

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ РЕЗАНИИ

Ивченко Т.Г., Петряева И.А., Полякова Е.В. (ДонНТУ, м. Донецк, Украина)

Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: [tm@mech.dgtu.donetsk.ua](mailto:tm@mech.dgtu.donetsk.ua)

**Аннотация:** Выполнен анализ закономерностей формирования тепловых потоков в зоне обработки при прерывистом резании. Установлен характер влияния прерывистости процесса резания на плотности тепловых потоков и средние температуры на передней поверхности лезвия инструмента в условиях неустановившегося теплообмена

**Ключевые слова:** тепловой поток, температура, прерывистое резание, неустановившийся теплообмен

### 1. Введение

Тепловое состояние зоны резания существенно влияет на работоспособность режущих инструментов и качество обрабатываемых деталей. Современные тенденции роста производительности за счет повышения режимов механической обработки, в частности применение высокоскоростного резания, приводят к существенному увеличению тепловых нагрузок на режущий инструмент, в связи с чем возрастает и актуальность задач по их исследованию.

Методы экспериментальных и теоретических исследований тепловых явлений при стационарном процессе резания в условиях установившегося теплообмена в настоящее время достаточно хорошо разработаны [1]. Однако при кратковременном или прерывистом резании – строгании, долблении, фрезеровании, нестационарностью процесса пренебрегать нельзя.

В исследованиях теплового состояния инструмента, выполненных для условий неустановившегося теплообмена [2], не рассмотрены особенности формирования тепловых потоков при резании. При теоретических исследованиях теплового состояния торцовых фрез, выполненных в работе [3], основное внимание уделено анализу циклического характера изменения температур, без учета особенностей формирования тепловых потоков.

В исследованиях тепловых потоков в зоне резания при неустановившемся теплообмене [4] рассмотрено влияние параметров процесса на тепловые потоки и температуру, однако не учтены особенности кратковременного и прерывистого резания. Представляет интерес дальнейшее развитие методики определения тепловых потоков и температур для этих условий.

Целью представленной работы является установление закономерностей формирования тепловых потоков в зоне резания в условиях неустановившегося теплообмена при прерывистом резании.

### 2. Основное содержание и результаты работы

Анализ стационарности тепловых процессов осуществляется на основании безразмерного критерия времени, или критерия Фурье:  $F_0 = \omega \tau / l^2$  ( $\omega$  – коэффициент температуропроводности,  $\tau$  – реальное время резания,  $l$  – длина источника). Процесс считается установившимся при  $F_0 \geq 200$  [1]. Анализ параметров, входящих в критерий Фурье, позволяет сделать вывод о том, что применительно к инструментам из твердых сплавов диапазон его изменения находится в пределах от 1 до 200 (коэффициенты температуропроводности изменяются в пределах от  $\omega = 0,100 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$  до  $\omega = 0,246 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ ).

Для учета особенностей формирования тепловых потоков при неустановившемся теплообмене необходимо использовать функцию безразмерного времени  $m(F_o)$  [1], характеризующую изменение температур в лезвии режущего инструмента в период неустановившегося теплообмена.

Плотности тепловых потоков на передней  $q_1$  и задней  $q_2$  поверхностях лезвия инструмента при непрерывном резании в условиях неустановившегося теплообмена могут быть рассчитаны следующим образом [4]:

$$q_1 = \frac{K_1 K_3 \lambda_u - K_2 N_2 m(F_o) h + K_1 M_2 m(F_o) h}{K_3 K_4 \lambda_u + M_2 K_4 h - N_1 N_2 (m(F_o))^2 l h / \lambda_u}; \quad q_2 = \frac{(K_1 - K_4 q_1) \lambda_u}{N_2 m(F_o) h}, \quad (1)$$

$$\text{где } K_1 = \frac{(1+c)\omega_d k b' q_d}{\lambda_d V} + \frac{K_{c1} q_{1T}}{\lambda_d} \sqrt{\frac{\omega_d k l}{V}}; \quad K_2 = \frac{(1+c)\omega_d k b' q_d T_u}{\lambda_d V} + \frac{K_{c2} q_{2T}}{\lambda_d} \sqrt{\frac{\omega_d h}{V}};$$

$$K_3 = \frac{1,82 K_{c2}}{\lambda_d} \sqrt{\frac{\omega_d h}{V}}; \quad K_4 = \frac{1,3 K_{c1}}{\lambda_d} \sqrt{\frac{\omega_d k l}{V}} + \frac{M_1 m(F_o) l}{\lambda_u}; \quad m(F_o) = 4 \cdot 10^{-3} F_o; \quad \lambda_d, \lambda_u, \omega_d, \omega_u$$

– коэффициенты теплопроводности и температуропроводности материалов детали и инструмента;  $b$  – ширина среза;  $l$  – длина контактной площадки в направлении схода стружки;  $h$  – износ по задней поверхности лезвия;  $k$  – 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, учитывающие законы распределения плотности теплового потока на передней и задней поверхностях ( $K_{c1} = 0,77$ ;  $K_{c2} = 0,55$ );  $q_{1T}$ ,  $q_{2T}$ ,  $q_d$  – плотности тепловых потоков от сил трения на контактных площадках передней и задней поверхностей лезвия инструмента, а также в зоне деформации.

Безразмерные функции, определяющие нагрев контактных площадок на передней и задней поверхностях лезвия инструмента:

$$M_{1,2} = (4,88 + 2,64 \eta_{1,2}^{0,5} \lg \eta_{1,2}) \beta^{0,85};$$

$$N_{1,2} = (0,04 + 0,02 \eta_{1,2}^{0,6} \lg \eta_{1,2}) B_{1,2}(h/l),$$

где  $\eta$  – безразмерная ширина среза:  $\eta_1 = b/l$ ,  $\eta_2 = b/h$  ( $\eta_{1,2} > 1$ );  $\beta$  – угол заострения;  $B_{1,2}(h/l)$  – специальные функции.

Закономерности изменения плотностей тепловых потоков на передней и задней поверхностях лезвия инструмента во времени при неустановившемся теплообмене представлены на рис. 1 ( $F_o$  – безразмерное время,  $\tau$  – реальное время резания). Расчеты выполнялись для условий: обрабатываемый материал – сталь 45;  $\sigma_s = 750 \text{ МПа}$ ; коэффициент усадки  $k = 2,0$ ; инструментальный материал Т5К10; износ по задней поверхности  $h = 0,1 \text{ мм}$ .

Рассмотрены относительные плотности тепловых потоков  $q_{отн1}(F_o) = q_1(F_o) / q_1(200)$ ;  $q_{отн2}(F_o) = q_2(F_o) / q_2(200)$  при условии, что процесс устанавливается при  $F_o = 200$

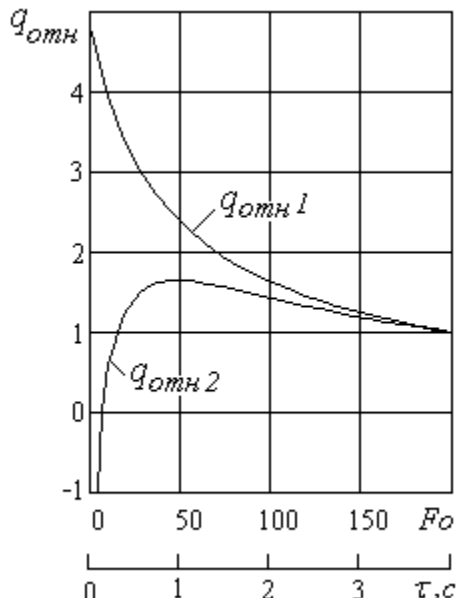


Рис. 1. Графики изменения относительных плотностей тепловых потоков на передней и задней поверхностях лезвия при неустановившемся теплообмене

В начальный момент времени тепловые потоки на передней и задней поверхностях инструмента весьма велики, относительные плотности тепловых потоков  $q_{отн1}$  и  $q_{отн2}$  при неустановившемся теплообмене в несколько раз превышают плотности тепловых потоков при установившемся теплообмене, а затем стабилизируются ( $q_{отн1} = q_{отн2} = 1$ ).

Прерывистый процесс резания характеризуется наличием рабочих ходов длительностью  $t_p$ , которые чередуются с холостыми ходами длительностью  $t_x$  и в сумме определяют длительность цикла  $t_u = t_p + t_x$ .

Циклический процесс изменения во  $\tau$  времени температуры лезвия инструмента при прерывистом резании  $\Theta_u$  аналитически может быть описан следующим образом:

$$\Theta_u(x, y, z, \tau) = \begin{cases} \Theta_{Hi}(x, y, z, \tau), & \text{если } t_u(i-1) \leq \tau \leq (t_p + t_u i), \quad i = 1, 2, \dots, n_u \\ \Theta_{Oi}(x, y, z, \tau), & \text{если } (t_p + t_u(i-1)) \leq \tau \leq t_u i \end{cases}, \quad (2)$$

где  $\Theta_{Hi}(x, y, z, \tau)$  – температура в любой точке лезвия при нагреве в период рабочего хода;  $\Theta_{Oi}(x, y, z, \tau)$  – температура в любой точке лезвия при охлаждении в период холостого хода;  $n_u$  – число циклов.

Процесс нагрева лезвия инструмента под действием источника на передней поверхности при неустановившемся теплообмене описывается следующим образом:

$$\Theta_H(x, y, z, \tau) = PT_H(\psi, \eta, \zeta, F_o), \quad (3)$$

где  $T_H(\psi, \eta, \zeta, F_o)$  – безразмерное распределение температур;  $P = K_b q_l l / 4 \lambda$  – размерный коэффициент;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности инструмента,  $K_b$  – коэффициент перехода от неограниченного пространства к неограниченному клину ( $K_b = 4$  для  $\beta = 90^\circ$ ,  $K_b = 6$  для  $\beta = 60^\circ$ ).

Безразмерное распределение температур:

$$T_H(\psi, \eta, \zeta, F_o) = \int_0^1 d\psi_u \int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{1 - \operatorname{erf} \left[ \sqrt{(\psi - \psi_u)^2 + \eta^2 + (\zeta - \zeta_u)^2} / 2\sqrt{F_o} \right]}{\sqrt{(\psi - \psi_u)^2 + \eta^2 + (\zeta - \zeta_u)^2}} d\zeta_u, \quad (4)$$

где  $\psi = x/l$ ,  $\psi_u = x_u/l$ ,  $\zeta = z/l$ ,  $\zeta_u = z_u/l$ ,  $\eta = y/l$  – безразмерные координаты;  $\alpha = 0,5b/l$  – безразмерная ширина среза;  $\operatorname{erf}[u]$  – известная модифицированная функция интеграла вероятностей.

Процесс охлаждения, происходящий в отсутствие нагрева в период холостого хода за счет отвода тепла из зоны резания вглубь лезвия, описывается зависимостью:

$$\Theta_o(x, y, z, \tau) = PT_o(\psi, \eta, \zeta, \infty) \exp[-0.04 F_o], \quad (5)$$

где  $T_o(\psi, \zeta, \eta, \infty)$  – безразмерная температура при установившемся теплообмене.

Тогда циклический процесс изменения во времени средней безразмерной температуры лезвия фрезы  $T$ , представленный на рис. 2, аналитически описывается следующим образом:

$$T_{Hi}(\tau) = \frac{1}{\alpha} \int_0^{\alpha} d\zeta \int_0^1 d\psi \int_0^1 d\psi_u \int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{1 - \operatorname{erf} \left[ \sqrt{(\psi - \psi_u)^2 + (\zeta - \zeta_u)^2} / 2\sqrt{\omega_o(\tau - (t_p + x_{i-1}))} \right]}{\sqrt{(\psi - \psi_u)^2 + (\zeta - \zeta_u)^2}} d\zeta_u;$$

$$T_{O_i}(\tau) = T_{H_i}(t_p + x_{i-1}) \exp[-0.04\omega_o(\tau - t_p)] ; \quad \Delta t_{i-1} = 0, \quad (6)$$

где  $\omega_o = \omega / l^2$ ;  $x_i$  - период времени, корректирующий начало отсчета температуры нагрева  $T_{H(i+1)}(t_p + t_{\psi i} + x_i)$  в каждом последующем цикле с учетом охлаждения в предыдущем  $T_{O_i}(t_{\psi i})$ .

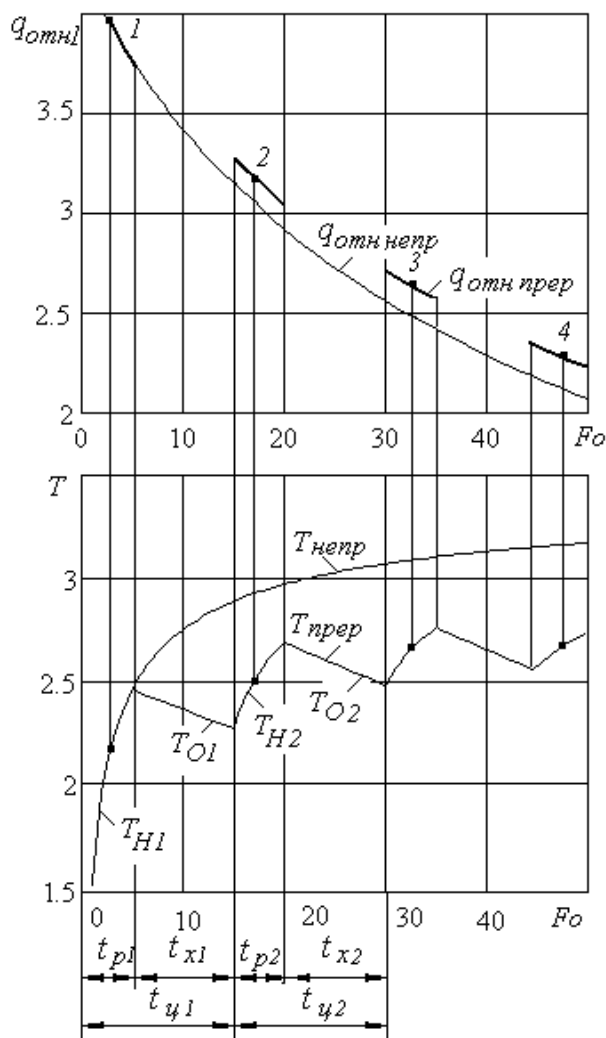


Рис. 2. Графики изменения относительной плотности теплового потока  $q_{отн}$  и средней безразмерной температуры  $T$  на передней поверхности лезвия

ную температуру  $T_{H_i \text{ ср}}$  в моменты времени  $\tau_i = t_{p_i} / 2 + t_{\psi i}(i - 1)$ . Тепловой поток в этом случае является прерывистым.

Закономерности изменения средней температуры на передней поверхности лезвия инструмента для указанных ранее условий представлены на рис. 3. Из графиков следует, что фактическая температура при прерывистом резании в период неустановившегося теплообмена  $\Theta_{\text{прер факт}}$ , рассчитанная с учетом разработанной методики расчета плотностей тепловых потоков, превышает средние температуры при непрерывном  $\Theta_{\text{непрер}}$  и прерывистом резании  $\Theta_{\text{прер}}$ , рассчитанные для тепловых потоков при установившемся процессе резания.

В первом цикле  $t_{\psi 1}$  в течение первого рабочего хода  $t_{p1}$  наблюдается резкий рост температуры по кривой нагрева  $T_{H1}$ , а затем на протяжении холостого хода  $t_{x1}$  происходит охлаждение по кривой охлаждения  $T_{O1}$ . В следующем цикле нагрев в период рабочего хода по кривой нагрева  $T_{H2}$ , в период холостого хода  $t_{x2}$  происходит охлаждение по кривой охлаждения  $T_{O2}$ . В последующих циклах  $t_{\psi}$  нагрев и охлаждение повторяются, в некотором цикле  $k$  они уравниваются. При этом процесс теплообмена может считаться установившимся и характеризоваться общей средней безразмерной температурой  $T_{\text{ср } O}$ .

Изменение относительного теплового потока во времени при непрерывном резании представлено на рис. 2 кривой  $q_{отн \text{ непр}}$ .

При прерывистом резании тепловой поток возникает и действует только в течении рабочего хода. Причем в связи с уменьшением средней безразмерной температуры передней поверхности лезвия инструмента  $T_{\text{прер}}$  за счет охлаждения в период холостого хода в сравнении с  $T_{\text{непр}}$ , относительный тепловой поток  $q_{отн \text{ прер}}$  при прерывистом резании превышает относительный тепловой поток  $q_{отн \text{ непр}}$  при непрерывном резании. Для определения плотности тепловых потоков при прерывистом резании в каждом цикле в период неустановившегося теплообмена необходимо рассчитывать среднюю безразмерную

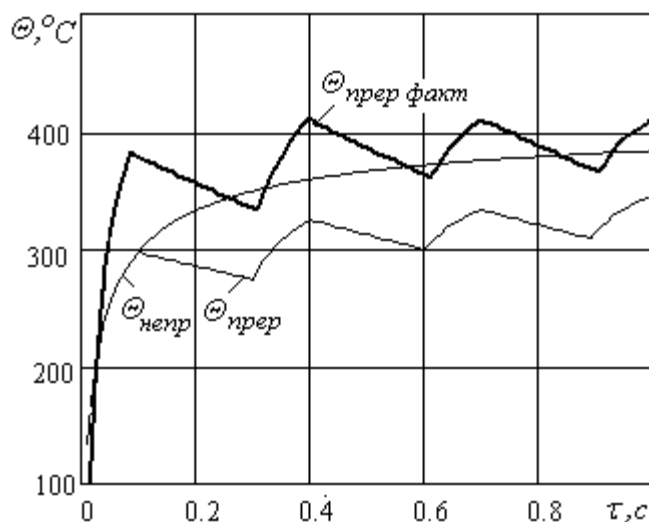


Рис.3. Графики изменения средних температур  $\Theta$  на передней поверхности лезвия инструмента при непрерывном и прерывистом резании в условиях неустановившегося теплообмена

інструменту в умовах нестационарного різання // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2006.- Випуск 110. - С.17-23. 3. Івченко Т.Г. Исследование закономерностей распределения температур в лезвии торцовых фрез // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип.24, 2009.- С.90 -96. 4. Івченко Т.Г., Петряєва І.А., Полякова Е.В. Исследование тепловых потоков и температур в зоне резания при неустановившемся теплообмене // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, ДДМА. Вип.28, 2011.- С.280-283.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ ПІД ЧАС УРИВЧАСТОГО РІЗАННЯ

*Івченко Т.Г., Петряєва І.А., Полякова К.В. (ДонНТУ, м. Донецьк, Україна)*

**Анотація:** Виконаний аналіз закономірностей формування теплових потоків в зоні обробки під час уривчастого різання. Встановлений характер впливу уривчастості процесу різання на щільності теплових потоків і середні температури на передній поверхні леза інструменту в умовах несталого теплообміну

**Ключові слова:** тепловий потік, температура, уривчасте різання, несталий теплообмін

### RESEARCH OF CONFORMITIES TO LAW OF THERMAL STREAMS FORMING AT IRREGULAR CUTTING

*Ivchenko T.G., Petryaeva I.A., Polyakova K.V., (DonNTU, t. Donetsk, Ukraine)*

**Annotation:** The analysis of conformities to law of thermal streams forming in the area of treatment at the irregular cutting is executed. Character of influence of cutting process irregularity on the closeness of thermal streams and middle temperatures on the front surface of blade of instrument in the conditions of the unset heat exchange is set

**Keywords:** thermal stream, temperature, irregular cutting, unset heat exchange

### 3. Заключение

В результате проведенных исследований установлены закономерности формирования тепловых потоков и температур в зоне резания в условиях неустановившегося теплообмена при прерывистом резании.

Разработанная методика может быть широко использована для анализа тепловых процессов при различных видах кратковременного и прерывистого резания.

### Список литературы: 1. Резников А.Н., Резников Л.А.

Тепловые процессы в технологических системах. - М.: Машиностроение, 1990. -288с. 2. Івченко Т.Г. Дослідження теплового стану ріжучого

Надійшла до редколегії 22.06.2011 р.