

УДК 621.9: 531.3:001.5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УПРУГОЙ, ТЕПЛОВОЙ ПОДСИСТЕМ И РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА

© 2013 С.П. Никитин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Поступила в редакцию 13.03.2013

Предлагается термодинамическая модель плоскошлифовального станка, полученная методом прямой аналогии и учитывающая взаимодействие динамической системы станка, включающей процесс шлифования, и тепловой системы. Данная модель позволяет исследовать колебание температур и взаимовлияние упругих и тепловых динамических процессов в процессе шлифования.

Ключевые слова: *шлифование, станок, динамическая система, термодинамика*

Шлифование является одним из окончательных методов обработки, поэтому от него 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.

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

обработки. 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 термодинамической 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.

Станок большей частью представляет собой сложную структуру и через статические и динамические свойства, а точнее через передаточные функции процесса шлифования, оказывает значительное влияние на колебания при шлифовании. К колебательной системе (рис. 1) при плоском шлифовании принадлежит подсистема инструмента, в которую входит шлифовальный круг, 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.

В модели упругая система станка представлена в виде отдельных сосредоточенных масс, соединенных жесткостями и обладающих определенным демпфированием колебаний. Для

Никитин Сергей Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты». E-mail: perkan@perm.ru

сокращения числа степеней свободы и упрощения модели некоторые связи между соседними элементами принимаются абсолютно жесткими, если ожидаемое перемещение по соответствующим координатам мало влияет на относительные смещения шлифовального круга и стола.

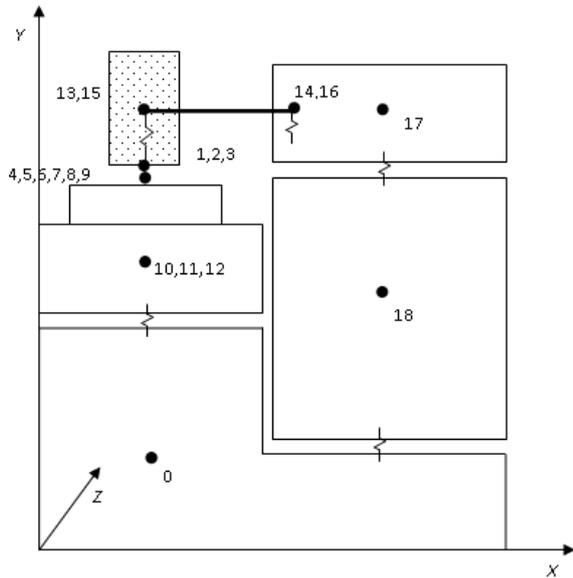


Рис. 1. Расчетная схема плоскошлифовального станка

В качестве сосредоточенных масс выделены: станина и основание станка (точка 0); стол (точки 10,11,12); колонна со шлифовальной бабкой (точка 18); гильза шлифовального шпинделя (точка 17); шлифовальный круг (точки 1, 2, 3). Шпиндель шлифовального круга представлен как стержень, закрепленный в гильзе шпинделя и испытывающий изгибные деформации (точки 13, 15, 14, 16).

Шлифование, как процесс пластического деформирования и разрушения материалов детали и круга, занимает промежуточное положение между резанием резцом [1, 2] (инструментом с определенной режущей кромкой) и трением. При моделировании динамики процесса резания при шлифовании процесс резания будем отображать в виде полной линейной модели [1, 2], так как процесс микрорезания зерна схож с процессом резания резцом. При этом процессы микрорезания зерен, находящихся в контакте с заготовкой, представим в виде некоторого совокупного процесса.

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. Эти особенности процесса шлифования позволяют при отображении тепловых процессов ориентироваться на схематизированное зерно с некоторыми усредненными геометрическими параметрами и условиями работы.

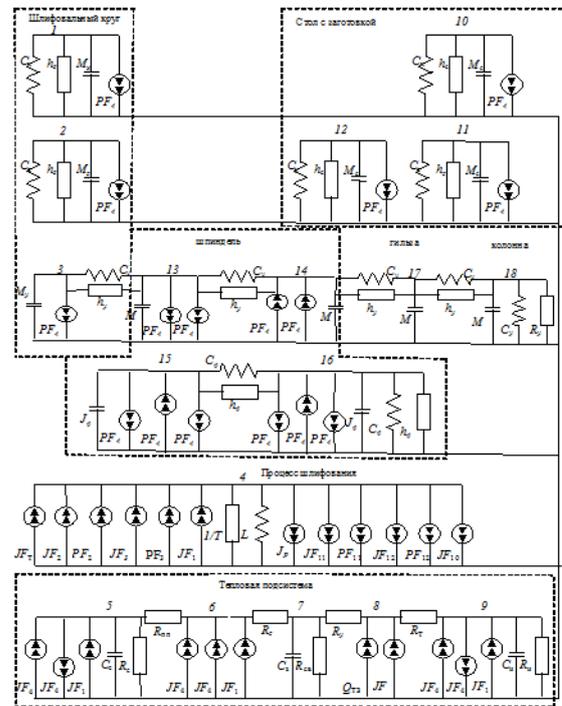


Рис. 2. Эквивалентная схема термодинамической системы шлифовального станка при учете резания в виде полной линейной модели:

C_z, C_y, C_x, C_ϕ – приведенные жесткости соответствующих подсистем; h_z, h_y, h_x – приведенные коэффициенты демпфирования механических подсистем; $R_c, R_{шп}, R_z, R_y, R_{св}, R_{ТЗ}, R_{и\phi}$ – коэффициенты сопротивления тепловому потоку в зоне шлифования; M_z, M_y, M_x, J_ϕ – приведенные инерционные параметры подсистем; L – условная податливость процесса резания единичной величины; T_p – постоянная времени стружкообразования; J_p – номинальная сила резания, определяемая припуском; $Q_{ТЗ}$ – источник тепла от трения по задней поверхности зерен; PF, JF – фиктивные источники, отражающие взаимодействие подсистем

Для отображения тепловых процессов в локальной области, прилегающей к зерну, будем использовать систему тел и элементарных источников согласно [3, 6, 7]. 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 [3-7]. Используя метод прямой аналогии и сделанные допущения, получаем следующую эквивалентную схему (рис. 2), которая

отражает динамику упругих и тепловых процессов при шлифовании. Для исследований используется оригинальная компьютерная программа, использующая в качестве исходных данных эквивалентную схему. Математическая модель

тепло-динамической системы шлифовального станка при плоском шлифовании, построенная по эквивалентной схеме, представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами:

$$\begin{aligned}
 & M_z \frac{d^2 z_1}{dt^2} + h_z \frac{dz_1}{dt} + C_z z_1 + k_z P = 0 \\
 & M_x \frac{d^2 x_2}{dt^2} + h_x \frac{dx_2}{dt} + C_x x_2 + k_x P = 0 \\
 & M_y \frac{d^2 y_3}{dt^2} + h_y \left(\frac{dy_3}{dt} - \frac{dy_{13}}{dt} \right) + C_y (y_3 - y_{13}) + k_y P = 0 \\
 & h_T \frac{d\theta_5}{dt} + h_{P_z} \frac{dz_1}{dt} + h_{P_x} \frac{dx_2}{dt} + k_{P_x} x_2 + h_{P_y} \frac{dx_3}{dt} + k_{P_y} y_3 + \\
 & \quad + \frac{1}{T_P} \frac{dP_4}{dt} + P_4 + h_{P_z} \frac{dz_{10}}{dt} + h_{P_x} \frac{dx_{11}}{dt} + k_{P_x} x_{11} + \\
 & \quad + h_{P_y} \frac{dy_{12}}{dt} + k_{P_y} y_{12} + 0 \\
 & C_c \frac{d\theta_5}{dt} + \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{\text{III}}} \right) \theta_5 - \frac{1}{R_{\text{III}}} \theta_7 - (K_{d1}^c - K_{d2}^c) P - K_{dv}^c = 0 \\
 & \quad - \frac{1}{R_{\text{III}}} \theta_5 + \left(\frac{1}{R_{\text{III}}} + \frac{1}{R_Z} \right) \theta_6 - \frac{1}{R_Z} \theta_7 - (K_{n1} + K_{n2}) P - \\
 & \quad \quad - K_{nv} z_1 = 0 \\
 & \quad - \frac{1}{R_Z} \theta_6 + C_3 \frac{d\theta_7}{dt} + \left(\frac{1}{R_{cb}} + \frac{1}{R_Y} + \frac{1}{R_Z} \right) \theta_7 - \frac{1}{R_Y} \theta_8 = 0 \\
 & \quad - \frac{1}{R_Y} \theta_7 + \left(\frac{1}{R_Y} + \frac{1}{R_{T3}} \right) \theta_8 - \frac{1}{R_{T3}} \theta_9 - K_{T3} z_1 = Q_{T3} \\
 & \quad - \frac{1}{R_{T3}} \theta_8 + C_{\text{II}} \frac{d\theta_9}{dt} + \left(\frac{1}{R_{T3}} + \frac{1}{R_{\text{II}}} \right) \theta_9 - (K_{d1}^{\text{II}} - K_{d2}^{\text{II}}) P - \\
 & \quad \quad - K_{dv}^{\text{II}} z_1 = 0 \\
 & M_{10} \frac{d^2 z_{10}}{dt^2} + h_z \frac{dz_{10}}{dt} + C_z z_{10} + k_z P = 0 \\
 & M_{11} \frac{d^2 x_{11}}{dt^2} + h_x \frac{dx_{11}}{dt} + C_x x_{11} + k_x P = 0 \\
 & M_{12} \frac{d^2 y_{12}}{dt^2} + h_y \frac{dy_{12}}{dt} + C_y y_{12} + k_y P = 0 \\
 & -C_y (y_3 - y_{13}) - h_y \left(\frac{dy_3}{dt} - \frac{dy_{13}}{dt} \right) + M_y \frac{d^2 y_{13}}{dt^2} + k_{\varphi 15} \varphi_{15} + \\
 & \quad + k_{\varphi 16} \varphi_{16} + C_y (y_{13} - y_{14}) + h_y \left(\frac{dy_{13}}{dt} - \frac{dy_{14}}{dt} \right) = 0 \\
 & \quad J_{13} \frac{d^2 \varphi_{13}}{dt^2} + k_{y13} y_{13} - k_{\varphi 14} y_{14} + k_{\varphi 16} \varphi_{16} + \\
 & \quad + C_y (\varphi_{15} - \varphi_{16}) + h_y \left(\frac{d\varphi_{15}}{dt} - \frac{d\varphi_{16}}{dt} \right) = 0 \\
 & \quad - c_y (\varphi_{15} - \varphi_{16}) - h_y \left(\frac{d\varphi_{15}}{dt} - \frac{d\varphi_{16}}{dt} \right) + J_{16} \frac{d^2 \varphi_{16}}{dt^2} + \\
 & \quad + k_{y13} y_{13} + k_{y14} y_{14} + k_{\varphi 15} \varphi_{15} + C_{\varphi} y_{16} + h_y \frac{dy_{16}}{dt} = 0 \\
 & \quad - C_y (y_{14} - y_{17}) - h_y \left(\frac{dy_{14}}{dt} - \frac{dy_{17}}{dt} \right) + M_{17} \frac{d^2 y_{14}}{dt^2} + \\
 & \quad + C_y (y_{17} - y_{18}) + h_y \left(\frac{dy_{17}}{dt} - \frac{dy_{18}}{dt} \right) = 0 \\
 & \quad - C_y (y_{17} - y_{18}) - h_y \left(\frac{dy_{17}}{dt} - \frac{dy_{18}}{dt} \right) + M_{18} \frac{d^2 y_{14}}{dt^2} + \\
 & \quad + C_y y_{18} + h_y \frac{dy_{18}}{dt} = 0
 \end{aligned}$$

где $\Theta_{5,6,7,8,9}$ – 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; C_z, C_y, C_x, C_ϕ – приведенные жесткости соответствующих подсистем; h_z, h_y, h_x – приведенные коэффициенты демпфирования механических подсистем; $R_c, R_{пн}, R_z, R_y, R_{св}, R_{ТЗ}$ – коэффициенты сопротивления тепловому потоку в зоне шлифования; M_z, M_y, M_x, J_ϕ – приведенные инерционные параметры подсистем; L – условная податливость процесса резания единичной величины; T_p – постоянная времени стружкообразования; J_p – номинальная сила резания, определяемая припуском; $Q_{ТЗ}$ – источник тепла от трения по задней поверхности зерен; 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; $K_{d1}^c, K_{d1}^c, K_{dv}^c$ – 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; $K_{п1}, K_{п2}, K_{пv}$ – коэффициенты, учитывающие долю теплоты трения стружки по передней поверхности, переходящей в стружку, пропорционально тангенциальной составляющей силы резания, нормальной составляющей силы резания и скорости резания; C_c, C_z, C_ϕ – учитывают эквивалентные теплоемкости стружки, зерна и круга.

Полученная математическая модель 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 зерна $K_0=100\%$. Результаты были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными В.В. Щипановым в Тольяттинском политехническом институте, и с расчетными данными А.Н. Резника. Сопоставление результатов показало, что влияние скорости резания и скорости заготовки на температуру резания в расчетных и экспериментальных закономерностях достаточно близки, расхождения не превышают 10%. В математической модели были использована схематизация и допущения при теплофизическом анализе, предложенные А.Н. Резником. Хорошее согласование расчетов с экспериментальными значениями показывает целесообразность использования подобной схемы.

Предложенная методика и модель могут быть использованы при исследовании особенностей теплодинамических процессов в шлифовальных станках при резании. Они позволяют изучать влияние разнообразных факторов на тепловые процессы в процессе шлифования, на относительные смещения шлифовального круга и заготовки из-за появляющихся в процессе динамических явлений, которые влекут за собой значительные отклонения геометрической формы, изменения температуры в зоне резания и, соответственно, микроструктуры поверхностного слоя.

Является целесообразным предсказание вибрационных колебаний при шлифовании с помощью данной математической модели, которая позволяет получить динамические характеристики при динамически нестабильном процессе шлифования без дорогостоящих натурных испытаний. Модель, базирующаяся на чисто геометрических связях, не может передать передаточные характеристики процесса шлифования в полной мере. Необходима модель, связывающая воедино кинематику, упругопластические процессы внедрения зерен, силы резания, тепловые процессы в зоне резания, физические свойства системы шлифовальный станок / заготовка.

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. *Кедров, С.С.* Колебания металлорежущих станков / *С.С. Кедров.* – М.: Машиностроение, 1978. 199 с.
2. *Кудинов, В.А.* Динамика станков / *В.А. Кудинов.* – М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
3. *Резников, А.Н.* Теплофизика процессов механической обработки материалов / *А.Н. Резников.* – М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
4. *Резников, А.Н.* Теплофизика резания / *А.Н. Резников.* – М.: Машиностроение, 1969. 288 с.
5. *Резников, А.Н.* Тепловые процессы в технологических системах. Учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения», «Металлорежущие станки и инструменты» / *А.Н. Резников, Л.А. Резников.* – М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
6. *Якимов, А.В.* Теплофизика механической обработки. Учеб. пособие / *А.В. Якимов, П.Т. Слободяник, А.В. Усов.* – Одесса: Лыбидь, 1991. 240 с.
7. *Яцерицын, П.И.* Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: Учеб. для вузов / *П.И. Яцерицын* – Мн.: Выш. шк., 1990. 512 с.

A GRINDER MATHEMATICAL MODELING TAKING INTO ACCOUNT THE INTERACTION OF ELASTIC, THERMAL SUBSYSTEMS AND WORKING PROCESS

© 2013 S.P. Nikitin

Perm National Research Polytechnical University

The thermodynamic model of face-grinding tool received by a method of direct analogy and taking into account the interaction of tool dynamic system, including grinding process and thermal system is offered. This model allows to research the fluctuation of temperatures and interaction of elastic and thermal dynamic processes in the course of grinding.

Key words: *grinding, tool, dynamic system, thermodynamics*