

# ПРОЦЕСС ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Иванова Т.Н. (Чайковский ф-л ГОУ ВПО ИГТУ, г. Ижевск, Россия)

*This article represents mathematical model of deformation of surface layer during grinding, which accounts for actual heat amount at chip forming, bending moment causing plastic deformation, and potential energy of elastic strain. The developed model of deformation of surface layer during grinding allows controlling both production rate and surface quality.*

## 1. Введение.

Наличие конкуренции в сбыте одноименных по назначению деталей требует от предприятий – изготовителей повышать критерии работоспособности деталей и обеспечивать низкую себестоимость в производстве. Эти требования способствуют ускоренному развитию более точных теоретических исследований, применения новейших технологий обработки материалов. В частности это относится и к шлифованию, где окончательно формируется поверхностный слой. Происходящие процессы в малом объеме обрабатываемого материала вокруг режущих кромок абразивных зерен определяют качественные показатели работы шлифовального круга, получаемой обработанной поверхности и обрабатываемости самого материала детали. Многими известными учеными А.В. Гордеевым, И.П. Захаренко, Е.Н. Масловым, П.И. Ящерицыным, А.Б. Якимовым, Д.Г. Евсеевым, С.А. Поповым, Ю.Н. Полянчиковым, Э.В. Рыжовым, С.С. Силиным, Л.Н. Филимоновым, В.А. Хрульковым, Л.В. Худобиным, В.М. Шумячер, В.Ф. Макаровым и др., созданы научные основы процесса шлифования, разработаны технологические методы абразивной обработки, которые широко и успешно применяются в различных отраслях машиностроения. Рекомендации этих ученых в производстве убедительно показали широкие возможности процессов шлифования по обеспечению высокой производительности при улучшении качества деталей машин из различных материалов.

Известно, что основная доля тепла, выделяемая в процессе шлифования, поглощается обрабатываемой деталью, и составляет 40 - 90% от общего количества тепла. Поглощаемое деталью тепло приводит к упругим и пластическим деформациям обрабатываемого материала в зоне резания, которые в свою очередь являются источником излучения тепловой энергии, влияющим на качество обрабатываемой поверхности. Поэтому изучение упруго-пластической деформации поверхностного слоя детали из труднообрабатываемых материалов при шлифовании является актуальной проблемой.

Целью исследований является определение величины упруго-пластической деформации при заданных температурно-скоростных условиях протекания процесса шлифования труднообрабатываемых материалов.

Задачи исследований: определение деформации элемента стружки, снимаемой при шлифовании одним зерном под действием силы  $P_z$  с учетом скорости резания и температуры в зоне контакта.

## 2. Основное содержание и результаты работы.

Потенциальная энергия упругой деформации  $U$  изотропного тела определяется по формуле [1]:

$$U = \int_V \frac{1}{2E} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - 2\nu(\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_x\sigma_z) + 2(1+\nu)(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)] \cdot dV \quad (1)$$

Если ввести относительные удлинения по осям  $X, Y, Z$   $\varepsilon_x = \frac{\Delta dx}{dx}$ ;  $\varepsilon_y = \frac{\Delta dy}{dy}$ ;  $\varepsilon_z = \frac{\Delta dz}{dz}$ , относительные сдвиги сечений  $\gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy}$ ;  $\gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz}$ ;  $\gamma_{xz} = \frac{1}{G} \tau_{xz}$  и относительное изменение объема  $\varepsilon = \frac{1-2\nu}{E} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$ , то получим

$$U = \int_V G \left[ \varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon^2 + \frac{1}{2} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{xz}^2) \right] dV \quad (2)$$

где  $G$  – модуль сдвига;  $E$  – модуль упругости  $E = 2G(1 + \nu)$ ;  $\nu$  – коэффициент Пуассона  $\nu = \varepsilon_{\text{поп}} / \varepsilon_{\text{прод}}$ ;  $\varepsilon_{\text{поп}}$ ,  $\varepsilon_{\text{прод}}$  – поперечное и продольное удлинения.

Определим энергию деформации элемента стружки, снимаемой при шлифовании одним зерном, вдоль оси  $Z$  с силой резания  $P_z$  (рис. 1).

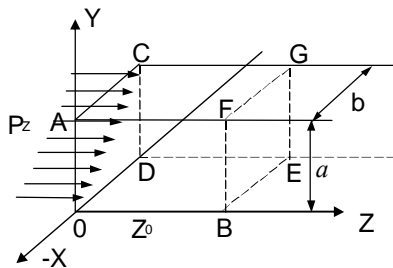


Рис. 1. Схема действия сил

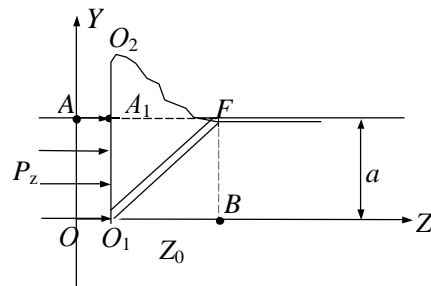


Рис. 2. Схема деформации стружки

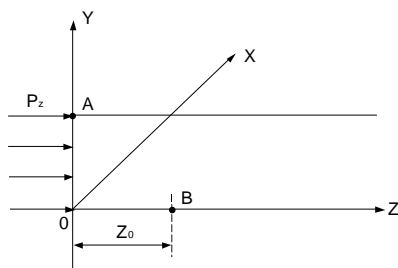
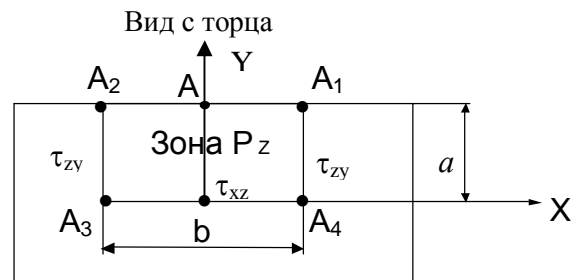


Рис. 3. Схема действия касательных напряжений



Деформация элемента  $OACDEBFG$  направлена по оси  $Z$  при сжатии и по оси  $Y$  при растяжении. Упругая деформация происходит по треугольнику  $AOF$ , пластическая деформация или сдвиг по линии  $O_1F$  (рис. 2). По линиям  $OO_1B$  и  $OA$  в сечениях плоскостей  $XOZ$  и  $XOY$  и по бокам сжимаемой стружки возникают касательные напряжения -  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$ . Рассматриваемый элемент стружки сжимается на величину объема  $OAA_1O_1$  под действием  $P_z$  и выдавливается в объем  $A_1O_2F$  в результате действия касательных напряжений по торцу и бокам элементов  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$ . Поэтому деформированный объем  $O_1O_2FB$  будет равен:

$$V_{\text{деф}} = ab \left[ \left( 1 + \frac{vP_z}{2abE} \right) z_0 - \frac{P_z}{bE} - \frac{v}{2} \frac{P_z^2}{ab^2E^2} \right] \quad (3)$$

Сила  $P_z$  по  $OX$  (рис. 3) будет создавать изгибающий момент:

$$M = P_z \cdot \frac{1}{2} (a + \varepsilon_{\text{non}}) \quad (4)$$

Величина момента  $M$  изгибает полосу  $abz_0$ , стружка одного зерна толщиной  $a$  и шириной  $b$  должна “наплывать” на зерно и закручиваться по ходу процесса. При шлифовании деформация стружки происходит не плавно, а слоями по линии  $OO_1$  (рис. 4). По линии  $OO_2$  проходит пластическое течение стружки, при котором изгибающий момент (4) увеличивается до величины достаточной для отрыва стружки от зерна и увода ее в межзеренное пространство  $O_2O_3$ . Пластическое течение по линии  $OO_1$  (а не точно по оси  $Z$ ) объясняется именно наличием значительного изгибающего момента, действие которого ускоряет пластическую деформацию. По линии  $OO_1$  происходит одновременно и сжатие снимаемого слоя обрабатываемой поверхности детали. Объемная деформация  $OO_2O_1$  шириной  $b$  приводит к возникновению наплыва толщиной  $\varepsilon_{\text{non}}$  (рис. 3) и изменению всего объема на величину:

$$\Delta V = V - V_{\text{деф}} = ab \left\{ z_0 - \left[ \left( 1 + \frac{vP_z}{2abE} \right) z_0 - \frac{P_z}{bE} - \frac{v}{2} \frac{P_z^2}{a \cdot b^2 E^2} \right] \right\} \quad (5)$$

Изменение объема сопровождается выделением тепловой энергии и нагревом стружки. Величина нагрева зависит от скорости деформации, т.е. от скорости резания.

На расплав толщины слоя пластической деформации  $h_c$  необходимо затратить теплоту плавления стружки  $Q_{\text{nc}}$  от одного абразивного зерна:

$$Q_{\text{nc}} = h_c \cdot L_{O_2O_1} \cdot b \cdot Q_n \cdot \gamma_M \quad (6)$$

где  $Q_n$  - теплота плавления;  $\gamma_M$  - удельный вес;  $b$ ,  $L_{O_2O_1}$  - размеры зерна.

Если полного расплава не происходит, то стружка успевает отделиться от обрабатываемой детали со скоростью  $V_{\text{окр}}$  (рис. 5). Элемент стружки  $OO_2O_3O_1$  находится в состоянии объемного сжатия.

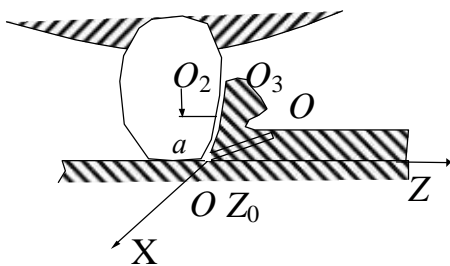


Рис. 4. Схема деформации

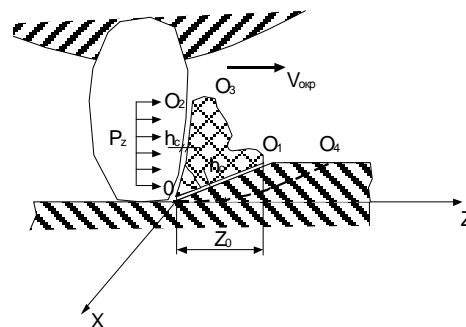


Рис. 5. Этапы формирования стружки

По поверхностям  $OO_2$  и  $OO_1$  объем сжимается непосредственно под действием сил резания  $P_z$ . По поверхности  $O_2O_3O_1$ , которая условно считается свободной от нормальных напряжений, момент (4) создает деформацию сжатия самой поверхности. Тогда за модель деформации элемента стружки  $OO_2O_3O_1$  можно взять модель стесненного сжатия с одной только «полусвободной» поверхностью  $O_3O_1$ , в сторону которой проис-

ходит вытеснение материала стружки при действии  $P_z$ . Стружка раскаляется и закручивается. Следовательно, изменение температуры составит:

$$\Delta\theta = \theta_{\text{конечное}} - \theta_{\text{начальное}} = \frac{\Delta V}{V \cdot \beta} \geq \frac{z_0 - \left[ \left( 1 + \frac{\nu P_z}{2abE} \right) z_0 - \frac{P_z}{bE} - \frac{\nu}{2} \frac{P_z^2}{a \cdot b^2 E^2} \right]}{\beta \cdot z_0} \quad (7)$$

где  $\beta$  – коэффициент объемного температурного расширения.

Чтобы разогреть массу стружки объемом  $b \cdot S_{OO_2O_3O_1}$  от  $\theta_{\text{начальное}}$  до  $\theta_{\text{конечное}}$  необходимо затратить количество тепла [2]:

$$Q_{\Delta t} = \frac{1}{2} C_p \cdot \gamma_M \cdot a \cdot b \cdot z_0 \cdot \Delta\theta \quad (8)$$

где  $C_p$  – изобарная теплоемкость обрабатываемого материала;

Считая, что пластические деформации происходят в тонком слое  $OO_1$ ,  $OO_2$  (рис. 5) можно принять, что остальная масса стружки находится в состоянии упругой деформации. Выделяемая тепловая энергия должна соответствовать энергии, необходимой объему обрабатываемой детали, равному  $V_{\text{деф}}$  и расширяться до  $V$  при нагревании.

При шлифовании возникают потери механической энергии на изменение формы деформируемого тела, на его передвижение с некоторой скоростью с преодолением касательных напряжений, на расплав или размягчение слоя  $L_{O_2OO_1}$ . Поэтому реальное выделение тепла  $Q_p$  при деформации

$$Q_p = k(Q_{\Delta t} + Q_{nc}) \quad (9)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий истинное выделение тепловой энергии.

В рассматриваемых условиях  $\sigma_x = \sigma_y = 0$ ;  $\tau_{xy} = 0$ ;  $\tau_{xz} = \tau_{zy} = \frac{P_z}{(2a+b) \cdot z_0}$ ;  $\sigma_z = \frac{P_z}{a \cdot b}$

Тогда потенциальная энергия упругой деформации

$$U = \frac{P_z^2}{2E} \left( \frac{1}{a^2 \cdot b^2} + \frac{4(1+\nu)}{(2a+b)^2 \cdot z_0^2} \right) \cdot a \cdot b \cdot z_0 \quad (10)$$

Полная энергия, затрачиваемая на стружкообразование, имеет вид

$$U_{\text{полное}} = U + Q_p < U_{\text{станка}} \quad (11)$$

и должна быть меньше механической энергии привода станка  $U_{\text{станка}}$ .

### 3. Заключение.

Формулы (5) – (11) позволяют для конкретных глубин резания определять оптимальные значения  $a$ ,  $b$ ,  $l$  для достижения максимальной производительности. За счет регулирования температуры шлифования, возникающей под действием деформаций, можно управлять качеством обрабатываемой поверхности.

**Список литературы:** 1. Александров А.В. и др. Сопротивление материалов.- 2-е изд. испр. М.: «Высш. шк.» 2000. - 560 с. 2. Шаврин О.И., Репко А.В. Многокритериальный подход в технологии шлифования титановых сплавов. Екатеринбург: Изд-во Ин-та экономики УРО РАН, 2007. - 199 с. 3. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление пластическому деформированию. Л.: Машиностроение, 1988. – 368 с.

Сдано в редакцию 22.01.2009