

**УДК 621.791:621.926**



**В.Г. Лебедев,**  
д.т.н., професор,  
Одеський національний  
політехнічний  
університет  
e-mail:  
wLebedev29@rambler.ru



**Н.Н. Клименко,**  
к.т.н., доцент,  
Одеський національний  
політехнічний  
університет  
e-mail:  
nklimenko@mail.ru

**КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ, ОТДАВАЕМОЕ АБРАЗИВНЫМ  
ЗЕРНОМ МЕТАЛЛУ ПРИ ШЛИФОВАНИИ**

*В.Г. Лебедев, Н.Н. Клименко*  
**Количество теплоты, отдаваемое абразивным  
зерном металлу при шлифовании.**

Рассматривается вопрос определения количества теплоты, отдаваемое зерном металлу при его движении по своей траектории при резании. Определение этой величины дает возможность рассчитать теплонапряженность процесса шлифования, в зависимости от режимов обработки, зернистости круга и материала зерен. Знание теплонапряженности процесса шлифования дает возможность проектировать процесс обработки таким образом, чтобы избежать появления шлифовочных прижогов и трещин.

*V.G. Lebedev, N.N. Klimenko*  
**amount of heat given to abrasive grain  
for grinding metal.**

The question of determining of the amount of heat given to the metal by grain as it moves as it moves along its trajectory when cutting. The definition of this value allows to calculate the calorific intensity of grinding process, depending on the processing conditions, grain circle and material of grains. Knowledge of the thermal stress of the grinding process gives the opportunity to design the processing so as to avoid bum marks and cracks.

**Вступление**

Режущее зерно во время контакта с обрабатываемым материалом описывает траекторию, образующуюся в результате суммирования двух движений - вращательного круга и поступательного движения детали - удлиненную трохоиду. Таким образом, в каждый данный момент времени величина углубления зерна в металл разная и зависит от положения зерна на траектории. Таким образом, можно говорить о текущей глубине внедрения зерна в металл и о ее максимальной и минимальной величине. Кроме того, специфика процесса резания абразивным зерном заключается еще в том, что высокоскоростной процесс резания вызывает упрочнение металла и так называемое «выравнивание твердостей металлов» [2], а с другой стороны выделяющаяся температура вызывает разупрочнение металла. Таким образом, работа резания зависит от ряда противоречивых факторов, точный учет которых весьма затруднителен, что сильно усложняет расчет количества тепла отдаваемого зерном металлу и расчет

контактної температури поверхності шліфуючої деталі от чого зависит фазово - структурний состав поверхностного слоя, величина остаточних напружень, а также наличие или отсутствие шлифовочных трещин.

**Цель исследования** – определение фактического количества тепла отдаваемого металлу абразивным зерном при шлифовании, с максимальным учетом вышеперечисленных противоречивых факторов.

На основании полученных данных и установленных закономерностей, создать программный продукт для определения контактной температуры шлифования.

### Исследования

Для того, чтобы решить поставленную задачу необходимо знать следующие характеристики процесса резания:

$V_{кр}$  - скорость вращения круга;  $V_{д}$  - скорость перемещения детали;  $D_{кр}$  - диаметр круга;  $t$  - глубина резания при шлифовании;  $S$  - величина поперечной подачи или «ширина ленточки»; длина дуги контакта круга с металлом или же длина траектории зерна [ 1 ]

$$L = \sqrt{D_{кр} \cdot t} \quad (1)$$

$R_3$  - радиус закругления вершинки зерна. Можно принять по работе [3 ] где

$$R_3 = 10^{-6} \cdot N_s^{0,85} \quad (2)$$

$N_s$  номер зернистости для абразивных кругов;  $F_3$  площадь контакта зерна с металлом при резании из соотношения шарового сектора (учитывая, что только половина сектора контактирует с металлом) равна

$$F_3 = \pi \cdot R_3 \cdot h \quad (3)$$

где  $R_3$  - радиус закругления зерна,  $h$  - глубина внедрения зерна в металл;  $\sigma_{20}$  - предел прочности при 200С;  $\sigma_{mod}$  предел прочности при температуре модифицированной по скорости;  $T_{деф}$  температура, при которой происходит деформация;  $T_{д mod}$  - модифицированная температура деформации. Модифицированная температура рассчитывается из следующих соображений:

При высоких скоростях деформации сопротивление пластическому сжатию и растяжению металла возрастают, а в связи с нагревом металла сопротивление деформированию понижается и происходит так называемое «уравнивание твердости металлов». Таким образом сила деформации при стружкообразовании определяется действием одновременно обоих этих факторов. Оба эти фактора К.В. Макгрогер и И.К. Фишер, а за ними и С.Г. Редько [2] предложили объединить

понятием температуры модифицированной по скорости резания. «Скорость деформации связывается с температурой соотношением.

$$T_{\text{мод}} = T_{\text{абс}} \cdot \left( 1 - C \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \quad (4)$$

где  $T_{\text{мод}}$ - температура модифицированная по скорости;  $T_{\text{абс}}$ - абсолютная температура,  $C$  - постоянная, зависящая от испытуемого материала (для стали и латуни  $C = 0,017$ );  $\dot{\epsilon}^*$  - скорость деформации при которой определяется температура,  $\dot{\epsilon}_0$  - скорость деформации при стандартном методе испытаний. Считается, что при высоких скоростях деформации температура как бы понижается. Так если при шлифовании она равна  $900^{\circ}\text{C}$ , а скорость деформации  $10^6$  1/с, то деформация металла будет происходить при температуре

$$T_{\text{мод}} = 1173^{\circ}\text{K} \left( 1 - 0,017 \ln \frac{10^6}{10^{-3}} \right) = 501^{\circ}\text{C} \quad (5)$$

Таким образом, сталь, нагретая до  $900^{\circ}\text{C}$  при данной скорости деформации будет иметь прочность, какую бы она имела при  $501^{\circ}\text{C}$ .»

Несложный пересчет показывает, что для обычной скорости резания при шлифовании 30 - 35 м/с и при переходе от  $^{\circ}\text{K}$  на  $^{\circ}\text{C}$ , выражение 4 преобразуется в простую формулу:

$$T_{\text{мод}} = 0,647 \cdot T_{\text{нов}} \quad (6)$$

То есть для скорости круга 35 м/с  $v_{\text{деф}} = 10^6$  1/с.; для скорости 25 м/с -  $v_{\text{деф}} = 0,71 \cdot 10^6$  1/с; для скорости 15 м/с -  $v_{\text{деф}} = 0,43 \cdot 10^6$  1/с; для скорости 50 м/с -  $v_{\text{деф}} = 1,43 \cdot 10^6$  1/с;  $v_0$  - скорость деформации при стандартном методе испытаний  $10^{-3}$  1/с. а рис.1 показаны типичные кривые зависимости предела прочности стали  $\sigma_{\text{вр}}$  от температуры. Анализ подобных зависимостей показывает, что они с достаточной степенью точности могут быть описаны выражением

$$\sigma_t = \sigma_{20} \cdot \exp(-0,8 \cdot 10^{-3} \cdot T_t) \quad (7)$$

Или же, если говорить о пределе прочности при модифицированной температуре, то можно записать

$$\sigma_{\text{мод}} = \sigma_{20} \cdot \exp(-8 \cdot 10^{-4} \cdot T_{\text{мод}t}) \quad (8)$$

С учетом глубины резания можно сказать, что зерно описывает в обрабатываемом металле циклоидальную кривую, (Рис.2) закон движения которой в прямоугольной системе координат описывается системой уравнений:

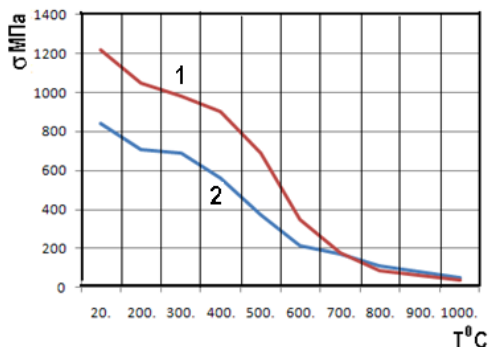


Рис.1. Типичная зависимость предела прочности стали от температуры, 1 - сталь 30ХГСА; 2 - сталь 45

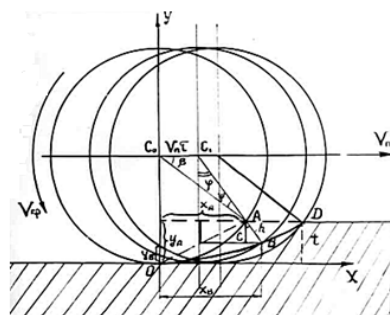


Рис.2. Схема движения единичного зерна для определения величины углубления зерна в металл при плоском шлифовании периферией круга.

$$x^2 + (y - R)^2, \quad (9)$$

$$x = \frac{v_\phi \cdot R_k}{v_d} \cdot \arccos \frac{R - y}{\phi \cdot R} + \sqrt{2 \cdot R \cdot y - y^2}.$$

Определяя величину углубления зерна в металл как мгновенное значение расстояния между дугой контакта шлифовального круга с обрабатываемым металлом, взятое в их начальный момент времени, и циклоидальной кривой, представляющей собой траекторию зерна в металле, измеренное по нормали к этой циклоидальной кривой, проходящей через мгновенное положение центра шлифовального круга, получим:

из треугольника  $CC_1A$  по теореме синусов

$$\frac{R_k}{\sin(90 - \phi)} = \frac{v_\phi \cdot \tau}{\sin \psi} = \frac{C_1 A}{\sin(90 - \phi - \psi)}, \quad (10)$$

откуда

$$\sin \psi = \frac{v_{\delta} \cdot \tau \cdot \cos \varphi}{R_k} \quad (11)$$

Используя формулы (2) и (3) находим величину отрезка  $C_1A$ :

$$C_1A = \frac{v_{\delta} \cdot \tau \cdot \sin(90 - \varphi - \psi) \cdot R_k}{v_{\delta} \cdot \tau \cdot \cos \varphi} = \frac{R_k \cdot \sin(90 - \varphi - \psi)}{\cos \varphi}. \quad (12)$$

После соответствующих преобразований, пренебрегая малыми величинами более высокого порядка и ввиду малого значения угла  $\varphi$  полагая  $\sin \varphi = \varphi$  получим:

$$h = R_{kp} - C_1A = 9,3 \cdot v_{\delta} \cdot \varphi \cdot \tau_{zm} \cdot \sin \left( \frac{v_{kp}}{R_{kp}} \cdot \varphi \right) \quad (13)$$

или после дополнительных преобразований

$$h = 9,3 \cdot v_{\delta} \cdot \varphi \cdot \tau_m \cdot \sin \left( \frac{v_{kp}}{R_{kp}} \cdot \varphi \right) \quad (14)$$

Где  $\tau_m$  время контакта зерна с металлом, а именно

$$\tau_m = \sqrt{D \cdot t} / v_{kp} \quad (15)$$

а

$$\varphi = \frac{2L}{D_{kp}} \quad (16)$$

Температуру любой точки металла, которая находится на трассе движения зерна можно принять [2]

$$\dot{\theta}_{na} = \frac{q'_{\xi} \cdot \sqrt{\alpha \cdot \tau}}{2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{R \cdot h}{2 \cdot \alpha \cdot \tau}\right) \right) \quad (17)$$

Поскольку мощность теплового потока составляет  $q = \sigma_{mod} F_3$ , где  $F_3$  - площадь поверхности зерна, контактирующая с металлом, а плотность теплового потока или интенсивность теплового потока составляет  $q' = q/F_3$ , то выражение (8) можно преобразовать к виду

$$T_{na} = \frac{\sigma_{mod} \cdot v_{kp} \cdot \sqrt{\alpha \cdot \tau}}{2 \cdot \lambda \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \left( 1 - \exp\left(-\frac{R \cdot h}{2 \cdot \alpha \cdot \tau}\right) \right) \quad (18)$$

Время контакта зерна  $\tau$  с произвольной точкой при движении его по трассе определится из следующих соображений.

Движение зерна со скоростью  $v_{kp}$  по его трассе показано на рис. 3.

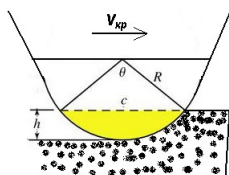


Рис. 3. Схема движения зерна по трассе.  $h$  – средняя глубина внедрения зерна в металл,  $c$ - хорда образованного сектора

Можно утверждать, что время теплового воздействия зерна на произвольную точку металла составит:

$$\tau = c / 2 \cdot v_{kp} \quad (19)$$

а

$$c = 2\sqrt{h(2R - h)} \quad (20)$$

Учет противоречивых факторов, имеющих место при резании металла зерном аналитически невозможен, однако это можно сделать используя численные методы [4].

Траектория движения зерна в металле имеет вид:

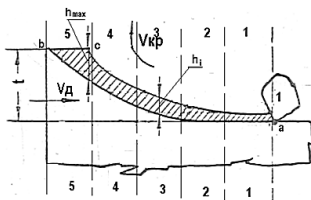


Рис.4. Схема движения зерна по трассе и изменения глубины внедрения зерна в металл

Траекторию движения зерна можно разделить на  $i$  количество участков (на данном рисунке таких участков 5). На каждом участке можно рассчитать все параметры резания с условием того, что температура деформации металла на  $i$  участке будет равна температуре резания на участке  $i - 1$ . В этих условиях легко определить  $T_{\text{мод}}$ ,  $\sigma_{\text{мод}}$  и мощность теплового потока  $q_i$ . Просуммировав значения  $q_i$  можно достаточно точно определить количество тепла, отдаваемого зерном металлу, а также закон изменения этого количества при движении зерна. Результаты расчетов показаны на рис. 5 – 7

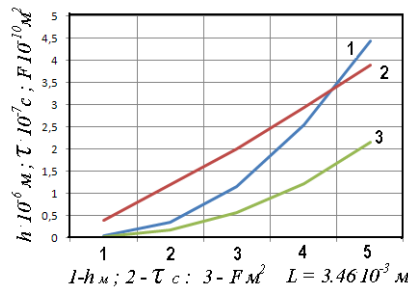


Рис.5.  $h$ - Глубина внедрения зерна,  $\tau$  - время контакта зерна с произвольной точкой металла на трассе движения;  $F$  - площадь контакта зерна с металлом;  $L$  - длина дуги контакта круга с деталью.

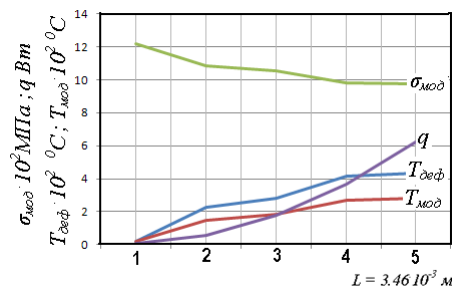


Рис.6. Значения температуры деформации  $T_{\text{деф}}$ ; температуры модифицированной по скорости  $T_{\text{мод}}$ ; предела прочности  $\sigma_{\text{мод}}$  при модифицированной температуре;  $q$  - тепловой мощности зерна на различных участках трассы его движения в металле

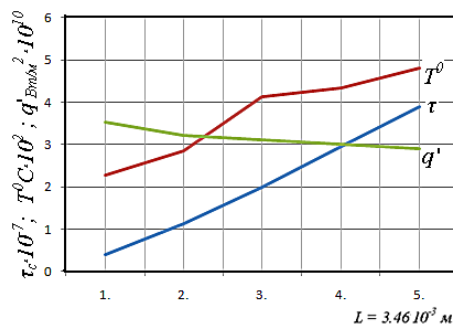


Рис.7. Значения времени контакта зерна с произвольной точкой металла  $\tau$ ; температуры поверхности  $T^0$  и интенсивности теплового потока  $q'$ , в зависимости от его положения на трассе

Суммарно при движении зерна в металле зерно отдает 12,33 Вт энергии. Однако при определении температуры поверхности нас будет

интересовать средняя теплоотдача каждого зерна находящегося в данный момент времени в пятне контакта круга с изделием. Из рис. 6 видно, что теплоотдача на первых двух участках траектории движения зерна составляет всего лишь 5,7 % от общей теплоотдачи. Следовательно, основной энергетический вклад осуществляют зерна, находящиеся на  $3/5$  длины дуги контакта, считая от конца траектории движения. Общий энергетический вклад будет 11,29 Вт, а среднее значение 3,76 Вт. Таким образом, длина дуги контакта “греющая” металл составит  $3/5 L$  или в нашем случае  $2 \cdot 10^{-3}$  м.

### **Выводы**

1. Удельная интенсивность теплового потока от режущего зерна при движении его по трассе меняется незначительно и может быть принята как постоянная.

2. Температура металла значительно повышается, при движении зерна от начала до конца трассы, в основном, вследствие увеличения времени контакта зерна с произвольной точкой металла, из-за увеличения глубины внедрения зерна в металл.

3. Предел прочности металла при резании зерном значительно снижается, при движении зерна от начала до конца трассы, в связи, с чем происходит “выравнивание твердости” при шлифовании различных сплавов.

4. Основной тепловой вклад в формирование величины контактной температуры осуществляют зерна, находящиеся на  $3/5$  длины дуги контакта, считая от конца траектории движения.

### **Литература**

1. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. - М.: Машиностроение, 1984.-320 с.
2. Редько С.Г. Процессы теплообразования при шлифовании металлов. - Саратов: Издательство Саратовского университета, 1986.-231 с.
3. Чумаченко Т. В. Фактическое расстояние между режущими зёрнами в эльборовом круге /Т. В. Чумаченко, В. Г. Лебедев // Проблемы техники. – 2009. № 2. – С. 124 - 135.
4. Чирков Т. В. Математическое моделирование режимов резания при обработке материалов абразивными инструментами / Т. В. Чирков // Технология машиностроения. — 2004. — № 6. — С. 58—62.

*Надійшла до редакції 19.01.2015*