

С.П. Никитин

Пермский государственный технический университет

ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СТАНКА НА ТОЧНОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРУ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Исследовано колебание температур и взаимовлияние упругих и тепловых динамических процессов при плоском шлифовании. Для исследований использована теплодинамическая модель плоскошлифовального станка, полученная методом прямой аналогии и учитывающая взаимодействие динамической системы станка, включающей процесс шлифования, и тепловой системы.

Шлифование является одним из окончательных методов обработки, поэтому от шлифования требуется не столько производительность и стойкость инструмента, сколько обеспечение заданного качества поверхностного слоя и точности заготовки. Точность формы поверхности, получаемой при шлифовании, определяется большими скоростями вращения шлифовальных кругов и, вследствие этого, вынужденными колебаниями в динамической системе станка. Качество поверхностного слоя заготовки определяется весьма интенсивными тепловыми процессами при шлифовании, приводящими к прижогам на поверхности.

Одновременно с этим наблюдается взаимовлияние указанных выше факторов. Так, развивающиеся колебания динамической системы приводят к изменению силы резания и колебанию температуры резания. С другой стороны, тепловые воздействия в зоне резания приводят к разупрочнению обрабатываемого материала, и за счет температурных деформаций упругой системы – к снижению точности. На рис. 1 представлена схема W. Dietrich, которая дает приближенную картину взаимодействий процессов при шлифовании.

Задачей является управление тепловыми и упругими явлениями при шлифовании таким образом, чтобы обеспечить заданную точность и качество поверхностного слоя заготовки. Для конечного качества заготовки при шлифовании определяющими являются колебания и, соответственно, следы дробления на заготовке. Поэтому при исследовании определяют способы устранения колебаний или понижения их уровня. Задача усложняется тем, что при шлифовании обработка осуществляется геометрически неопределенными лезвиями. Это затрудняет выявление зависимостей между параметрами процесса шлифования и результатами обработки.

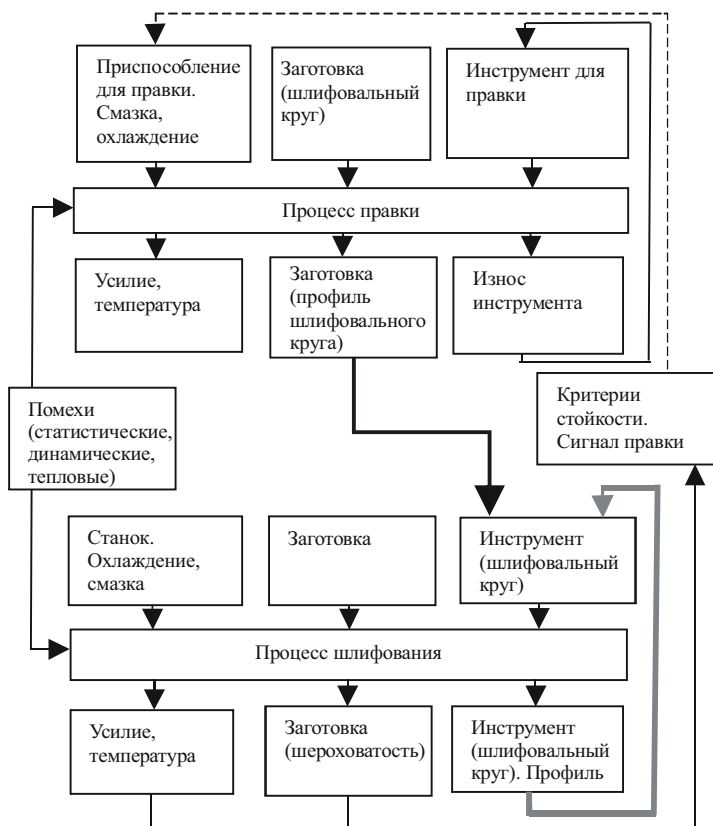


Рис. 1. Динамическая система «станок – заготовка – инструмент» с процессом шлифования и правки

К колебательной системе (рис. 2) при плоском шлифовании принадлежит подсистема инструмента, в которую входит шлифовальный круг с приводом, подсистема заготовки и упругая система станка. Характеристики шлифовального круга, его профиль, а также кинематика процесса влияют на склонность к колебаниям и вибрациям. Заготовка через свою геометрию, статическую и динамическую жесткости также влияет на процесс колебаний.

Станок чаще всего представляет собой сложную структуру и через статические и динамические свойства, а точнее, через передаточные функции процесса шлифования, оказывает значительное влияние на колебания при шлифовании. Сегодня для определения динамических свойств станков, как сложных структур, существуют хорошо разработанные методы анализа. В частности, экспериментальный модальный анализ позволяет отыскать плохие положения и соответствующие им формы колебаний.

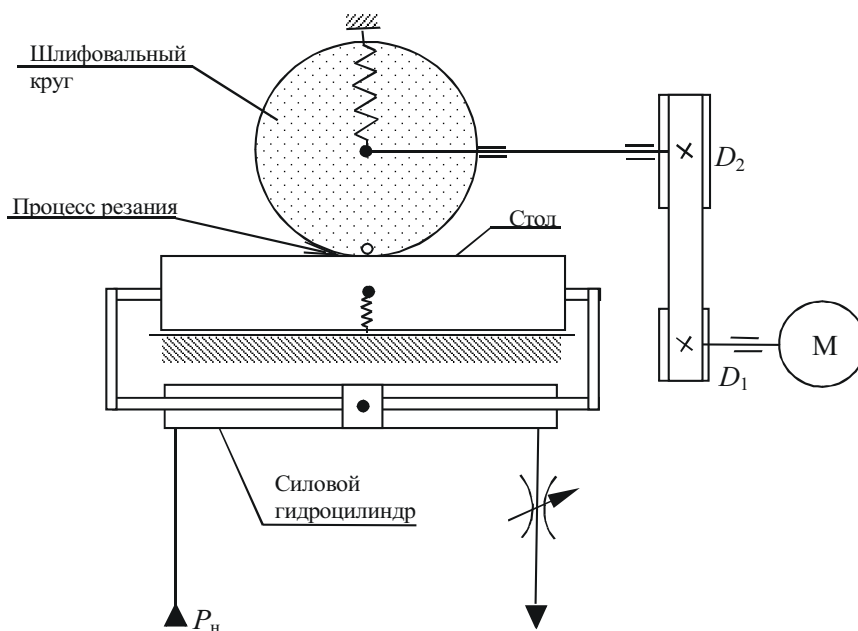


Рис. 2. Расчетная схема плоскошлифовального станка

В рамках решения задачи управления тепловыми и упругими явлениями при шлифовании были проведены исследования влияния конструктивных параметров и режимов резания на уровень температур и колебаний при плоском шлифовании. 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.

Для исследований в данной работе использована математическая модель теплодинамической системы шлифовального станка, учитывающая взаимодействие упругих, тепловых явлений и процесса резания. Для построения математической модели использован метод электрической аналогии, который позволяет отразить как тепловые, механические, так и процессы другой физической природы.

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. Представим схему контакта шлифовального круга с заготовкой (рис. 3).

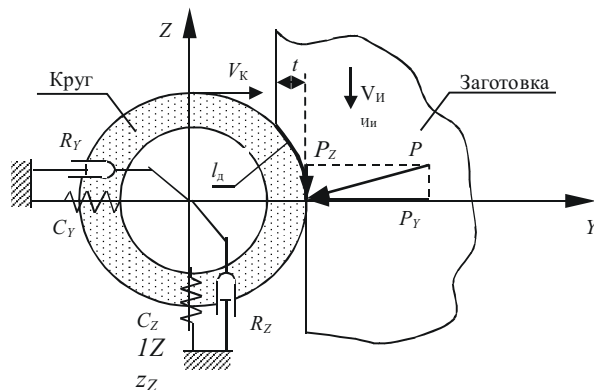


Рис. 3. Схема контакта шлифовального круга с заготовкой

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. 4). 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.

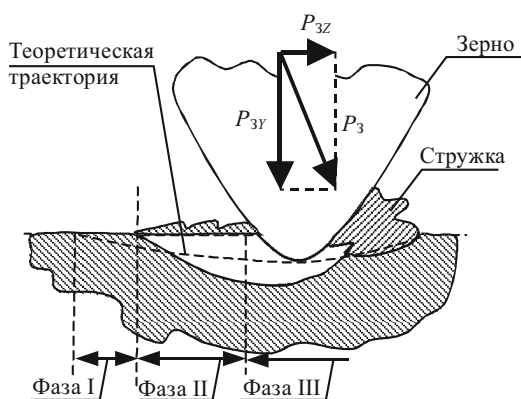


Рис. 4. Процесс резания отдельным зерном

При этом значения составляющих совокупной силы резания могут быть вычислены по следующим выражениям:

$$\begin{aligned} P_Y &= \sum P_{3Yi} + P_{C_{\text{в}Y}} + P_{C_{\text{т}Y}} + P_{\Gamma_{\text{д}Y}}, \\ P_Z &= \sum P_{3Zi} + P_{C_{\text{в}Z}} + P_{C_{\text{т}Z}} + P_{\Gamma_{\text{д}Z}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $P_{3Yi}, P_{3Zi}, P_{C_{\text{в}Y}}, P_{C_{\text{в}Z}}, P_{C_{\text{т}Y}}, P_{C_{\text{т}Z}}, P_{\Gamma_{\text{д}Y}}, P_{\Gamma_{\text{д}Z}}$ – радиальная и тангенциальная составляющие силы резания соответственно при микрорезании единичным зерном; при контакте материала со связкой круга; при контакте материала со стружкой, заполняющей поры круга; при воздействии гидродинамических потоков в области контакта детали с кругом.

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 учтем систему сил, действующую на режущий выступ абразивного зерна [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 $b = 2a$.

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

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

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

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

где β – угол между равнодействующей силы 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 площади 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 [6, 7, 8]

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

- где x_{cp} – средняя величина зерна, мм;
- K^* – концентрация режущего материала в круге, %;
- v_k – скорость шлифования, м/с;
- ε – относительная глубина заделки зерен, $\varepsilon \approx 0,7-0,8$;
- ω^* – 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 влияние.

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, прилегающей к зерну [6, 9, 10] (рис. 5).

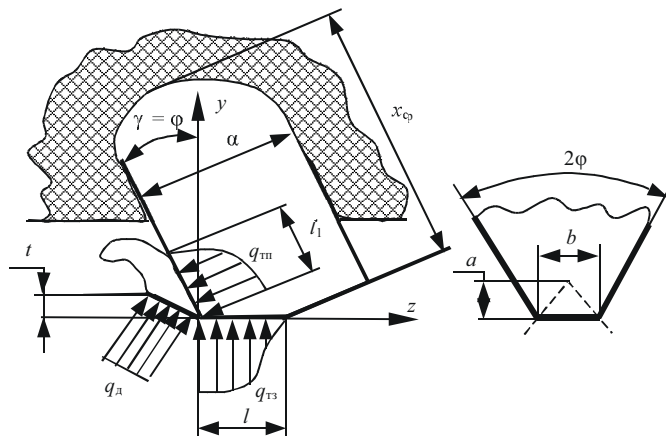


Рис. 5. Режущий выступ зерна и расположение источников тепловыделения

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:

$$Q = q n_p l B,$$

где n_p – 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 плоском шлифовании представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами:

$$\begin{aligned}
& J_1 \ddot{\varphi}_1 + h_1 \dot{\varphi}_1 + C_l \varphi_1 + C_2 (k_1^2 \varphi_1 - k_1 \varphi_2) = 0 \\
& J_2 \ddot{\varphi}_2 + (\varphi_2 - k_1 \cdot \varphi_1) \cdot C_2 + C_B (\varphi_2 - \varphi_3) = 0 \\
& J_3 \ddot{\varphi}_3 + C_3 \varphi_4 + C_x r^2 \varphi_3 + C_{kx} r z_4 - C_{kx} r z_5 - C_B (\varphi_2 - \varphi_3) = 0 \\
& M_z z_4 + C_z z_4 + C_{kz} (z_4 - z_5) + C_{kz} r \varphi_3 = 0 \\
& -C_{kz} (z_4 - z_5) - C_{kz} r \varphi_3 - k_z P = 0 \\
& M_x \ddot{x}_6 + h_x \dot{x}_6 + C_x x_6 + k_x P = 0 \\
& M_y \ddot{y}_7 + h_y \dot{y}_7 + C_y y_7 + k_y P = 0 \\
& h_{pz} z_5 + h_{px} x_6 + k_{px} x_6 + h_{py} y_7 + k_{py} y_7 + \frac{1}{T_p} \dot{P} + P + h_{pz} z_{14} + h_{px} x_{15} + k_{px} x_{15} + h_{py} y_{16} + k_{py} y_{16} = 0 \\
& C_C \frac{d\Theta_9}{dt} + \left(\frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_{\text{ТП}}}\right) \Theta_9 - \frac{1}{R_{\text{ТП}}} \Theta_{10} - (K_{d1}^C - K_{d2}^C) P - K_{dv}^C z_5 = 0 \\
& -\frac{1}{R_{\text{ТП}}} \Theta_9 + \left(\frac{1}{R_{\text{ТП}}} + \frac{1}{R_Z}\right) \Theta_{10} - \frac{1}{R_Z} \Theta_{11} - (K_{n1} + K_{n2}) P - K_{nv} z_5 = 0 \\
& -\frac{1}{R_Z} \Theta_{10} + C_K \frac{d\Theta_{11}}{dt} + \left(\frac{1}{R_K} + \frac{1}{R_Y} + \frac{1}{R_Z}\right) \Theta_{11} - \frac{1}{R_Y} \Theta_{12} = 0 \\
& -\frac{1}{R_Y} \Theta_{11} + \left(\frac{1}{R_Y} + \frac{1}{R_{\text{ТЗ}}}\right) \Theta_{12} - \frac{1}{R_{\text{ТЗ}}} \Theta_{13} - K_{\text{ТЗ}} z_5 = Q_{\text{ТЗ}} \\
& -\frac{1}{R_{\text{ТЗ}}} \Theta_{12} + C_{\text{И}} \frac{d\Theta_{13}}{dt} + \left(\frac{1}{R_{\text{ТЗ}}} + \frac{1}{R_{\text{И}}}\right) \Theta_{13} - (K_{d1}^{\text{И}} - K_{d2}^{\text{И}}) P - K_{dv}^{\text{И}} z_5 = 0 \\
& M_c z_{14} + h_{14} z_{14} + C_{\text{шт}} (z_{14} - z_{17}) + k_x P = 0 \\
& M_c x_{15} + h_x x_{15} + C_x x_{15} + k_x P = 0 \\
& M_c y_{16} + h_y y_{16} + C_y y_{16} + k_y P = 0 \\
& M_{\text{н}} z_{17} + h_{17} z_{17} + C_{17} z_{17} - C_{\text{шт}} (z_{14} - z_{17}) = 0
\end{aligned}$$

где $\Theta_{9,10,11,12,13}$ – средние температуры характерных элементов исходной системы шлифовальной обработки соответственно: средняя температура стружки; средняя температура на передней поверхности зерна (температурой резания); средняя температура в теле режущего зерна; средняя температура на задней поверхности зерна; средняя температура на поверхности изделия в зоне резания.

k_{px}, k_{py} – коэффициенты 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;

$K_{d1}^C, K_{d1}^C, K_{dv}^C$ – коэффициенты, учитывающие долю теплоты деформации, переходящей в изделие, пропорционально тангенциальной составляющей силы резания, нормальной составляющей силы резания и скорости резания;

$K_{d1}^И, K_{d1}^И, K_{dv}^И$ – коэффициенты, учитывающие долю теплоты деформации, переходящей в стружку, пропорционально тангенциальной составляющей силы резания, нормальной составляющей силы резания и скорости резания;

$K_{п1}, K_{п2}, K_{пв}$ – коэффициенты, учитывающие долю теплоты трения стружки по передней поверхности, переходящей в стружку, пропорционально тангенциальной составляющей силы резания, нормальной составляющей силы резания и скорости резания;

$Q_{ТЗ}$ – источник теплоты трения заготовки по задней поверхности;

$R_{ТП}$ – определяет теплообмен между стружкой и передней поверхностью зерна;

$R_{ТЗ}$ – определяет теплообмен между изделием и задней поверхностью зерна;

R_C – отражает отвод тепла со стружкой из зоны резания;

$R_{и}$ – учитывает теплоотвод из зоны резания в глубину изделия;

R_Z, R_Y – отражают теплообмен между задней и передней поверхностями зерна;

R_k – учитывает отвод тепла от зерна в связку круга;

C_i – учитывает теплоемкость участков.

Полученная математическая модель (5) описывает основные теплодинамические процессы при 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.

С помощью предложенной модели были рассчитаны температуры, возникающие в процессе плоского шлифования без охлаждения деталей из закаленной до HRC64 быстрорежущей стали периферией круга ПП200×20×75 с зёрнами эльбора ЛО63/50, связкой Б1, концентрацией зёрна $K_0 = 100 \%$. Результаты были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными

В.В. Щипановым в Тольяттинском политехническом институте, и с расчетными данными А.Н. Резника. Сравнительные данные представлены на рис. 6–8.

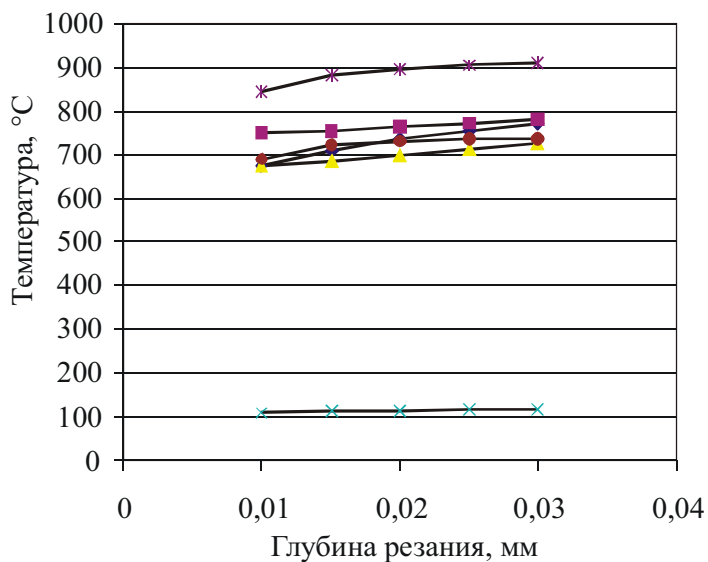


Рис. 6. Влияние глубины резания на температуру при шлифовании:
 —♦— ряд 1; —■— ряд 2; —▲— ряд 3; —×— ряд 4; —*— ряд 5; —●— ряд 6

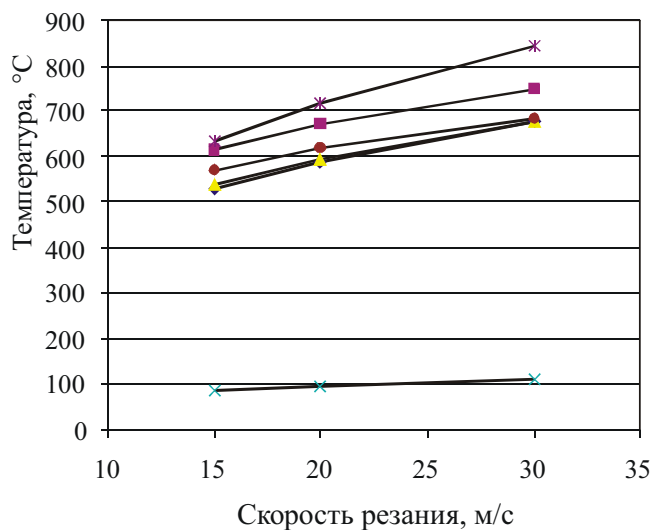


Рис. 7. Влияние скорости резания на температуру при шлифовании:
 —♦— ряд 1; —■— ряд 2; —▲— ряд 3; —×— ряд 4; —*— ряд 5; —●— ряд 6

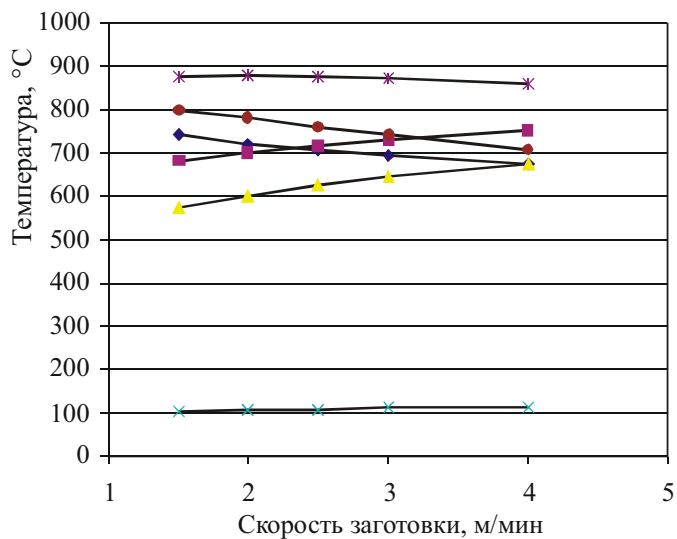


Рис. 8. Влияние скорости заготовки на температуру при шлифовании:
 —♦— — ряд 1; —■— — ряд 2; —▲— — ряд 3; —×— — ряд 4; —*— — ряд 5; —●— — ряд 6

Здесь ряд 1 показывает изменение экспериментальной температуры, полученной с помощью закладной полуискусственной термодпары. Ряды 2, 3, 4, 5 показывают изменения средних температур, полученных по модели (расчетным путем). Ряд 2 показывает температуру в зоне резания (стружки). Ряд 3 показывает среднюю температуру на поверхности передней поверхности зерен шлифовального круга (температура резания). Ряд 4 показывает изменение средних температур в зерне. Ряд 5 показывает среднюю температуру на задней поверхности зерна. Ряд 6 демонстрирует изменение температуры на поверхности заготовки.

Сопоставление результатов показывает, что влияние скорости резания и скорости заготовки на температуру резания в расчетных и экспериментальных закономерностях достаточно близки, расхождения не превышают 10 %. В математической модели была использована схематизация и допущения при теплофизическом анализе, предложенные А.Н. Резником. Хорошее согласование расчетов с экспериментальными значениями показывает целесообразность использования подобной схемы. Расчетная температура на поверхности заготовки практически не зависит от глубины резания, что расходится с экспериментальными данными. Следует предположить, что это связано с принятой схемой теплового распределения и допущениями.

Предложенная модель позволяет изучать влияние разнообразных факторов на средние температуры в процессе шлифовании. Используя методику А.Н. Резника и полученные средние температуры в результате моделирования, можно описать температурное поле в поверхностных слоях заготовки

и определить, на какую глубину и с какой интенсивностью прогревается заготовка в процессе обработки.

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

На рис. 9 показан переходный процесс изменения температуры резания Θ_{10} 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 может приводить также к колебательному переходному процессу в тепловой системе. Из переходного процесса видно, что установившееся значение температуры резания возникнет спустя некоторое время, определяемое тепловыми сопротивлениями.

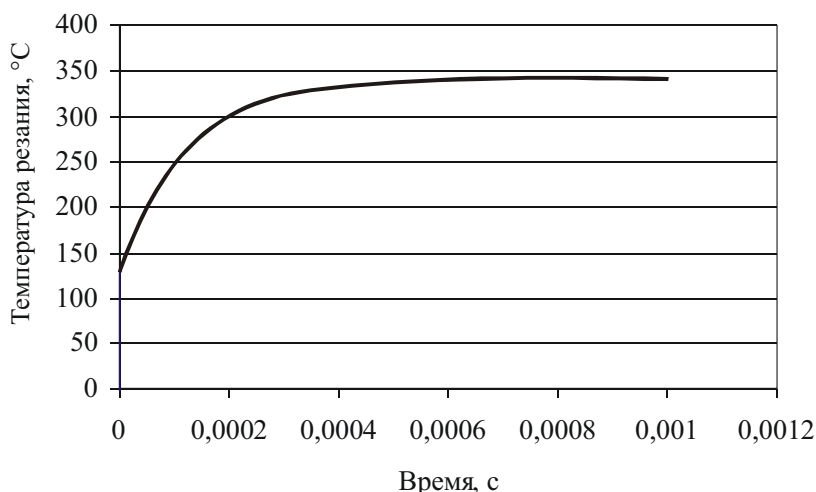


Рис. 9. Переходный процесс нарастания температуры резания при врезании

Если жесткость упругой системы недостаточна, то при врезании это может приводить к значительным колебаниям температуры резания (рис. 10), что может сказаться на качестве поверхностного слоя заготовки.

На рис. 11 показан переходный процесс для температуры резания при ступенчатом возмущении на узел шлифовального круга по оси Y . При недостаточном демпфировании в системе развивается продолжительный процесс колебаний температуры, что может способствовать появлению прижогов на поверхности.

При этом процесс нарастания температуры на задней поверхности зерен шлифовального круга, т.е. в контакте зерна с заготовкой, является постепенным, без выраженных колебаний (рис. 12). Время переходного процесса значительно и определяется тепловыми сопротивлениями.

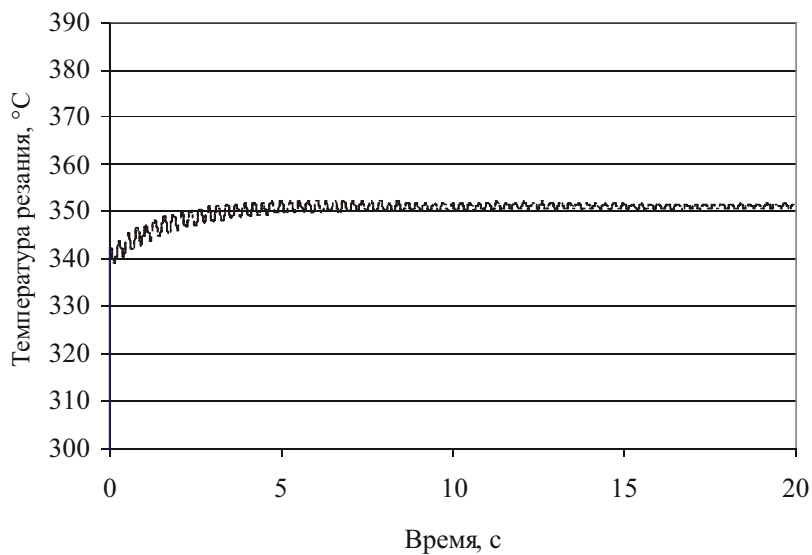


Рис. 10. Переходный процесс

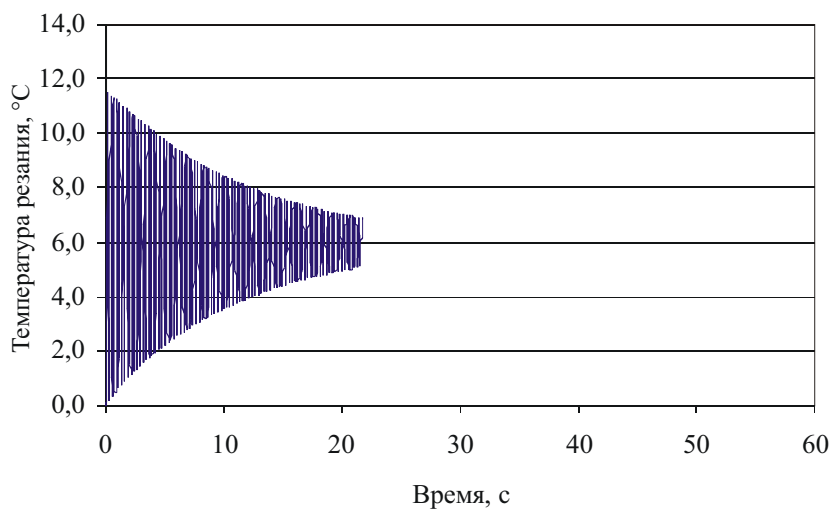


Рис. 11. Переходный процесс колебаний температуры резания при ступенчатом возмущении на узел круга по оси Y

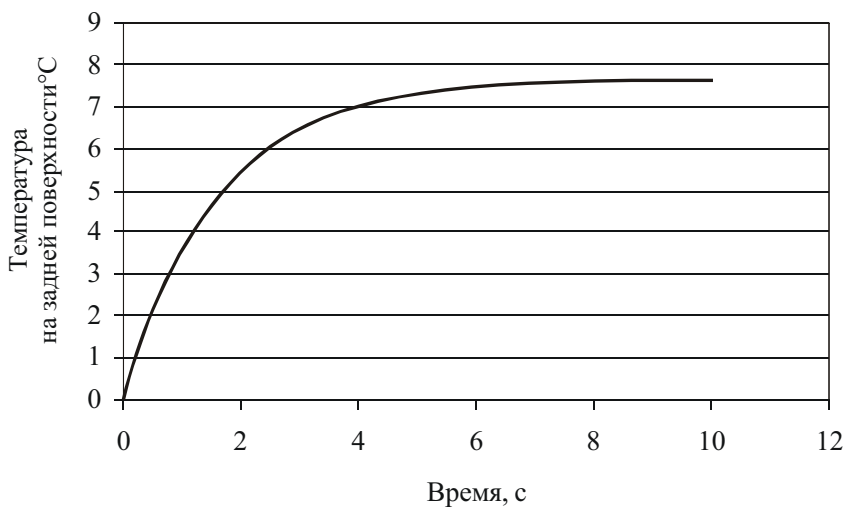


Рис. 12. Переходный процесс нарастания температуры на задней поверхности зерна при врезании

На рис. 13 приведена амплитудно-частотная характеристика колебаний температуры резания при периодическом изменении силы резания.

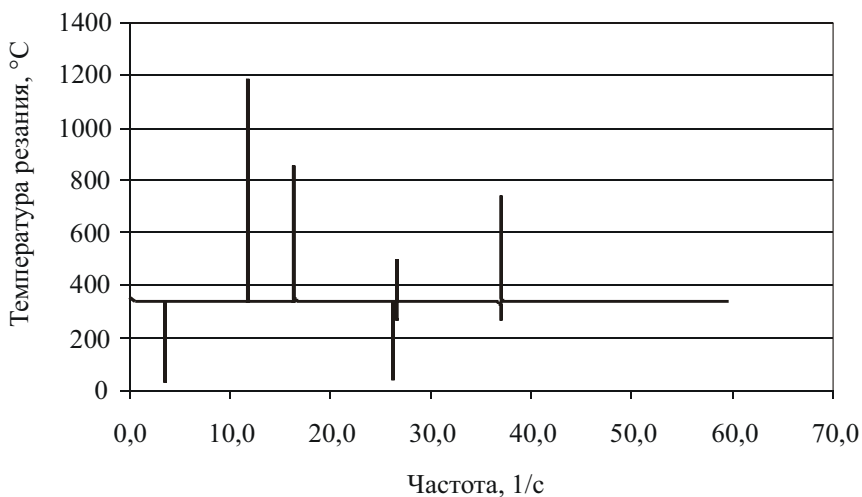


Рис. 13. АЧХ температуры резания от колебаний силы резания

При некотором сочетании эквивалентных жесткостей и демпфирования узлов шлифовального круга и стола по соответствующим координатам может проявляться явление резонанса на собственных частотах узлов. Резонансные колебания температуры резания будут приводить к ухудшению качества поверхности. В частности, при проектировании круга для прерывистого шлифования необходимо учитывать возможные резонансы в системе при шлифо-

вании, когда прерывистость процесса приводит к периодическим колебаниям силы резания.

Исследования показали, что возмущения в узлах шлифовального станка по соответствующим координатам резонируют на собственных частотах своих узлов и вызывают повышенные колебания температуры резания (рис. 14, 15).

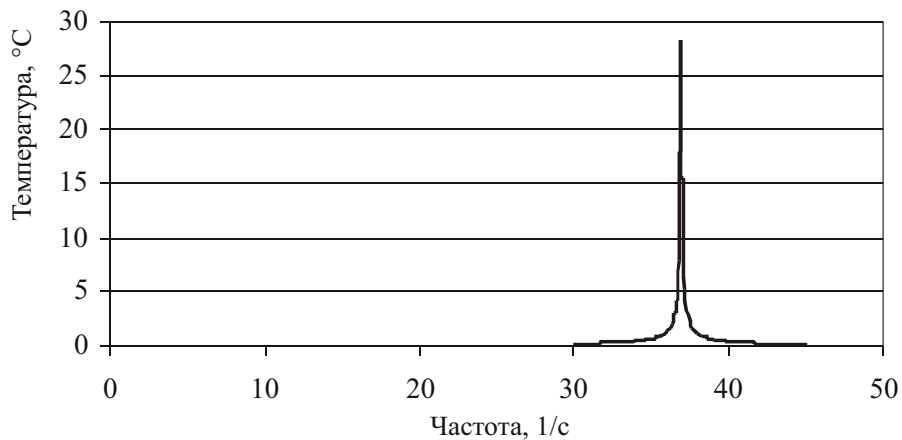


Рис. 14. АЧХ колебаний температуры резания при шлифовании от периодического возмущения на узел круга по оси Y

Данные процессы вызывают также резонансные колебания температуры на задней поверхности зерна (рис. 15).

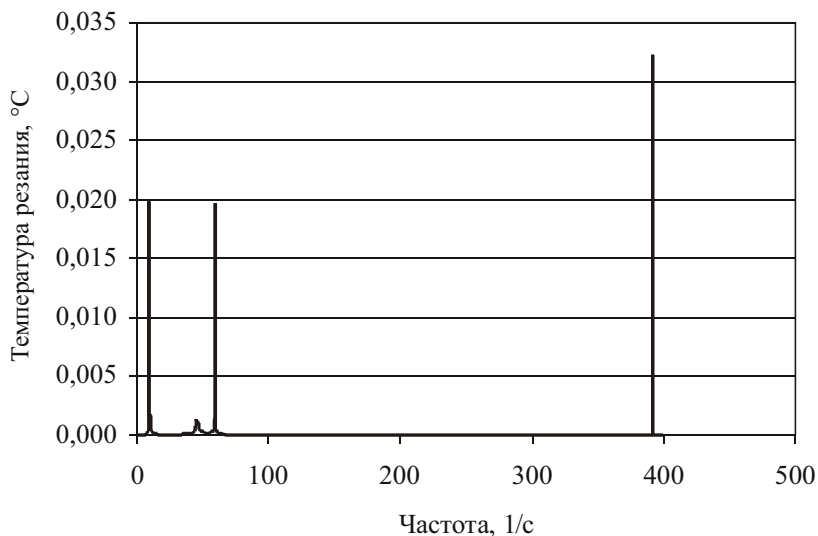


Рис. 15. АЧХ колебаний температуры резания от возмущений в электродвигателе привода шлифовального круга

Эти явления можно объяснить резонансными колебаниями силы резания при колебаниях упругой системы (рис. 16), а меняющаяся сила резания вызывает колебания выделяющегося тепла в процессе резания и температур.

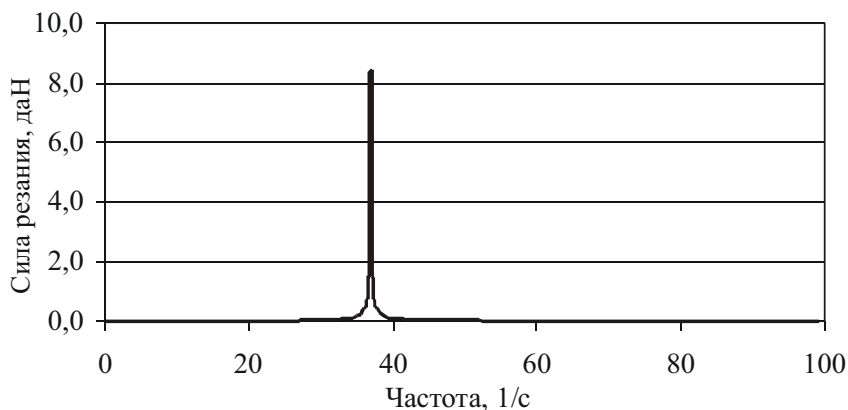


Рис. 16. АЧХ колебаний силы резания от воздействий на узел круга по оси Y

Периодическое изменение силы резания может существенно снижать температуру резания в сравнении с установившимся значением. Эффект снижения достигается уже при небольших частотах. Это явление давно известно при обработке резанием. 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.

Предложенная методика и математическая модель могут быть использованы при исследовании особенностей теплодинамических процессов в шлифовальных станках при резании. Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. При шлифовании необходимо уделять особое внимание появляющимся в процессе динамическим явлениям. Уже незначительные смещения между шлифовальным кругом и заготовкой влекут за собой значительные отклонения геометрической формы, изменения температуры в зоне резания и, соответственно, микроструктуры поверхностного слоя.

2. Является целесообразным предсказание вибрационных колебаний при шлифовании с помощью математической модели, которая позволяет получить динамические характеристики при динамически нестабильном процессе шлифования и без дорогостоящих натурных испытаний.

3. Модель, базирующаяся на чисто геометрических связях, не может в полной мере дать информацию о передаточных характеристиках процесса шлифования. Необходима модель, связывающая количественно кинематику, упругопластические процессы внедрения зерен, силы резания, термические процессы в зоне резания, физические свойства системы «шлифовальный станок – заготовка».

4. Температура резания определяется не только процессами распределения тепла в системе, но и динамическими процессами в системе «шлифовальный станок – заготовка» и динамикой самого процесса шлифования. При определенных сочетаниях параметров обработки возникают колебания температуры резания, как при врезании шлифовального круга, так и при резонансах режимах работы.

Список литературы

1. Аршинов В.А., Алексеев Г.Л. Резание металлов и режущий инструмент. – М.: Машиностроение, 1976. – 440 с.

2. Зарубин В.С., Крищенко А.П. Математическое моделирование в технике: учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 496 с.

3. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1978. – 199 с.

4. Кудинов В.А. Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с.

5. Кудинов В.А. Системность и диалектика в динамике технологических процессов и машин. – СТИН. – 2000. – № 1. – С. 5–11.

6. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.

7. Резников А.Н. Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.

8. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах: учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения», «Металлорежущие станки и инструменты». – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.

9. Якимов А.В., Слободяник П.Т., Усов А.В. Теплофизика механической обработки: учеб. пособие. – Киев; Одесса: Лыбидь, 1991. – 240 с.

10. Ящерицын П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: учебник для вузов. – Минск: Выш. шк., 1990. – 512 с.

Получено 20.04.2010