

УДК 621.923

СЫЗЫЙ Ю.А. (докт. техн. наук, проф.)**УШАКОВ А.Н.** (канд. техн. наук, доц., ragom38@yandex.ru)Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт",
г. Харьков, Украина**СТАЛИНСКИЙ Д.В.** (д-р техн. наук.)

Директор ГНТЦ «Энергосталь», г. Харьков, Украина

О БАЛАНСЕ ТЕПЛА ОТ РАБОТЫ ДЕФОРМАЦИИ НА ПЛОСКОСТИ СДВИГА ПРИ РЕЗАНИИ ЕДИНИЧНЫМ АБРАЗИВНЫМ ЗЕРНОМ

В статье представлен анализ распределения тепла между стружкой, зерном и обрабатываемой поверхностью при резании единичным абразивным зерном на основе аналитических решений задачи теплопроводности.

шлифование, абразивное зерно, работа деформации, плоскость сдвига, баланс тепла

Введение

Принято, что основным источником тепла при резании является работа деформации обрабатываемого материала. При этом, рассматривая упрощенную модель механики резания, за источник тепла от работы деформации принимается плоскость сдвига. Эта модель принята как для лезвийного инструмента, так и для инструмента, где режущими лезвиями являются абразивные зерна.

В отличие от лезвийного инструмента с положительным передним углом резания абразивное зерно принимается как лезвие с отрицательным передним углом [1,2,3]. Используя такую общепринятую модель резания зерном при исследовании нагрева обрабатываемой поверхности возникает задача теплового баланса, т.е. распределения тепла между стружкой, зерном и обрабатываемой поверхностью. Большинство авторов [2,4,5] игнорируют тепло уносимое стружкой и зерном, и все тепло деформации направляют в обрабатываемую поверхность.

В предыдущих наших работах [6,7] на это сомнительное решение указывалось, и было показано, что значительное, если не преобладающее количество тепла от работы деформации уходит в стружку и зерно. Однако вопрос распределения тепла деформации между стружкой, зерном и обрабатываемой поверхностью требует своего дальнейшего уточнения.

Основное содержание работы

В статье рассматриваются два подхода при решении задачи теплопроводности при резании единичным абразивным зерном. Первый подход состоит в принятии плоскости сдвига, как источника тепла расположенного наклонно к направлению вектора скорости резания и движущегося в сплошном однородном пространстве, как показано на рис. 1.

Второй подход состоит в представлении срезаемого слоя металла как набора тонких адиабатических стержней, движущихся со скоростью резания $V_{кр}$ и проходящих через плоскость сдвига [6,7], как показано на рис. 2.

Решение задачи теплопроводности от работы деформации при первом подходе

описується наступним образом [7]:

$$T(x_1, y_1, t) = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \int_0^{\tau/l} \int_0^l \frac{1}{\tau-t} \exp \left\{ - \frac{[x_1 \cos \beta - y_1 \sin \beta - x_u + V(\tau-t) \cos \beta]^2 + [x_1 \sin \beta + y_1 \cos \beta + V(\tau-t) \sin \beta]^2}{4 \cdot a \cdot (\tau-t)} \right\} dx_u dt, \quad (1)$$

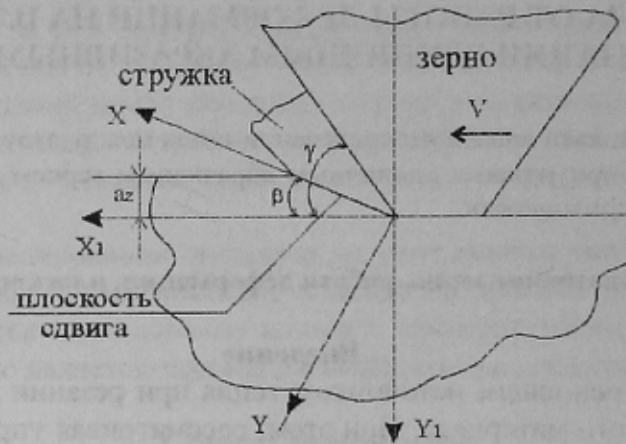


Рис. 1. Схема резания единичным зерном с источником тепла от работы деформации на плоскости сдвига

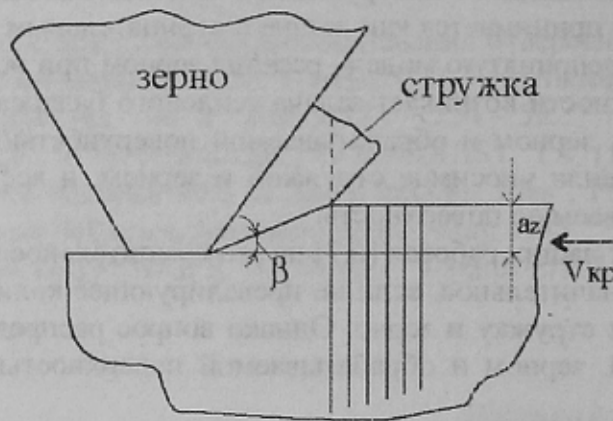


Рис. 2. Схема резания единичным зерном со стержневой моделью обрабатываемой поверхности

где x_1, y_1 - координаты согласно рис.1,
 β - угол сдвига,
 τ - время наблюдения за температурным полем, с,
 τ_1 - время действия источника тепла на плоскости сдвига, с,
 l - размер источника тепла по оси X,
 λ, a - коэффициенты тепло- и температуропроводности материала,
 q - плотность теплового потока равномерно распределенного на плоскости сдвига.

Как показано в [7] теплофизические константы электрокорунда и стали близки друг к другу и поэтому теплопроводящее пространство принято однородным.

Расчет q выполнен в соответствии с моделью механики резания принятой в [2,9]:

$$q = 52 \cdot \sigma_i,$$

где σ_i - интенсивность напряжений на плоскости сдвига соответствующая степени и скорости деформации и температуре при шлифовании.

На рис. 3 приведен расчет по (1) для толщины среза $a_z = 0.0005$ см, $\lambda = 0.21$ Дж/см³·град, $\alpha = 0.055$ см²/с, $\beta = 0.3837$ рад [2], скорости резания $V = 5000$ см/с, времени наблюдения $\tau = \tau_1 = 0.26 \cdot 10^{-6}$ с. Время τ_1 рассчитывалось как время прохождения плоскости сдвига над точкой обрабатываемой поверхности движущейся со скоростью резания вдоль координаты X (см. рис.1).

На рисунке распечатки расчета рис.3 а) приведено температурное поле, охватывающее обрабатываемый материал (в положительном направлении оси y_1 и под плоскостью сдвига), стружку (между плоскостью сдвига и передней поверхностью зерна), а также зерно (за передней поверхностью зерна и в отрицательном направлении оси y_1). На графике рис.3 б) приведены кривые распределения температуры по оси y_1 для различных значений x_1 . Из этих графиков наглядно видно, что основное количество тепла сосредоточено в стружке и зерне и малая доля его перешла в обрабатываемую поверхность, о чем указано в работе [6].

Однако, если время наблюдения τ принять незначительно бо́льшим времени действия τ_1 источника тепла, то картина распределения тепла резко меняется. На рис. 4, для тех же условий, что и на рис.3, но при $\tau = 0.2601 \cdot 10^{-6}$ с, т.е. на $1 \cdot 10^{-10}$ с. бо́льшем, чем время действия $\tau_1 = 0.2601 \cdot 10^{-6}$ с. показано температурное поле и распределение его по оси y_1 для различных значений x_1 . Здесь хорошо видно, что за ничтожно малое время равное $1 \cdot 10^{-10}$ с. тепло "мгновенно" перераспределяется по оси y_1 . Если на рис. 3 для оси $x_1 = 0$ проходящей через вершину зерна тепло по оси y_1 в основном сосредоточено в зерне, т.е. в области отрицательных значений y_1 , то для этого же значения $x_1 = 0$ на рис.4 оно уже распределено практически равномерно вдоль оси y_1 . Т.е. тепло из зерна – "мгновенно" перетекает в обрабатываемую поверхность. При этом температура обработанной поверхности, т.е. для $y_1 = 0$, с 1600 °С (см. рис. 3) становится равной 2048 °С (см. рис.4).

На такой характер перераспределения тепла от зерна со стружкой в обрабатываемую поверхность нигде в литературе не указывается, и такой результат позволяет принять распределение тепла от работы деформации между обрабатываемой поверхностью и зерном со стружкой одинаковыми, т.е. в обработанную поверхность и зерно со стружкой тепло распределяется равномерно.

Такой характер "мгновенного" перетекания тепла от зерна в обрабатываемую поверхность показывает и анализ температурного поля в тонком адиабатическом стержне, набором которых моделируется обрабатываемая поверхность согласно схемы рис.2.

Решение задачи описания температуры в таком однородном адиабатическом стержне с движущимся со скоростью V вдоль стержня источником тепла и началом системы координат помещенной в источник, приведено в [7] и имеет следующий вид:

$$T(x,t) = \frac{q}{2 \cdot C \rho \cdot \sqrt{\pi \cdot a}} \int_0^{if(\tau \leq \tau_1, \tau, \tau_1)} \frac{1}{\sqrt{\tau-t}} \exp\left(-\frac{[x + if(\tau \leq \tau_1, V, 0) \cdot (\tau-t)]^2}{4 \cdot a \cdot (\tau-t)}\right) dt, \quad (2)$$

az := 0.0005 λ := 0.21 a := 0.055 v := 5000 q := 1.3 · 10⁷ β := 0.3837 τ := 0.26 · 10⁻⁶

i := 0..60 x1i := -0.0015 + 0.00005 · i j := 0..75 y1j := -0.001 + 0.00002 · j TOL := 10⁻⁶

l := $\frac{az}{\sin(\beta)}$

$$T1(x1,y1) := \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \int_0^{\tau} \int_0^l \frac{e^{-\frac{[\left(x1 \cdot \cos(\beta) - y1 \cdot \sin(\beta) - xv + v(\tau-t) \cos(\beta)\right)^2 + \left(x1 \cdot \sin(\beta) + y1 \cdot \cos(\beta) - v(\tau-t) \sin(\beta)\right)^2]}{4a(\tau-t)}}}{\tau-t} dxudt$$

M1_{i,j} := T1(x1_i, y1_j)

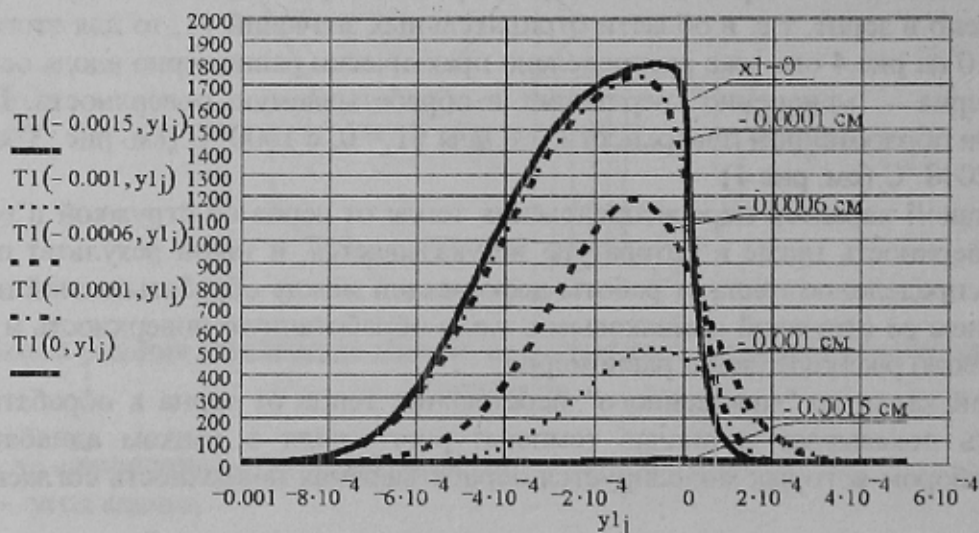
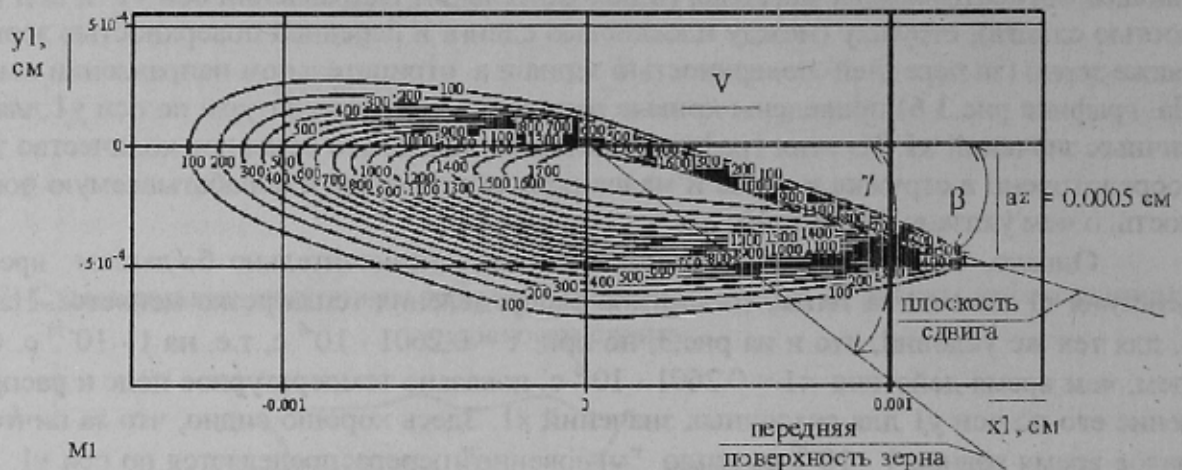


Рис. 3. Протокол расчета и графический анализ температурного поля с источником тепла на наклонной плоскости сдвига

где C_p – объемная теплоемкость, Дж/см³·град, x - координата вдоль стержня с началом на обработанной поверхности, а все прочие величины те же, что и в (1).

Скорость движения источника примерно равна $V_{кр} \cdot \text{tg}\beta$.

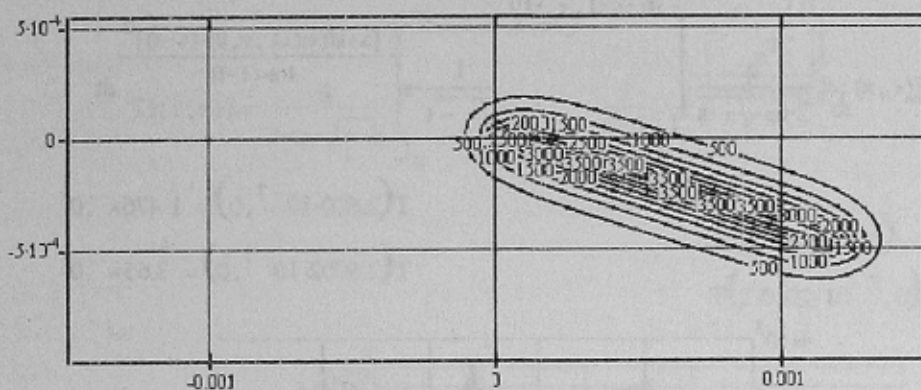
$$az := 0.0005 \quad \lambda := 0.21 \quad a := 0.055 \quad v := 5000 \quad q := 1.3 \cdot 10^7 \quad \beta := 0.3837 \quad \tau_1 := 0.26 \cdot 10^{-6}$$

$$i := 0.60 \quad x_{1j} := -0.0015 + 0.00005 \cdot i \quad j := 0.75 \quad y_{1j} := -0.001 + 0.00002 \cdot j \quad \text{TOL} := 10^{-6}$$

$$l := \frac{az}{\sin(\beta)} \quad \tau := 0.2601 \cdot 10^{-6}$$

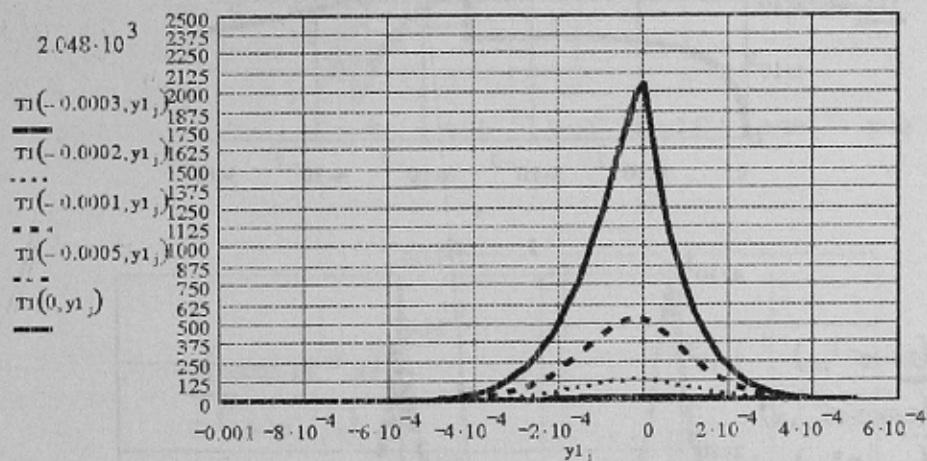
$$T1(x1, y1) := \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \int_0^{\tau_1} \int_0^l \frac{- [x1 \cos(\beta) - y1 \sin(\beta) - x0 - \text{if}(\tau \leq \tau_1, v, 0)(\tau - t) \cos(\beta)]^2 - [x1 \sin(\beta) + y1 \cos(\beta) + \text{if}(\tau \leq \tau_1, v, 0)(\tau - t) \sin(\beta)]^2}{4a(\tau - t)} dx0 dt$$

$$M1_{i,j} := T1(x1_j, y1_j)$$



M1

a)



б)

Рис. 4. Протокол расчета и графический анализ температурного поля с движущимся источником на наклонной плоскости сдвига после прекращения его действия

На распечатке расчета рис.5 для тех же условий, что и для времени наблюдения τ равном времени действия источника тепла $\tau_1 = 2.6 \cdot 10^{-7}$ с. температура на обработанной поверхности равна $1.476 \cdot 10^3$ °C, а уже через $2 \cdot 10^{-11}$ с. она увеличивается более чем в два раза и достигает значения $3.65 \cdot 10^3$ °C. Конечно, такая температура превышает

значительно температуру плавления стали, и уже действуют не только законы теплопередачи теплопроводностью и, строго говоря, решение (2) неприемлемо. Однако очевидно, что тепло "броском" перетекает из зерна, где оно скопилось, в обрабатываемую поверхность. Причем, если обратиться к графикам рис.5 б), то видно, что через крайне малое время $2 \cdot 10^{-11}$ с. распределение тепла между обрабатываемым материалом и зерном со стружкой становится из неравномерного равномерно – распределенным относительно источника тепла, т.е. относительно $x = 0$. Это означает, что оно перераспределяется, и можно, как и в модели с наклонным источником тепла констатировать, что оно распределяется равномерно между обработанной поверхностью и зерном со стружкой.

$$\sigma_{wv} := 250000 \quad q_w := 52 \cdot \sigma_i \quad c_{pw} := 4.52 \quad a_w := 0.05 \quad v_w := 1890 \quad \lambda_{wv} := 2.6 \cdot 10^{-7}$$

$$x := -7 \cdot 10^{-4}, -6 \cdot 10^{-4} .. 7 \cdot 10^{-4} \quad \tau := 0, 0.0002 \cdot 10^{-7} .. 5 \cdot 10^{-7}$$

$$T(\tau, x) := \frac{q}{2 \cdot c_p \cdot \sqrt{\pi \cdot a}} \int_0^{\text{if}(\tau \leq t_1, \tau, t_1)} \frac{1}{\sqrt{\tau - t}} \cdot e^{-\frac{[x + \text{if}(\tau \leq t_1, v, 0) \cdot (\tau - t)]^2}{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}} dt$$

$$T(2.600 \cdot 10^{-7}, 0) = 1.476 \times 10^3$$

$$T(2.6002 \cdot 10^{-7}, 0) = 3.65 \times 10^3$$

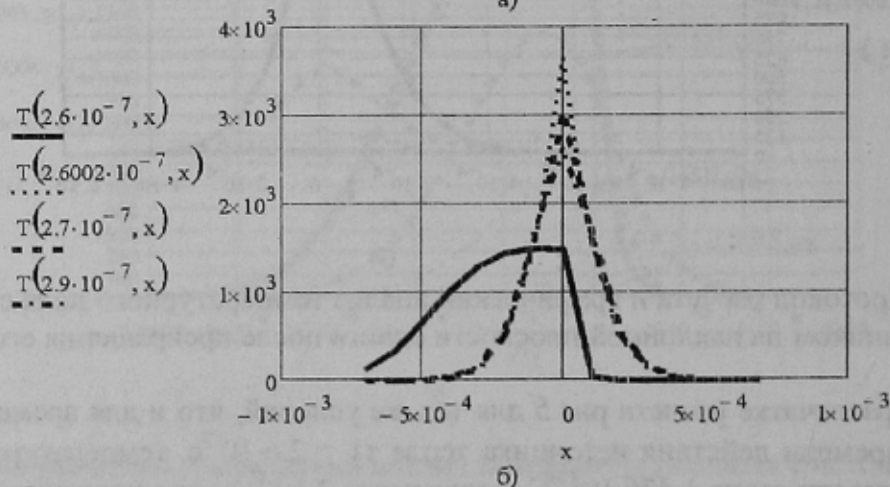
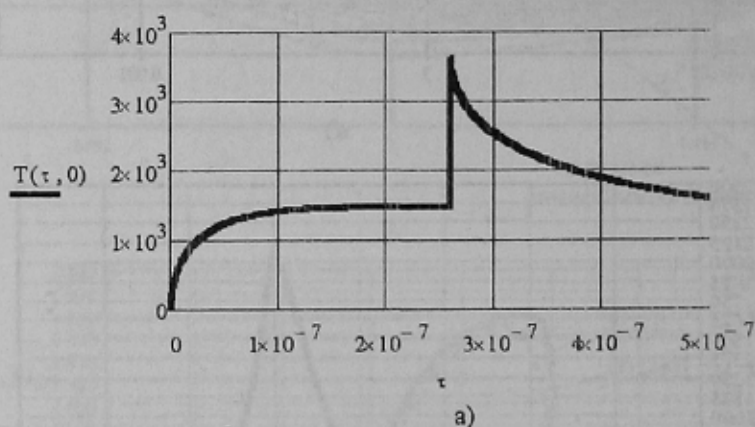


Рис. 5. Протокол расчета и графический анализ температурного поля в обрабатываемой поверхности от движущегося вдоль стержня источника тепла

Такой общий вывод из анализа двух моделей температурных полей, конечно, справедлив для одинаковых теплофизических констант материалов зерна, стружки и обрабатываемой поверхности. Конечно, они зависят еще и от температуры этих материалов, но учесть это в аналитическом решении не удается.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &:= 250000 \quad q := 52 \cdot \sigma_1 \quad c_p := 4.52 \quad a := 0.05 \quad v := 1890 \quad t_1 := 2.6 \cdot 10^{-7} \\ \tau &:= 0, 0.0002 \cdot 10^{-7} .. 5 \cdot 10^{-7} \quad x := -7 \cdot 10^{-4}, -6 \cdot 10^{-4} .. 7 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

$$T(\tau, x) := \frac{q}{2 \cdot c_p \cdot \sqrt{\pi \cdot a}} \int_0^{\text{if}(\tau \leq t_1, \tau, t_1)} \frac{1}{\sqrt{\tau - t}} \cdot e^{-\frac{[x + \text{if}(\tau \leq t_1, v, 0) \cdot (\tau - t)]^2}{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}} dt$$

$$T1(\tau, x) := \frac{q}{2 \cdot c_p \cdot \sqrt{\pi \cdot a}} \int_0^{\text{if}(\tau \leq t_1, \tau, t_1)} \frac{1}{\sqrt{\tau - t}} \cdot e^{-\left[\frac{x^2}{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}\right]} dt$$

$$\begin{aligned} T1(2.6 \cdot 10^{-7}, 0) &= 3.658 \times 10^3 \\ T(2.6002 \cdot 10^{-7}, 0) &= 3.65 \times 10^3 \end{aligned}$$

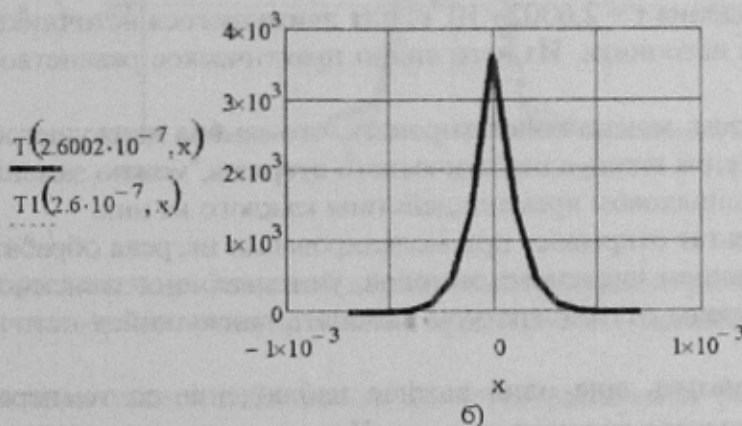
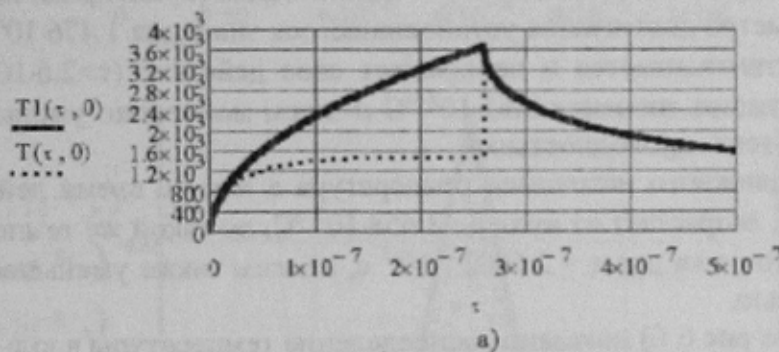


Рис. 6. Сравнение температурных полей от движущегося и неподвижного источников тепла

При исследовании теплофизических моделей нагрева обрабатываемой поверхности как набора адиабатических стержней возникает возможность сравнения темпе-

ратурных полей от движущегося вдоль стержня источника тепла и неподвижного. Для движущегося источника тепла это уравнение (2), а для неподвижного можно использовать его же, приравняв скорость V нулю:

$$T(x,t) = \frac{q}{2 \cdot C\rho \cdot \sqrt{\pi} \cdot a} \cdot \int_0^{\tau_1} \frac{dt}{\sqrt{\tau-t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot a \cdot (\tau-t)}\right) \quad (3)$$

Сравним решения (2) и (3), т.е. выясним, возможно ли заменить движущийся источник тепла вдоль стержня неподвижным. Такое сравнение необходимо, т.к. условием такой замены является значение критерия Пекле больше 10 ($Pe=V \cdot l/a > 10$) [5], где V – скорость движения источника, м/с, l – размер источника в направлении его движения, м, a – коэффициент температуропроводности, м²/с. Для условий резания зерном, когда источник тепла – плоскость сдвига и она движется вдоль стержня располагаясь в нем перпендикулярно оси стержня, размер источника l в направлении движения равен нулю, а значит и $Pe=0$. Такой источник не удовлетворяет требованиям к "быстродвижущемуся" и поэтому замена движущегося неподвижным непрерывно – действующим требует доказательства.

Сравнение решений по (2) и (3) приведено на распечатке рис. 6. На графике рис. 6 а) показаны зависимости температуры в источнике тепла ($x=0$) в зависимости от времени наблюдения τ при одном и том же времени действия τ_1 источника тепла. Из этих графиков видно, что для движущегося источника тепла (пунктирная линия) тепло в источнике тепла быстро достигается установившегося значения $1.476 \cdot 10^3$ °С, а после того как источник останавливается и прекращает свое действие ($\tau > 2.6 \cdot 10^{-7}$ с) температура "мгновенно" достигает значения $3.65 \cdot 10^3$ °С и затем монотонно уменьшается в результате охлаждения теплопроводностью.

Для неподвижного источника температура в нем за время действия источника $\tau_1 = \tau = 2.6 \cdot 10^{-7}$ с. возрастает от нуля до $3.658 \cdot 10^3$ °С, до такой же температуры, как и от движущегося источника для $\tau = 2.6002 \cdot 10^{-7}$ с, а затем также уменьшается, охлаждаясь теплопроводностью.

На графике рис.6 б) показано распределение температуры вдоль стержня (по оси x) в момент наблюдения $\tau = 2.6002 \cdot 10^{-7}$ с. для движущегося источника и в $\tau = 2.6 \cdot 10^{-7}$ с. для неподвижного источника. Из него видно практическое равенство этих распределений.

Таким образом, можно констатировать, что замена движущегося с большой скоростью источника тепла вдоль адиабатического стержня, можно заменить неподвижным при практически одинаковом времени действия каждого из них.

Такой результат открывает при моделировании нагрева обрабатываемой поверхности с использованием численных методов, учитывающих зависимость теплофизических параметров среды от температуры заменять движущийся источник тепла неподвижным.

Следует отметить еще одно важное наблюдение за температурным полем в стержне от движущегося источника тепла. Чем меньше время действия τ_1 источника тепла, тем меньше тепла сосредотачивается за источником и тем меньше всплеск температуры в источнике после его остановки. А так как τ_1 прямопропорционально зависит от толщины среза a_z , то при малых его значениях, а значит и малых величин τ_1 всплеск температуры будет незначительным.

$$\rho_w := 250000 \quad \rho_s := 52 \cdot \rho_w \quad \rho_w := 4.52 \quad a_s := 0.05 \quad \lambda_s := 1890 \quad \lambda_w := 0.75 \cdot 10^{-8}$$

$$x := -2 \cdot 10^{-4}, -1.5 \cdot 10^{-4} .. 2 \cdot 10^{-4} \quad \tau := 0, 0.0002 \cdot 10^{-7} .. 1 \cdot 10^{-7}$$

$$T(\tau, x) := \frac{q}{2 \cdot c_p \cdot \sqrt{\pi \cdot a}} \int_0^{\text{if}(\tau \leq \tau_1, \tau, \tau_1)} \frac{1}{\sqrt{\tau - t}} \cdot e^{-\frac{[x + \text{if}(\tau \leq \tau_1, v, 0) \cdot (\tau - t)]^2}{4 \cdot a \cdot (\tau - t)}} dt$$

$$T(0.75 \cdot 10^{-8}, 0) = 594.273$$

$$T(0.752 \cdot 10^{-8}, 0) = 596.846$$

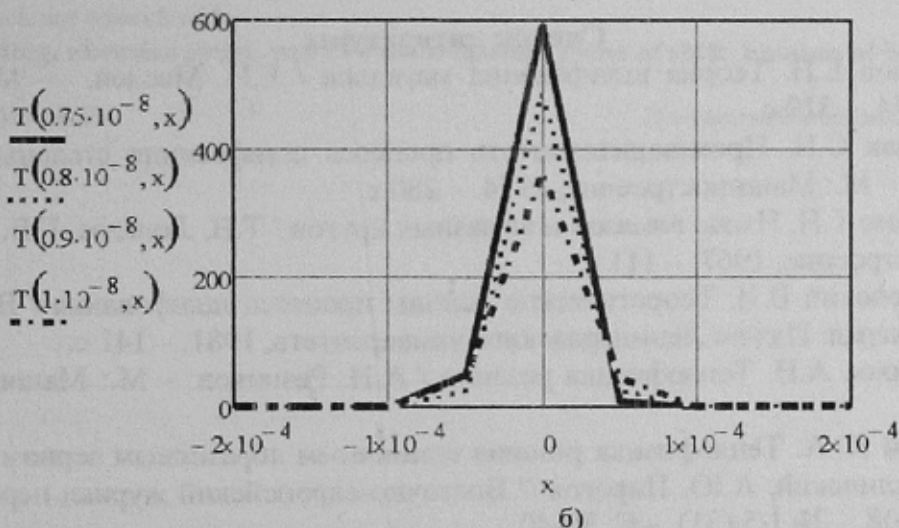
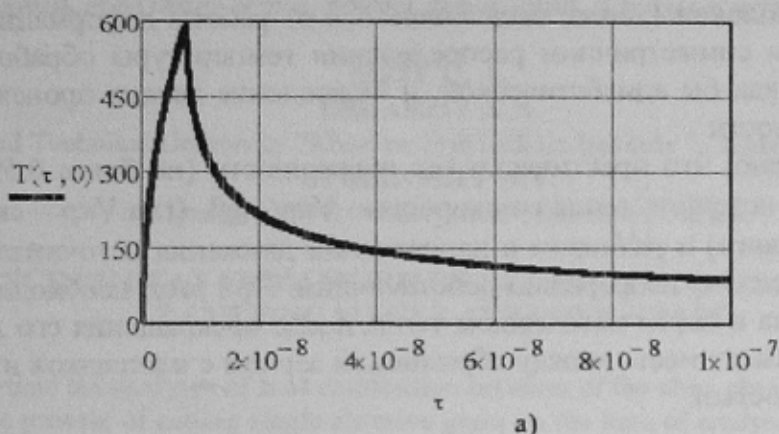


Рис. 7. Протокол расчета и графический анализ температурного поля от движущегося источника тепла при малом времени его действия

Подтверждением такого наблюдения является распечатка расчета температурных полей в стержне от движущегося источника тепла с малым временем его действия (рис.7). Время действия $\tau_1 = 0.75 \cdot 10^{-8}$ с, соответствующее $a_2 = 1.5$ мкм при всех прочих условиях таких же, как и для вычислений приведенных на рис.5. Из графика рис.6 а) видно, что после остановки движения источника тепла, т.е. для $\tau > 0.75 \cdot 10^{-8}$ с, всплеска температуры практически не наблюдается в сравнении с графиком рис.5 а). Причем,

как видно из графиков рис.6 б) практически сразу устанавливается равномерное распределение температуры относительно источника.

Выводы

1. Установлено, что при движении плоскости сдвига, как источника тепла от работы деформации, с высокой скоростью резания тепло в основном сосредотачивается за источником тепла и при прекращении действия источника и его остановке оно практически мгновенно перетекает в область перед источником тепла, т.е. в обрабатываемую поверхность. При этом температура в источнике тепла, т.е. на обработанной поверхности резко возрастает. Это возрастание зависит от времени действия источника тепла и при малой его величине возрастания практически нет.

2. Установлено также, что после остановки движущегося источника тепла температура симметрично распределяется относительно источника тепла вдоль координаты перпендикулярной обрабатываемой поверхности, т.е. в обрабатываемую поверхность поступает половина тепла, выделившегося от работы деформации на плоскости сдвига. При таком симметричном распределении температуры обработанная поверхность становится как-бы адиабатической, и охлаждение детали происходит только за счет теплопроводности.

3. Установлено, что практически без погрешности (не более 0.5%) можно принять движущийся источник тепла со скоростью $V_{кр} \cdot \operatorname{tg}\beta$, (где $V_{кр}$ – скорость шлифования, β – угол сдвига) и размером в направлении движения источника равным нулю, быстродействующим, т.е. непрерывно-действующим. При этом необходимо, чтобы контакт пространств за и перед источником тепла после прекращения его действия не нарушался, как это имеет место между абразивным зерном с площадкой износа и обрабатываемой поверхностью.

Список литературы

1. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов / Е.Н. Маслов. — М.: Машиностроение, 1974. — 319 с.
2. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. — М.: Машиностроение, 1974. — 280 с.
3. Лоладзе Т.Н. Износ алмазов и алмазных кругов / Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучава. — М.: Машиностроение, 1967. — 111 с.
4. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования / В.И. Островский. — Ленинград: Изд-во Ленинградского университета, 1981. — 141 с.
5. Резников А.Н. Теплофизика резания / А.Н. Резников. — М.: Машиностроение, 1969. — 288 с.
6. Сизый Ю.А. Теплофизика резания единичным абразивным зерном / Ю.А. Сизый, Д.В. Сталинский, А.Ю. Пирогов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2008. — № 1/5 (31). — С. 30-40.
7. Сизый Ю.А. Температура самоподогрева при шлифовании / Ю.А. Сизый, Д.В. Сталинский, А.Н. Ушаков // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2009. — № 1/5 (37). — С. 24-37.
8. Сизый Ю.А. О мгновенной температуре шлифования / Ю.А. Сизый, Д.В. Сталинский, А.Н. Ушаков // Вестник национального технического университета. Харьковский политехнический институт. — 2009. — №2. — С. 97 – 106.
9. Yusuf Altintas. Manufacturing Automation. Metal cutting mechanics, machine tool vibration, and CNC design. Cambridge University Press. 2000.

**СИЗИЙ Ю.А.
УШАКОВ О.М.**

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
м. Харків, Україна

СТАЛІНСЬКИЙ Д.В.

Директор ГНПЦ "Енергосталь", м. Харків, Україна

**ПРО БАЛАНС ТЕПЛА ВІД РОБОТИ ДЕФОРМАЦІЇ НА ПЛОЩИНІ ЗРУШЕННЯ ПРИ
РІЗАННІ ОДИНИЧНИМ АБРАЗИВНИМ ЗЕРНОМ**

У статті представлений аналіз розподілу тепла між стружкою, зерном і оброблюваною поверхнею при різанні одиничним абразивним зерном на основі аналітичних рішень задачі теплопровідності.

шліфування, абразивне зерно, робота деформації, площина зрушення, баланс тепла

**SIZIY U. A.
USHAKOV A.N.**

National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute ", Kharkov, Ukraine

STALINSKIY D.V.

The director GNTZ "«Energostal", Kharkov, Ukraine

**ABOUT BALANCE OF HEAT FROM WORK OF DEFORMATION ON A PLANE OF SHIFT
AT CUTTING SINGLE ABRASIVE GRAIN**

In this article the analyses of heat distribution between of the chip, abrasive grain and machining surface in the process of cutting single abrasive grain on the base of analytic solutions of the head conduction task are considered.

grinding, abrasive grain, work of deformation, plane of shift, balance of heat

Рецензент: Гусєв В.В.

Надійшла до редколегії 25.04.10