

## ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХ. И ФИЗ.-ТЕХН. ОБРАБОТКИ

УДК 621.9: 531.3:001.5

С. П. НИКИТИН

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УПРУГОЙ И ТЕПЛОВОЙ СИСТЕМ

Статья представляет метод и математическую модель, используемые в анализе динамики взаимосвязи между операцией резки и тепловых процессов. В модели функционирования электрической аналогии используется метод, который позволяет указать динамические процессы различных физических типов. *Динамическая система станка; теплодинамика процесса резания*

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.

#### 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

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

В данной работе предлагаются математическая модель и методика расчетов тепломеханических процессов при абразивной обработке как часть комплексной тепло-динамической системы шлифовального станка. Для построения математической модели использован метод

электрической аналогии [2], который позволяет отразить как тепловые, так и процессы другой физической природы.

#### 3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Шлифование как процесс пластического деформирования и разрушения материалов детали и круга занимает промежуточное положение между резанием резцом [3, 4] (инструментом с определенной режущей кромкой) и трением. Поэтому при моделировании динамики процесса при шлифовании 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.

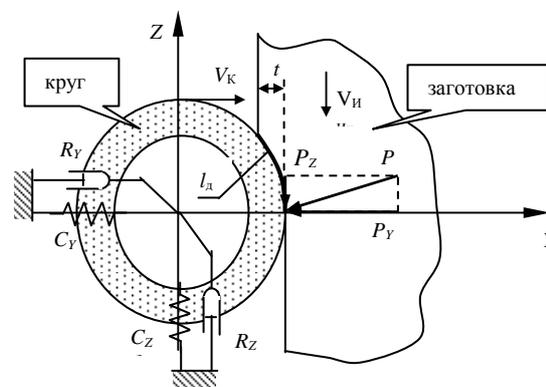


Рис. 1. Схема контакта шлифовального круга

Процесс удаления материала с заготовки на длине контакта  $l_d$  обеспечивают отдельные зерна. Пока еще нет достаточной информации о процессах стружкообразования, силах и трении при резании абразивными и алмазными зернами. Но, ссылаясь на публикации [1, 9, 10] и информацию о виде стружек при шлифовании, можно предположить близкое сходство процесса резания зерном и резцом (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.

$$\begin{aligned} P_Y &= \sum P_{3Yi} + P_{C_{BY}} + P_{C_{TY}} + P_{Г_{дY}}, \\ P_Z &= \sum P_{3Zi} + P_{C_{BZ}} + P_{C_{TZ}} + P_{Г_{дZ}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $P_{3Yi}, P_{3Zi}, P_{C_{BY}}, P_{C_{BZ}}, P_{C_{TY}}, P_{C_{TZ}}, P_{Г_{дY}}, P_{Г_{дZ}}$  – 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.

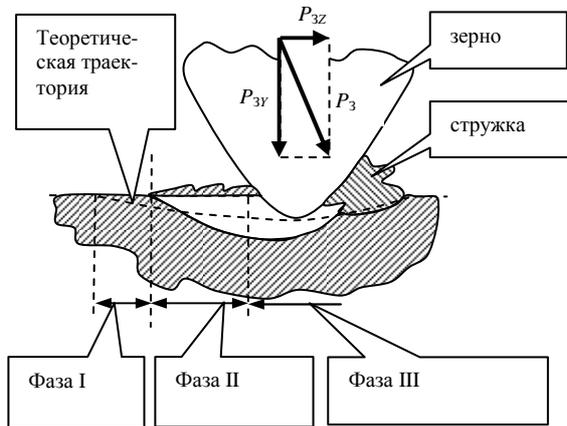


Рис. 2. Процесс резания отдельным зерном

Ограничим свое внимание первым слагаемым, которое наиболее тесно связано с кинематикой процесса и формированием обрабатываемой поверхности. Остальные составляющие мало зависят от относительного смещения круга и заготовки и 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) [4], и износ зерна при обработке.

При прохождении абразивным зерном зоны контакта детали с кругом силы резания изменяются синхронно с изменением глубины микрорезания  $a$ . Ширина площадки на вершине абразивного зерна связана с глубиной микрорезания зерна и с учетом формы зерна можно принять  $b = 2a$ .

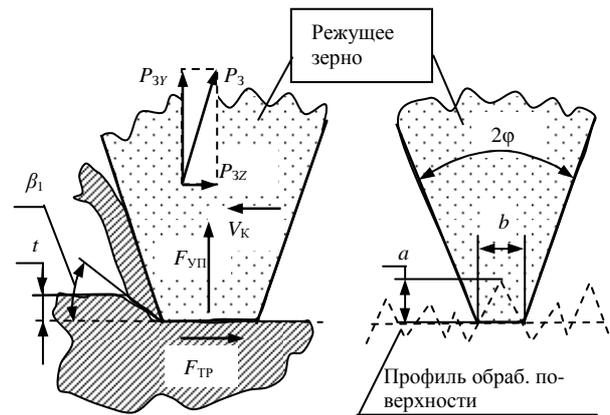


Рис. 3. Воздействие системы сил на режущий выступ зерна

При моделировании динамики процесса резания при шлифовании процесс резания будем отображать в виде полной линейной модели [3, 4, 5], 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).

$$P + T_p \dot{P} = h_{P_x} x + k_{P_y} y + h_{P_y} \dot{y} + k_{P_z} z + h_{P_z} \dot{z}, \quad (2)$$

где  $k_{P_x}, k_{P_y}$  – коэффициенты резания по осям  $x, y$ ,  $h_{P_x}, h_{P_y}, h_{P_z}$  – коэффициенты демпфирования по координатам  $x, y, z$ .

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

$$\begin{aligned} k_{P_y} &= \left( \frac{\sqrt{3,25} \sin \beta}{\sin \beta_1} + 1 \right) \tau n_p B l_d, \\ k_{P_z} &= \left( \frac{\sqrt{3,25} \cos \beta}{\sin \beta_1} + \mu \right) \tau n_p B l_d, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\beta$  – угол между равнодействующей силой резания и скоростью резания,  $\beta_1$  – угол сдвига,  $\tau$  – 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,  $\mu$  – 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) [6, 7, 8]:

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

где  $x_{cp}$  – средняя величина зерна, мм,  $K^*$  – концентрация режущего материала в круге, %,  $v_k$  – скорость шлифования, м/с,  $\varepsilon$  – относительная глубина заделки зерен, ( $\varepsilon \approx 0,7 \dots 0,8$ ),  $\omega$  – скорость погружения зерен в обрабатываемый материал, мм/с.

В данной модели учитывается жесткость и демпфирование по ортогональным координатам  $z$ ,  $y$ , которые определяют величину сечения срезаемого слоя материала.

По координате  $x$  учитывается только демпфирование резания. В левой части уравнения отражена инерционность процесса резания. Несмотря на то, что постоянные времени процесса резания при шлифовании невелики, намного меньше, чем при обработке лезвийным инструментом, мы пытаемся в модели учесть их влияния.

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 [6, 9, 10], согласно рис. 4.

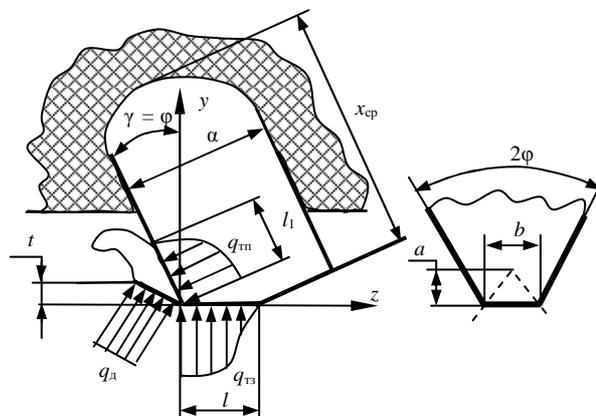


Рис. 4. Режущий выступ зерна и расположение источников тепловыделения

Данная схема представляет режущий выступ зерна как элементарный резец с отрицательным передним углом. 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  $q_{тп}$ .

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 [6, 7, 8, 9, 10].

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  $n_d$  – средневероятное 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:

$$\begin{aligned}
 \ddot{\varphi} + h_{\varphi} \dot{\varphi} + C_{\varphi} + k_z P &= 0, \\
 M_x \ddot{x} + h_x \dot{x} + C_x x + k_x P &= 0, \\
 M_y \ddot{y} + h_y \dot{y} + C_y y + k_y P &= 0, \\
 h_{P_x} \dot{x} + h_{P_y} \dot{y} + k_{P_z} z + \frac{1}{T_P} \dot{P} + P &= 0, \\
 C_C \frac{d\Theta_1}{dt} + \left(\frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_{\text{ТП}}}\right)\Theta_1 - \frac{1}{R_{\text{ТП}}}\Theta_2 &= Q_{\text{Д}} b^* \\
 -\frac{1}{R_{\text{ТП}}}\Theta_1 + \left(\frac{1}{R_{\text{ТП}}} + \frac{1}{R_Z}\right)\Theta_2 - \frac{1}{R_Z}\Theta_3 &= Q_{\text{ТП}} \\
 -\frac{1}{R_Z}\Theta_2 + C_K \frac{d\Theta_3}{dt} + \left(\frac{1}{R_K} + \frac{1}{R_Y} + \frac{1}{R_Z}\right)\Theta_3 - \frac{1}{R_Y}\Theta_4 &= 0 \\
 -\frac{1}{R_Y}\Theta_3 + \left(\frac{1}{R_Y} + \frac{1}{R_{\text{ТЗ}}}\right)\Theta_4 - \frac{1}{R_{\text{ТЗ}}}\Theta_5 &= Q_{\text{ТЗ}} \\
 -\frac{1}{R_{\text{ТЗ}}}\Theta_4 + C_{\text{И}} \frac{d\Theta_5}{dt} + \left(\frac{1}{R_{\text{ТЗ}}} + \frac{1}{R_{\text{И}}}\right)\Theta_5 &= Q_{\text{Д}}(1-b^*)
 \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\Theta_{1,2,3,4,5}$  – 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;  $k_{P_x}$ ,  $k_{P_y}$  – коэффициенты резания по соответствующим координатам;  $h_{P_x}$ ,  $h_{P_y}$ ,  $h_{P_z}$  – коэффициенты демпфирования резания по соответствующим координатам;  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  – коэффициенты, определяемые проекциями силы резания на соответствующие оси.

$Q_{\text{Д}}$  – 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.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Использование для анализа полученной математической модели (5) позволило получить основные зависимости и характеристики взаимодействия упругой и тепловой систем при врезном шлифовании.

На рис. 6 показан переходный процесс изменения температуры резания  $\theta_2$  при врезании шлифовального круга.

При врезании шлифовального круга в заготовку открывается переходный процесс, связанный с колебаниями упругой системы. Несмотря на то, что тепловые процессы не обладают инерционностью, это приводит также к колебательному переходному процессу в тепловой системе. Из переходного процесса видно, что установившееся значение температуры резания возникнет спустя некоторое время, определяемое тепловыми сопротивлениями.

На рис. 5 приведена амплитудно-частотная характеристика изменения температуры резания  $\theta_2$  при периодическом изменении силы резания.

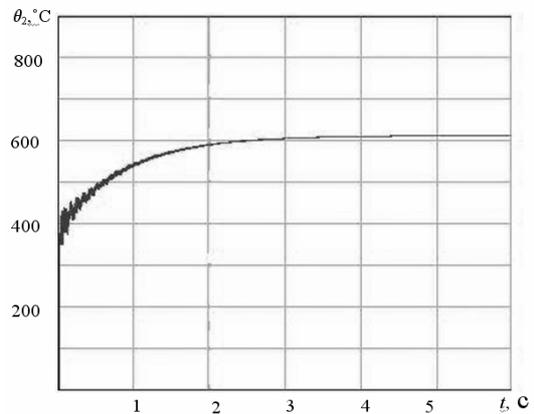
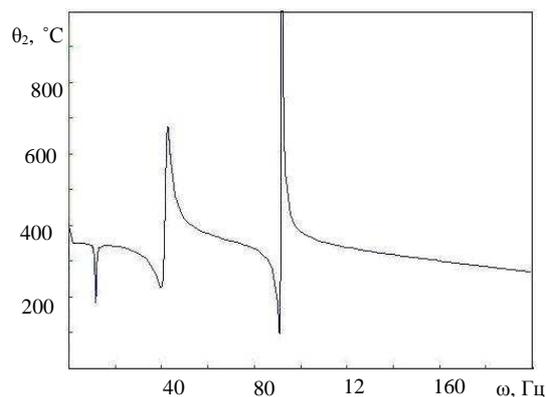


Рис. 5. График изменения температуры резания при врезании инструмента

На рис. 6 приведена амплитудно-частотная характеристика изменения температуры резания  $\theta_2$  при периодическом изменении силы резания.

Периодическое изменение силы резания существенно снижает температуру резания в сравнении с установившимся значением. Эффект снижения достигается уже при небольших частотах. Это явление широко используется при шлифовании, когда реализуют процесс прерывистого шлифования. Однако следует иметь в виду, что при некоторых частотах в силу резонансных явлений в технологической системе возможно значительное увеличение

температуры резания. Резонансные пики на графике определяются собственными частотами привода шлифовального круга, привода подачи заготовки, несущей системы станка и процесса резания. Если использовать сложные модели этих узлов станка, то их влияние будет еще более многообразным. Следует учитывать также резонансы температур от периодических возмущений в узлах технологического оборудования.



**Рис. 6.** Амплитудно-частотная характеристика изменения температуры резания при периодическом изменении силы резания

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, в том числе исследовать проблему отвода тепла со смазочно-охлаждающей жидкостью. В то же время ее компактность позволяет встраивать ее в более сложные системы.

## 5. ПРИЛОЖЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предложенная методика и математическая модель могут быть использованы при исследовании особенностей теплодинамических процессов в шлифовальных станках при резании.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель тепло-динамической системы шлифовального станка.

2. Приведена методика определения параметров математической модели шлифовального станка при резании.

3. Получены основные зависимости влияния конструктивных параметров на динамические характеристики шлифовального станка при резании.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аршинов, В. А.** Резание металлов и режущий инструмент / В. А. Аршинов, Г. А. Алексеев. М.: Машиностроение, 1976. 440 с.
2. **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.
3. **Кедров, С. С.** Колебания металлорежущих станков / С. С. Кедров. М.: Машиностроение, 1978. 199 с.
4. **Кудинов, В. А.** Динамика станков / В. А. Кудинов. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
5. **Кудинов, В. А.** Системность и диалектика в динамике технологических процессов и машин / В. А. Кудинов // СТИН. 2000. № 1. С. 5–11.
6. **Резников, А. Н.** Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
7. **Резников, А. Н.** Теплофизика резания / А. Н. Резников. М.: Машиностроение, 1969. 288 с.
8. **Резников, А. Н.** Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
9. **Якимов, А. В.** Теплофизика механической обработки / А. В. Якимов, П. Т. Слободяник, А. В. Усов. К., Одесса: Лыбидь, 1991. 240 с.
10. **Ящерицын, П. И.** Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: Учеб. для вузов / П. И. Ящерицын. Мн.: Выш. шк., 1990. 512 с.

## ОБ АВТОРЕ



**Никитин Сергей Петрович**, доц. каф. металлореж. станков и инструментов Пермск. гос. техн. университета. Канд. техн. наук по процессам мех. и физ.-техн. обработки, станкам и инструментам (М., МГТУ «Станкин», 1997). Иссл. в обл. динамическ. качества технологическ. машин.