

УДК 621.9:531.3.001.5

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ШЛИФОВАНИЕМ

С. П. Никитин

perkann@mail.ru

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)

Поступило в редакцию 22.07.2013

Аннотация. Представлены результаты теоретического исследования устойчивости при шлифовании с учетом взаимодействия упругих, тепловых и рабочих процессов. Для исследования использована теплодинамическая модель плоскошлифовального станка. Рассмотрено влияние параметров динамической системы станка и процесса шлифования на устойчивость и средние температуры.

Ключевые слова: динамическая система станка; устойчивость динамической системы; теплодинамика процесса резания; динамические характеристики.

Шлифование относится к финишным методам обработки, поэтому во многом определяет эксплуатационные свойства обработанных деталей. Наибольшее влияние на эксплуатационные свойства оказывает качество поверхностного слоя, которое характеризуется геометрией, структурой, степенью деформации, наклепом и остаточными напряжениями поверхностного слоя. Качество поверхностного слоя заготовки определяется одновременным воздействием геометрического, силового и теплового факторов, являющихся функциями процесса шлифования и имеющих непосредственную связь с относительными колебаниями формообразующих узлов станка. Общая теория колебаний при резании [1] дает ответ на вопрос о характере колебаний при шлифовании. Колебания при шлифовании являются вынужденными, но их уровень зависит от степени устойчивости динамической системы.

1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Задача состоит в поиске путей снижения колебаний шлифовальных станков за счет повышения степени устойчивости системы. Это позволит управлять тепловыми и упругими явлениями при шлифовании так, чтобы обеспечить заданную точность и качество поверхностного слоя заготовки. Для конечного качества заготовки при шлифовании определяющими являются упругие колебания в станке и следы дробления на заготовке, прижоги и микроструктура поверхностного слоя. Поэтому при исследовании определяют способы исключения ко-

лебаний 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.

Одновременно с этим наблюдается взаимовлияние указанных выше факторов. Так развивающиеся колебания динамической системы приводят к изменению силы резания и колебанию температуры резания [3–5]. С другой стороны, тепловые воздействия в зоне резания приводят к разупрочнению обрабатываемого материала и за счет температурных деформаций упругой системы – к снижению точности.

К колебательной системе (рис. 1) при плоском шлифовании принадлежит подсистема инструмента, в которую входит шлифовальный круг с приводом, подсистема заготовки и упругая система станка. На склонность к колебаниям и вибрациям влияют характеристики шлифовального круга, его профиль, а также кинематика процесса. Заготовка через свою геометрию, статическую и динамическую жесткости также влияют на процесс колебаний.

Станок представляет собой сложную структуру и через статические и динамические свойства, а точнее через передаточные функции процесса шлифования, оказывает значительное влияние на колебания при шлифовании.

До настоящего времени тепловые и динамические процессы при шлифовальной обработке исследовались отдельно. Например, сегодня для определения динамических свойств станков как сложных структур существуют хо-

рошо разработанные методы анализа. В частности, экспериментальный модальный анализ позволяет определить формы колебаний динамической системы станка и выявить слабые элементы конструкции.

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 рамках решения задачи поиска путей снижения колебаний шлифовальных станков за счет повышения степени устойчивости системы при шлифовании были проведены исследования влияния конструктивных параметров и режимов резания на устойчивость и уровень температур при плоском шлифовании. Для исследований в данной работе использована математическая модель теплодинамической системы шлифовального станка [2], учитывающая взаимодействие упругих, тепловых явлений и процесса резания:

$$\begin{aligned}
 M_z \frac{d^2 z}{dt^2} + h_z \frac{dz}{dt} + C_z + k_z P &= 0, \\
 M_x \frac{d^2 x}{dt^2} + h_x \frac{dx}{dt} + C_x x + k_x P &= 0, \\
 M_y \frac{d^2 y}{dt^2} + h_y \frac{dy}{dt} + C_y y + k_y P &= 0, \\
 h_{P_x} \frac{dx}{dt} + h_{P_y} \frac{dy}{dt} + k_{P_y} y + h_{P_z} \frac{dz}{dt} + k_{P_z} z + \frac{1}{T_p} \frac{dP}{dt} + P &= 0, \\
 C_c \frac{d\Theta_1}{dt} + \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{\text{III}}}\right)\Theta_1 - \frac{1}{R_{\text{III}}}\Theta_2 &= Q_d b^* \\
 -\frac{1}{R_{\text{III}}}\Theta_1 + \left(\frac{1}{R_{\text{III}}} + \frac{1}{R_z}\right)\Theta_2 - \frac{1}{R_z}\Theta_3 &= Q_{\text{III}}, \\
 -\frac{1}{R_z}\Theta_2 + C_k \frac{d\Theta_3}{dt} + \left(\frac{1}{R_k} + \frac{1}{R_y} + \frac{1}{R_z}\right)\Theta_3 - \frac{1}{R_y}\Theta_4 &= 0, \\
 -\frac{1}{R_y}\Theta_3 + \left(\frac{1}{R_y} + \frac{1}{R_{\text{T3}}}\right)\Theta_4 - \frac{1}{R_{\text{T3}}}\Theta_5 &= Q_{\text{T3}}, \\
 -\frac{1}{R_{\text{T3}}}\Theta_4 + C_{\text{И}} \frac{d\Theta_5}{dt} + \left(\frac{1}{R_{\text{T3}}} + \frac{1}{R_{\text{И}}}\right)\Theta_5 &= Q_d (1 - b^*),
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $\Theta_1, \dots, \Theta_5$ – 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 изделия; x, y, z – обобщенные координаты механической подсистемы; 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; h_x, h_y, h_z – коэффициенты эквивалентных сопротивлений движению механической подсистемы по соответствующим осям; k_x, k_y, k_z – коэффициенты, определяемые проекциями силы резания на соответствующие оси; M_z, M_y, M_x – приведенные массы подвижных частей механической подсистемы; Q_d – теплота деформации (в ваттах); b^* – коэффициент распределения теплоты деформации между изделием и стружкой; Q_{III} – источник теплоты трения стружки по передней поверхности; Q_{T3} – источник теплоты трения заготовки по задней поверхности; R_{III} – определяет теплообмен между стружкой и передней поверхностью зерна; R_z – 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; $C_{\text{И}}, C_{\text{К}}, C_{\text{С}}$ – учитывают теплоемкость участков тепловой модели; C_z, C_y, C_x – эквивалентные жесткости механической подсистемы по соответствующим осям.

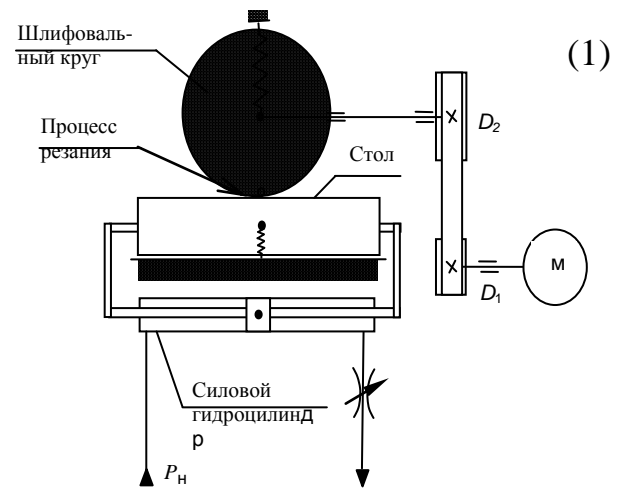


Рис. 1. Расчетная схема плоскошлифовального станка

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

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Высокие требования к точности формы обрабатываемых поверхностей при шлифовании и большие скорости вращения шлифовальных кругов делают проблему колебаний и устойчивости особенно важными для шлифовальных станков.

Влияние рабочего процесса шлифования на устойчивость системы известно [1, 5]. Оно может быть исследовано при анализе замкнутой динамической системы станка при шлифовании.

Для исчерпывающей информации о динамическом качестве шлифовального станка необходимо иметь девять амплитудно-фазовых характеристик (АФЧХ) [5], которые могут быть получены экспериментально на станке без резания или теоретически.

В модели привод главного движения, привод подачи и несущая система представлены упрощенно, в виде эквивалентных жесткостей.

Влияние режимов резания, свойств обрабатываемого материала и геометрии инструмента на динамические характеристики процесса шлифования могут быть получены на основе использования динамической характеристики резания, которая представляет собой зависимость изменения силы резания от относительного смещения заготовки и инструмента. При этом она получается только для собственно устойчивого процесса резания. В упрощенном выражении она имеет вид

$$P_a \approx \frac{K_p}{1 + T_p \cdot p} \cdot y, \quad (2)$$

где K_p – коэффициент резания, T_p – постоянная времени стружкообразования.

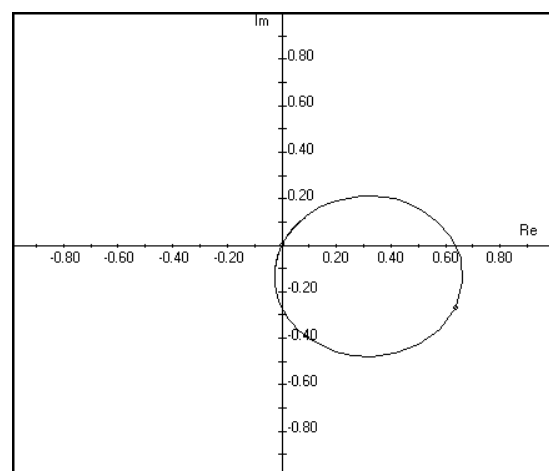
Амплитудно-фазовая характеристика процесса резания как апериодического звена имеет вид полуокружности, размещающейся в четвертой четверти.

В сочетании с эквивалентной упругой системой станка процесс резания в виде статической характеристики дает устойчивую систему, т. е. амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы при этом не пересекает отрицательной ветви вещественной оси. Однако динамическая характеристика резания вызывает фазовое смещение, что выражается в повороте амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы (годографа), что может приводить к пересечению отрицательной ветви вещественной оси. Таким образом, система станка при резании становится потенциально неустойчивой. При некоторых параметрах процесса резания система становится неустойчивой, когда ампли-

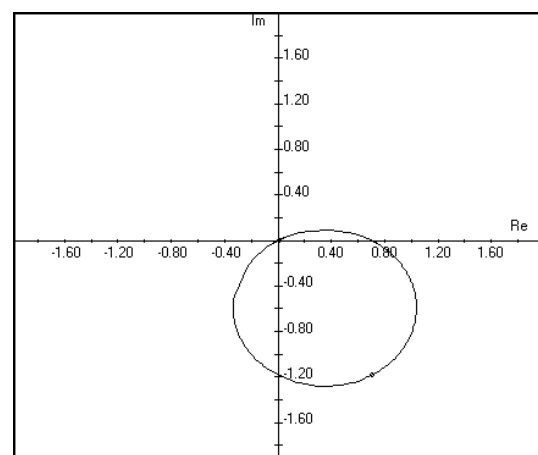
тудно-фазовая характеристика разомкнутой системы пересекает отрицательную ветвь правее точки минус один (–1).

В силу специфики процесса шлифования и близости его к трению, изменение условий обработки (продольной и поперечной подачи, ширины круга, зернистости и т. п.) влияет на силы резания, а значит, и на устойчивость, через изменение фактического сечения срезаемого слоя. Этим объясняется влияние на устойчивость системы продольной и поперечной подачи.

Амплитудно-фазовые характеристики разомкнутой системы станка при шлифовании с различными поперечными подачами показаны на рис. 2.



а – $S_{\text{поп}} = 0,001$ мм/проход



б – $S_{\text{поп}} = 1$ мм/проход

Рис. 2. АФЧХ разомкнутой системы станка при шлифовании с различными поперечными подачами $S_{\text{поп}}$

Из рисунка видно, что с возрастанием поперечной подачи фазовое смещение годографа разомкнутой системы увеличивается, а значит,

устойчивость системы в замкнутом состоянии уменьшается.

Изменение скорости резания не оказывает влияния на устойчивость замкнутой системы станка при шлифовании (рис. 3).

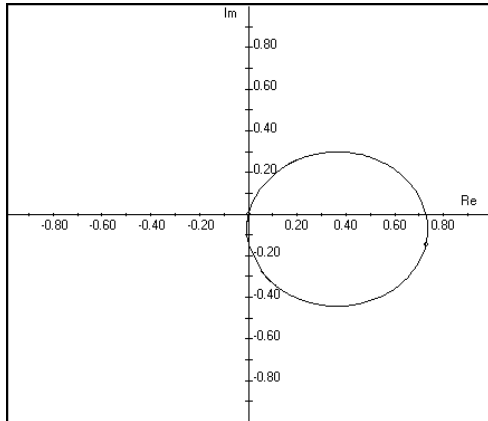
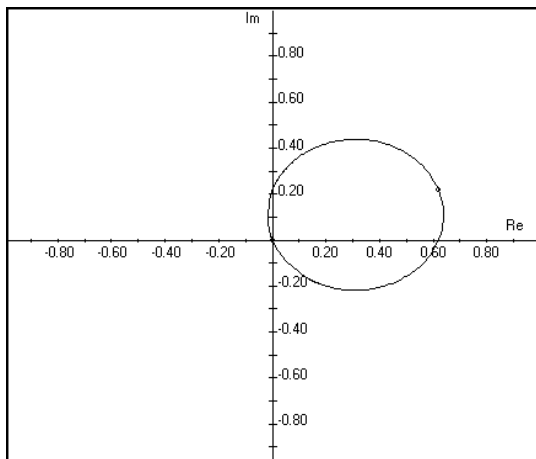
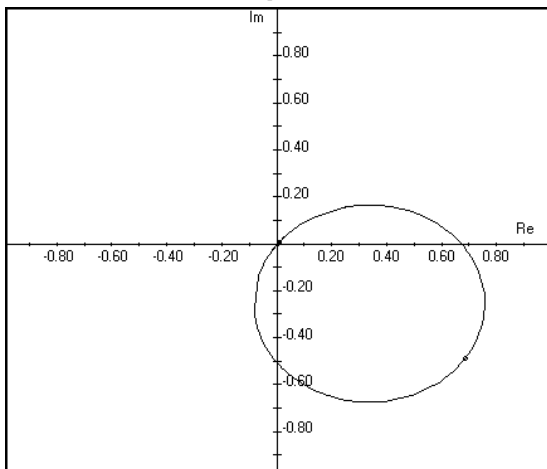


Рис. 3. АФЧХ разомкнутой системы станка при шлифовании при скоростью резания $v=30$ м/с



$a - S_{\text{пр}} = 1,5$ м/мин



$b - S_{\text{пр}} = 3,5$ м/мин

Рис. 4. АФЧХ разомкнутой системы станка при шлифовании с различными продольными подачами $S_{\text{пр}}$

Продольная подача при шлифовании также оказывает значительное влияние на устойчивость (рис. 4).

Влияние вибрационных следов на устойчивость при следующих проходах также известно давно [1, 5]. Это явление иногда называют регенеративным эффектом.

Наличие следов создает в динамической системе станка при резании дополнительную обратную связь с запаздыванием (рис. 5).

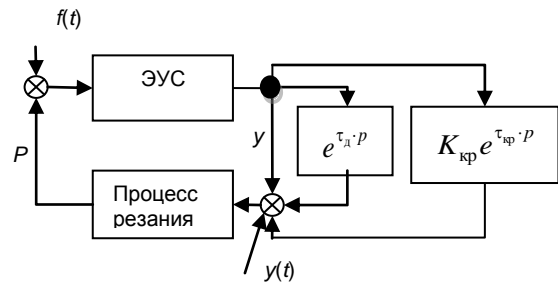


Рис. 5. Схема динамической системы станка при шлифовании «по следу»

Дополнительная обратная связь с запаздыванием, равным времени τ_d одного цикла обработки, если обработка производится «по следу» от предыдущего прохода. В этом случае круг для обрабатываемой заготовки выступает как «фреза», число зубьев которой равно числу волн.

$$\tau_d = \frac{60}{n_{\text{кр}} \cdot z_{\text{кр}}}, \quad (3)$$

где $z_{\text{кр}}$ – число волн на периферии круга, $n_{\text{кр}}$ – число оборотов круга в минуту.

Для шлифования существенное значение имеет также обратная связь с запаздыванием $\tau_{\text{кр}}$ через износ и затупление круга. Причем условия работы шлифовального круга «по чистому» на практике почти не встречаются. Обрабатываемая заготовка при этом выступает для круга в виде «протяжки».

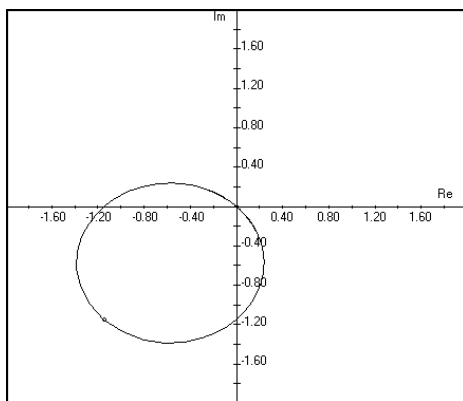
Для плоского шлифования

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{v_{\text{пр}}}{f \cdot \pi \cdot D_{\text{кр}} \cdot n_{\text{кр}}} = \frac{60 \cdot t_{\text{в}}}{\pi \cdot D_{\text{кр}} \cdot n_{\text{кр}}}, \quad (4)$$

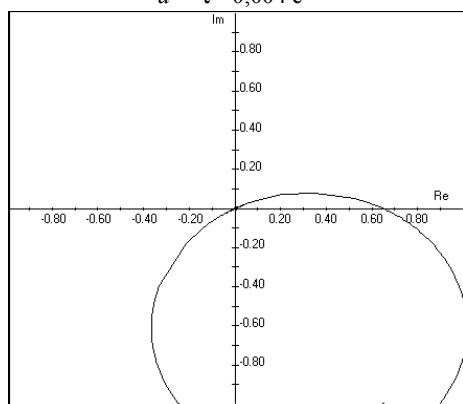
где $D_{\text{кр}}$ – диаметр круга, $t_{\text{в}}$ – шаг волны на шлифуемой поверхности заготовки, f – частота волн на поверхности заготовки, $v_{\text{пр}}$ – скорость продольной подачи.

Обратные связи с запаздыванием вызывают дополнительное фазовое смещение, что выражается в дальнейшем повороте амплитудно-фазовой характеристики разомкнутой системы, что может приводить к пересечению отрицательной ветви вещественной оси.

На рис. 6 показаны амплитудно-фазовые характеристики замкнутой системы станка при шлифовании с учетом регенеративного эффекта. Для этого в математической модели (1) в уравнение процесса резания вводится дополнительный элемент, отражающий запаздывание сигнала от следов предыдущей обработки.



$$a - \tau = 0,004 \text{ c}$$



$$z - \tau = 0,0001 \text{ c}$$

Рис. 6. АФЧХ разомкнутой системы станка при шлифовании с различными запаздываниями τ

Рисунок показывает, что величина запаздывания воздействия от следов предыдущей обработки оказывает сильное воздействие на амплитудно-фазовую характеристику станка при шлифовании.

Устойчивость системы при шлифовании «по чистому» (для заготовки и круга) определяется критерием Найквиста. Если амплитудно-фазовая характеристика (АФЧХ) разомкнутой системы не имеет пересечения отрицательной части вещественной оси левее координаты -1 , то система в замкнутом состоянии будет устой-

чива. Для заготовки такая обработка встречается при плоском шлифовании, резбошлифовании и т.п. Для шлифовального круга таких условий практически не возникает.

В соответствии с общей теорией влияние дополнительных обратных связей с запаздыванием при работе «по следу» проявляется следующим образом [1]:

1) если АФЧХ разомкнутой системы охватывает точку $(-0.5; j0)$, то система неустойчива независимо от времени запаздывания;

2) если точка пересечения АФЧХ разомкнутой системы лежит справа от вертикальной прямой с координатой $(-0.5; j0)$, то система устойчива при любом времени запаздывания;

3) если АФЧХ разомкнутой системы пересекает вертикальную прямую с координатой $(-0.5; j0)$, но не охватывает точку $(-0.5; j0)$, то существуют чередующиеся области устойчивой и не устойчивой работы системы. Причем указанные области для шлифования очень узки.

При наличии неустойчивости динамическая система станка при шлифовании будет испытывать вынужденные колебания, в том числе на собственных частотах. Уровень этих колебаний будет определяться степенью неустойчивости, которая может понижаться до нуля.

Колебания динамической системы станка при шлифовании вызывает изменение фактического срезаемого слоя, фактической силы резания, а в силу взаимосвязанности процессов вызывают изменения в тепловой системе станка при шлифовании. Это приводит к колебаниям температур в зоне шлифования.

На рис. 7 приведена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) для температуры резания при периодическом изменении силы резания.

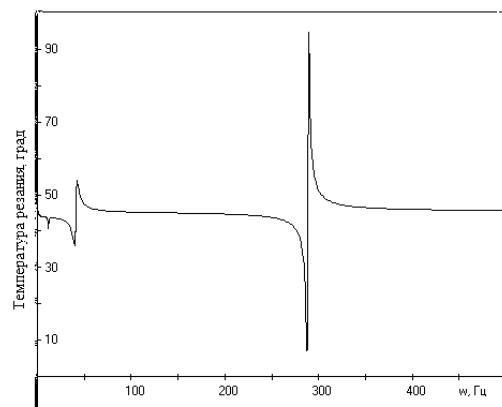


Рис. 7. Колебания температуры резания при периодическом изменении силы резания

Амплитудно-частотные характеристики показывают, что внешние воздействия на собственных частотах вызывают резонансное увели-

чение колебаний температуры резания. При низкой устойчивости динамической системы станка при шлифовании амплитуда колебаний может значительно возрасти и приводить к периодическим дефектам поверхности в виде прижогов, изменения физико-механических свойств шлифованной поверхности.

Эти же явления могут происходить при врезании шлифовального круга в заготовку, когда возникают переходные процессы в динамической системе (рис. 8).

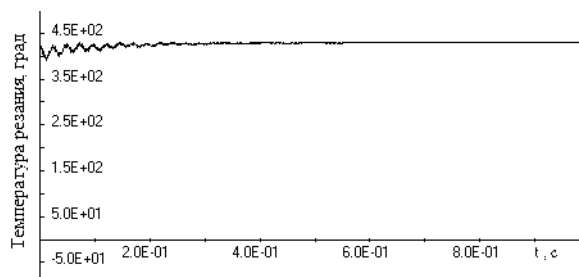


Рис. 8. Переходный процесс колебаний температуры резания при ступенчатом приложении силы резания

При выявлении неустойчивости нужно исходить из того, что при шлифовании носителем регенеративного эффекта может быть как заготовка, так и шлифовальный круг. Вибрации со стороны заготовки наводятся очень быстро после начала шлифования, так как цепочка волн на заготовке образуется сравнительно быстро. Образование микроволнистости на периферии шлифовального круга, напротив, происходит довольно медленно. Их природа определяется неравномерностью износа участков круга. Помимо этого при непрерывной правке микронежность на круге может быть результатом колебаний в системе заточки. Регенеративный эффект может возникать также из-за зерен с различной режущей способностью на периферии круга.

Оптимизация станка связана с большими издержками конструктивного характера. Поэтому, если на практике проявляется неустойчивость из-за регенеративного эффекта, то более эффективным способом стабилизации системы является изменение передаточной характеристики процесса шлифования. Этого можно достигнуть изменением технических характеристик круга (зернистости, твердости и т. д.). Однако при этом наблюдается обратное влияние, поэтому требуется проверка изменений технических характеристик с помощью моделирования.

ВЫВОДЫ

При шлифовании за счет регенеративного эффекта со стороны как заготовки, так и шлифовального круга может значительно снижаться устойчивость системы станка. Это вызывает со стороны внешних воздействий повышенные колебания в системе, которые влияют на точность и тепловые процессы, что в значительной степени определяет качество поверхностного слоя шлифуемой заготовки.

Предложена математическая модель и методика оценки устойчивости процесса шлифования, позволяющая прогнозировать поведение динамической системы станка. По математической модели получены амплитудно-фазовые характеристики шлифовального станка при резании, выявлены ее изменения от скорости резания, подачи и скорости заготовки.

Устойчивость динамической системы шлифовального станка при резании снижается при росте продольной и поперечной подачи, практически не меняется с ростом скорости резания.

Величина запаздывания, связанная с обработкой «по следу» или износом и затуплением круга, ведет к снижению устойчивости динамической системы.

Результаты работы позволяют разрабатывать технологию шлифования, обеспечивающую приемлемую устойчивость системы и необходимое качество поверхности заготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кудинов В. А.** Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.
2. **Никитин С. П.** Моделирование процесса резания при шлифовании с учетом взаимодействия упругой и тепловой систем. // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 12, № 4 (33). С. 61–65.
3. **Резников А. Н., Резников Л. А.** Тепловые процессы в технологических системах: учебник для вузов по спец. «Технология машиностроения», «Металлорежущие станки и инструменты» М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
4. **Якимов А. В., Слободяник П. Т., Усов А. В.** Теплофизика механической обработки: учеб. пособие. К., Одесса: Лыбидь, 1991. 240 с.
5. **Dietrich W.** Analyse selbsterregter Schwingungen beim Aussenrund-Einstechschleifen. Dissertation, Technischen Universität Braunschweig, 1984.
6. **Löwin R.** Schleiftemperaturen und ihre Auswirkungen im Werkstück; Dissertation, RWTH Aachen, 1980.

ОБ АВТОРЕ

НИКИТИН Сергей Петрович; доц. каф. металлореж. станков и инструментов. Дипл. инженер. Канд. техн. наук («Станкин», 1997). Иссл. в обл. дин. качества технол. машин.

METADATA

Title: Theoretical study of stability when processing by grinding.

Authors: S.P. Nikitin

Affiliation:

Perm National Research Polytechnic University (PNRPU),
Russia.

Email: perkann@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 17, no. 8 (61), pp. 38-44, 2013. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The results of theoretical studies of stability in grinding with the interaction of elastic, thermal, and workflows. To study the model used teplotdinamicheskaya surface grinding machine. The influence of the parameters of the dynamic system and the process of grinding machine for stability and average temperatures.

Key words: dynamic machine system; dynamic stability; heat dynamics; cutting process; dynamics.

References (English transliteration):

1. V. A. Kudinov, *Dynamics machines*. Moscow: Mashinostroenie, 1967.
2. S. P. Nikitin, "Simulation of the cutting process by grinding with the interaction of elastic and thermal systems," *Vestnik UGATU*, vol. 12, no. 4 (33), pp. 61-65, 2009.
3. A. N. Reznikov, *Thermal processes in technological systems*, textbook for high schools. Moscow: Mashinostroenie, 1990.
4. A. V. Yakimov, *Thermophysics machining*, textbook. Kiev, Odessa: Lybyd, 1991.
5. W. Dietrich, *Analyse selbsterregter Schwingungen beim Aussenrund-Einsteichschleifen*, Dissertation. Technischen Universität Braunschweig, 1984.
6. R. Löwin, *Schleiftemperaturen und ihre Auswirkungen im Werkstück*; Dissertation. RWTH Aachen, 1980.

About authors:

NIKITIN, Sergey Petrovich, an assistant prof. of Metal Machine Tools Dept. Candidate of technical sciences in the fields of "Processes for mechanical and physical-technical processes, tools and instruments" and "Drive Systems" ("STANKIN", 1997).