

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ*Е.М. Буракова, лаборант**Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского
Томского политехнического университета**652055, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26*

Процесс шлифования занимает большое место в современном машиностроении как один из финишных методов обработки. Причем высокие скорости резания при шлифовании и формообразование в тонких приповерхностных слоях материала вызывают значительные механические и тепловые нагрузки, приводящие иногда к трещинам и прижогам на обработанных поверхностях. Это ухудшает качество обработки. С другой стороны, высокие температуры при шлифовании воздействуют на шлифовальный круг, приводят к выгоранию связки, затуплению зерен, повышенному износу, что снижает производительность и ухудшает условия обработки.

До настоящего времени тепловые и динамические процессы при шлифовальной обработке исследовались раздельно. Но при использовании предельных режимов резания и повышении требований к точности обработки постоянные времена этих процессов в зоне резания становятся сравнимыми. Поэтому динамическое поведение технологического оборудования можно предсказать только с учетом комплексного воздействия тепловых и упругих процессов.

Для построения математической модели использован метод электрической аналогии [1], который позволяет отразить как тепловые, так и процессы другой физической природы.

Шлифование как процесс пластического деформирования и разрушения материалов детали и круга занимает промежуточное положение между резанием резцом [2, 3] и трением. Поэтому при моделировании динамики процесса шлифования необходимо учесть особенности этого процесса. Математические модели должны учитывать, что изменения условий обработки (подача, ширина круга, зернистость и т. д.) влияют на силы резания через изменение фактического, а не номинального сечения срезаемого слоя. Схему контакта шлифовального круга с заготовкой можно представить в соответствии с рис. 1.

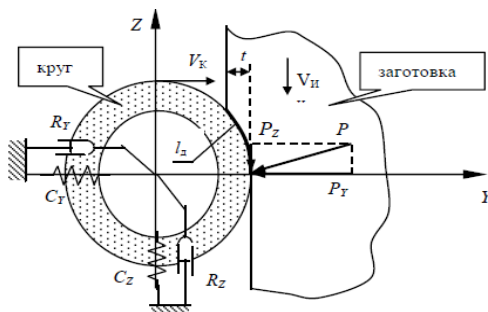


Рис. 1. Схема контакта шлифовального круга

Процесс удаления материала с заготовки на длине контакта l_d обеспечивают отдельные зерна (рис. 2). Процесс отделения стружки отдельным зерном содержит три фазы упругопластического взаимодействия: фаза чистой упругой деформации, фаза упругой и пластической деформации, фаза упругой и пластической деформации с удалением материала. При этом значения составляющих совокупной силы резания могут быть вычислены по следующим выражениям.

$$\begin{aligned} P_Y &= \sum P_{3Yi} + P_{C_{BY}} + P_{C_{TY}} + P_{\Gamma_{LY}}, \\ P_Z &= \sum P_{3Zi} + P_{C_{BZ}} + P_{C_{TZ}} + P_{\Gamma_{LZ}}. \end{aligned} \quad (1)$$

где P_{3Yi} , P_{3Zi} , $P_{C_{BY}}$, $P_{C_{BZ}}$, $P_{C_{TY}}$, $P_{C_{TZ}}$, $P_{\Gamma_{LY}}$, $P_{\Gamma_{LZ}}$ – радиальная и тангенциальная составляющие силы резания соответственно при микрорезании единичным зерном, от контакта материала со связкой круга, от контакта материала со стружкой, заполняющей поры круга, от воздействия гидродинамических потоков в области контакта детали с кругом.

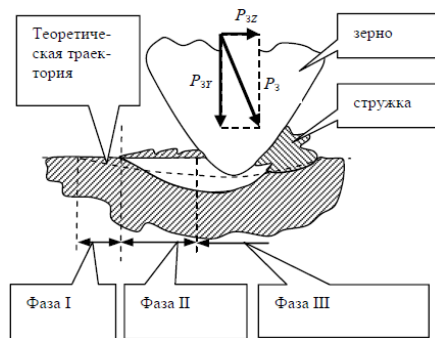


Рис. 2. Процесс резания отдельным зерном

Первые слагаемые, наиболее тесно связаны с кинематикой процесса и формированием обрабатываемой поверхности. Остальные составляющие мало зависят от относительного смещения круга и заготовки, их можно принять постоянными величинами и учесть в модели постоянными внешними усилиями.

Для определения P_{3Yi} , P_{3Zi} учтем систему сил, действующую на режущий выступ абразивного зерна (рис. 3) [3], и износ зерна при обработке.

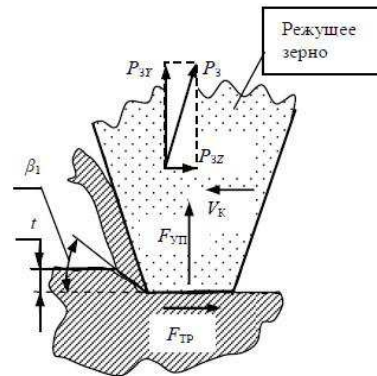


Рис. 3. Воздействие системы сил на режущий выступ зерна

При моделировании динамики процесса резания при шлифовании процесс резания будем отображать в виде полной линейной модели [2, 3, 4], так как процесс микрорезания зерна соответствует процессу резания резцом.

При этом процессы микрорезания зерен, находящихся в контакте с заготовкой, представим в виде некоторого совокупного процесса (2).

$$P + T_p P = h_{px} x + k_{py} y + h_{py} y + k_{pz} z + h_{pz} z, \quad (2)$$

где k_{px} , k_{py} – коэффициенты резания по осям x , y , h_{px} , h_{py} , h_{pz} – коэффициенты демпфирования по координатам x , y , z .

Коэффициенты резания по осям y и z при шлифовании можно вычислить по выражениям (3):

$$k_{py} = \left(\frac{\sqrt{3,25} \sin \beta}{\sin \beta} + 1 \right) \tau_p B l_d, \quad (3)$$

$$k_{pz} = \left(\frac{\sqrt{3,25} \cos \beta}{\sin \beta} + \mu \right) \tau_p B l_d.$$

где β – угол между равнодействующей силой резания и скоростью резания,

β_1 – угол сдвига,

τ – среднее касательное напряжение в плоскости сдвига,

n_p – фактическое число зерен, участвующих в резании, на единице площадки контакта круга с заготовкой,

B – ширина контакта круга с заготовкой,

l_d – длина контакта круга с заготовкой,

μ – коэффициент трения стружки о поверхность зерна.

Величину фактического числа зерен, участвующих в резании, на единичной площадке контакта круга с заготовкой можно определить, исходя из законов теории вероятности, по выражению (4) [2, 5, 6, 7]:

$$n_p = \frac{0,4}{x_{cp}^2} \sqrt{\frac{\omega^* \cdot K^*}{v_k \cdot (1 - \varepsilon)}}, \quad (4)$$

где x_{cp} – средняя величина зерна, мм,

K^* – концентрация режущего материала в круге, %, V_k – скорость шлифования, м/с,

ε – относительная глубина заделки зерен, ($\varepsilon=0,7 \dots 0,8$),

ω – скорость погружения зерен в обрабатываемый материал, мм/с.

Абразивные и алмазные круги, применяемые при шлифовании, являются инструментами со стохастическим (вероятностным) расположением множества элементарных режущих зерен. В месте расположения каждого из зерен с материалом заготовки выделяется теплота, возникающая в процессе срезания отдельной стружки. Расположение этих локальных источников тепловыделения на поверхности контакта между заготовкой и кругом в связи со стохастическим размещением зерен непрерывно меняется во времени. Это приводит к выравниванию температур на всей контактной поверхности заготовки. Выравниванию температур содействует также явление самозатачивания. Эти особенности процесса шлифования позволяют при отображении тепловых процессов ориентироваться на схематизированное зерно с некоторыми усредненными геометрическими параметрами и условиями работы.

Для практического теплофизического анализа процесса шлифования будем использовать систему тел и источников в локальной области, прилежащей к зерну [5, 8, 9], согласно рис. 4.

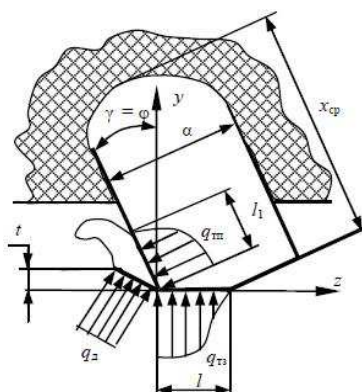


Рис. 4. Режущий выступ зерна и расположение источников тепловыделения

Данная схема представляет режущий выступ зерна. В схеме учитываются три источника тепловыделения: от деформации q_d , от трения на поверхности контакта зерна с обрабатываемым материалом $q_{тз}$ и от трения передней поверхности зерна со стружкой $q_{ш}$.

Теплота от каждого элементарного источника распределяется между всеми телами, участвующими в процессе. Представим это распределение в виде итоговых потоков теплообмена между инструментом, заготовкой и стружкой [2, 5, 6, 7, 8, 9].

Итоговые потоки тепла определяем как результат совокупности элементарных потоков, соединенных параллельно. Элементарные источники представим аналогично в виде соответствующих совокупных источников.

$$Q = q \cdot n_d \cdot l_d \cdot B,$$

где n_d – среднеевероятное количество режущих зерен, активно участвующих в процессе шлифования на единице контакта,

l_d – длина контакта,

B – ширина контакта.

Математическая модель теплодинамической системы шлифовального станка при врезном шлифовании представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами:

$$\begin{aligned}
 &\varphi + h_{\varphi} \varphi + C_{\varphi} + k_z P = 0, \\
 &M_x x + h_x x + C_x x + k_x P = 0, \\
 &M_y y + h_y y + C_y y + k_y P = 0, \\
 &h_{px} x + h_{py} y + h_{pz} z + \frac{1}{T_p} P + P = 0, \\
 &C_c \frac{d\Theta_1}{dt} + \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{\text{тп}}} \right) \Theta_1 - \frac{1}{R_{\text{тп}}} \Theta_2 = Q_d b^* \\
 &-\frac{1}{R_{\text{тп}}} \Theta_1 + \left(\frac{1}{R_{\text{тп}}} + \frac{1}{R_z} \right) \Theta_2 - \frac{1}{R_z} \Theta_3 = Q_{\text{тп}} \\
 &-\frac{1}{R_z} \Theta_2 + C_k \frac{d\Theta_3}{dt} + \left(\frac{1}{R_k} + \frac{1}{R_y} + \frac{1}{R_z} \right) \Theta_3 - \frac{1}{R_y} \Theta_4 = 0 \\
 &-\frac{1}{R_y} \Theta_3 + \left(\frac{1}{R_y} + \frac{1}{R_{\text{тз}}} \right) \Theta_4 - \frac{1}{R_{\text{тз}}} \Theta_5 = Q_{\text{тз}} \\
 &-\frac{1}{R_{\text{тз}}} \Theta_4 + C_{\text{и}} \frac{d\Theta_5}{dt} + \left(\frac{1}{R_{\text{тз}}} + \frac{1}{R_{\text{и}}} \right) \Theta_5 = Q_d (1 - b^*)
 \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3, \Theta_4, \Theta_5$ – средние температуры характерных элементов исходной системы шлифовальной обработки: средняя температура стружки; средняя температура на передней поверхности зерна (температура резания), средняя температура в теле режущего зерна, средняя температура на задней поверхности зерна; средняя температура изделия;

k_{px}, k_{py}, k_{pz} – коэффициенты демпфирования резания по соответствующим координатам;

h_{px}, h_{py}, h_{pz} – коэффициенты демпфирования резания по соответствующим координатам;

k_x, k_y, k_z – коэффициенты, определяемые проекциями силы резания на соответствующие оси;

Q_d – теплота деформации (в ваттах);

b^* – коэффициент распределения теплоты деформации между изделием и стружкой;

$Q_{\text{тп}}$ – источник теплоты трения стружки по передней поверхности;

$Q_{\text{тз}}$ – источник теплоты трения заготовки по задней поверхности;

$R_{\text{тп}}$ – определяет теплообмен между стружкой и передней поверхностью зерна;

$R_{\text{тз}}$ – аналогично, определяет теплообмен между изделием и задней поверхностью зерна;

R_c – отражает отвод тепла со стружкой из зоны резания;

$R_{\text{и}}$ – учитывает теплоотвод из зоны резания в глубину изделия за счет его относительного движения;

R_z, R_y – отражают теплообмен между задней и передней поверхностями зерна;

R_k – учитывает отвод тепла от зерна в связку круга;

C_i – учитывают теплоемкость участков.

Полученная математическая модель (5) описывает основные теплодинамические процессы при врезном шлифовании. Она обладает достаточной гибкостью и универсальностью, позволяет отображать нюансы тепловых и механических упругих процессов при различных условиях обработки.

Литература.

1. Зарубин, В. С. Математическое моделирование в технике: Учеб. для вузов / В. С. Зарубин, А. П. Крищенко. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 496 с.
2. Никитин С. П. Моделирование процесса резания при шлифовании с учетом взаимодействия упругой и тепловой систем / Вестник УГАТУ, 2009, №4, С 61-65.
3. Кедров, С. С. Колебания металлорежущих станков / С. С. Кедров. М.: Машиностроение, 1978. 199 с.

4. Кудинов, В. А. Системность и диалектика в динамике технологических процессов и машин / В. А. Кудинов // СТИН. 2000. № 1. С. 5–11.
5. Резников, А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
6. Резников, А. Н. Теплофизика резания / А. Н. Резников. М.: Машиностроение, 1969. 288 с.
7. Резников, А. Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
8. Якимов, А. В. Теплофизика механической обработки / А. В. Якимов, П. Т. Слободяник, А. В. Усов. К., Одесса: Лыбидь, 1991. 240 с.
9. Ящерицын, П. И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: Учеб. для вузов / П. И. Ящерицын. Мн.: Выш. шк., 1990. 512 с.