 - а)

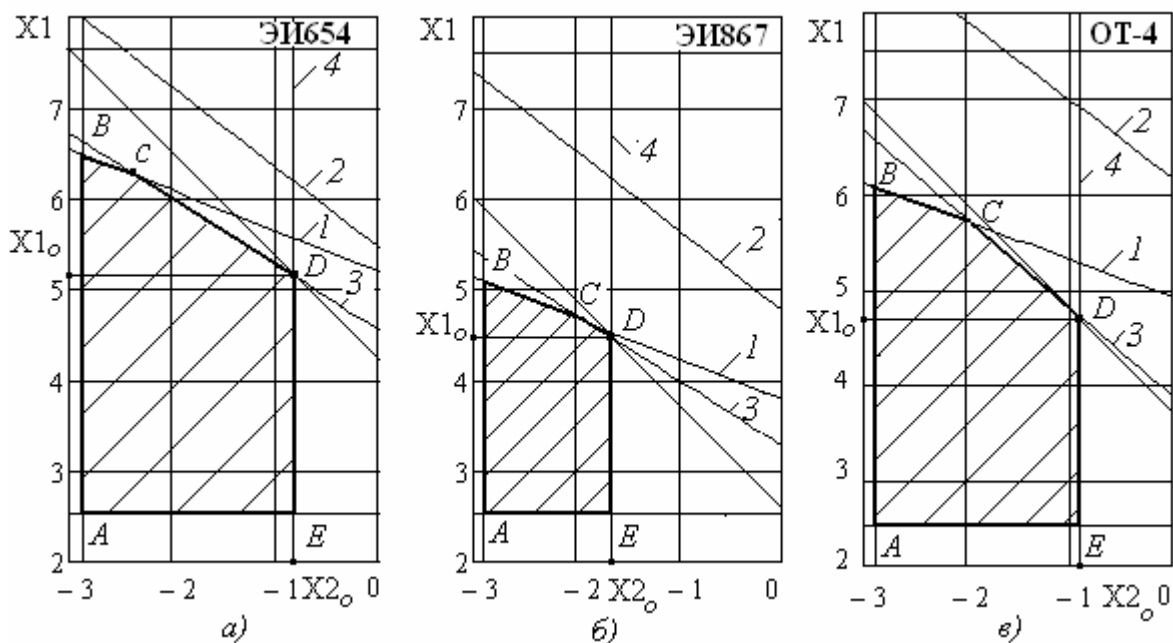


Рисунок 3. Схемы определения оптимальных режимов резания токарной обработки жаропрочных сплавов ЭИ654 - а), ЭИ867- б) и титанового сплава OT-4 - в)

Следовательно, именно температурные ограничения являются лимитирующими при определении оптимальных режимов резания по критерию максимальной производительности для всех рассмотренных труднообрабатываемых материалов.

Оптимальные режимы резания - подача S_o и скорость резания V_o с учетом температурных ограничений могут быть определены аналитически следующим образом:

$$S_o = \left[34n^{1.35} K_\phi^{0.8} / C_P K_{Pt}^{(x_P - 0.77)} \right]^{1/y_P} ; V_o = \begin{cases} \left(\Theta / C_\Theta t^{x_t} S_o^{y_t} \right)^{1/z_t}, & \text{при } K_{\Theta o} \leq 1; \\ C_V K_V / T^m t^{x_v} S_o^{y_v}, & \text{при } K_{\Theta o} \geq 1, \end{cases} \quad (3)$$

где $K_{\Theta o} = \Theta / N_\Theta t^{x_t} \left(C_V K_V / T^m t^{x_v} \right)^{z_t} \left[34n^{1.35} K_\phi^{0.8} / C_P K_{Pt}^{(x_P - 0.77)} \right]^{(y_v z_t - y_t)}$ -

граничное значение коэффициента, определяющего необходимость учета температурных ограничений.

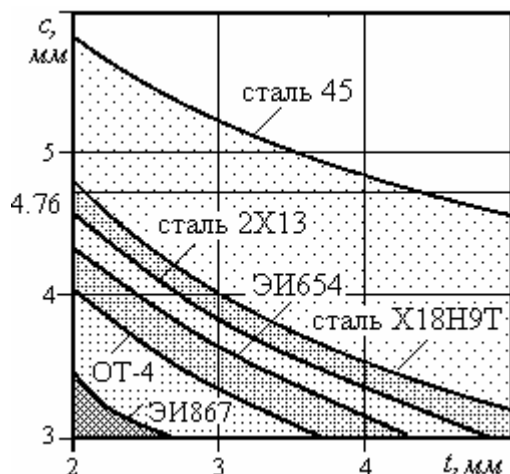


Рисунок 4. Графики зависимости коэффициентов, определяющих необходимость учета температурных ограничений от глубины резания t и толщины пластины c .

На рис. 4 в виде линий уровня представлены графики двухпараметрических зависимостей граничных коэффициентов, определяющих необходимость учета температурных ограничений от глубины резания и толщины твердосплавной пластины при обработке различных труднообрабатываемых материалов в сравнении со сталью 45. Значения коэффициентов на указанных линиях соответствуют уровню $K_{\Theta o} = 1$. Заштрихованные области слева от этих линий характеризуют сочетания глубин резания и толщин пластин, при которых $K_{\Theta oPl} \leq 1$ и температурные ограничения отсутствуют. Справа располагаются области, в которых $K_{\Theta oPl} \geq 1$, что свидетельствует о необходимости учета температурных ограничений.

Результаты расчетов оптимальных режимов резания (3) для различных труднообрабатываемых материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчетов температурных ограничений и оптимальных режимов резания для различных труднообрабатываемых материалов

№ п/п	Обрабатываемый материал	Температурное ограничение (ТО)	Оптимальные режимы резания		
			подача S , мм/об	скорость V , м/мин (с учетом ТО)	скорость V , м/мин (без учета ТО)
1	нержавеющая сталь Х18Н9Т	$\Theta = 57,6V^{0,71}S^{0,46}t^{0,1}$	0,6	57	68
2	нержавеющая сталь 2Х13	$\Theta = 32,0V^{0,84}S^{0,17}t^{0,1}$	0,6	50	108
3	жаропрочный сплав ЭИ 654	$\Theta = 77,0V^{0,69}S^{0,50}t^{0,1}$	0,4	54	82
4	жаропрочный сплав ЭИ 867	$\Theta = 256V^{0,54}S^{0,39}t^{0,1}$	0,2	27	29
5	титановый сплав ОТ-4	$\Theta = 107V^{0,74}S^{0,69}t^{0,1}$	0,4	35	61

Учет температурных ограничений позволяет уточнить оптимальные скорости резания в сравнении с результатами расчетов без их учета. При этом оптимальные скорости резания могут отличаться более, чем в 2 раза.

Установленные температурные ограничения позволяют количественно оценить возможные резервы роста скоростей резания и, соответственно, производительности обработки исследованных труднообрабатываемых материалов при снятии температурных ограничений, например, за счет применения смазочно-охлаждающих технологических сред [5].

3. Выводы.

В результате выполненного анализа тепловых потоков и температур в зоне резания в зависимости от скорости и подачи установлены температурные ограничения при токарной обработке различных труднообрабатываемых материалов. Для этих материалов установлены граничные значения коэффициентов, определяющих необходимость учета температурных ограничений

Определены оптимальные режимы резания, обеспечивающие максимальную производительность обработки, учитывающие установленные температурные ограничения. Выполнено сравнение этих режимов резания с режимами, рассчитанными без учета температурных ограничений. Выявлены резервы повышения скоростей резания (до 2 раз) при снятии температурных ограничений.

Разработанная методика быть 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич, В. Я. Режимы резания труднообрабатываемых материалов / В. Я. Гуревич. – М.: Машиностроение, 1986. – 240с.
2. Ивченко, Т. Г. Исследование закономерностей формирования тепловых потоков в зоне резания при точении / Т. Г. Ивченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ: ДДМА, 2006. - № 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. - Донецьк, ДонНТУ, 2008. - № 5. - С.23-29.
4. Богуславский, В. А. Оптимизация режимов резания при точении труднообрабатываемых материалов с учетом температурных ограничений / В. А. Богуславский, Т. Г. Ивченко, Зантур Сахби // Прогрессивные технологии и системы машиностроения:– Донецк: ДонНТУ, 2010. – Вып. 39. – С.77-84.
5. Ивченко, Т. Г. Оценка возможностей повышения эффективности обработки при использовании СОТС / Т. Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения:– Донецк: ДонНТУ, 2018. - № 1 (60). – С. 37-43.

Поступила в редколлегию 27.04.2018 г.