

*Ю.А. СИЗЫЙ, Д.В. СТАЛИНСКИЙ, А.Ю. ПИРОГОВ, Е.В. ХАРЧЕНКО*

## **ВЫБОР МОДЕЛИ ИСТОЧНИКА ТЕПЛА ПРИ РЕЗАНИИ ЕДИНИЧНЫМ АБРАЗИВНЫМ ЗЕРНОМ**

Анализируются модели теплового источника от работы деформации при резании единичным абразивным зерном и решается задача температурного поля.

The models of heat source of deformation works abrasive process with single grain is analysed and task of temperature field is solved.

Анализ работ по исследованию тепловых процессов резания единичным абразивным зерном [1, 2, 3, 4, 5] показывает, что исследователи по разному подходят к выбору модели источника тепла. Наиболее глубокие исследования в этом направлении выполнены в работах Редько С.Г. [1] и Корчака С.Н. [5].

Редько С.Г. принимает источник тепла в виде сферы с радиусом несколько большим радиуса закругления вершины зерна. На поверхности этой сферы выделяется тепло за счет работы деформации по вдавливанию сферы в обрабатываемый материал и работы трения ее по поверхности обрабатываемого материала. Работа деформации (вдавливания) принимается как произведение удельной силы вдавливания ( $P_{уд}$ ) на половину глубины ( $h$ ) вдавливания. При этом ( $P_{уд}$ ) определяется из формулы расчета микротвердости при внедрение алмазной пирамиды в металл, который обрабатывается резанием абразивным зерном.

Корчак С.Н. [5] принимает модель зерна в виде усеченного конуса. Плоская вершина этого конуса является площадкой износа. Источниками тепла при такой модели абразивного зерна являются работа деформации на поверхности сдвига и работа трения на площадке износа. При этом поверхность действия работы деформации принимается совпадающей с обработанной поверхностью, т. е. не учитывается наклонное под углом сдвига  $\beta$  положение источника тепла относительно обработанной поверхности.

Общим для работ [1, 5], как и для всех упомянутых, является то, что они не учитывают тепло уносимое стружкой.

Температуры резания зерном рассчитанные в [1, 5] принципиально разнятся. У Корчака С.Н. они достигают величины в  $3000\div 3500^\circ\text{C}$ , а у Редько С.Г. они находятся в пределах до  $1000^\circ\text{C}$ .

Учитывая, что задача механики резания абразивным зерном у Корчака С.Н. решена достаточно убедительно, соответствует современным взглядам, то нереальные высокие температуры резания более  $3000^\circ\text{C}$  следует объяснить тем, что в [5] не учитывается тепло уносимое стружкой и принимается работа деформации не на поверхности сдвига, а на плоскости совпадающей с обра-

ботанной поверхностью. В результате такой модели источника тепла от работы деформации Корчак С.Н. получает источник тепла при резании зерном как плоский, совпадающий с обработанной поверхностью и состоящий из двух участков с различной плотностью теплового потока.

Первый, фронтальный участок, это плоскость, на которой выделяется тепло от работы деформации, а второй, сразу же примыкающий к первому, является плоскость пары трения – площадки износа на зерне и обработанной поверхности. При этом интенсивность источника тепла на участке работы трения по Корчаку С.Н. составляет всего 4% от интенсивности источника на участке работы деформации.

У Редько С.Г. участки источников тепла от работы деформации и трения совпадают и находятся на сферической поверхности вершины зерна.

У всех других исследователей резания единичным абразивным зерном [2, 3, 4] оба источника тепла, как работы деформации, так и работы трения, отдельно не рассматриваются. Принимается модель источника в виде плоскости и плотность теплового потока рассчитывается как произведение тангенциальной составляющей силы резания единичным зерном на скорость резания. Таким образом, через силу резания учитывается как бы два источника тепла за счет преодоления сопротивлений деформации и трения.

Следовательно, во всех рассмотренных работах источник тепла от работы деформации принимается плоским параллельным вектору скорости резания зерном, в то время как тепло от работы деформации выделяется на плоскости сдвига. Поэтому представляет интерес сравнить температурные поля от таких источников при одинаковой их интенсивности.

Известно [2], что при описании температуры в детали от плоского движущегося на ее поверхности источника тепла для учета отсутствия теплоотдачи конвективным теплообменом в окружающую среду, плотность теплового потока удваивается. Если учитывать отсутствие теплоотдачи в окружающую среду от наклонного под углом  $\beta$  к вектору скорости плоского источника тепла, то необходимо добавлять фиктивный источник тепла симметричный наклонному относительно поверхности заготовки с одинаковой с наклонным интенсивностью.

На рис. 1 показана схема расположения источников тепла от работы деформации при резании единичным абразивным зерном.

Рис. 1 выполнен в плоскости перпендикулярной плоской поверхности заготовки (линия  $AO_2$ ). Абразивное зерно движется со скоростью резания  $V$ , с глубиной (толщиной среза)  $az$  и работа деформации происходит на плоскости сдвига  $OA$ . Источник тепла от работы деформации это плоскость  $OA$ . Сравним его с плоским источником тепла находящимся на обработанной поверхности, т. е. с плоским источником  $OD$ . Сравнение источников производим по температурным полям, формируемым ими в обработанной поверхности.

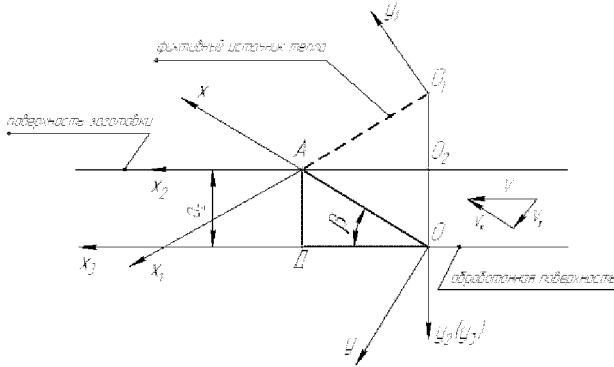


Рис. 1. Схема расположения источников тепла от работы деформации

Задачу теплопроводности от наклонного источника тепла  $OA$  решаем в системе координат  $XOY$  движущейся вместе с источником со скоростью  $V$ . Решаем эту задачу методом источников [2, 3]. При этом методе температурное поле от наклонного источника тепла  $OA$  движущегося в бесконечном пространстве представляем как поле от точечных источников тепла образующих наклонный. Известно [2, 3] решение для точечного источника тепла, вспыхнувшего и мгновенно потухшего в бесконечном теплопроводящем пространстве в момент времени  $t$ :

$$T(x, y, z, \tau) = \frac{q}{C\gamma[4\Pi a(\tau-t)]^{3/2}} \exp\left(-\frac{(x-x_u)^2 + (y-y_u)^2 + (z-z_u)^2}{4a(\tau-t)}\right), \quad (1)$$

где  $\tau$  – момент времени наблюдения за температурой;  $C\gamma$  – объемная удельная теплоемкость среды;  $a$  – коэффициент теплопроводности среды;  $q$  – количество мгновенно выделившегося тепла;  $x_u, y_u, z_u$  – координаты точечного источника тепла;  $z$  – координата по оси перпендикулярной плоскости  $XOY$ .

Так как наклонный источник тепла движется вдоль оси  $X$  со скоростью  $V_x = V \cos \beta$ , а вдоль оси  $Y - V_y = V \sin \beta$ , то учет движения источника учитываем заменой [2, 3]  $(x-x_u)^2$  на  $[(x-x_u) + V \cos \beta(\tau-t)]^2$ , а  $(y-y_u)^2$  на  $[y + V(\tau-t) \sin \beta]^2$  (имеется ввиду что  $y_u = 0$ ). Кроме учета движения источника, необходимо выражение (1) проинтегрировать по  $x_u, y_u, z_u$ , в соответствующих пределах, и по  $t$  в пределах от 0 до времени наблюдения  $\tau$ :

$$T(x, y, z, \tau) = \frac{q}{C\gamma[4\Pi a]^{3/2}} \int_0^{\tau} dx_u \int_{-\infty}^{+\infty} dz_u \int_0^{\tau} \frac{dt}{(\tau-t)^{3/2}} \times \exp\left[-\frac{[x-x_u + V \cos \beta(\tau-t)]^2 + [y + V(\tau-t) \sin \beta]^2 + [z-z_u]^2}{4a(\tau-t)}\right], \quad (2)$$

где  $l_1$  – размер источника тепла вдоль оси X (длина ОА).

В приведенном выражении принимаем источник тепла бесконечным вдоль оси Z, т. е. решаем плоскую задачу теплопроводности.

Выполнив интегрирование по  $z_u$  получим окончательно следующее решение и рассматривая решение для  $Z=0$  получим:

$$T(x, y, \tau) = \frac{q}{4 \cdot \lambda \cdot \pi} \int_0^\tau dt \int_0^{l_1} \frac{dx_u}{\tau - t} \times \exp \left[ -\frac{[x - x_u + V(\tau - t) \cos \beta]^2 + [y + V(\tau - t) \sin \beta]^2}{4a \cdot (\tau - t)} \right] \quad (3)$$

Чтобы учесть отсутствие теплоотдачи в окружающую среду конвективным теплообменом введем фиктивный источник тепла, показанный пунктирной линией на рис. 1, симметричный наклонному относительно поверхности заготовки. Решение для этого источника тепла будет как и (3) только вместо координат X и Y будут координаты  $x_1$  и  $y_1$  (см. рис. 1):

$$T_1(x_1, y_1, \tau) = \frac{q}{4 \cdot \lambda \cdot \pi} \int_0^\tau \int_0^{l_1} \frac{1}{\tau - t} \times \exp \left[ -\frac{[x - x_u + V(\tau - t) \cos \beta]^2 + [y + V(\tau - t) \sin \beta]^2}{4a(\tau - t)} \right] dx_u dt \quad (4)$$

Чтобы решения (3) и (4) суммировать не необходимо от координат X, Y и  $x_1, y_1$  перейти к общей для обоих источников системе координат например  $X_2 O_2 Y_2$ . Для того, чтобы выразить координаты X и Y через  $x_2$  и  $y_2$  необходимо систему  $X_2 O_2 Y_2$  сначала повернуть на угол  $\beta$ , а затем центр системы, т. е. точку  $O_2$ , перенести в точку O. Выполнив эти переходы получим:

$$\begin{cases} x = x_2 \cos \beta + (a_z - y_2) \sin \beta, \\ y = (y_2 - a_z) \cos \beta + x_2 \sin \beta. \end{cases} \quad (5)$$

Координаты  $x_1$  и  $y_1$  аналогичными действиями выражаем через  $x_2$  и  $y_2$ :

$$\begin{cases} x_1 = x_2 \cos \beta + (y_2 + a_z) \sin \beta, \\ y_1 = x_2 \sin \beta - (y_2 + a_z) \cos \beta. \end{cases} \quad (6)$$

Справедливость формул (5) и (6) была проверена сравнением геометрического построения и расчета.

Введение фиктивного источника тепла позволяет учесть отсутствие теплоотдачи конвективным теплообменом от поверхности заготовки. Его влияние на температурное поле в обработанной поверхности, очевидно, будет большим при малых значениях толщины среза  $a_z$ . Поскольку выполненные исследования предполагается использовать для обдирочного шлифования,

при котором толщины среза единичным зерном большие, то наверно возможно не учитывать фиктивный источник тепла, начиная с каких-то значений  $a_z$ . Сравнение температуры от суммарного воздействия наклонного и фиктивного источников с одним наклонным выполним для точки выхода обработанной поверхности из-под наклонного источника, т. е. для  $x_2 = 0$ ,  $y_2 = a_z$ . Прочие условия расчета следующие:  $\lambda = 0,226$  Дж/см·с·град,  $a = 0,05$  см<sup>2</sup>/с,  $V = 4000$  см/с,  $q = 0,4 \cdot 10^7$  Дж/см<sup>2</sup>·с. Толщина среза в см,  $\beta = 0,3837$  рад.

Расчет выполнен в пакете “Mathcad”. Протокол расчета и графики результатов приведены на рис. 2. Из рис. 2 видно, что при толщинах среза менее 1 мкм ( $1 \cdot 10^{-4}$  см) расчет температуры без учета фиктивного источника тепла ведет к погрешности порядка 10%, а для толщин среза  $a_z > 2$  мкм погрешность уже мене 1%. Таким образом, для обдирочного шлифования можно не учитывать адиабатичность поверхности заготовки.

Замена наклонного источника тепла плоским может быть осуществлена либо поворотом наклонного (линия ОА) вокруг точки О до обработанной плоскости, либо проекцией ОА на обработанную плоскость. В случае поворота источника его размер остается равным ОА, т. е.  $az \sin \beta$ , а в случае проектирования –  $az / \text{tg} \beta$ .

$$i := 0..4 \quad az_i := 0.0001 + 0.0001 \cdot i \quad \lambda := 0.226 \quad a := 0.05 \quad v := 4000$$

$$x2 := 0 \quad q := 0.4 \cdot 10^7 \quad \beta := 0.3837 \quad \tau := 2 \cdot 10^{-6}$$

$$T1(az) := \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \int_0^{\frac{az}{\sin(\beta)}} \frac{e^{-\frac{[x^2 \cos(\beta) + \sin(\beta) \cdot (az - az) - xv] + v(\tau - t) \cos(\beta)]^2 - [x \cos(\beta) \cdot (az - az) + x2 \sin(\beta) + v(\tau - t) \sin(\beta)]^2}{4 \cdot v(\tau - t)}}}{\tau - t} dx dt$$

$$T2(az) := \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \int_0^{\frac{az}{\sin(\beta)}} \frac{e^{-\frac{[x2 \cos(\beta) + \sin(\beta) \cdot (az + az) - xv] + v(\tau - t) \cos(\beta)]^2 - [x2 \sin(\beta) - (az + az) \cos(\beta) + v(\tau - t) \sin(\beta)]^2}{4 \cdot v(\tau - t)}}}{\tau - t} dx dt$$

$$T3(az) := T1(az) + T2(az) \quad \delta(az) := \frac{T3(az) - T1(az)}{T3(az)} \cdot 100$$

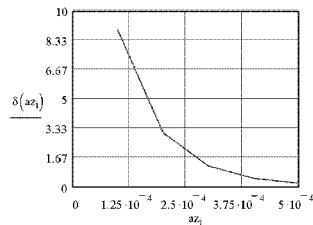
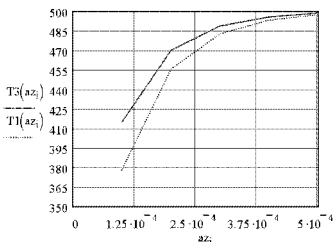


Рис. 2. Протокол расчета и графики результатов

В обоих случаях задачу надо решать в системе координат ХЗΟΥЗ. При-

чем, нужно учесть, что  $y_3 = y_2 - a_z$ , чтобы на одном графике сравнивать решения для наклонного и плоского источников в зависимости от  $y_2$ . Решение задачи для плоского источника длиной  $az/\sin\beta$ , будет следующим:

$$T_2(y_2) = \frac{q}{4 \cdot \lambda \cdot \pi} \int_0^{\tau} \int_0^{a_z/\sin\beta} \exp\left\{-\frac{[x_3 - x_u + V(\tau-t)]^2 + [y_2 - a_z]^2}{4a(\tau-t)}\right\} dx_u dt \quad (7)$$

Решение  $T_3(y_2)$  для плоского источника длиной  $a_z/tg\beta$  будет аналогично, только верхний предел интегрирования по  $x_u$  будет не  $a_z/\sin\beta$ , а  $a_z/tg\beta$ .

Протокол расчета температуры в точке  $x_2 = x_3 = 0$ , т. е. на выходе обработанной поверхности из-под источника на глубине равной от 0 ( $y_2 = a_z$ ) до 2 мкм ( $y_2 = a_z + 0.0002$  см) и результаты расчета в виде графиков приведены на рис. 3. Из графиков видно, что температура на поверхности детали сразу за источником при наклонном источнике равна  $\approx 450^\circ\text{C}$ , а при плоских источниках полученных поворотом наклонного вокруг точки О или проекцией наклонного равна  $\approx 1150 \dots 1200^\circ\text{C}$ , т. е. почти в 2,5 раза больше.

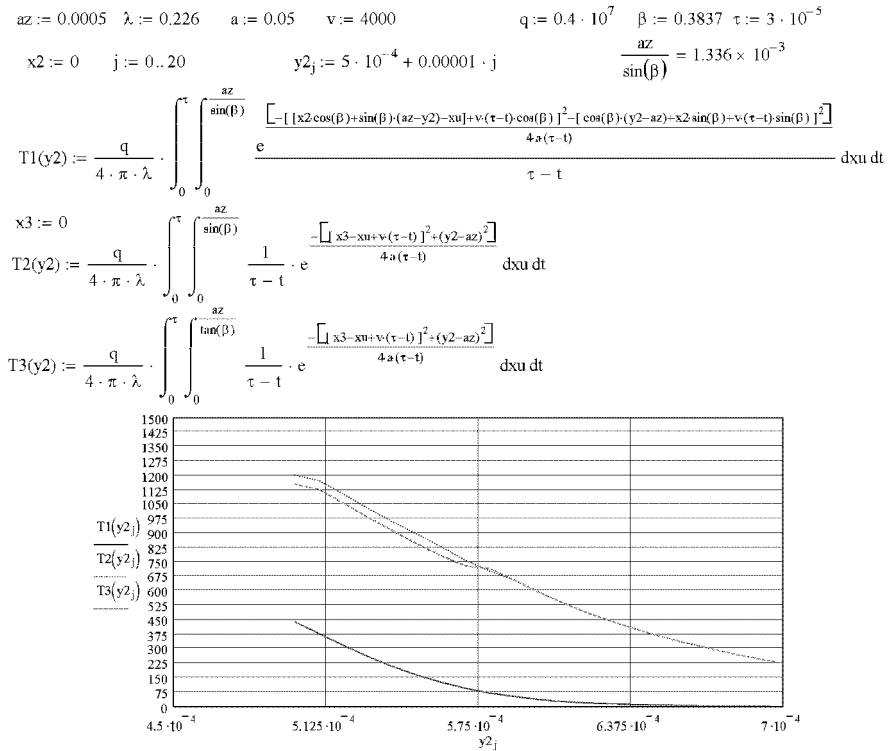


Рис. 3. Протокол и результаты расчета температуры

Такой результат объясняется тем, что, применяя наклонный источник тепла, автоматически учитывается, то, что часть теплоты деформации уносится стружкой, причем как очевидно это значительная часть тепла. Полученный результат объясняет необычно большие температуры при резании единичным зерном полученные в [5].

Таким образом, модель источника тепла при резании единичным абразивным зерном должна состоять из наклонного источника, в котором выделяется тепло от работы деформации на плоскости сдвига, и плоского непосредственно следующего за наклонным, на котором выделяется тепло от работы трения площадки износа по обработанной поверхности.

Список литературы: 1. Редько С.Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов. Изд-во саратовского университета, 1962, 231 с. 2. Резников А.Н. Теплофизика резания - М.: Машиностроение, 1969, 288с. 3. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности - М.: Машиностроение, 1978, 167 с. 4. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. Изд-во ленинградского университета, 1981, 141 с. 5. Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. - М.: Машиностроение, 1974, 280 с.

*Поступила до редколлегии 12.12.07*

**УДК 621.833:621.7.04:519.876.5**

*Б.А. ПЕРЕПЕЛИЦА, Ю.Г. ГУЦАЛЕНКО*

## **АНАЛОГОВОЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СИСТЕМЕ САД-ПОДГОТОВКИ STL-ФАЙЛОВ RPTM-ТЕХНОЛОГИЙ**

Розглядається паралельне геометричне моделювання у системі cad-підготовки stl-файлів rptm-технологій із переважною орієнтацією на вісесиметричні вироби, зокрема із зубчастим вінцем.

Parallel geometric modelling in the system of cad-preproduction of stl-files of rptm-technology with primary orientation to axisymmetric goods, especially with a ring gear, is considered.

**Введение.**

Серьезное внимание разработчиков теории и методики 3D моделирования объектов, инструментов и процессов обработки на основе математического аппарата многопараметрических отображений в последние годы привлекает передовая технология RPTM, являющаяся интегрированной технологией ускоренного изготовления прототипов Rapid Prototyping, инструментального обеспечения Rapid Tooling и производства изделий Rapid Manufacturing. Кафедра интегрированных технологий машиностроения НТУ "ХПИ" стала инициатором приобретения для Украины этой технологии. С 2001 года НТУ "ХПИ" и ЗАО "Конструкторско-технологическое бюро верификационного моделирования и подготовки производства" (ЗАО "Верифика-