



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Оценка влияния скорости реакции термодинамической подсистемы на динамику процесса резания при металлообработке

Виктор Лапшин^{a, *}, Роман Русановский^b, Илья Туркин^c

Донской государственный технический университет, пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0002-5114-0316>,  lapshin1917@yandex.ru, ^b  <http://orcid.org/0000-0001-9408-5188>,  zames161@yandex.ru,
^c  <https://orcid.org/0000-0003-4792-4959>,  tur805@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 531.39

История статьи:

Поступила: 14 января 2021
 Рецензирование: 24 февраля 2021
 Принята к печати: 14 апреля 2021
 Доступно онлайн: 15 июня 2021

Ключевые слова:

Нелинейная динамика
 Вибрации
 Процесс резания
 Температура резания

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-08-00022.

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Современные металлообрабатывающие станки с ЧПУ позволяют достигать качественно нового уровня обработки металлов резанием при токарной обработке металлов. При этом удается добиться обеспечения требуемой формы, точности размеров, а также взаиморасположения поверхностей детали. Однако такой показатель качества обработки, как шероховатость обработанной поверхности, связанный с вибрационной активностью инструмента, не всегда отвечает заданным требованиям. Фактором, определяющим вибрационный режим резания в токарном металлорежущем станке, служит фактор самовозбуждения системы резания, обусловленный формируемыми в процессе резания дополнительными обратными связями, одной из которых выступает термодинамическая подсистема системы резания, являющаяся **предметом** исследования. **Цель работы.** За счет формирования непротиворечивой модели связи между подсистемами, описывающими силовую, тепловую и вибрационную реакцию инструмента, получить адекватное описание механизма снижения вибрационной нагрузки на процесс резания. **В работе исследован** процесс токарной обработки металлов резанием на металлорежущих станках с подробным описанием взаимодействия между термодинамической, силовой и вибрационной подсистемами системы резания. **Методы исследования:** натурные и численные эксперименты, в которых для обработки и анализа данных использовался пакет математических программ Matlab. **Результаты и обсуждение.** Приведены результаты натурных и численных экспериментов, в частности графики изменения координат, описывающих деформацию инструмента, получены массивы данных, отражающие зависимость вибрационной энергии движений инструмента от времени реакции термодинамической подсистемы системы резания. Качественная оценка результатов натурного эксперимента позволяет подтвердить адекватность как самой модели, так и результатов ее моделирования. **Область применения** полученных в исследовании результатов связана с возможностью предварительной подготовки режущего клина, которая обеспечит заданное значение постоянной времени термодинамической подсистемы, в свою очередь, осуществляющей минимизацию энергии вибрации. **Вывод по работе:** предложенная в работе математическая модель адекватно описывает механизм влияния температуры на вибрационную нагрузку процесса точения.

Для цитирования: Лапшин В.П., Русановский Р.В., Туркин И.А. Оценка влияния скорости реакции термодинамической подсистемы на динамику процесса резания при металлообработке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 2. – С. 17–30. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-17-30.

Введение

Современные технологии обработки металлов точением на металлообрабатывающих станках за счет использования принципиально новой элементной базы, в первую очередь новых средств измерения, позволяют существенно

повысить качество обработки металлов. При этом удается добиться требуемой формы, точности размеров, а также взаиморасположения поверхностей детали. Однако такой показатель качества обработки, как шероховатость обработанной поверхности, связанный с вибрационной активностью инструмента, не всегда отвечает заданным требованиям [1]. Вибрация инструмента обусловлена различными факторами, которые можно разделить на две группы. Группа, обусловленная внешним влиянием на процесс обработки: здесь могут быть как вибрации станка,

*Адрес для переписки

Лапшин Виктор Петрович, к.т.н., доцент
 Донской государственный технический университет,
 пл. Гагарина, 1
 344000, г. Ростов-на-Дону, Россия
 Тел.: 8 (900) 122-75-14, e-mail: lapshin1917@yandex.ru

так и вибрации, связанные с неисправностями шпиндельной группы либо износом инструмента [1, 2]. Второй группой факторов, влияющих на вибрационный режим резания в металлорежущем станке, являются факторы самовозбуждения системы резания, к которым можно отнести регеративную природу колебаний при резании, а также термодинамическую подсистему системы резания, способную также возбуждать колебания инструмента [3, 4].

В научной литературе принято разделять вибрации, возникающие при резании, на три составляющие: свободные колебания, вынужденные колебания и самовозбуждающиеся колебания [5–7]. Отметим, что для борьбы со свободными и вынужденными вибрациями много уже сделано и есть положительные результаты в этой области [7–9]. Что касается колебаний, связанных с самовозбуждением системы резания, т. е. колебаниями, потребляющими энергию из внешней среды, на сегодняшний момент однозначных решений нет. Поэтому тематика, связанная с минимизацией самовозбуждающихся колебаний при точении металлов, является популярной в научных исследованиях, проводимых в мире [10–15]. В указанных выше работах основное внимание уделяется оценке влияния на колебания инструмента, так называемого регенеративного эффекта. Отметим, что это достаточно хорошо исследовано еще в двадцатом веке и описано в работах *Hahn R.S., Tobias S.A.* и *Merritt H.E.* [16–18]. Многими более современными авторами отмечается возможность установления хаотического характера вибраций инструмента при регенерации колебаний [19–21]. Однако в целом отмечается, что главным фактором, влияющим на регенеративный эффект, является так называемая временная задержка “time delay”.

Для российских ученых проблема резания по следу, как основы самовозбуждения системы резания, не так важна, многие научные школы больше внимания уделяют анализу взаимосвязанной динамики процесса резания [22–25]. К примеру, в работе [26] анализ динамики деформационных вибраций инструмента производится на основе связанности через силовую реакцию, этого деформационного движения с элементами резания системы ЧПУ станка. В работах советских и российских ученых, изучающих вибрационную динамику процесса резания [27–31],

отмечается тот факт, что в процессе резания помимо обратной связи по силе резания, в которой учитывается регенерация колебаний при резании по «следу» через изменения площади срезаемого слоя, формируется термодинамическая обратная связь, которая также связана с вибрационной активностью инструмента, а также с износом режущего клина. В работах [32–34] рассматривается влияние различных факторов на динамику системы резания, где наибольший интерес, с нашей точки зрения, представляет работа [34], в которой предложена взаимосвязанная модель системы резания, в которой важнейшую роль играет термодинамическая подсистема системы резания. Математическая модель термодинамической подсистемы, представленная в этой статье и впервые описанная в работах [33], основывается на операторе Вольterra второго рода, который для стационарного случая системы резания сводится к апериодическому уравнению первого или, в более сложном случае, второго порядка. Выявленная в этих работах зависимость этой постоянной от энергии вибраций и износа инструмента по задней грани позволяет сделать вывод о возможном нестационарном характере уравнения, описывающего взаимосвязь термодинамической системы резания с подсистемой, представляющей силу резания. Таким образом, речь идет о том, что такая постоянная может изменяться в процессе обработки металлов резанием на металлорежущем станке. Исходя из соображений взаимосвязанности подсистем системы резания такая нестационарность постоянной времени должна приводить к изменению всей системы резания. Для оценки влияния изменений постоянной времени термодинамической подсистемы на динамику процесса обработки можно промоделировать упрощенный вариант математической модели подсистемы с уже известными моделями подсистем деформационных движений инструмента и силовой реакции на формирующие движения инструмента со стороны процесса резания. В связи с этим целью работы выступает формирование непротиворечивой модели связи между подсистемами, описывающими силовую, тепловую и вибрационную реакцию инструмента, которая адекватно описывает механизм снижения вибрационной нагрузки на процесс резания.

Методика исследований

Рассмотрим в качестве примера обработки процесс продольного точения детали, при этом осей деформации инструмента будет три [33].

На рис. 1 показана традиционная схема разложения деформаций на оси: ось x – осевое направление деформаций (мм), ось y – радиальное направление деформаций (мм) и ось z – тангенциальное направление деформаций (мм). Вдоль этих же осей разложена силовая реакция со стороны процесса резания на формообразующие движения инструмента ($F_x, F_y, F_z (H)$), V_x и V_z (мм/с) скорости подачи и резания соответственно, ω – угловая скорость вращения шпинделя (рад/с).

Для уточнения математической модели процесса резания с учетом эффектов, возникающих в зоне контакта инструмента и детали, рассмотрим схематичное изображение процесса резания через призму формирования термодинамической связи в этой системе (рис. 2).

Как видно из рис. 2, в процессе резания образуется зона теплопередачи, обусловленная сформированной площадкой износа по задней грани, именно через нее передается температура от предыдущих этапов обработки. Благодаря этому каналу передачи температуры формируется термодинамическая связь, влияющая на силовую реакцию со стороны процесса резания на формообразующие движения инструмента. Сама сила, препятствующая формообразующим

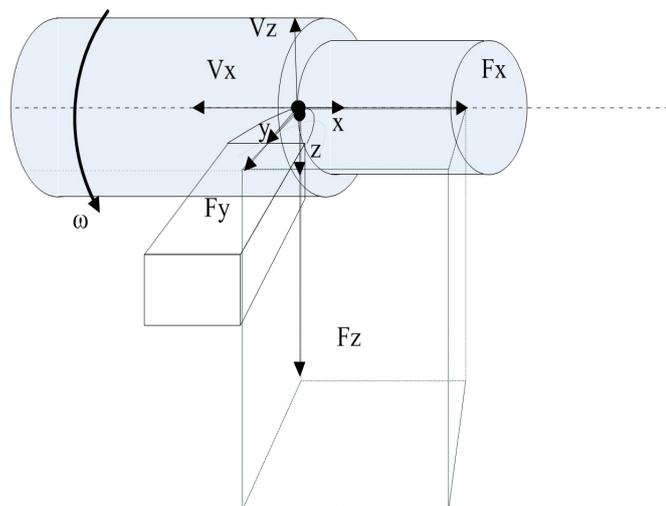


Рис. 1. Оси деформаций и сил при токарной обработке

Fig. 1. Axes of deformations and forces during turning

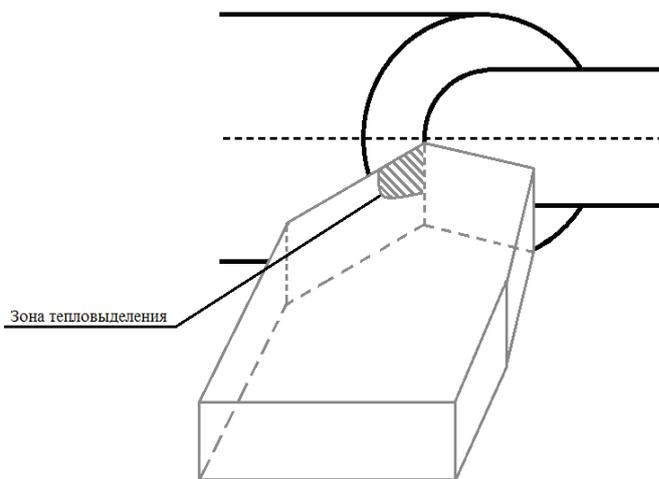


Рис. 2. Зона тепловыделения

Fig. 2. Heat dissipation zone

движениям, может быть определена на основе гипотезы о пропорциональности силы резания площади срезаемого слоя:

$$F = \rho(Q)[t_p - y] \int_{t-T}^t \left(V_x - \frac{dx}{dt} \right) dt, \quad (1)$$

где $\rho(Q)$ – коэффициент, характеризующий давление стружки на переднюю грань инструмента (кг/мм^2); Q – температура в зоне резания ($^{\circ}\text{C}$); t_p – подача на оборот (мм), записанная в программе ЧПУ; T – время вращения шпинделя с закрепленным в нем деталью (с^{-1}); V_x – скорость подачи инструмента (мм/с); $\frac{dx}{dt}$ – скорость ви-

браций инструмента в направлении подачи (мм/с); y – деформация инструмента в радиальном направлении (мм). Время вращения шпинделя с закрепленной в нем деталью также зависит от координат деформаций инструмента. Исходя из связи времени вращения с частотой вращения $T = \frac{2\pi}{\omega}$ (ω , рад/с), где частота вращения может быть выражена через скорость резания $V_z = \omega R$ (мм/с), получим следующую зависимость, представляющую период вращения шпинделя:

$$T = \frac{2\pi R}{V_z - \frac{dz}{dt}}, \quad (2)$$

где $\frac{dz}{dt}$ – скорость деформации инструмента в направлении резания (мм/с); R – радиус обрабатываемой детали (мм).

Таким образом, нами получена математическая модель, описывающая силу резания в координатах деформаций инструмента. Однако здесь же (см. выражение (1)) присутствует температура в зоне резания, с учетом проведенных нами ранее исследований, опубликованных в работах [33, 34], зависимость температуры в зоне резания от мощности необратимых преобразований может быть представлена следующим выражением:

$$T_Q \frac{dQ}{dt} + (Q + Q_0) = kN, \quad (3)$$

где T_Q – постоянная времени термодинамической подсистемы (s^{-1}); Q – текущая температура в зоне резания ($^{\circ}C$); Q_0 – температура обрабатываемой детали до начала обработки ($^{\circ}C$); k – коэффициент преобразования мощности, выделенной в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали, в температуру $\left(\frac{^{\circ}C \cdot c}{H \cdot мм}\right)$; N – мощность необратимых преобразований в зоне резания ($H \cdot мм$). Мощность необратимых преобразований с учетом введенных координат деформаций инструмента (см. рис. 1) представим в виде следующего выражения:

$$N = F \sqrt{\left(V_z - \frac{dz}{dt}\right)^2 + \left[V_x - \frac{dx}{dt}\right]^2 + \frac{dy^2}{dt}}. \quad (4)$$

С учетом принятой модели формирования температуры в зоне резания (3), (4), а также на основе принятых в металлообработке зависимостей предела прочности металла на разрыв от температуры эксперимента примем следующую зависимость $\rho(Q)$:

$$\rho(Q) = \frac{\rho_0}{2} e^{-\alpha Q} + \frac{\rho_0}{2}, \quad (5)$$

где ρ_0 – коэффициент, характеризующий давление стружки на переднюю грань инструмента при стандартной температуре эксперимента ($кг/мм^2$).

Для синтеза модели динамики системы деформационных движений инструмента запишем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} m \frac{d^2x}{dt^2} + h_{11} \frac{dx}{dt} + h_{12} \frac{dy}{dt} + h_{13} \frac{dz}{dt} + \\ + c_{11}x + c_{12}y + c_{13}z = \chi_1 F, \\ m \frac{d^2y}{dt^2} + h_{21} \frac{dx}{dt} + h_{22} \frac{dy}{dt} + h_{23} \frac{dz}{dt} + \\ + c_{21}x + c_{22}y + c_{23}z = \chi_2 F, \\ m \frac{d^2z}{dt^2} + h_{31} \frac{dx}{dt} + h_{32} \frac{dy}{dt} + h_{33} \frac{dz}{dt} + \\ + c_{31}x + c_{32}y + c_{33}z = \chi_3 F, \end{cases} \quad (6)$$

где χ_1, χ_2, χ_3 – коэффициенты, учитывающие разложение силы резания на оси деформации инструмента.

Таким образом, нами получена математическая модель системы резания, выраженная совокупностью уравнений (1)–(6).

Для проведения эксперимента с полученной моделью нами были разработаны несколько программ в среде Matlab и Matlab/Simulink. Исходные данные для этих моделей мы получили на основе анализов экспериментов, проведенных ранее и опубликованных в работах [32, 33].

Для всех экспериментов обозначим, что система уравнений движения инструмента представлена следующими параметрами:

$$m = \begin{bmatrix} 0,0065 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0065 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0065 \end{bmatrix} \text{ кг} \cdot \text{с}^2 / \text{мм};$$

$$h = \begin{bmatrix} 0,844 & 0,39 & 0,37 \\ 0,39 & 0,77 & 0,36 \\ 0,37 & 0,36 & 0,75 \end{bmatrix} \text{ кг} \cdot \text{с} / \text{мм};$$

$$c = \begin{bmatrix} 1390 & 190 & 165 \\ 190 & 795 & 150 \\ 165 & 150 & 970 \end{bmatrix} \text{ кг} / \text{мм}.$$

Коэффициенты разложения силы резания на оси деформации инструмента: $\chi_x = 0,3369$, $\chi_2 = 0,48$, $\chi_3 = 0,81$. Параметры технологического режима: глубина $t_p = 2$ мм; подача $S = 0,1$ мм; частота вращения шпинделя $n = 1000$ об/мин; $\rho = 400 \frac{кг}{мм^2}$; радиус обрабатываемой детали $R = 50$ мм.

Результаты экспериментов и обсуждение

Результаты экспериментов, проведенных в среде Matlab/Simulink, приведены ниже в серии рисунков, первым из которых мы рассмотрим динамику системы резания при постоянной времени термодинамической подсистемы системы резания, равной 0,7 с (рис. 3).

Как видно из рис. 3, после нарастания деформаций инструмента к 0,1 секунде эксперимента наблюдается некоторая стабилизация координат деформации и даже последующее снижение. Это обусловлено влиянием введенного нами в выражении (5) оператора, отображающего зависимость силы резания от температуры в зоне резания. С учетом введенного в эксперименте значения постоянной времени термодинамической подсистемы системы резания, равной 0,7 с, реакция системы на изменение силы резания примерно равна 2/3 от этого времени, т. е. процесс температурной стабилизации изменения координат деформации занимает около 1,05 с. Для оценки того, как координаты состояния деформационной подсистемы системы резания реагируют на нарастание температуры при врезании, рассмотрим фазовые

траектории деформационных координат, представленные на рис. 4.

Как видно из рис. 4, координаты деформирования инструмента в направлении x стягиваются от максимального значения 0,0075 до 0,005 мм, в направлении y – от 0,034 до 0,024 мм, а в направлении z – от 0,059 до 0,04 мм. Как уже ранее было указано, это обусловлено падением силы резания при росте температуры. Для адекватного рассмотрения этого вопроса приведены графики изменения силы резания, температуры и $\rho(Q)$ (рис. 5).

Как показано на рис. 5, действительно сила резания, зависящая от $\rho(Q)$, падает примерно за 1,05 с от почти 80 Н, до значения менее 60 Н, т. е. на четверть, что сказывается на координатах деформации инструмента (см. рис. 3 и 4). Однако интерес представляет связь между временем реакции термодинамической подсистемы и вибрациями инструмента, которые удобно измерять при помощи следующего интегрального показателя:

$$VA = \sqrt{\frac{1}{T_v} \left(\int_0^{T_v} \frac{dy^2}{dt} dt \right)}, \quad (6)$$

где VA – показывает энергию вибраций инструмента за период наблюдения (эксперимента), T_v .

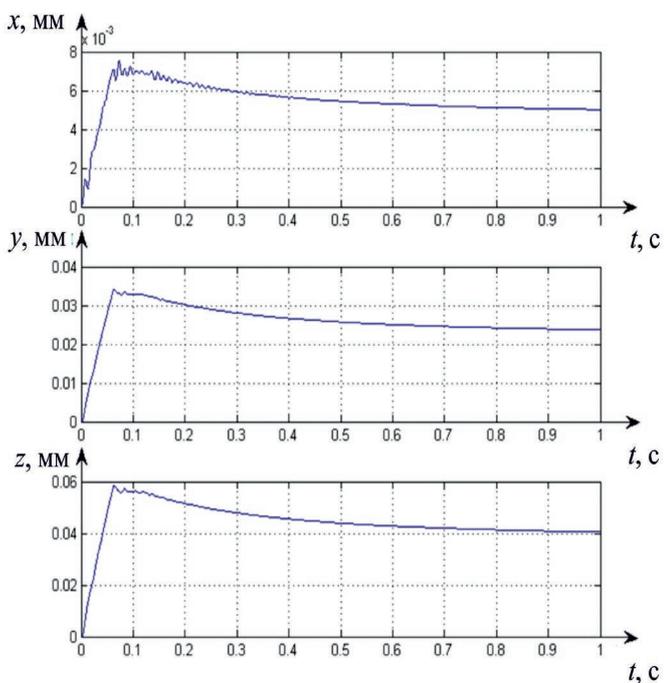


Рис. 3. Графики координат деформации инструмента при врезании ($T_Q = 0,7$)

Fig. 3. Graphs of tool deformation coordinates during embedding ($T_Q = 0.7$)

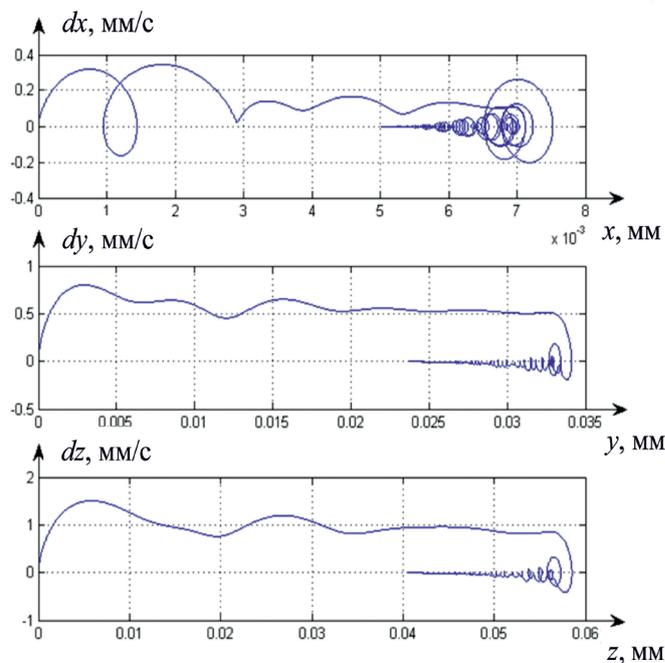


Рис. 4. Фазовые траектории координат деформации при $T_Q = 0,7$

Fig. 4. Phase trajectories of deformation coordinates at $T_Q = 0.7$

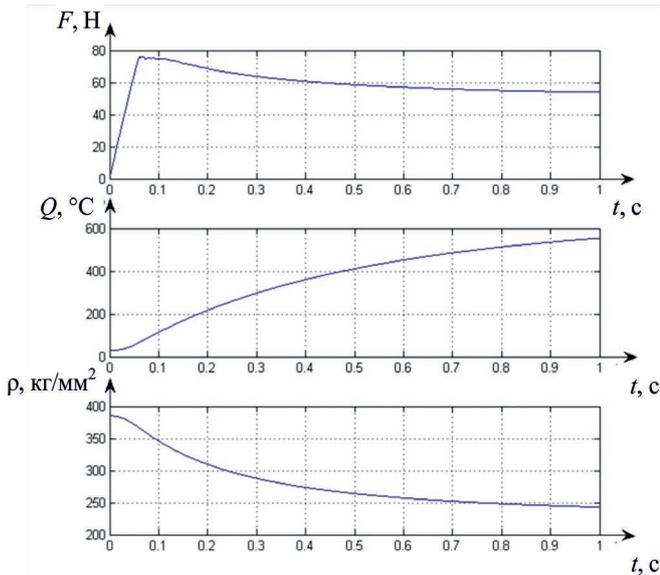


Рис. 5. Графики силы, температуры и коэффициент, характеризующий давление стружки на переднюю грань инструмента

Fig. 5. Graphs of force, temperature and coefficient characterizing the chip pressure on the front face of the tool

Для указанного на рис. 4 случая значение $V_A = 2$ мм/с, к примеру, для варианта $T_Q = 1,0009$ мм/с.

График изменения координат состояния для этого случая изображен на рис. 6.

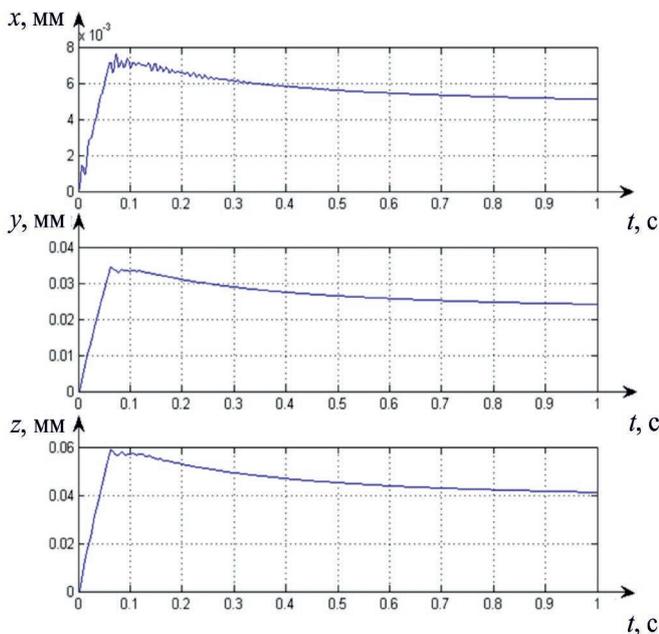


Рис. 6. Графики координат деформации инструмента при врезании ($T_Q = 0,85$)

Fig. 6. Graphs of the deformation coordinates of the tool when cutting ($T_Q = 0.85$)

Как видно из сравнения рис. 6 и 3, различия в колебаниях визуально не наблюдается, но, как ранее мы уже указывали, удобно рассматривать для такого анализа графики фазовых траекторий, которые и изображены на рис. 7.

Как видно из сопоставления рис. 7 и 4, графики фазовых траекторий действительно стали меньше по амплитуде, почти не изменившись в направлении координат деформаций.

Проведенная серия экспериментов позволила получить кривую, характеризующую изменения расчетного значения энергии вибрационного сигнала при изменении времени реакции термодинамической подсистемы системы резания, аппроксимирующую полученные исследования (рис. 8).

Расчетная кривая построена нами на основе синтеза полинома второго порядка методом наименьших квадратов. Как видно из рис. 8, расчетная кривая существенным образом отличается от кривой, полученной на основе проведения серии численных экспериментов. Отклонения максимальны на левом и правом конце графика, в центре графика эти отклонения минимальны. Это сделано специально, чтобы получить максимальную сходимость в центре графика, где находится точка минимума характеристики. Уве-

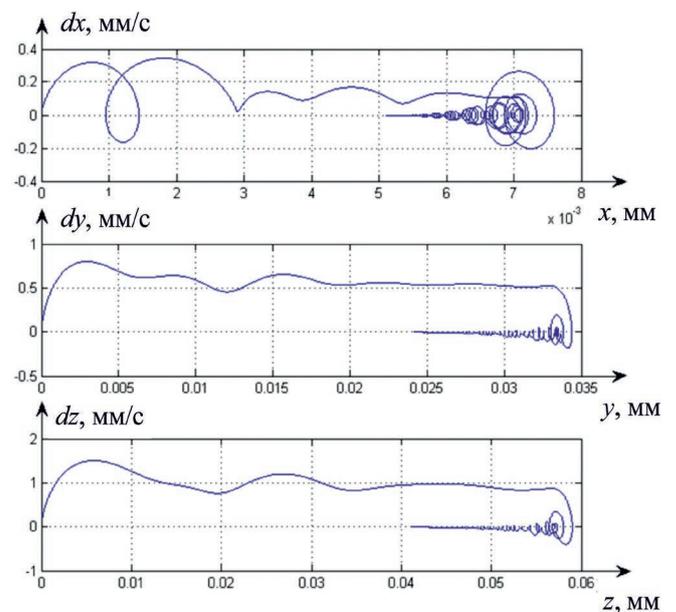


Рис. 7. Фазовые траектории координат деформации при $T_Q = 0,85$

Fig. 7. Phase trajectories of deformation coordinates at $T_Q = 0.85$

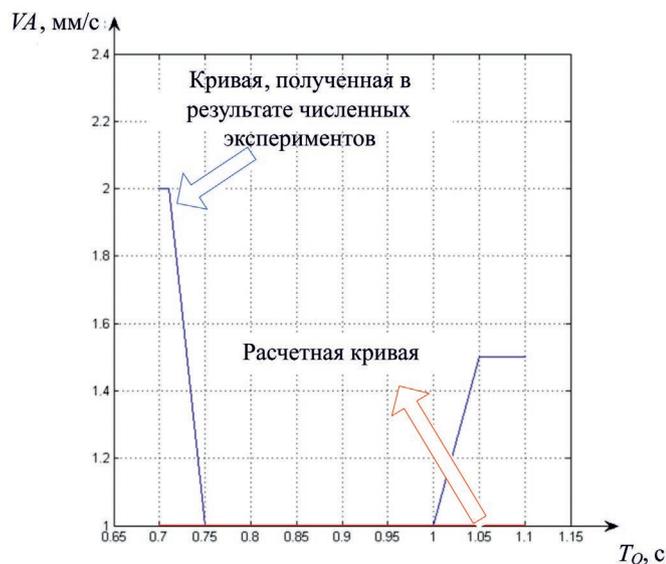


Рис. 8. Полученная в численных экспериментах и расчетная кривые в общем масштабе

Fig. 8. Obtained in numerical experiments and calculated curves on a general scale

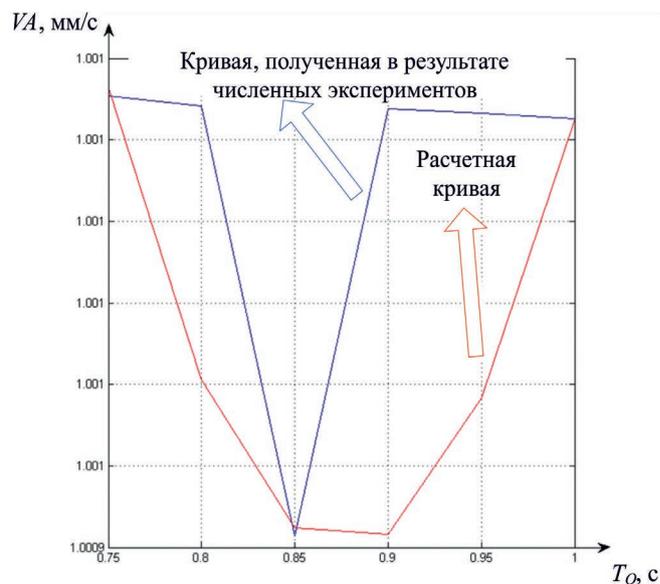


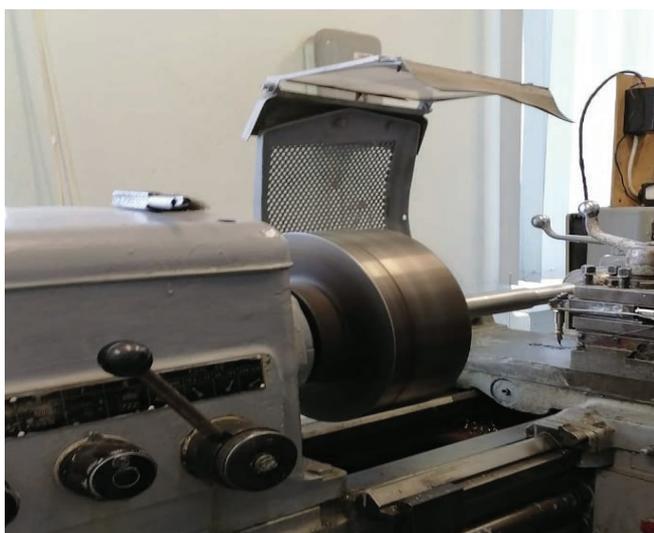
Рис. 9. Кривая, полученная в результате численных экспериментов и расчетная кривые

Fig. 9. Obtained in numerical experiments and calculated curves on a general scale

личенная область графика с точкой минимума показана на рис. 9.

Проведенные исследования (рис. 9) действительно показали наличие локального минимума кривой, отражающей зависимость энергии вибраций инструмента от времени реакции термодинамической подсистемы. Из рис. 9 также видно, что построенная нами расчетная кривая достаточно точно отображает локальный минимум, полученный в результате эксперимента в системе Matlab.

Рассмотрим для примера результаты натурального эксперимента, проведенного на токарном станке 1К625 с разработанным авторами измерительным комплексом, позволяющим регистрировать вибрационную активность инструмента в направлении осей деформации, а также температуру вблизи зоны контакта задней грани инструмента (пластина сменная бгр. «ломаный треугольник» WNUM 120612 (02114-120612) H30 (T5K10) КЗТС) и обрабатываемой детали (рис. 10).



а



б

Рис. 10. Станок с оборудованием (а); измерительный комплекс на инструменте (б)

Fig. 10. Machine with equipment (a); measuring complex on the tool (b)

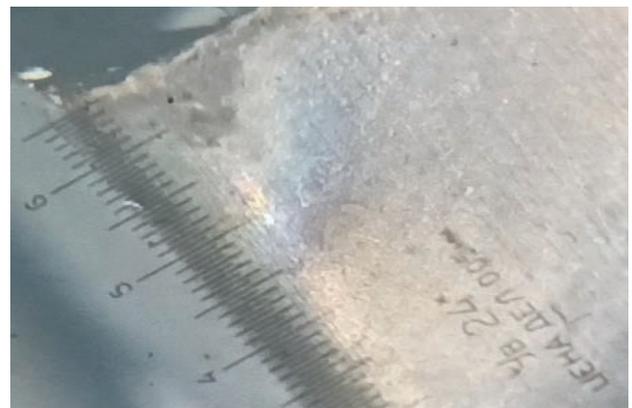
Из рис. 10 видно, что применяемый нами экспериментальный инструмент содержит три виброакселерометра и искусственную термоду, встроенную в режущий клин в непосредственной близости от зоны контакта задней грани инструмента с обрабатываемой деталью. Для встраивания термоду в режущий клин он был предварительно разрезан методом электроэрозии

онной резки металла, в подготовленном отверстии термоду закреплена термоду.

При эксперименте обрабатывалась деталь из круглого проката (сталь 45) диаметром 50 мм, частота вращения шпинделя составила 810 об/мин, глубина резания 1 мм, подача – 0,11 мм/об. Фотографии задней поверхности инструмента под микроскопом, представлены на рис. 11.



а



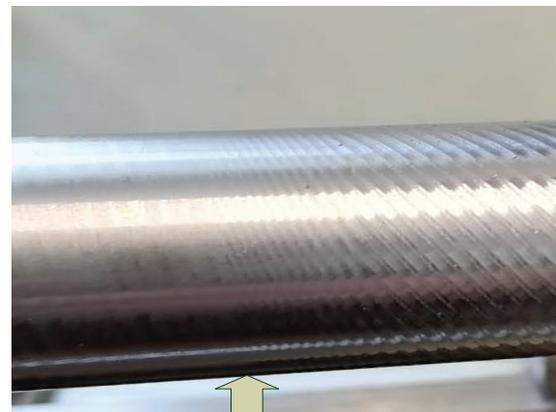
б

Рис. 11. Инструмент до приработки (а); инструмент с сформированной задней гранью (б)

Fig. 11. Pre-burn tool (а); a tool with a formed back face (б)

Эксперимент проводился до момента формирования площадки износа инструмента по задней грани (рис. 11, б), при которой согласно предложенному в работе подходу формируется такое значение постоянной времени T_Q , при котором процесс течения стабилизируется. При стабилизации процесса резания резко уменьшается СКЗ (среднеквадратическое значение) сигналов, снимаемых с виброакселерометров установленных вдоль осей деформации инструмента, однако наиболее наглядно снижение вибрационной нагрузки можно увидеть на поверхности обработанной детали, фотография которой показана на рис. 12.

Из рис. 12 видно, что на обрабатываемой детали визуально наблюдается область стабилизации вибрационной активности инструмента, после которой качество обрабатываемой поверхности существенно улучшается. Для понимания связи постоянной времени термодинамической подсистемы системы резания с фактом улучшения качества обрабатываемой поверхности рассмотрим график изменения температуры, снимаемой с искусственной термоду (рис. 13).



Область стабилизации
процесса резания

Рис. 12. Фотография обработанной детали

Fig. 12. Photo of the processed part

В области стабилизации процесса обработки (рис. 13) наблюдается рост температуры в зоне обработки, который в среднем составил величину, большую чем 50 °С. Учитывая механизм формирования температуры в зоне резания, вернее, связь его с постоянной времени реакции термо-

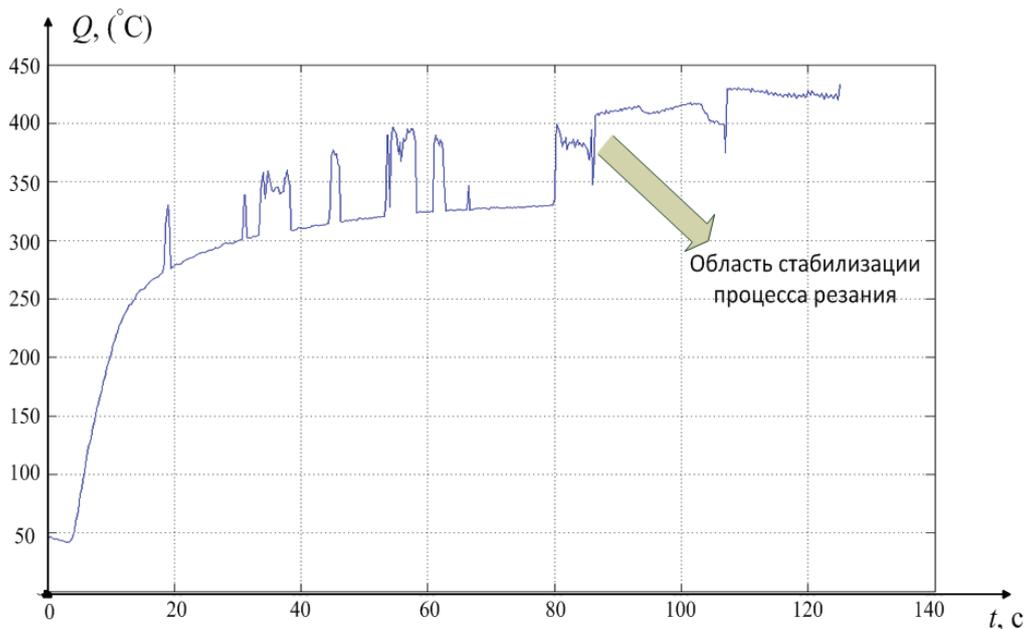


Рис. 13. График изменения температуры снимаемой с термопары
 Fig. 13. Graph of the temperature change taken from the thermocouple

динамической подсистемы системы резания, подробно описанный в работах [33, 34], именно рост постоянной времени приводит к росту самой температуры в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали.

Таким образом, мы экспериментально подтвердили полученные ранее выводы на базе численного анализа разработанной нами математической модели.

Проведенные исследования показали, что постоянная времени термодинамической подсистемы системы резания существенным образом влияет на динамику деформационных движений инструмента. Исследования также показали, что существует некоторая оптимальная область допустимых значений такой постоянной времени с точки зрения обеспечения минимума энергии, расходуемой на вибрации инструмента. Все это достаточно хорошо соотносится с результатами экспериментальных исследований, проведенных нами, а также другими авторами, в частности, это подтверждается широко известным из работ Макарова А.Д. положением о существовании оптимального с точки зрения обеспечения максимальной стойкости инструмента режима резания. Продолжая эти рассуждения и учитывая тот факт, что динамика процесса обработки непрерывно связана с динамикой изменения температуры в зоне резания, которая, в свою очередь, зависит

от постоянной времени термодинамической подсистемы, оптимальная температура во многом определяется значением введенной нами постоянной.

Заключение

В статье раскрыт механизм самоорганизации процесса резания через призму взаимодействия трех подсистем системы резания, подсистемы, описывающей деформационные движения инструмента, подсистемы силовой реакции процесса резания на формообразующие движения инструмента, а также термодинамической подсистемы системы резания. В работе выдвинута и подтверждена гипотеза о наличии минимума энергии вибраций инструмента, находящегося в функциональной зависимости от вариации постоянной времени термодинамической подсистемы системы резания. Рассмотренный в работе механизм минимизации вибрационной активности инструмента при резании позволяет оптимизировать процесс точения металлов по показателю шероховатости обработанной поверхности за счет заблаговременной подготовки инструмента, под которым мы понимаем формирование предварительной площадки контакта инструмента и детали с учетом выбранных элементов резания, при которой его вибрации при точении минимальны.

Список литературы

1. *Grabec I.* Chaos generated by the cutting process // *Physics Letter A.* – 1986. – Vol. 117, N 8. – P. 384–386. – DOI: 10.1016/0375-9601(86)90003-4.
2. *Лапшин В.П., Тюняев Р.А., Христофорова В.В.* Оценка влияния скорости подачи, на равновесные режимы привода обеспечивающего фрезерование заготовки переменной толщины // *Динамика технических систем, ДТС-2015: XII международная научно-техническая конференция.* – Ростов н/Д., 2016. – С. 180–184.
3. *Резников А.Н., Резников Л.А.* Тепловые процессы в технологических системах. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
4. *Рыжжик А.А.* Теплофизические процессы при изнашивании инструментальных режущих материалов. – Ростов н/Д.: Изд. центр ДГТУ, 2005. – 311 с. – ISBN 5-7890-0348-6.
5. Tool wear detection and fault diagnosis based on cutting force monitoring / S.N. Huang, K.K. Tan, Y.S. Wong, C.W. De Silva, H.L. Goh, W.W. Tan // *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* – 2007. – Vol. 47, iss. 3–4. – P. 444–451.
6. Tool condition monitoring in turning using statistical parameters of vibration signal / H. Arslan, A.O. Er, S. Orhan, E. Aslan // *International Journal of Acoustics and Vibration.* – 2016. – Vol. 21, iss. 4. – P. 371–378.
7. *Alonso F.J., Salgado D.R.* Application of singular spectrum analysis to tool wear detection using sound signals // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture.* – 2005. – Vol. 219 (9). – P. 703–710.
8. *Dimla Sr D.E., Lister P.M.* On-line metal cutting tool condition monitoring. I: force and vibration analyses // *International Journal of Machine Tools and Manufacture.* – 2000. – Vol. 40 (5). – P. 739–768. – DOI: 10.1016/S0890-6955(99)00084-X.
9. Tool wear evaluation by vibration analysis during end milling of AISI D3 cold work tool steel with 35 HRC hardness / S. Orhan, A.O. Er, N. Camuşcu, E. Aslan // *NDT & E International.* – 2007. – Vol. 40 (2). – P. 121–126.
10. *Tobias S.A.* *Vibraciones en máquinas-herramientas.* – Bilbao, Spain: Ediciones Urmo, 1961.
11. *Sri Namachchivaya, Beddini.* Spindle speed variation for the suppression of regenerative chatter // *Journal of Nonlinear Science.* – 2003. – Vol. 13, N 3. – P. 265–288. – DOI: 10.1007/s00332-003-0518-4.
12. *Wahi P., Chatterjee A.* Regenerative tool chatter near a codimension 2 Hopf point using multiple scales // *Nonlinear Dynamics.* – 2005. – Vol. 40, N 4. – P. 323–338.
13. *Stépán G., Insperger T., Szalai R.* Delay, parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes // *International Journal of Bifurcation and Chaos.* – 2005. – Vol. 15, N 09. – P. 2783–2798. – DOI: 10.1142/S0218127405013642.
14. Nonlinear behaviour of the regenerative chatter in turning process with a worn tool: forced oscillation and stability analysis / H. Moradi, F. Bakhtiari-Nejad, M.R. Movahhedy, M.T. Ahmadian // *Mechanism and Machine Theory.* – 2010. – Vol. 45, N 8. – P. 1050–1066. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2010.03.014.
15. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays / A.M. Gousov, S.A. Voronov, H. Paris, S.A. Batzer // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation.* – 2002. – Vol. 7, N 4. – P. 207–221. – DOI: 10.1016/S1007-5704(02)00014-X.
16. *Hahn R.S.* On the theory of regenerative chatter in precision grinding operation // *Transactions of American Society of Mechanical Engineers.* – 1954. – Vol. 76. – P. 356–260.
17. *Tobias S.A., Fishwick W.* Theory of regenerative machine tool chatter // *The Engineer.* – 1958. – Vol. 205, N 7. – P. 199–203.
18. *Merritt H.E.* Theory of self-excited machine-tool chatter: contribution to machine-tool chatter research // *Journal of Engineering for Industry.* – 1965. – Vol. 87. – P. 447–454. – DOI: 10.1115/1.3670861.
19. *Balachandran B.* Nonlinear dynamics of milling process // *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences.* – 2001. – Vol. 359 (1781). – P. 793–819.
20. *Stepan G.* Modelling nonlinear regenerative effects in metal cutting // *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences.* – 2001. – Vol. 359. – P. 739–757. – DOI: 10.1098/rsta.2000.07537.
21. *Litak G.* Chaotic vibrations in a regenerative cutting process // *Chaos Solitons and Fractals.* – 2002. – Vol. 13. – P. 1531–1535. – DOI: 10.1016/S0960-0779(01)00176-X.
22. *Гуськов А.М., Воронов С.А., Квашинин А.С.* Влияние крутильных колебаний на процесс вибро-сверления // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение.* – 2007. – № 1 (66). – С. 3–19.
23. *Васин С.А., Васин Л.А.* Синергетический подход к описанию природы возникновения и развития автоколебаний при точении // *Наукоемкие технологии в машиностроении.* – 2012. – № 1. – С. 11–16.
24. *Воронин А.А.* Влияние ультразвуковых колебаний на процесс резания жаропрочных сплавов // *Станки и инструмент.* – 1960. – № 11. – С. 15–18.
25. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of the equilibrium in a dynamic system of cutting / V.L. Zakovorotny, A.D. Lukyanov, A.A. Gubanova, V.V. Khristoforova // *Journal of Sound and Vibration.* – 2016. – Vol. 368. – P. 174–190. – DOI: 10.1016/j.jsv.2016.01.020.

26. *Zakovorotny V.L., Lapshin V.P., Babenko T.S.* Modeling of tool wear: irreversible energy transformations // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38, N 9. – P. 707–708.

27. *Жарков И.Г.* Вибрации при обработке лезвийным инструментом. – Л.: Машиностроение, 1986. – 184 с.

28. *Марков А.И.* Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов. – М.: Машиностроение, 1968. – 367 с.

29. *Макаров А.Д.* Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

30. *Заковоротный В.Л., Флек М.Б.* Динамика процесса резания. Синергетический подход. – Ростов н/Д.: Терра, 2006. – 880 с. – ISBN 5-98254-055-2.

31. *Рыжкин А.А.* Синергетика изнашивания инструментальных режущих материалов (трибоэлектрический аспект). – Ростов н/Д.: Изд. центр ДГТУ, 2004. – 323 с. – ISBN 5-7890-0307-9.

32. Influence of the temperature in the tool–workpiece contact zone on the deformational dynamics in turning / V.P. Lapshin, I.A. Turkin, V.V. Khristoforova, T.S. Babenko // Russian Engineering Research. – 2020. – Vol. 40, N3. – P. 259–265.

33. *Бордачев Е.В., Лапшин В.П.* Математическое моделирование температуры в зоне контакта инструмента и изделия при токарной обработке металлов // Вестник Донского государственного технического университета. – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 130–137. – DOI: 10.23047/1992-5980-2019-19-2-130-137.

34. *Лапшин В.П., Христофорова В.В., Носачев С.В.* Взаимосвязь температуры и силы резания с износом и вибрациями инструмента при токарной обработке металлов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 44–58. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Evaluation of the influence of the reaction rate of the thermodynamic subsystem on the dynamics of the cutting process in metalworking

Victor Lapshin^{a, *}, Roman Rusanovsky^b, Ilya Turkin^c

Don State Technical University, 1 Gagarin square, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-5114-0316>, lapshin1917@yandex.ru, ^b <http://orcid.org/0000-0001-9408-5188>, zames161@yandex.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0003-4792-4959>, tur805@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 14 January 2021

Revised: 24 February 2021

Accepted: 14 April 2021

Available online: 15 June 2021

Keywords:

Nonlinear dynamics

Vibrations

Cutting process

Cutting temperature

Funding

This study was performed with financial support of RFBR grant № 19-08-00022.

ABSTRACT

Introduction. Modern metalworking machines with CNC, allow to achieve a qualitatively new level of metal processing by cutting in metal turning. At the same time, it is possible to achieve the required shape, dimensional accuracy, as well as the relative position of the surfaces of the part, but such an indicator of the processing quality as the roughness of the treated surface, associated with the vibration activity of the tool, does not always meet the specified requirements. The factor determining the vibration mode of cutting in a metal-cutting lathe is the self-excitation factor of the cutting system, which is caused by additional feedbacks formed during the cutting process, one of which is the thermodynamic subsystem of the cutting system, which is the **subject of research**. **Purpose of the work:** due to the formation of a consistent model of the relationship between the subsystems that describe the force, heat and vibration reactions of the tool, an adequate description of the mechanism for reducing the vibration load on the cutting process is obtained. The paper studies the process of metal turning on metal-cutting machines with a detailed description of the interaction between the thermodynamic, power and vibration subsystems of the cutting system. **Research methods:** full-scale and numerical experiments in which the Matlab package of mathematical programs is used for data processing and analysis. **Results and discussion.** The results of full-scale and numerical experiments are presented, in particular, graphs of coordinate changes describing tool deformation, and data sets are obtained that reflect the dependence of the vibrational energy of tool movements on the reaction time of the thermodynamic subsystem of the cutting system. A qualitative assessment of the results of a full-scale experiment allows us to confirm the adequacy of both the model itself and the results of its modeling. The scope of application of the results obtained in the study is related to the possibility of preliminary preparation of the cutting wedge, which will provide a set value of the time constant of the thermodynamic subsystem, which in turn ensures the minimization of vibration energy. **Conclusion:** the mathematical model proposed in this paper adequately describes the mechanism of temperature influence on the vibration load of the turning process.

For citation: Lapshin V.P., Rusanovsky A.V., Turkin I.A. Evaluation of the influence of the reaction rate of the thermodynamic subsystem on the dynamics of the cutting process in metalworking. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 2, pp. 17–30. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.2-17-30. (In Russian).

References

1. Grabec I. Chaos generated by the cutting process. *Physics Letter A*, 1986, vol. 117, no. 8, pp. 384–386. DOI: 10.1016/0375-9601(86)90003-4.
2. Lapshin V.P., Tyunyaev R.A., Khristoforova V.V. [Evaluation of the effect of the feed rate on the equilibrium modes of the drive providing milling of the workpiece of variable thickness]. *Dinamika tekhnicheskikh sistem, DTS-2015* [Dynamics of technical systems], Rostov-on-Don, 2016, pp. 180–184. (In Russian).
3. Reznikov A.N., Reznikov L.A. *Teplovye protsessy v tekhnologicheskikh sistemakh* [Thermal processes in technological systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 288 p.

* Corresponding author

Lapshin Viktor P., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Don State Technical University,
 1 Gagarin square
 344000, Rostov-on-don, Russian Federation
 Tel.: 8 (900) 122-75-14, e-mail: lapshin1917@yandex.ru

4. Ryzhkin A.A. *Teplofizicheskie protsessy pri iznashivanii instrumental'nykh rezhushchikh materialov* [Thermophysical processes during wear of tool cutting materials]. Rostov-on-Don, DSTU Publ., 2005. 311 p. ISBN 5-7890-0348-6.
5. Huang S.N., Tan K.K., Wong Y.S., De Silva C.W., Goh H.L., Tan W.W. Tool wear detection and fault diagnosis based on cutting force monitoring. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, vol. 47, iss. 3–4, pp. 444–451.
6. Arsla H., Er A.O., Orhan S., Aslan E. Tool condition monitoring in turning using statistical parameters of vibration signal. *International journal of acoustics and vibration*, 2016, vol. 21, iss. 4, pp. 371–378.
7. Alonso F.J., Salgado D.R. Application of singular spectrum analysis to tool wear detection using sound signals. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2005, vol. 219 (9), pp. 703–710.
8. Dimla Sr D.E., Lister P.M. On-line metal cutting tool condition monitoring. I: force and vibration analyses. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, vol. 40 (5), pp. 739–768. DOI: 10.1016/S0890-6955(99)00084-X.
9. Orhan S., Er A.O., Camuşcu N., Aslan E. Tool wear evaluation by vibration analysis during end milling of AISI D3 cold work tool steel with 35 HRC hardness. *NDT & E International*, 2007, vol. 40 (2), pp. 121–126.
10. Tobias S.A. *Vibraciones en Máquinas-Herramientas* [Machine tools vibrations]. Bilbao, Spain, Ediciones Urmo, 1961.
11. Sri Namachchivaya, Beddini. Spindle speed variation for the suppression of regenerative chatter. *Journal of Nonlinear Science*, 2003, vol. 13, no. 3, pp. 265–288. DOI: 10.1007/s00332-003-0518-4.
12. Wahi P., Chatterjee A. Regenerative tool chatter near a codimension 2 Hopf point using multiple scales. *Nonlinear Dynamics*, 2005, vol. 40, no. 4, pp. 323–338.
13. Stépán G., Insperger T., Szalai R. Delay, parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2005, vol. 15, no 9, pp. 2783–2798. DOI: 10.1142/S0218127405013642.
14. Moradi H., Bakhtiari-Nejad F., Movahhedy M.R., Ahmadian M.T. Nonlinear behaviour of the regenerative chatter in turning process with a worn tool: Forced oscillation and stability analysis. *Mechanism and Machine Theory*, 2010, vol. 45, no. 8, pp. 1050–1066. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2010.03.014.
15. Gousskov A.M., Voronov S.A., Paris H., Batzer S.A. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2002, vol. 7, no. 4, pp. 207–221. DOI: 10.1016/S1007-5704(02)00014-X.
16. Hahn R.S. On the theory of regenerative chatter in precision grinding operation. *Transactions of American Society of Mechanical Engineers*, 1954, vol. 76, pp. 356–260.
17. Tobias S.A., Fishwick W. Theory of regenerative machine tool chatter. *The Engineer*, 1958, vol. 205, no. 7, pp. 199–203.
18. Merritt H.E. Theory of self-excited machine-tool chatter: contribution to machine-tool chatter research. *Journal of Engineering for Industry*, 1965, vol. 87, pp. 447–454. DOI: 10.1115/1.3670861.
19. Balachandran B. Nonlinear dynamics of milling process. *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2001, vol. 359 (1781), pp. 793–819.
20. Stepan G. Modelling nonlinear regenerative effects in metal cutting. *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2001, vol. 359, pp. 739–757. DOI: 10.1098/rsta.2000.07537.
21. Litak G. Chaotic vibrations in a regenerative cutting process. *Chaos Solitons and Fractals*, 2002, vol. 13, pp. 1531–1535. DOI: 10.1016/S0960-0779(01)00176-X.
22. Gousskov A.M., Voronov S.A., Kvashnin A.S. Vliyanie krutil'nykh kolebaniy na protsess vibrosverleniya [Influence of torsion vibrations on process of vibration-drilling]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2007, no. 1 (66), pp. 3–19.
23. Vasin S.A., Vasin L.A. Sinergeticheskii podkhod k opisaniyu prirody vozniknoveniya i razvitiya avtokolebaniy pri tochenii [Synergetic approach to describing the nature and development of self-oscillations in turning]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2012, no. 1, pp. 11–16.
24. Voronin A.A. Vliyanie ul'trazvukovykh kolebaniy na protsess rezaniya zharoprochnykh splavov [Influence of ultrasonic vibrations on the cutting process of heat-resistant alloys]. *Stanki i instrument = Machines and Tools*, 1960, no. 11, pp. 15–18.

25. Zakovorotny V.L., Lukyanov A.D., Gubanova A.A., Khristoforova V.V. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of the equilibrium in a dynamic system of cutting. *Journal of Sound and Vibration*, 2016, vol. 368, pp. 174–190. DOI: 10.1016/j.jsv.2016.01.020.
26. Zakovorotny V.L., Lapshin V.P., Babenko T.S. Modeling of tool wear: irreversible energy transformations. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, no. 9, pp. 707–708.
27. Zharkov I.G. *Vibratsii pri obrabotke lezviinym instrumentom* [Vibrations when processing with a blade tool]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986. 184 p.
28. Markov A.I. *Ul'trazvukovoe rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov* [Ultrasonic cutting of hard-to-process materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 367 p.
29. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 278 p.
30. Zakovorotny V.L., Flek M.B. *Dinamika protsessa rezaniya. Sinergeticheskii podkhod* [Dynamics of the cutting process. Synergetic approach]. Rostov-on-Don, Terra Publ., 2006. 880 p. ISBN 5-98254-055-2.
31. Ryzhkin A.A. *Sinergetika iznashivaniya instrumental'nykh rezhushchikh materialov (triboelektricheskii aspekt)* [Synergetics of wear of tool cutting materials (triboelectric aspect)]. Rostov-on-Don, DSTU Publ., 2004. 323 p. ISBN 5-7890-0307-9.
32. Lapshin V.P., Turkin I.A., Khristoforova V.V., Babenko T.S. Influence of the temperature in the tool–workpiece contact zone on the deformational dynamics in turning. *Russian Engineering Research*, 2020, vol. 40, no. 3, pp. 259–265.
33. Bordachev E.V., Lapshin V.P. Matematicheskoe modelirovanie temperatury v zone kontakta instrumenta i izdeliya pri tokarnoi obrabotke metallov [Mathematical modeling of the temperature in the contact zone of the tool and product during metal turning]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Don State Technical University*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 130–137. DOI: 10.23047/1992-5980-2019-19-2-130-137.
34. Lapshin V.P., Khristoforova V.V., Nosachev S.V. Vzaimosvyaz' temperatury i sily rezaniya s iznosom i vibratsiyami instrumenta pri tokarnoi obrabotke metallov [Relationship of temperature and cutting force with tool wear and vibration in metal turning]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 44–58. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).