

Ю.А.СИЗЫЙ, д-р техн. наук, НТУ «ХПИ», г. Харьков,
Д.В.СТАЛИНСКИЙ, д-р техн. наук, ГНТЦ «Энергосталь», г. Харьков,
А.Н.УШАКОВ, канд. техн. наук, НТУ «ХПИ», г. Харьков.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ЕДИНИЧНЫМИ АБРАЗИВНЫМИ ЗЕРНАМИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА ПРИ СТЕРЖНЕВОЙ МОДЕЛИ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В статье представлена методика, и ее программная реализация расчета времени реза каждым, следующим друг за другом, зерном адиабатического стержня, совокупность которых, моделирует шлифуемую поверхность.

In this article the design procedure of the cutting time and its algorithms by the abrasive grains an adiabatic sticks from which consist the grinding surface are considered.

В последние годы при анализе теплофизики процесса шлифования получила распространение модель обрабатываемой поверхности, как набор тонких стержней [1,2,3]. Этот подход так же используется и в наших ранее опубликованных работах [4,5,6]. Использование этого подхода открывает новые возможности анализа теплофизики шлифования и получения полезных практических рекомендаций. Однако, для решения задачи нагрева обработанной поверхности последовательно, след в след режущими зернами, требуется дальнейшее уточнение кинематических и временных параметров процесса, что и решается в настоящей работе.

При решении задачи самоподогрева [4] обрабатываемой поверхности последовательно режущими зернами разработан алгоритм вычисления таких важных параметров процесса как время $t_{м.р.}$ между режущими след в след единичными зернами, числа n зерен, прошедших над обрабатываемой поверхностью и расстоянии L_p между режущими след в след зернами. Расчетные формулы полученные при ряде допущений, которые упрощают их расчет. Поэтому желательно сравнить расхождение в предложенном расчете с результатами расчета по формулам Островского В.И. [7], исключающих применение допущений. Тем более это необходимо в связи с использованием полученных формул в последующем аналитическом анализе кинематических и временных параметров процессов резания единичными зернами, что представляет основное содержание настоящей работы. Рассмотрим расчет $t_{м.р.}$ n и L_p и сравним его с расчетом по формулам Островского В.И.

Расчет $t_{м.р.}$ выполняется для какого-то среднего значения максимальной толщины среза a_z , т.е. принимается, что все зерна режущие след в след друг другу режут с одинаковой a_z . Для этого расчета обратимся к рис.1. При этом, упрощая поставленную задачу, принимает, что за время реза единичным зерном, поскольку оно очень мало, перемещение круга или обрабатываемой

поверхности в направлении подачи принимаем равной нулю. Поэтому, траекторию, описываемую зерном в процессе резания принимаем в виде окружности. При таких упрощениях получены формулы, позволяющие вычислить $t_{м.р.}$, n и L_p [4]. Расчет $t_{м.р.}$ основан на определении L - перемещение центра круга в направлении подачи (см. рис.1) за время между резами. Величина L находится как решение квадратного уравнения:

$$L^2 + 2 \cdot \sqrt{2 \cdot R \cdot h - h^2} \cdot L + 2 \cdot R \cdot h - h^2 + (R - h)^2 - (R - a_z)^2 = 0. \quad (1)$$

Зная L находим $t_{м.р.}$:

$$t_{м.р.} = \frac{L}{S}, \quad (2)$$

где S - скорость подачи.

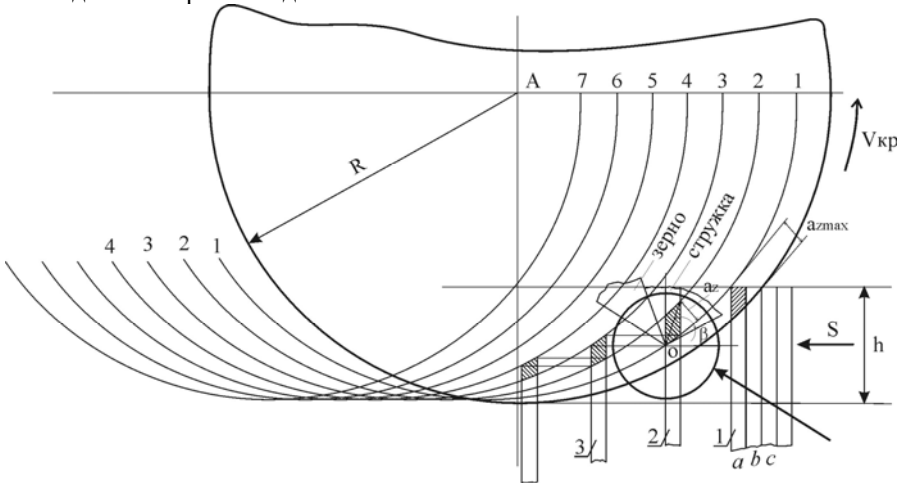


Рис. 1

Количество резов n вычисляется делением координаты точки А по оси Х на L :

$$n = \frac{x_A}{L} = \frac{\sqrt{2 \cdot R \cdot h - h^2}}{L} \quad (3)$$

Зная $t_{м.р.}$ можно рассчитать расстояние L_p между режущими зернами на поверхности круга:

$$L_p = t_{м.р.} \cdot V_{кр}, \quad (4)$$

где $V_{кр}$ - скорость резания (круга).

Близость расчетов по предложенным формулам (1), (2), (3), (4) к расчету по формулам Островского В.И. [7] можно выявить сравнением этих расчетов. У Островского В.И. расчет L_p можно получить из формулы:

$$a_{zm} = 2(V_o / V_{кр}) \cdot (\sqrt{h/2R}) \cdot \delta, \quad (5)$$

где a_{zm} – максимальная толщина среза, $V_d, V_{кр}$ – скорости детали и круга, R – приведенный радиус круга, δ - расстояние между режущими зернами.

Из (5) получим:

$$\delta = a_{zm} \cdot \frac{V_{кр}}{2V_{\phi}} \cdot \sqrt{\frac{2R}{h}}$$

В принятых обозначениях настоящей статьи

$$Lp = a_z \cdot \frac{V_{кр}}{2\delta} \cdot \sqrt{\frac{2R}{h}} \quad (6)$$

Сравнение результатов проводим для круглого наружного шлифования при следующих типичных условиях шлифования: радиус круга $R=375$ мм, радиус шлифуемой детали $r=50$ мм, глубина резания $h=0.02$ мм, $V_{кр}=50$ м/с, $s=833$ мм/с, $a_z=0.005$ мм. Т.к. рассматривая круглое наружное шлифование, то в формулах (1) и (6) вместо R подставляется эффективный радиус круга Re [7]:

$$Re = \frac{R}{1 + \frac{R}{z}} \quad (7)$$

Распечатка результатов расчета приведена на рис.2. Расхождение в полученных значениях Lp по (4) и (6) не превышает 7% и поэтому в дальнейшем пользуемся формулами (1), (2), (3), (4).

Обратимся теперь к многократному резанию зернами последовательно след в след друг за другом, схема которого показана на рис.3. При этом принимаем, что каждое зерно режет с одинаково максимальной a_{1zmax} толщиной среза. Круг при этом за время между резами перемещается на одинаковое расстояние $OO_1=O_1O_2=O_2O_3 \dots$. Выше приведен расчет этого расстояния, обозначенного как L .

$R := 375$	$r := 50$	$h := 0.02$	$V_{кр} := 50000$	$s := 833$	$a_z := 0.005$
$Re := \frac{R}{1 + \frac{R}{r}}$	$Re = 44.118$	$l := 0.5$			
$L := \text{root} \left[l^2 - 2 \cdot \sqrt{2 \cdot Re \cdot h - h^2} \cdot l + 2 \cdot Re \cdot h - h^2 + (Re - h)^2 - (Re - az)^2, l \right]$	$L = 0.178$				
$tmp := \frac{L}{s}$	$tmp = 2.137 \times 10^{-4}$	$n := \frac{\sqrt{2 \cdot Re \cdot h - h^2}}{L}$	$n = 7.463$	$Lp := tmp \cdot V_{кр}$	$Lp = 10.684$
Расчет по (6)					
$L1p := az \cdot \frac{V_{кр}}{2 \cdot s} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot Re}{h}}$	$L1p = 9.967$				

Рис. 2

Перпендикулярно дуге окружности и, соответственно ее разверстке, восстанавливаем перпендикуляр из т.В равный толщине среза $AB = a1_z$.

Если соединить т.А с точкой С, то получим отрезок стержня АС. Затем, под углом сдвига β из т.А проведем прямую AD, которая и будет следом плоскости сдвига. Эта плоскость сдвига со скоростью $V_{кр}$ будет перемещаться и пересекать отрезок стержня АС в течение времени τ равным времени перемещения зерна на расстояние DC. Таким образом, найдя DC и разделив его на $V_{кр}$, мы найдем время действия работы деформации сдвига на стержне при первом резе.

На рис.4 отрезок АС – это отрезок лежащий на адиабатическом стержне, который, согласно рис.3, перпендикулярен обрабатываемой поверхности. Поэтому, на рис.4 обрабатываемая поверхность тоже перпендикулярна стержню.

Итак, рассчитаем длину отрезка DC:

$$DC = DB - CB ; \quad CB = \sqrt{AC^2 - a1_z^2} ; \quad DB = \frac{a1_z}{tg\beta} .$$

Следовательно, с учетом (8) получим:

$$DC = \frac{a1_z}{tg\beta} - \sqrt{AC^2 - a1_z^2} = \frac{a1_z}{tg\beta} - \sqrt{\left(\frac{a1_z(R - a1_z)}{R - h}\right)^2 - a1_z^2} . \quad (9)$$

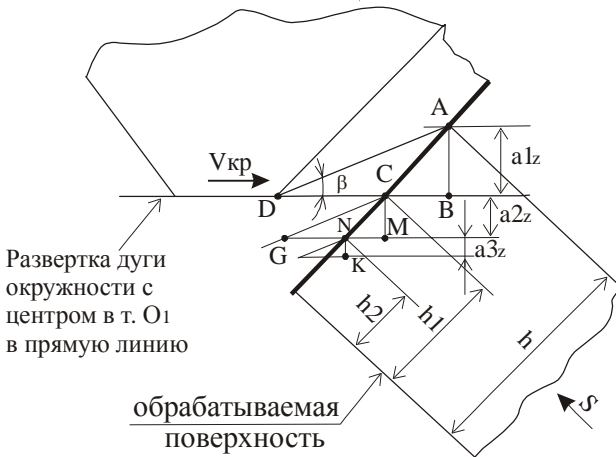


Рис. 4

Зная DC, найдем τ_1 - время пребывания плоскости сдвига на адиабатическом стержне при первом резе.

$$\tau_1 = \frac{DC}{V_{кр}} . \quad (10)$$

Это описан расчет τ_1 и h_1 для первого реза при заданной величине $a_{1z} = a_{1zmax}$.

При втором резе ось шлифовального круга будет согласно рис.3 в т. O_2 и толщина среза будет отрезком CM , а CN будет отрезком стержня, через который пробегает плоскость сдвига при втором резе.

Путь, который проходит круг в направлении подачи до следующего реза, нами уже определен по уравнению (1) и он неизменен от реза к резу. Поэтому, зная L и h_1 можно из (1), подставив в (4) вместо h значение h_1 найти a_{2z} , разрешив (1) относительно a_z . Получим квадратное уравнение относительно a_z из (1):

$$L^2 - 2 \cdot \sqrt{2 \cdot R \cdot h_1 - h_1^2} \cdot L + 2 \cdot R \cdot h_1 - h_1^2 + (R - h_1)^2 - (R - a_z)^2 = 0;$$

$$a_{2z}^2 - 2 \cdot R \cdot a_{2z} + 2 \cdot R^2 - L^2 + 2 \cdot \sqrt{2 \cdot R \cdot h_1 - h_1^2} \cdot L - 4 \cdot R \cdot h_1 = 0. \quad (11)$$

```

R:=375  r:=50  h:=0.02  Vkr:=50000  delta:=833  az:=0.005  i:=0.5
azm:=

dff := | h1 ← 0.0149982992
| az1 ← 4.2818564515× 10-3
| tau1 ← 2.2670193247× 10-7
| V1 ← 1.8892194025× 104
| for i ∈ 2..7
|   | az_i ← root [ x2 - 2·Re·x - L2 + 2·sqrt(2·Re·h_{i-1} - (h_{i-1})2)·L, x ]
|   | GN_i ← az_i / sin(beta) - sqrt( az_i^2 (Re - az_i)^2 / (Re - h_{i-1}) ) - (az_i)^2
|   | tau_i ← GN_i / Vkr
|   | h_i ← h_{i-1} - az_i (Re - az_i) / (Re - h_{i-1})
|   | V_i ← az_i (Re - az_i) / ((Re - h_{i-1}) tau_i)
|   | augment (h, az, tau, V)
|
|   (
|     0.02      0.005      2.6432× 10-7  1.89229× 104
|     0.0107154  4.28185645× 10-3  2.26701932× 10-7  1.8892194× 104
|     7.15109988× 10-3  3.5637246× 10-3  1.88968373× 10-7  1.88618994× 104
|     4.30521768× 10-3  2.84560445× 10-3  1.51119399× 10-7  1.88320111× 104
|     2.17761667× 10-3  2.1274959× 10-3  1.13155065× 10-7  1.88025258× 104
|     7.68192898× 10-4  1.40939923× 10-3  7.50754139× 10-8  1.87734399× 104
|     7.68775423× 10-5  6.9131415× 10-4  3.68804786× 10-8  1.87447501× 104
|   )

```

Рис. 5

	0.02	0.002	1.05628×10^{-1}	1.894203×10^4
dfr =	0.01327284	$1.72493734 \cdot 10^{-3}$	$9.12405237 \cdot 10^{-8}$	$1.8911076 \cdot 10^4$
	0.01165284	$1.61957692 \cdot 10^{-3}$	$8.57175887 \cdot 10^{-8}$	$1.88993282 \cdot 10^4$
	0.01013827	$1.51421675 \cdot 10^{-3}$	$8.01881431 \cdot 10^{-8}$	$1.88876405 \cdot 10^4$
	$8.72913739 \cdot 10^{-3}$	$1.40885683 \cdot 10^{-3}$	$7.46521883 \cdot 10^{-8}$	$1.88760128 \cdot 10^4$
	$7.42542078 \cdot 10^{-3}$	$1.30349717 \cdot 10^{-3}$	$6.91097257 \cdot 10^{-8}$	$1.88644449 \cdot 10^4$
	$6.22711388 \cdot 10^{-3}$	$1.19813776 \cdot 10^{-3}$	$6.35607565 \cdot 10^{-8}$	$1.88529365 \cdot 10^4$
	$5.13420808 \cdot 10^{-3}$	$1.0927786 \cdot 10^{-3}$	$5.80052818 \cdot 10^{-8}$	$1.88414875 \cdot 10^4$
	$4.14669557 \cdot 10^{-3}$	$9.8741969 \cdot 10^{-4}$	$5.24433027 \cdot 10^{-8}$	$1.88300977 \cdot 10^4$
	$3.26456926 \cdot 10^{-3}$	$8.82061033 \cdot 10^{-4}$	$4.68748202 \cdot 10^{-8}$	$1.88187668 \cdot 10^4$
	$2.48782283 \cdot 10^{-3}$	$7.76702628 \cdot 10^{-4}$	$4.1299835 \cdot 10^{-8}$	$1.88074947 \cdot 10^4$
	$1.81645071 \cdot 10^{-3}$	$6.71344475 \cdot 10^{-4}$	$3.57183481 \cdot 10^{-8}$	$1.87962813 \cdot 10^4$
	$1.2504481 \cdot 10^{-3}$	$5.65986573 \cdot 10^{-4}$	$3.013036 \cdot 10^{-8}$	$1.87851263 \cdot 10^4$
	$7.89810928 \cdot 10^{-4}$	$4.60628923 \cdot 10^{-4}$	$2.45358713 \cdot 10^{-8}$	$1.87740294 \cdot 10^4$
	$4.34535904 \cdot 10^{-4}$	$3.55271525 \cdot 10^{-4}$	$1.89348825 \cdot 10^{-8}$	$1.87629907 \cdot 10^4$
	$1.8462048 \cdot 10^{-4}$	$2.49914378 \cdot 10^{-4}$	$1.33273941 \cdot 10^{-8}$	$1.87520097 \cdot 10^4$
$4.00628661 \cdot 10^{-5}$	$1.44557483 \cdot 10^{-4}$	$7.71340625 \cdot 10^{-9}$	$1.87410865 \cdot 10^4$	
$8.62026388 \cdot 10^{-7}$	$3.9200839 \cdot 10^{-5}$	$2.09260928 \cdot 10^{-9}$	$1.87329952 \cdot 10^4$	

Рис. 6

Отрезок GN (см.рис.4) находим согласно (9) заменив в нем a_{1z} на a_{2z} и DC на $V_{кр}$, а h на h_1 :

$$GN = \frac{a_{2z}^2}{tq\beta} - \sqrt{\left(\frac{a_{2z}(R-a_{2z})}{R-h_1}\right)^2 - a_{2z}^2}.$$

Время τ_2 пребывания плоскости сдвига на адиабатическом стержне при втором резе получим разделив GN на $V_{кр}$:

$$\tau_2 = \frac{GN}{V_{кр}}.$$

Расчет a_{zi} , τ_i и h_i ведется до тех пор, пока a_{zi} не станет меньше a_{zimin} , при котором образуется срез, т.е. стружка. Если $a_{zi} < a_{zimin}$, то стружка не образуется и зерно будет только тереть об обрабатываемую поверхность.

Кроме параметров a_{zi} , τ_i и h_i рассчитывается и скорость V_i перемещения плоскости сдвига вдоль стержня:

$$V_i = \frac{h_i - h_{i-1}}{\tau_i}. \quad (12)$$

Описанный алгоритм расчета параметров многократного резания с абразивными зёрнами след в след друг другу реализован программно в пакете Mathcad и приведен на рис.5.

Внизу рис.5 приведена таблица с результатами расчета. В первой колонке стоит высота стержня h_i , во второй – толщина среза a_{zi} , в третьей - τ_i – время пробегания плоскости по стержню при i -ом резе, в четвертой V_i – скорость движения плоскости сдвига вдоль стержня. Из этой таблицы видно, что

толщина среза с каждым резом уменьшается и уменьшается время действия τ_i источника тепла на стержне.

На рис.6 приведены результаты расчета тех же параметров, что и на рис.5, только при максимальной толщине среза $a_{zmax} = 0.002$ мм. Чтобы снять слой толщиной 0.02 мм необходимо сделать 19 резов с максимальной толщиной среза $a_{zmax} = 0.002$ мм. При этом также с каждым последующим резом толщина среза a_{zi} уменьшается и уменьшается также τ_i .

Выводы

1. Получены формулы и алгоритмы расчета важнейших параметров резания единичными зёрнами шлифовального круга след в след друг другу при моделировании обрабатываемой поверхности набором адиабатических стержней.

2. Установлено, что как толщина среза, так и время действия источника тепла на адиабатический стержень с каждым резом уменьшается, что важно при последующем моделировании температурных полей детали при массовом резании единичными абразивными зёрнами.

Список литературы: 1. Новиков Ф.В. Математическая модель определения температуры шлифования на основе учета баланса тепла, уходящего в образующуюся стружку и обрабатываемую деталь. "Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка". Випуск 61, Харків 2007, 23-33 с. 2. Новиков Ф.В., Рябенков И.А. Теоретический анализ условий повышения качества обработки по температурному критерию. "Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка". Випуск 61, Харків 2007, 164-171 с. 3. Новиков Ф.В., Рябенков И.А. Исследования теплонапряженности процессов шлифования. "Восточно-европейский журнал передовых технологий" №2/4 (32) 2008, 41-44 с. 4. Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Ушаков А.Н. Температура самоподогрева при шлифовании. "Восточно-европейский журнал передовых технологий" 1/5 (37) 2009, 24-37 с. 5. Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Ушаков А.Н. О мгновенной температуре шлифования "Вестник национального технического университета ХПИ".- Харьков.-2009.- №2.-124 с, С. 97-116. 6. Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Ушаков А.Н. Конечно-разностная теплофизическая модель резания абразивными зёрнами шлифовального круга. Физические и компьютерные технологии. Труды 15-й международной научно-технической конференции. 1-3 декабря 2009 г. – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2009г.-523 с.- С.145-154. 7. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. Изд-во Ленинградского университета, Ленинград,1981, 141 с.

Поступила в редколлегию 24.04.10