

В.И.Кальченко, д-р. техн. наук, В.В.Кальченко, д-р. техн. наук,  
А.В.Рудик, канд. техн. наук, В.И.Венжега, А.В.Кологойда, Чернигов,  
Украина

## АНАЛИЗ ТЕПЛОАПРЯЖЕННОСТИ ПРОЦЕССА ОДНОПРОХОДНОГО ТОРЦЕВОГО ШЛИФОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ

*Theoretical research by the method of sources and experimental construction of mathematical model of thermal tension of the butt end polishing of details for a passage-way taking into account the kinematics of process*

Известно, что структура приповерхностных слоев шлифованных изделий отлична от основы, что главным образом вызвано тепловыми процессами, возникающими на поверхности при финишных операциях. Состояние поверхностного слоя может определять работоспособность изделия. При появлении прижогов создаются условия трещинообразования, так как тепловые процессы, связанные со структурными превращениями поверхностных слоев, проходят при изменении объемов. Поэтому задача определения максимальных температур при однопроходном торцевом шлифовании является актуальной для обработки плоских поверхностей. Решение ее может быть проведено с использованием метода источников [1], который не смотря на относительно невысокую точность в сравнении с численными методами, позволяет получить аналитические зависимости и исследовать влияние отдельных параметров процесса настройки станка на процесс теплообразования.

Заготовку можно рассматривать как множество расположенных вплотную друг к другу бесконечных стержней единичной площади, ограниченных со стороны торца (рис.1). Функция точечного источника, расположенного на прямой определяет распределение температуры в бесконечном стержне по координате и времени, описывается уравнением [1]

$$T(x, x', t, t') = \frac{Q}{c \cdot \gamma \cdot \sqrt{4\pi \cdot a \cdot (t - t')}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - x')^2}{4 \cdot a \cdot (t - t')}\right), \quad (1)$$

где  $Q$  – количество теплоты, мгновенно выделяемое точечным источником,

$c$  – удельная теплоемкость материала детали,  $c = 439,6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;

$\gamma$  – плотность материала детали;  $\gamma = 7,87 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} = 7870 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

$a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma} = 2,514 * 10^{-3} \frac{M^2}{c}$  – коэффициент температуропроводности;

$\lambda = 87 \frac{Bm}{M * K}$  – коэффициент теплопроводности;

$t, t'$  – моменты времени - текущий (для которого определяется температура) и действия источника тепла;

$x, x'$  – координаты точек - исследуемой и положения источника тепла.

Обозначим  $t - t' = \Delta t$ .

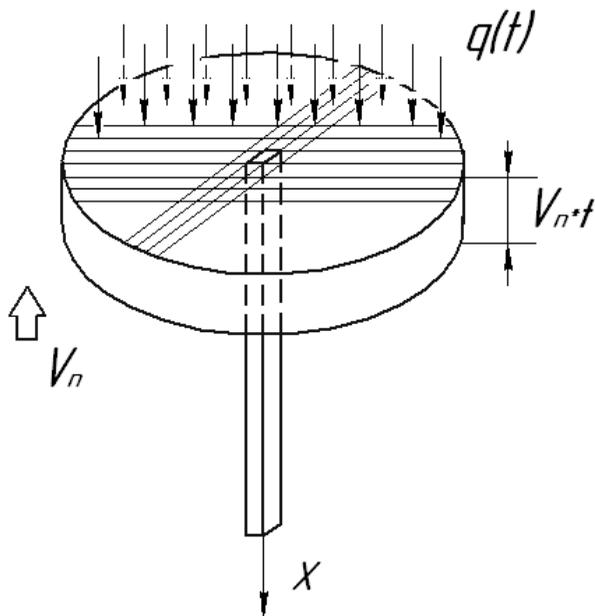


Рис. 1 Расчетная модель торца заготовки, представленная в виде стержней единичной площади

Ограниченность заготовки торцевой поверхностью нарушает симметричное распределение тепла. Кроме того, на торце заготовки в момент обработки действует источник с плотностью теплового потока равной  $q(t)$ , что соответствует граничным условиям второго рода:

$$\left. \frac{\partial T(x, x', \Delta t)}{\partial x} \right|_{x=0} = - \frac{q(t)}{\lambda}. \quad (2)$$

Найдем частную производную от температуры по координате  $x$ .

$$\frac{\partial T(x, x', \Delta t)}{\partial x} = \frac{Q}{c \cdot \gamma \cdot \sqrt{4\pi \cdot a \cdot \Delta t}} \cdot \exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4 \cdot a \cdot \Delta t}\right) \cdot \left(-\frac{x-x'}{2 \cdot a \cdot \Delta t}\right). \quad (3)$$

Приняв в этом выражении координату  $x=0$ , получим запись граничного условия второго рода

$$\frac{Q}{c \cdot \gamma \cdot \sqrt{4\pi \cdot a \cdot \Delta t}} \cdot \exp\left(-\frac{(x')^2}{4 \cdot a \cdot \Delta t}\right) \cdot \frac{x'}{2 \cdot a \cdot \Delta t} = -\frac{q(t)}{\lambda}. \quad (4)$$

Помножив обе части равенства (4) на  $\lambda$  и произведя сокращения, получим выражение

$$\frac{Q}{2 \cdot \Delta t \cdot \sqrt{4\pi \cdot a \cdot \Delta t}} \cdot \left[ x' \cdot \exp\left(-\frac{(x')^2}{4 \cdot a \cdot \Delta t}\right) \right] = -q(t). \quad (5)$$

Данное выражение можно рассматривать как произведение двух сомножителей, характеризующих интенсивность и расстояние до начала координат, связанного с торцом заготовки.

Первый из сомножителей (перед скобками) характеризует интенсивность теплового источника в момент времени  $t$ . Приравняв его значение числовому значению правой части уравнения (5), получим

$$\frac{Q}{2 \cdot \Delta t \cdot \sqrt{4\pi \cdot a \cdot \Delta t}} = q(t). \quad (6)$$

Из выражения (6) находим соотношение, которое можно использовать при решении уравнения (1)

$$\frac{Q}{\sqrt{4\pi \cdot a \cdot \Delta t}} = 2 \cdot \Delta t \cdot q(t). \quad (7)$$

В свою очередь, как было показано в работе [2], плотность теплового потока может быть найдена из уравнения

$$q(t) = \frac{k \cdot N(t)}{S(t)}, \quad (8)$$

где  $N(t)$  – мощность, которая затрачивается на процесс резания (рис. 2, нижние графики) на участках черного и чистового шлифования,  $S(t)$  – площадь поверхности контакта между поверхностями инструмента и заготовки;

$k$  – коэффициент, характеризующий долю общей мощности процесса торцевого шлифования, которая преобразуется в тепло и попадает в торец заготовки.

При выборе значения коэффициента  $k$  следует учитывать, что порядка 80% механической энергии, которая затрачивается на процесс резания, превращается в тепло. В свою очередь менее третьей части общего теплового потока направляется в деталь, остальная часть передается окружающей среде и уходит со стружкой. Поэтому в работе принято  $k \approx 0,3$ .

На рисунке 2 приведены осциллограммы, соответствующие обработке со следующими углами ориентации кругов в горизонтальной  $\gamma$  и вертикальной  $\nu$  плоскостях, которые были получены на установке разработанной на кафедре на базе станка 3342 АДО [2]:

$$a - \nu = 0,05^\circ, \gamma = 0,1^\circ.$$

$$б - \nu = 0,1^\circ, \gamma = 0,1^\circ.$$

$$в - \nu = 0,15^\circ, \gamma = 0,1^\circ.$$

Круговая частота вращения подающего барабана составляла  $n = 5 \text{ мин}^{-1}$ .

Верхние осциллограммы соответствуют съему припуска, а нижние – мощности, которая затрачивается на процесс резания.

Второй множитель выражения (5), находящийся в скобках, определяет положение источника тепла относительно торца, будет численно равен 1.

$$x' \cdot \exp\left(-\frac{(x')^2}{4 \cdot a \cdot \Delta t}\right) = -1. \quad (9)$$

Если связать начало системы координат с торцом заготовки, то из выражения (9) видно, что координата, характеризующая положение источника на прямой с удовлетворительной точностью может быть аппроксимирована зависимостью

$$x'(t) = 0,035 \cdot \sqrt{t} - 1,08. \quad (10)$$

Координата торца  $x$  в процессе шлифования меняет свое положение относительно фиксированной точки заготовки, и движется со скоростью  $V_n$ .

В произвольный момент времени  $t$  ее можно определить из выражения

$$x_t = x + V_n(t) \cdot \Delta t. \quad (11)$$

Выражение для определения скорости движения источника тепла в направлении нормали  $V_n$  определялось в работе [2]. Ориентировочно числовое значение можно найти из полученных осциллограмм съема припуска (верхние графики на рисунке 2).

Подставив выражения (7), (8), (10) в уравнение (1) для небольшого промежутка времени  $dt$ , получим приращение температуры от действия теплового источника, плотность которого определяется мощностью резания

$$dT(x, t) = \frac{2}{c \cdot \gamma} \cdot k \cdot \frac{N(t)}{S(t)} \cdot \exp\left(-\frac{(x - V_n(t) \cdot t - x'(t))^2}{4 \cdot a \cdot t}\right) \cdot dt. \quad (12)$$

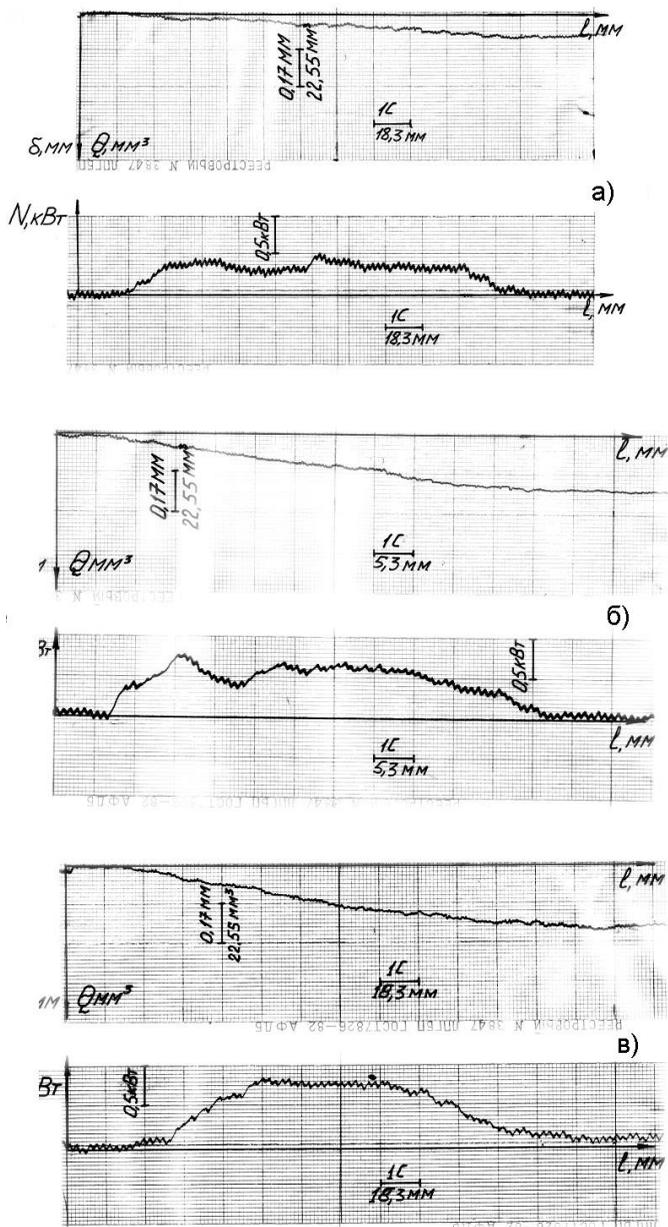


Рис. 2 Графики изменения объемов (длины заготовки за счет движения  $V_n$ ) и мощности, затрачиваемой на резание металла [2]

Тогда за конечное время обработки  $t_0$  происходит приращение температуры, которое определяется интегрированием выражения (11)

$$T(x, t) = \frac{2 \cdot k}{c \cdot \gamma} \cdot \int_0^{t_0} \frac{N(t)}{S(t)} \cdot \exp\left(-\frac{(x + V_n(t) \cdot \Delta t - x'(t))^2}{4 \cdot a \cdot \Delta t}\right) \cdot dt. \quad (13)$$

Время обработки определяется из выражения

$$t_0 = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\omega}, \quad (14)$$

где  $\theta_1, \theta_2$  – углы поворота подающего барабана, определяющие моменты входа и выхода заготовки из рабочего пространства станка;

$\omega$  – угловая скорость барабана подачи заготовок.

В выражении (12) в качестве параметра можно использовать вместо времени угол поворота барабана подачи  $\theta$ , так как

$$t = \frac{\theta}{\omega}. \quad (15)$$

По данным формулам составлена программа расчета в пакете программ MathCAD и проведен опытный замер температур при помощи термопар. График изменения температуры приведен на рисунке 3.

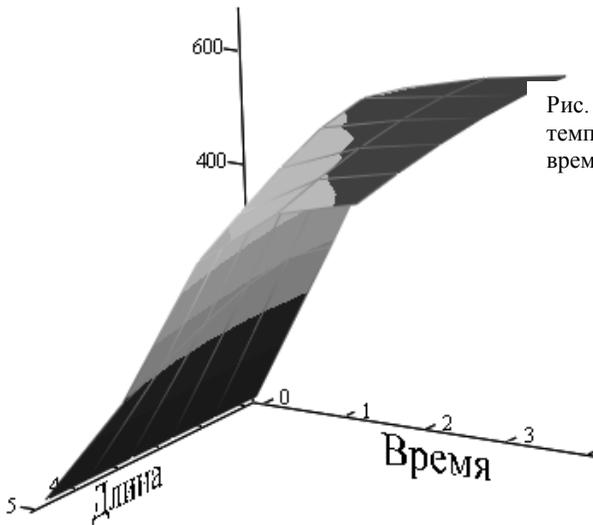


Рис. 3 График изменения температуры по длине и времени обработки

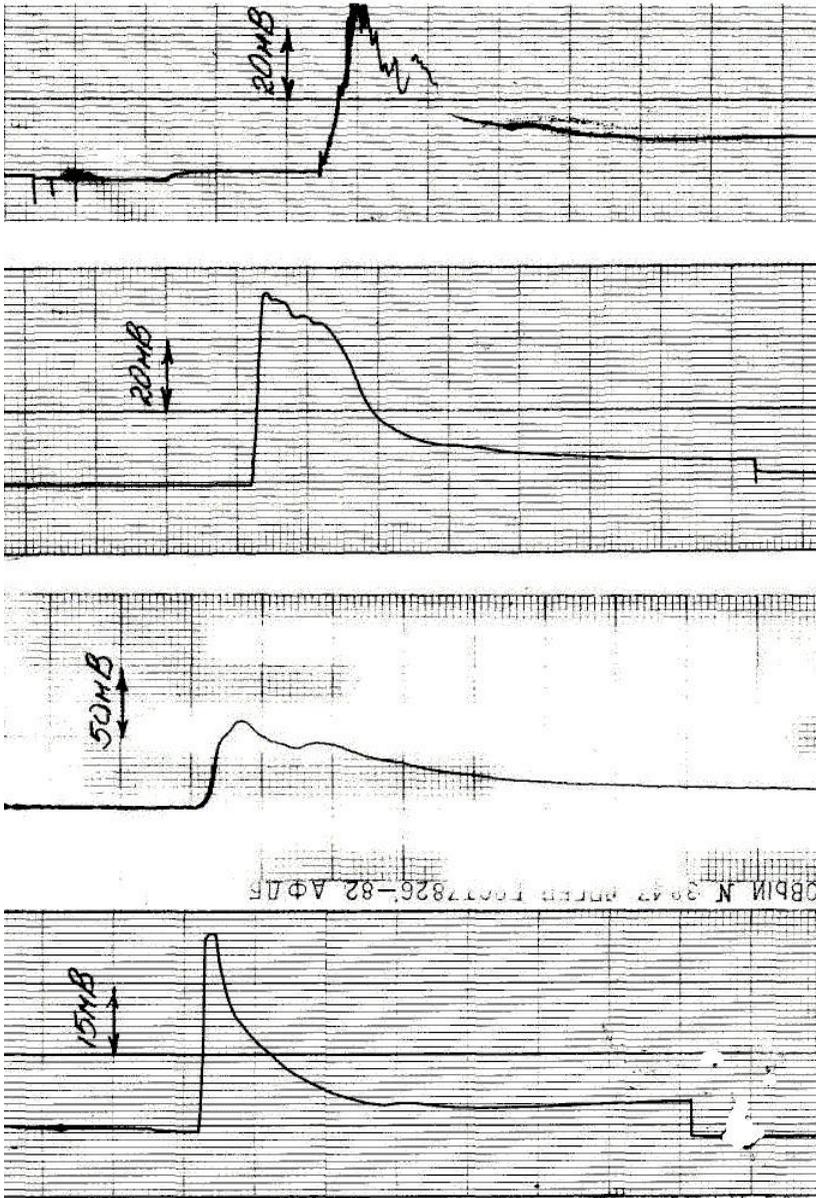


Рис. 4 Осциллограммы термо ЭДС (температур) по углу поворота барабана подачи

Проведены экспериментальные исследования тепловой напряженности процесса торцевого шлифования. В качестве математической модели эксперимента использовался полный факторный эксперимент типа  $2^3$  при учете взаимодействий между факторами. В качестве плана принят ортогональный план второго порядка с проведением параллельных опытов во всех точках, так как до опыта не известны дисперсия, вид модели изучаемого процесса, наиболее значимые факторы. Данный план обеспечивает лучшую оценку коэффициентов в уравнении регрессии.

Оциллограммы и значения максимальных температур (рис.4) были получены при использовании предварительно тарированных термопар из материала хромель-капель и оригинального двухканального усилителя, что позволяло проводить измерения на двух торцах.

Методом математического планирования получено уравнение математической модели температуры точки, расположенной в центре цилиндрической стальной детали диаметром 20 мм. Данное уравнение имеет вид

$$T(\delta, v) = 750 + 1113 \cdot \delta^2 + 413 \cdot v^2 - 644 \cdot v, \quad (16)$$

где в качестве факторов принимались припуск  $\delta$  (мм), круговая скорость  $v$  (м/мин) вращения барабана подачи заготовок. Влияние угла разворота кругов в вертикальной плоскости выявилось незначительным.

Как показали экспериментальные исследования тепловой напряженности процесса однопроходного торцевого шлифования деталей (рисунок 4), расчетные зависимости отличаются от результатов опыта не более чем на 15-20%.

Выводы:

Получена расчетная зависимость температур при торцевом шлифовании деталей, которая позволяет оценить максимальные температуры в процессе обработки деталей.

Планируется доработать программу [2], выполненную на кафедре Черниговского государственного технологического университета, расчета процесса обработки на станке 3342 АДО с целью более точного определения плотности теплового потока и температур на торцах заготовок.

Проведены экспериментальные исследования тепловой напряженности процесса торцевого шлифования. Расхождения экспериментальных и расчетных значений не превышает 15%.

**Список литературы:** 1. Ситайлов В.А. *Тепловые процессы и управление качеством поверхности*. - М.: Машиностроение, 1978, 167 с. 2. Кальченко В.В. Научные основы эффективного шлифования со скрешивающимися осями инструмента и обрабатываемой детали: Автореф. дис. на соиск. уч. степ. доктора техн. наук. – Харьков, 2006, 36 с. 3. Рецетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. - М.: Машиностроение, 1986, 336 с.

Поступила в редколлегию 15.06.08