



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Взаимосвязь температуры и силы резания с износом и вибрациями инструмента при токарной обработке металлов

Виктор Лапшин^{а, *}, Вероника Христофорова^б, Сергей Носачев^с

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

^а <https://orcid.org/0000-0002-5114-0316>, lapshin1917@yandex.ru, ^б <https://orcid.org/0000-0002-8611-1152>, nikaapp@rambler.ru,

^с <https://orcid.org/0000-0003-0302-2937>, nosachev-s@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 531.39

История статьи:

Поступила: 29 апреля 2020
 Рецензирование: 12 мая 2020
 Принята к печати: 07 июня 2020
 Доступно онлайн: 15 сентября 2020

Ключевые слова:

Нелинейная динамика
 Вибрации
 Процесс резания
 Температура резания

Финансирование:

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Процессы, протекающие в станке при резании металлов, взаимосвязаны друг с другом. В процессе резания сложная динамика обработки включает в себя как быстроизменяющиеся факторы, так и факторы, носящие более эволюционный (медленный) характер. Под такими факторами подразумеваем: изменения стационарных составляющих сил резания, температуры в зоне обработки и износ инструмента. На сегодня единой и непротиворечивой математической модели, описывающей такую взаимосвязь, не существует. Поэтому в статье предложен подход, основанный на обработке экспериментальных данных, полученных в серии экспериментов, позволяющий выявить структуру обратных связей, формируемых при резании и связывающих между собой подсистемы, описывающие силовую, тепловую и вибрационную реакцию со стороны процесса резания на формообразующие движения инструмента. **Цель работы.** За счет формирования непротиворечивой модели связи между подсистемами, описывающими силовую, тепловую и вибрационную реакцию со стороны процесса резания на формообразующие движения инструмента, получить описание механизма самоорганизации процесса резания в процессе эволюционных изменений инструмента. Такой механизм нужен для поиска некоторого режима функционирования системы резания, при котором может стабилизироваться дальнейший износ режущего клина, сила резания, температура в зоне резания и вибрации инструмента. **В работе исследован** процесс обработки металлов резанием на токарном станке для случая продольного точения изделия. **Методы исследования.** Исследования состоят из серии натурных экспериментов на реальном оборудовании с использованием современного измерительного стенда STD.201-1, позволяющего одновременно измерять силовую, температурную и вибрационную составляющие реакции со стороны процесса резания на формообразующие движения инструмента. Для обработки и анализа полученных экспериментальных данных использовался пакет математических программ Matlab, в котором была разработана подпрограмма, позволяющая провести спектральный анализ вибрационных сигналов, а также графическую интерпретацию измеренных величин. **Результаты и обсуждение.** Приведены результаты обработки экспериментальных данных, в частности спектры вибрационных сигналов, получены зависимости сил и температуры от износа инструмента, а также выявлено влияние износа на вибрационную динамику процесса резания. Проведена оценка влияния энергии вибраций инструмента на температурное поле в зоне резания. Основным выводом по работе является выдвинутое нами положение о самоорганизации системы резания через процесс эволюции инструмента, выражающийся в износе режущего клина, целью которого служит формирование некоторого квазистационарного режима резания.

Для цитирования: 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.

Введение

Современные технологии обработки металлов на металлорежущих станках на сегодняшний день являются одной из самых развивающихся отраслей науки и техники. Например, металлорежущие станки, производимые такими крупными компаниями, как Siemens и Fanuc Co., Ltd., содержат в себе самые передовые подходы к разработке и построению автоматических и

*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

автоматизированных систем. Во многом современная база металлорежущих станков по своей научной и инженерной сложности не уступает такой отрасли, как космонавтика. В металлообработке в настоящее время наиболее полно реализуется цифровой подход к управлению и контролю процессов обработки, что объясняется широким внедрением систем цифрового контроля (датчики) и систем обработки получаемых от них данных. Благодаря этому подходу становится возможным использование при анализе процесса резания на конкретном станке более сложных моделей, чем те, что использовались ранее. Здесь перспективным направлением контроля качества процесса обработки являются бурно развивающиеся системы вибромониторинга и вибродиагностики [1–5]. В связи с этим возникает задача описания связи вибраций, измеряемых в процессе резания с неизмеряемыми, но представляющими инженерный интерес характеристиками, такими, как силовая реакция и температура в зоне контакта инструмента и обрабатываемого изделия.

В современном представлении вибраций, возникающих при резании, принято их разделять на три составляющие: свободные, вынужденные и самовозбуждающиеся колебания [6]. Свободные колебания связаны с добротностью системы резания и являются реакцией на изменения в процессе обработки; вынужденные колебания обусловлены внешними воздействиями, такими, к примеру, как биения в подшипниках шпиндельного узла, вибрациями корпуса станка или биениями в ШВП. Для борьбы со свободными и вынужденными вибрациями сегодня разработано много инженерных методов, а вот с самовозбуждающимися колебаниями, которые могут извлекать энергию из взаимодействия, возникающего в зоне резания, однозначных инженерных решений на настоящий момент нет. Это делает тематику самовозбуждающихся колебаний при резании очень популярной в современных научных исследованиях [7–11]. Однако в указанных работах главный упор делается на оценку влияния на колебания инструмента, т. е. так называемый регенеративный эффект. Впервые регенерацию колебаний при обработке металлов на металлорежущих станках исследовали *Hahn R.S.*, *Tobias S.A.* и *Merritt H.E.* [12–14]. Работы этих авторов являются фундаментальным базисом,

лежащим в основе анализа динамики регенеративных вибраций инструмента при резании. Во многих работах отмечается возможность установления хаотического характера вибраций инструмента при регенерации колебаний [15–18]. В этих работах указывается, что главным фактором, влияющим на регенеративный эффект, является так называемая временная задержка “time delay”, именно она определяет динамику процесса регенерации колебаний инструмента.

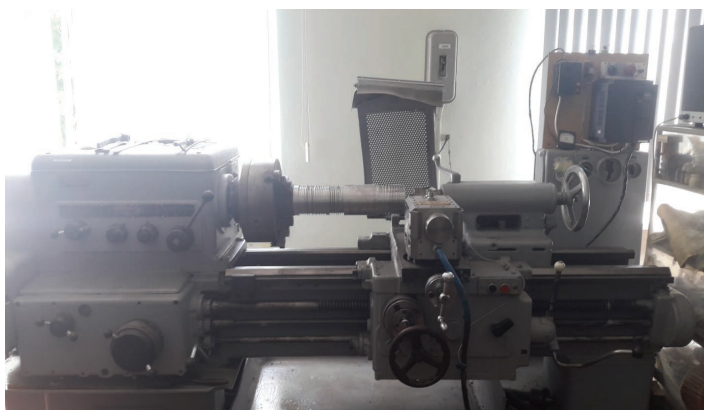
В российской научной публицистике, посвященной самовозбуждающимся колебаниям (вибрациям) инструмента при обработке металлов резанием, вопросы оценки влияния резания по «следу» на динамику вибраций инструмента рассматриваются косвенно. Больше внимания уделяется построению и анализу моделей, описывающих взаимосвязанную динамику процесса обработки [19–21]. К примеру, в ранее опубликованных нами работах [22–25], анализ динамики деформационных вибраций инструмента производится на основе связанности через силовую реакцию этого деформационного движения с элементами резания системы ЧПУ станка. В этом случае динамические эффекты, возникающие при моделировании, по нашему мнению, более точно отражают природу взаимодействия подсистем системы управления резанием в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали. В фундаментальных работах ведущих советских и российских ученых, изучающих вибрационную динамику процесса резания [26–30], отмечается тот факт, что в процессе резания помимо обратной связи по силе резания, в которой и учитывается регенерация колебаний при резании по «следу», формируется термодинамическая обратная связь, которая также зависит от вибрационной активности инструмента и износа режущего клина [26–30]. Таким образом, речь идет о том, что в реальном процессе обработки наблюдается достаточно сложное взаимодействие, включающее в себя формирование множества зависящих друг от друга обратных связей. Приведем такой пример рассуждений о возможности самовозбуждения системы резания: изменение силы резания приводит к изменению температуры в зоне резания и изменению вибрационной активности инструмента [26, 28]. Одновременно вибрационная активность связана с температурой в

зоне контакта [2, 27] и износом инструмента [24, 30], износ инструмента при этом влияет на динамическую и статическую составляющие силы резания [4, 28], и здесь же надо учитывать влияние температуры на процесс формирования износа [30]. Такое взаимодействие в процессе обработки говорит о сложной нелинейной динамике вибраций инструмента [30], позволяющей связать через адекватное математическое представление измеряемые в процессе обработки характеристики с интересующими нас, но не измеряемыми характеристиками. В своей работе [31] мы привели пример моделирования влияния температуры в зоне резания на силу резания с учетом нелинейного влияния температуры на предел прочности на разрыв металла обрабатываемой детали. В настоящей работе мы поставили более амбициозную цель: разработать и представить математический аппарат, позволяющий адекватно (экспериментальным данным) описывать влияние силовой, вибрационной и эволюционной (износ режущего клина) составляющей процесса обработки на температурное поле, формируемое в контакте инструмента и обрабатываемой детали. При этом математическая модель, описывающая это температурное поле, должна учитывать сложную взаимосвязанность процесса резания, воспринимаемого как единая система, включающая в себя силовую, температурную, вибрационную подсистему.

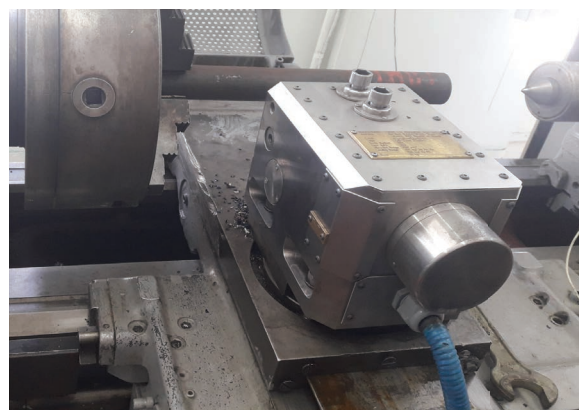
Методика исследований

С целью определения взаимосвязи между износом, измеряемым температурным полем в зоне обработки, силовой реакцией и вибрациями инструмента при токарной обработке металлов, нами была проведена серия натурных экспериментов на токарном станке 1K625 (рис. 1, а) с установленным на нем стендом для исследования режимов резания при токарной обработке STD.201-1 (рис. 1, б).

Отметим, что представленный на рис. 1 станок ранее был модернизирован, управление двигателем, обеспечивающим режимы работы на станке, переведено на частотное регулирование, частотный регулятор представлен в правом верхнем углу рис. 1, а. Благодаря этому появилась возможность плавной подстройки скорости резания внутри выбранного режима работы станка, элементы этого режима в эксперименте были следующими: скорость резания $V = 124$ м/мин, подача $S = 0.11$ мм/об, глубина резания $t_p = 1$ мм, которые на весь период эксперимента резания оставались неизменными. В качестве инструмента была использована державка MP TNR 2020 K11 и резцом на ней была пятигранная пластина 10113-110408 T15K6, обработке подвергался вал из стали марки 45. Более подробно сам эксперимент и его результаты описаны в наших более ранних работах [32, 33].



а



б

Рис. 1. Экспериментальное оборудование:
а – станок 1K625; б – измерительный стенд STD.201-1

Fig. 1. Experimental equipment:
а – machine 1K625; б – measuring stand STD. 201-1

Износ инструмента в эксперименте оценивался по задней грани, для этого после каждого шага обработки делалась фотография режущего клина, примеры таких фотографий показаны на рис. 2.

На рис. 2, *а* и *б* представлены увеличенные фотографии режущей пластины, прошедшей предварительную приработку, при этом на рис. 2, *а* акцент в фотографии сделан на задней грани пластины, а на рис. 2, *б* – на передней грани (режущая кромка). Как видно из этих фотографий, износ инструмента по задней грани только формируется, однако наблюдается как термический ожог, так и некоторая приработка контактирующей поверхности. Что касается режущего клина, то здесь изменений нет вообще, т. е. условия резания не меняются. На рис. 2, *в* и *г* показаны задняя поверхность критически изношенной пластины и состояние режущего клина. На этих фотографиях видно, что износ по задней грани существенно изменился по сравнению с предыдущим случаем, здесь он

около 0.45 мм, а также видно, что существенно изменился режущий клин, часть которого буквально вырезана, что позволяет говорить о новых условиях резания.

Часть результатов эксперимента представлена на рис. 3, где в качестве примера приведены измеренная сила в направлении оси подачи (осевая составляющая), а также измеренная в этом же эксперименте температура в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали, к сожалению, привести все полученные результаты нам не позволяет объем статьи.

Как видно из рис. 3, *а*, стабилизация силы резания происходит за время, близкое к одной секунде, время стабилизации температуры в зоне контакта немного больше и оно ближе уже к двум секундам.

Результаты обработки данных о силовой реакции и температуре в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали за все время эксперимента, а также развитие износа режущего клина представлены на рис. 4.

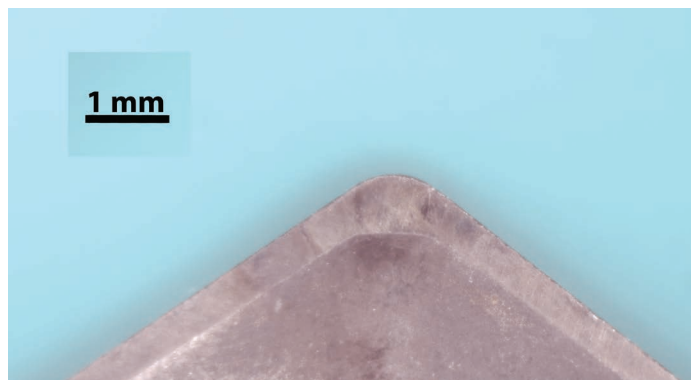
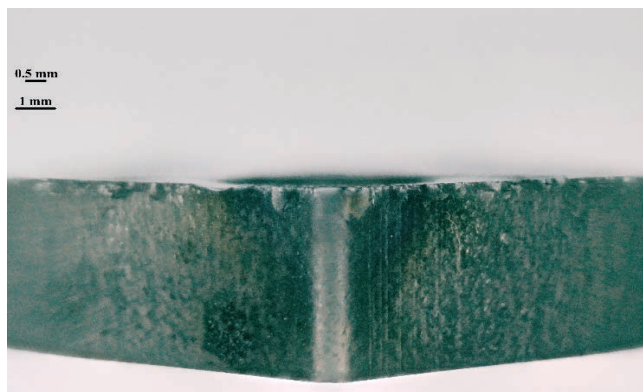
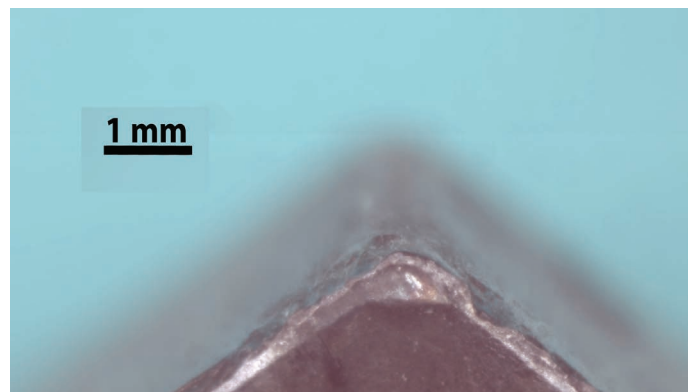
*а**б**в**г*

Рис. 2. Фотографии режущей пластины 10113-110408 T15K6

Fig. 2. Photos of the cutting plate 10113-110408 T15K6

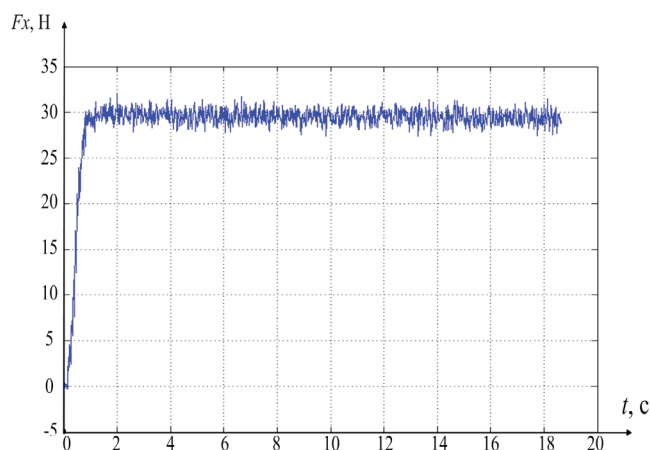
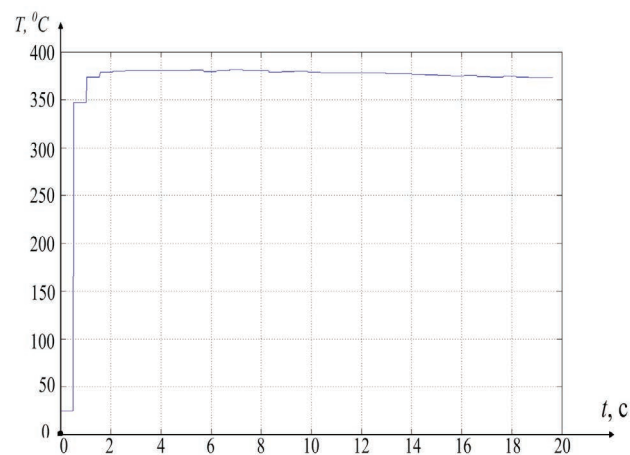

a

б

Рис. 3. Измеренные:

a – силовые; *б* – температурные характеристики процесса резания

Fig. 3. Measured:

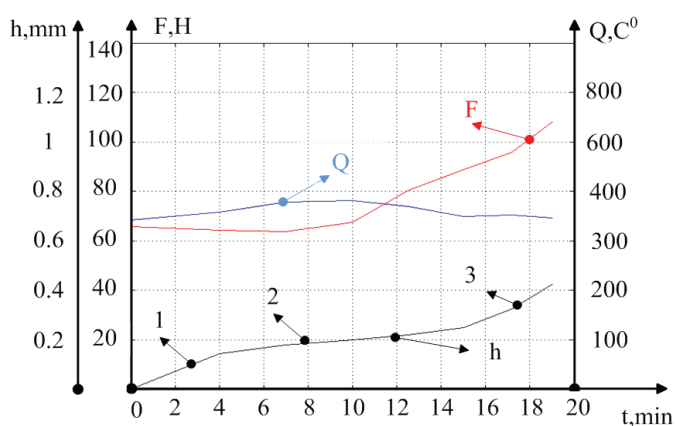
a – power; *б* – temperature characteristics of the cutting process


Рис. 4. Результаты обработки данных за все время эксперимента

Fig. 4. Results of data processing for the entire time of the experiment

На рис. 4 изображены три графика: график износа инструмента, график изменения среднего значения температуры и график изменения среднего значения суммарной силы резания. Как видно из этого рисунка, на этапе приработки инструмента, характеризующегося стабилизацией скорости износа (участок 2 кривой *h*), наблюдается прирост температуры в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали, а также некоторая стабилизация и даже небольшое падение силы резания. Для анализа влияния износа инструмента и изменений температуры на силовую реакцию со стороны процесса резания

на формообразующие движения инструмента рассмотрим графики изменения сил резания как функции от величины износа (рис. 5).

Из рис. 5, где представлены составляющие силы резания, видно, что наибольшему влиянию на этапе приработки инструмента (рис. 4, участок 2 кривой *h*) подвергается именно сила резания. В связи с этим справедливо следующее наблюдение: формирование первичной площадки контакта задней грани инструмента и обрабатываемой детали в процессе приработки приводит к росту температуры как в зоне этого контакта, так и в зоне первичной пластической деформации, в результате чего наблюдается стабилизация составляющих силы резания F_y и F_x и даже некоторое падение главной составляющей силы

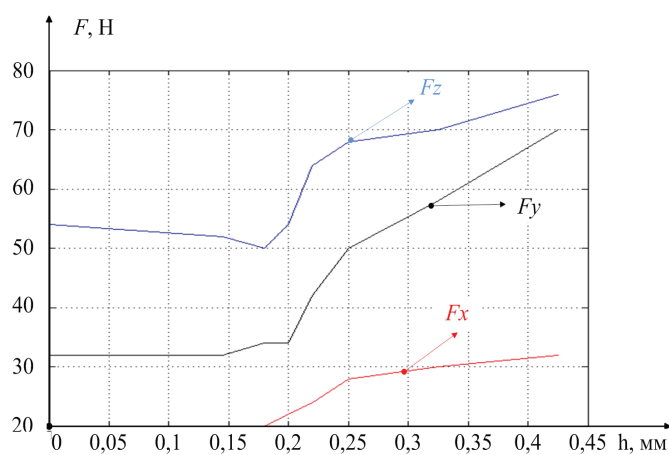


Рис. 5. Составляющие силы резания

Fig. 5. Components of the cutting force

резания F_z . Переход силы резания к росту после достижения величины износа режущего клина значения больше чем 0.25 мм связан с изменением условий резания. Следовательно, здесь при износе задней грани выше некоторого значения, которое обозначают как критическое, начинается резкий рост силовой реакции. По нашему мнению, это связано с тем, что при этой величине износа начинает срезаться передняя режущая кромка инструмента (см. рис. 2, *з*), что существенно влияет на условия формирования силовой реакции со стороны процесса обработки на формообразующие движения инструмента.

Проведенный выше анализ не дает ответа на важный вопрос: за счет чего на этапе приработки инструмента (участок 2 кривой износа, рис. 4) происходит рост температуры в зоне контакта инструмента и обрабатываемой дета-

ли, так как силы резания не растут, а также не растет скорость обработки, т. е. не наблюдается роста выделяемой здесь мощности. Очевидный ответ на этот вопрос дает именно сформированная в результате приработки инструмента площадка контакта по задней грани. Однако с увеличением износа инструмента (рис. 4, участок 3 кривой h) температура в зоне контакта даже несколько падает, а сила резания начинает увеличиваться. Вместе с силой должна расти мощность необратимых преобразований в зоне резания и, как следствие, температура. Для объяснения этого феномена рассмотрим измеренные нами в этом эксперименте вибрации инструмента в направлении подачи, отметим при этом, что в остальных направлениях вибрационная активность инструмента не отличается от показанной на рис. 6.

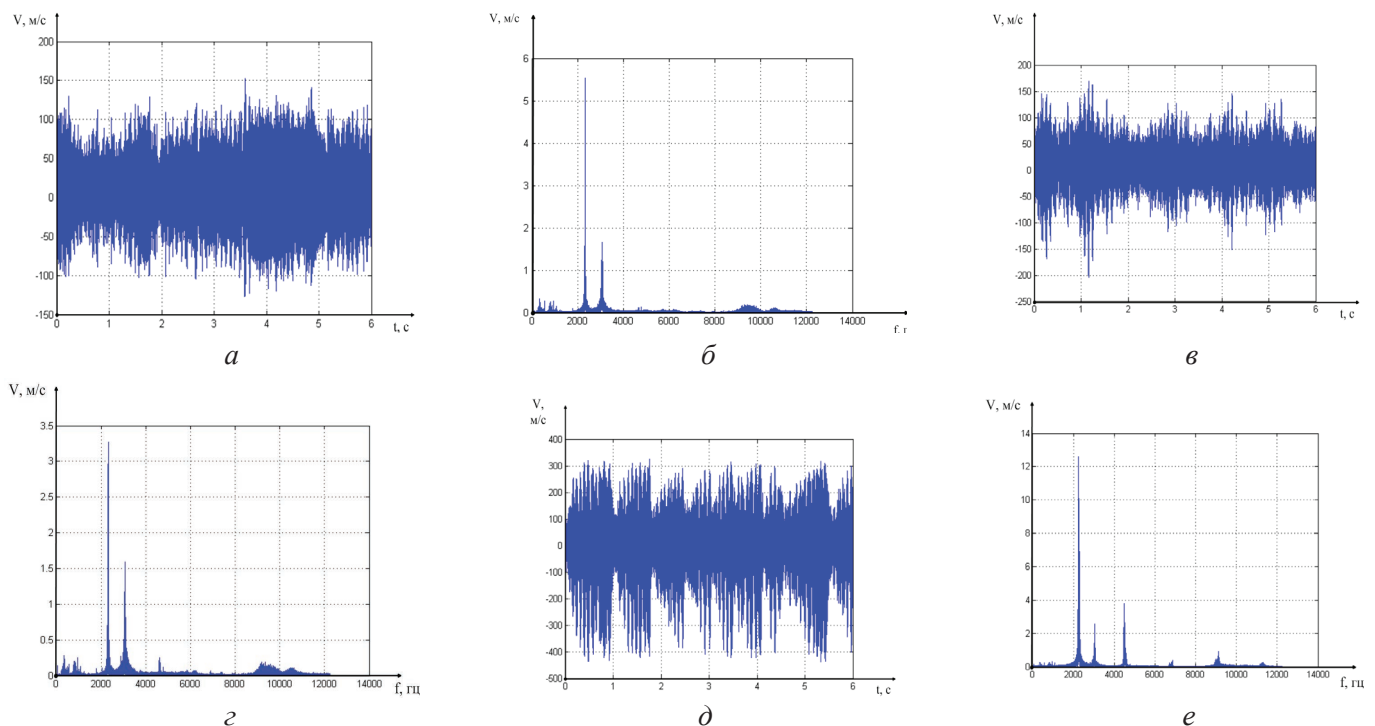


Рис. 6. Вибрации инструмента в направлении оси x :

а – виброскорость при резании неизношенным инструментом (участок 1 на графике $h(t)$, рисунок 5); *б* – амплитудный спектр виброскорости для случая резания неизношенным инструментом (участок 1 на графике $h(t)$, рис. 5); *в* – виброскорость при резании для случая инструмента, получившего некоторую приработку (участок 2 на графике $h(t)$, рис. 5); *г* – амплитудный спектр виброскорости для случая резания приработанного инструмента (участок 2 на графике $h(t)$, рис. 5); *д* – виброскорость при резании для случая инструмента, имеющего критический износ (участок 3 на графике $h(t)$, рис. 5); *е* – амплитудный спектр виброскорости для случая резания инструментом с износом близким к критическому (участок 3 на графике $h(t)$, рис. 5)

Fig. 6. Vibration of the tool in the direction of x -axis:

a – the velocity when the cutting tool is not worn (plot 1 on the graph $h(t)$, fig. 5); *б* – amplitude spectrum of vibration velocity for the case of unworn cutting tool (area 1 on the graph $h(t)$, fig. 5); *в* – the velocity when cutting for tool case that got some alignment (section 2 on the graph of $h(t)$, fig. 5); *г* – amplitude spectrum of vibration velocity for the case of cutting the run-in tool (section 2 on the graph of $h(t)$, fig. 5); *д* – the velocity when cutting for tool case, having critical wear (section 3 on the graph $h(t)$, fig. 5); *е* – the amplitude spectrum of vibration velocity for the case of cutting with a tool with wear close to the critical (section 3 on the graph $h(t)$, fig. 5)

Как видно из рис. 6, в начале обработки инструмент не приработан и амплитуда колебаний на рис. 6, а достигает на максимуме 150 м/с, а спектральный анализ этого сигнала (рис. 6, в) показывает мощность вибраций на основной частоте колебаний почти в 6 м/с. После приработки максимальная амплитуда вибраций превышает 150 м/с, но мощность сигнала вибраций на основной частоте в спектре сигнала не превышает 3.5 м/с, а в случае вибрации при резании сильно изношенным инструментом (рис. 6, е и д) мощность спектра вибраций на основной частоте превышает 12 м/с, а амплитуда (рис. 6, е) достигает 300 м/с.

Для численной оценки энергии вибрационного сигнала вибраций инструмента введем следующий интегральный показатель:

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

где VA – можно интерпретировать, как фоновый шум сигнала, или энергию вибрационного сигнала за период наблюдения (эксперимента) – T_v , при этом для случая, представленного на рис. 6, а, $VA = 30.29$ м/с, для случая, показанного на рис. 6, в, $VA = 21$ м/с, а для случая, представленного на рис. 6, д, $VA = 107$ м/с. Как видно из расчетных значений энергии вибрационного сигнала, при приработке энергия вибрационного сигнала падает почти в полтора раза, а при из-

носе инструмента выше критического энергия вибрационного сигнала вырастает почти в пять раз относительно приработанного значения.

Результаты и их обсуждение

Результаты проведенного эксперимента позволяют нам связать между собой температуру в зоне резания, вибрационную активность инструмента и износ по задней грани режущего клина. Для этого предварительно рассмотрим механизм передачи температуры через заднюю грань инструмента при точении металлов в металлорежущих станках (рис. 7). Надо отметить, что более подробно математику формирования движущегося вместе с инструментом температурного поля мы описали в серии своих статей, опубликованных ранее [34, 35].

Как видно из рис. 7, сформированная в процессе обработки задняя грань контактирует при резании с той частью обрабатываемого изделия, которая будет подвергаться точению через период вращения шпинделя. Из рис. 3, б мы видим, что температура в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали стабилизируется примерно через 1-2 с резания, за это время прогревается инструмент, температурное поле в нем достигает максимума, который (максимум) здесь и остается в процессе всего резания. Именно сформированный и поддерживаемый при резании в инструменте максимум

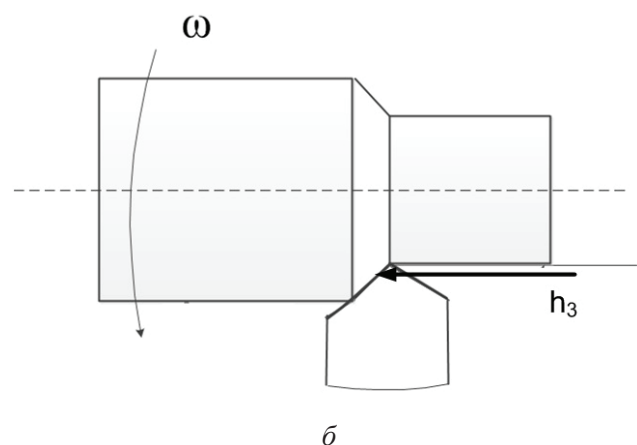
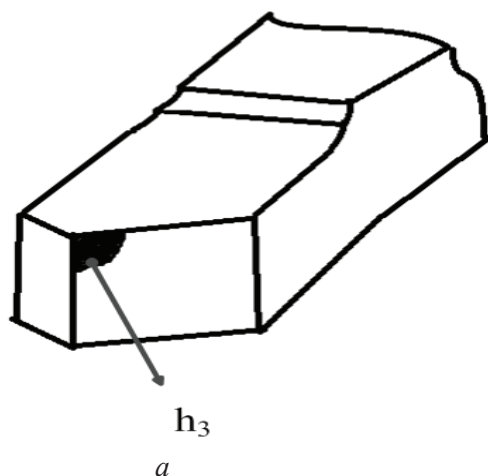


Рис. 7. Механизм передачи температуры при резании через заднюю грань инструмента:

а – сформированная задняя грань; б – контакт задней грани при резании

Fig. 7. Mechanism of temperature transfer during cutting through the back face of the tool:

а – formed back face; б – contact of the back face during cutting

температурного поля обеспечивает в процессе дальнейшей обработки направленность температурного градиента в сторону инструмента. Отметим, что он достаточно велик по модулю, а тепловой поток направлен в ту часть обрабатываемой детали, которая будет подвергаться точению через период вращения шпинделя. Благодаря этому происходит предварительный прогрев зоны резания за счет выделенной ранее при резании температуры. Таким образом, вся ранее выделенная при обработке температура через сформированную площадкой контакта по задней грани влияет на текущую температуру в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали. Этот процесс можно описать при помощи математического аппарата, основанного на операторе Вольтерра второго рода. Однако напрямую использовать оператор Вольтерра не представляется возможным в связи со сложностью описания распространения температуры в металлах, поэтому примем в качестве базовой модели мультипликативный критерий оценки влияния предыдущего прироста температуры на текущее ее значение в виде следующего двойного интеграла:

$$Q_z = Q_s + k_Q \int_0^{L(t)} e^{\frac{\alpha_1}{\lambda}(\gamma-L)} \times \times d\gamma \int_0^t e^{\frac{\alpha_2}{T_h}(\eta-t)} N(\eta) d\eta. \quad (2)$$

где α_1, α_2 – безразмерные масштабирующие параметры интегрального оператора, подлежащие идентификации; λ – коэффициент температуропроводности; Q_z – значение температуры в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали; Q_s – температура окружающей среды; k_Q – коэффициент, характеризующий преобразование выделенной в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали мощности необратимых преобразований в температуру; $L(t)$ – путь, пройденный инструментом при резании; $N(\eta)$ – мощность, выделенная в контакте инструмента и обрабатываемой детали при резании. Что касается T_h , то это некоторая постоянная, которая имеет размерность времени, в нашем случае – времени взаимо-

действия задней грани инструмента и обрабатываемой детали. Эта постоянная, исходя из обработанных данных и высказанного ранее наблюдения, будет прямо пропорциональна величине износа по задней грани и обратно пропорциональна энергии вибраций инструмента в направлении резания. Она будет иметь следующий вид:

$$T_h = \frac{h_3}{VA}, \quad (3)$$

где VA – энергия вибрационного сигнала, рассчитанная по формуле (1); h_3 – величина износа инструмента по задней грани. Фактически эта постоянная тем больше, чем больше износ и меньше вибрационная активность инструмента. Отметим, что интегральный оператор имеет решение для случая, когда мощность необратимых преобразований является величиной постоянной, $N_0 = N(t)$:

$$Q_z = Q_s + \frac{k_Q N_0 \lambda T_h}{\alpha_1 \alpha_2} \times \times \left(1 - e^{-\frac{\alpha_1}{\lambda} L}\right) \left(1 - e^{-\frac{\alpha_2}{T_h} t}\right). \quad (4)$$

В целом влияние введенной постоянной на температуру в зоне обработки можно описать следующим образом: чем больше значение T_h , тем сильнее влияние на текущую температуру в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали, ранее выделенной при резании температуры, и чем меньше T_h , тем меньше такое влияние. Иными словами, чем больше T_h , тем выше температура в зоне обработки. Аналогичные рассуждения справедливы и для λ -коэффициента температуропроводности, здесь дополнительного пояснения не требуется, поскольку этот коэффициент напрямую входит в уравнение Фурье, и чем больше этот коэффициент, тем сильнее влияние градиента температуры на величину теплового потока, направленного в обрабатываемую деталь.

Опираясь на полученный математический аппарат (см. выражение (2)), мы промоделировали интегральный оператор на данных, полученных экспериментально, однако для этого был переделан, интегральный оператор в дискретный вид так, как это представлено в выражении

$$Q_z^n = \frac{k_Q e^{-\frac{\alpha_1}{\lambda} L(t_n)} e^{-\frac{\alpha_2}{T_h} t_n}}{\alpha_1 \alpha_2} \times \left[N_2 \left(e^{\frac{\alpha_1}{\lambda} L(t_2)} - e^{\frac{\alpha_1}{\lambda} L(t_1)} \right) \times \left(e^{\frac{\alpha_2}{T_h} t_2} - e^{\frac{\alpha_2}{T_h} t_1} \right) + \dots \right], \quad (5)$$

где N_2 , N_3 – расчетные значения мощности, полученные умножением измеренного значения силы на скорость обработки; t_n – последняя из выборки дискрета времени обработки; $L(t_n)$ – последнее из выборки значение пройденного инструментом пути.

Результаты моделирования дискретной суммы (5) на полученных в эксперименте данных в сравнении с экспериментальной характеристикой, измеренной в зоне резания температуры, представлены на рис. 8.

Как видно из рис. 8, предлагаемый подход к моделированию температуры в зоне обработки металлов на металлорежущих станках адекватно отражает реальное температурное поле в зоне резания, измеряемое экспериментально.

На основании проведенного нами анализа экспериментальных данных, а также результатов моделирования полученной математической

модели температурного поля в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали можно приступить к формулированию нового положения, которое показывает механизм взаимовлияния силы, температуры в зоне резания, износа и вибраций инструмента при резании.

Перед формулировкой положения для увеличения наглядности объяснений выстраивания обратных связей внутри процесса резания как системы разобьем процесс обработки на следующие подсистемы:

- механическую подсистему, здесь мы имеем в виду подсистему, формирующую силовую реакцию на формообразующие движения инструмента;
- термодинамическую подсистему, отвечающую за формирование температуры в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали;
- деформационную подсистему, описывающую динамику деформационных движений инструмента;
- эволюцию (износ) инструмента – подсистема, описывающая процесс износа инструмента при резании.

Учитывая выявленные ранее особенности протекания процессов, выстроим следующую структурно-логическую схему взаимосвязанности введенных нами подсистем (рис. 9). Здесь отметим, что представленные в этой схеме свя-

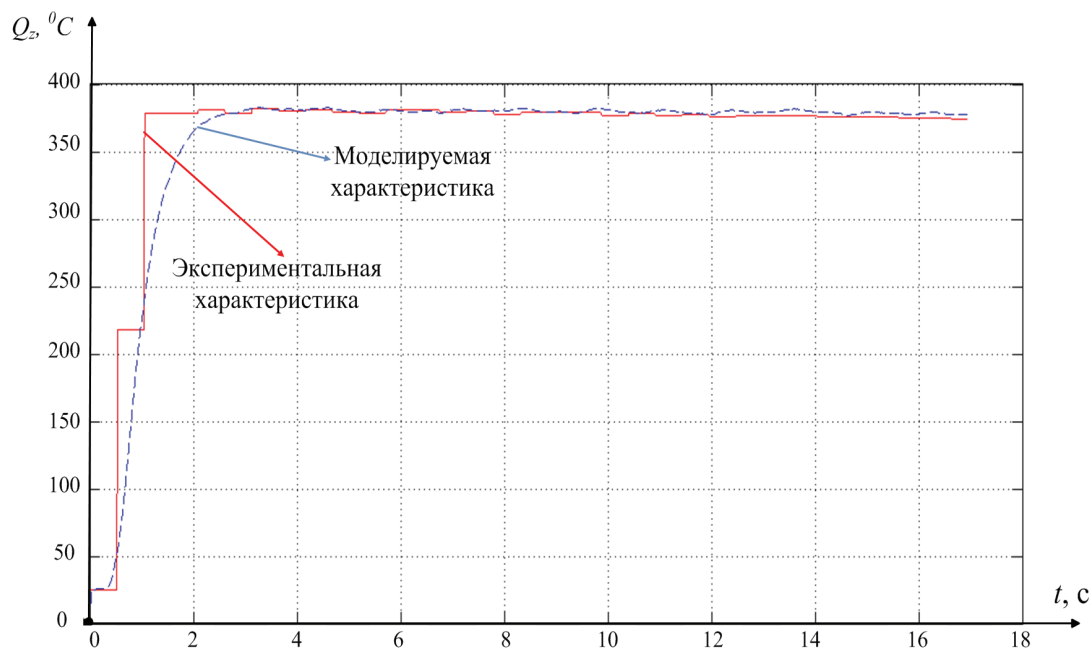


Рис. 8. Сравнение экспериментальной и моделируемой температуры в зоне обработки

Fig. 8. Comparison of experimental and simulated temperature in the processing zone



Рис. 9. Структура процесса обработки как системы

Fig. 9. Structure of the processing process as a system

зи не носят постоянного характера, т. е. они не являются жестко заданными, а изменяются, усиливаясь или ослабляясь по мере развития или деградации образующих их подсистем процесса обработки.

Для обобщения представленной на рис. 9 схемы структуры процесса обработки с учетом при этом выявленных ранее всех особенностей процесса сформулируем следующее положение.

В процессе эволюции инструмента при резании формирование площадки контакта инструмента с обрабатываемой деталью служит целью самоорганизации системы резания через формирование дополнительной термодинамической обратной связи, стабилизация которой обеспечивается определенным сочетанием износа инструмента и ограниченным вибрационным режимом резания. После этого взаимосвязанность термодинамической, силовой и вибрационной подсистемы уже обеспечивает стабилизацию интенсивности изнашивания приработанного инструмента. Иными словами, в процессе резания система резания стремится так приработать

режущий клин инструмента, чтобы выйти на некоторый уровень износа, снижающий уровень вибрационной активности инструмента и обеспечивающий функционирование термодинамической обратной связи, позволяющей через стабилизацию силовой реакции добиться максимально возможного уменьшения дальнейшей интенсивности изнашивания режущего клина.

Справедливость выдвинутого нами положения (помимо результатов моделирования полученного интегрального оператора) подтверждается широко известным из работ А.Д. Макарова положением о существовании оптимального с точки зрения обеспечения максимальной стойкости инструмента режима резания [28]. В своих рассуждениях А.Д. Макаров опирается на принцип В. Рейхеля, который можно свести к утверждению, что определенному периоду стойкости для заданной пары инструмент – деталь соответствует одна и та же температура в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали. Опираясь на этот принцип, А.Д. Макаров и вводит понятие оптимальной температуры резания,

которая обеспечивает оптимальную стойкость инструмента. Однако температура в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали не может быть стационарной, так как сам процесс обработки существенно не стационарен. Следовательно, для обеспечения постоянства оптимальной температуры на длительном интервале процесса резания требуется обеспечить если не стационарность всего процесса обработки, то хотя бы некоторую квазистационарность этого процесса. Именно эта квазистационарность и формируется при приработке инструмента и формировании первичного износа режущего клина. Стабилизация этого квазистационарного состояния процесса резания происходит за счет стабилизации силы резания, которая, в свою очередь, стабилизируется температурой, зависящей от вибрационной активности инструмента, а также от силы резания.

Заключение

В представленной работе раскрыт механизм самоорганизации процесса резания в процессе эволюции инструмента, целью которого является поиск некоторого режима функционирования системы резания, названного нами квазистационарным, при котором стабилизируется как дальнейший износ режущего клина, так и сила резания, температура в зоне резания и вибрации инструмента. В поддержку правильности выдвинутого нами положения выступает разработанная математическая модель температурного поля, распространяющегося в обрабатываемой детали по мере резания через сформированную износом площадку контакта инструмента и обрабатываемой детали. С точки зрения практического применения рассмотренного в работе механизма самоорганизации процесса резания в процессе эволюции инструмента и основанного на нем положения – это возможность прогнозирования остаточной стойкости инструмента по совокупности наблюдаемых данных о силе резания, температуре в зоне контакта и скоростях вибрационных движений инструмента.

Список литературы

1. 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. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.06.011.

2. 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, N 4. – P. 371–378. – DOI: 10.20855/ijav.2016.21.4432.

3. 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, iss. 9. – P. 703–710. – DOI: 10.1243/095440505X32634.

4. 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, iss. 5. – P. 739–768. – DOI: 10.1016/S0890-6955(99)00084-X.

5. 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, iss. 2. – P. 121–126. – DOI: 10.1016/j.ndteint.2006.09.006.

6. Tobias S.A. Vibraciones en máquinas-herramientas. – Bilbao: Ediciones Urmo, 1961.

7. Namachchivaya S., Beddini. Spindle speed variation for the suppression of regenerative chatter // Journal of Nonlinear Science. – 2003. – Vol. 13. – P. 265–288. – DOI: 10.1007/s00332-003-0518-4.

8. Wahi P., Chatterjee A. Regenerative tool chatter near a codimension 2 Hopf point using multiple scales // Nonlinear Dynamics. – 2005. – Vol. 40, iss. 4. – P. 323–338.

9. 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.

10. 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, iss. 8. – P. 1050–1066. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2010.03.014.

11. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays / A.M. Gouskov, 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.

12. 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.

13. Tobias S.A., Fishwick W. Theory of regenerative machine tool chatter // The Engineer. – 1958. – Vol. 205, N 7. – P. 199–203.

14. Merritt H.E. Theory of self-excited machine-tool chatter: contribution to machine-tool chatter research – 1 // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 1965. – Vol. 87, iss. 4. – P. 447–454. – DOI: 10.1115/1.3670861.

15. Grabec I. Chaos generated by the cutting process // Physics Letter A. – 1986. – Vol. 117, iss. 8. – P. 384–386. – DOI: 10.1016/0375-9601(86)90003-4.

16. 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. – DOI: 10.1098/rsta.2000.0755.

17. Stepan G. Modelling nonlinear regenerative effects in metal cutting // Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences. – 2001. – Vol. 359 (1781). – P. 739–757. – DOI: 10.1098/rsta.2000.0753.

18. Litak G. Chaotic vibrations in a regenerative cutting process // Chaos Solitons & Fractals. – 2002. – Vol. 13, iss. 7. – P. 1531–1535. – DOI: 10.1016/S0960-0779(01)00176-X.

19. Гуськов А.М., Воронов С.А., Квашинин А.С. Влияние крутильных колебаний на процесс вибросверления // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2007. – № 1 (66). – С. 3–19.

20. Васин С.А., Васин Л.А. Синергетический подход к описанию природы возникновения и развития автоколебаний при точении // Научные технологии в машиностроении. – 2012. – № 1. – С. 11–16.

21. Воронин А.А. Влияние ультразвуковых колебаний на процесс резания жаропрочных сплавов // Станки и инструмент. – 1960. – № 11. – С. 15–18.

22. Zakovorotny V.L., Lapshin V.P., Babenko T.S. Assessing the regenerative effect impact on the dynamics of deformation movements of the tool during turning // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 68–73. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.439.

23. 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.

24. Zakovorotny V., Lapshin V., Gvindjiliya V. Tool wear due to deformation displacements during metal turning // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2188, N 1. – P. 030002. – DOI: 10.1063/1.5138395.

25. 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. – DOI: 10.3103/S1068798X18090290.

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

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

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

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

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

31. 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, iss. 3. – P. 259–265. – DOI: 10.3103/S1068798X20030156.

32. Lapshin V.P., Babenko T.S., Moiseev D.V. Experimental evaluation of influence of tool wear on quality of turning // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering ICIE 2018. – Cham: Springer, 2018. – P. 853–859. – DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_89.

33. Lapshin V., Moiseev D., Minakov V. Diagnosing cutting tool wear after change of cutting forces during turning // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2188, iss. 1. – P. 030001. – DOI: 10.1063/1.5138394.

34. Лапшин В.П. Модифицированный оператор Вольтерры как способ моделирования температуры при металлообработке // Тепловые процессы в технике. – 2019. – Т. 11, № 11. – С. 505–513.

35. 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.

Конфликт интересов

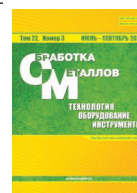
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2020 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



Relationship of Temperature and Cutting Force with Tool Wear and Vibration in Metal Turning

Victor Lapshin^a*, Veronika Khristoforova^b, Sergey Nosachev^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 <https://orcid.org/0000-0002-8611-1152>, nikaapp@rambler.ru,
^c <https://orcid.org/0000-0003-0302-2937>, nosachev-s@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 29 April 2020

Revised: 12 May 2020

Accepted: 07 June 2020

Available online: 15 September 2020

Keywords:

Nonlinear dynamics

Vibrations

Cutting process

Cutting temperature

Funding

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

ABSTRACT

Introduction. The processes that occur in the machine when cutting metals are interconnected with each other. In the process of cutting, the complex dynamics of processing includes both rapidly changing factors and factors that are more evolutionary (slow) in nature. By such factors the following is meant: changes in stationary components of cutting forces, temperature in the processing zone and tool wear. There is no single and consistent mathematical model describing this connectivity today. Therefore, the paper proposes an approach based on the processing of experimental data obtained in a series of experiments, which allows to identify the structure of feedbacks formed during cutting and linking subsystems that describe the force, heat and vibration responses from the cutting process to the shaping movements of the tool. **Purpose of work:** Due to the formation of a consistent model of communication between subsystems that describe the force, heat and vibration responses from the cutting process to the shaping movements of the tool, to obtain a description of the mechanism of self-organization of the cutting process in the process of evolutionary changes of the tool. The resulting mechanism is needed to find a certain mode of operation of the cutting system, in which further wear of the wedge, cutting force, temperature in the cutting zone and tool vibration can be stabilized. The paper examines: the process of metal processing by cutting on a lathe for the case of longitudinal turning of the product. **Research methods:** the Research consists of a series of field experiments on real equipment using a modern measuring stand STD.201-1, which allows simultaneously measuring the force, temperature and vibration components of the reaction from the cutting process to the shaping movements of the tool. For processing and analysis of the experimental data obtained, a package of mathematical programs Matlab is used, in which a subroutine is developed that allows spectral analysis of vibration signals, as well as graphical interpretation of the measured values. **Results and discussion.** The results of processing experimental data, in particular, the spectra of vibration signals, obtained the dependence of forces and temperature on tool wear, and also revealed the effect of wear on the vibration dynamics of the cutting process. The influence of vibration energy of the tool on the temperature field in the cutting zone is estimated. The main conclusion of the work is the position put forward by us about the self-organization of the cutting system, through the process of tool evolution, which is expressed in the wear of the wedge, the purpose of which is the formation of a certain quasi-stationary cutting mode.

For citation: Lapshin V.P., Khristoforova V.V., Nosachev S.V. 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. (In Russian).

References

1. Huang S.N., Tan K.K., Wong Y.S., Silva C.W. De, 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. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.06.011.

* 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

2. Arslan 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, no. 4, pp. 371–378. DOI: 10.20855/ijav.2016.21.4432.
3. 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, iss. 9, pp. 703–710. DOI: 10.1243/095440505X32634.
4. 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, iss. 5, pp. 739–768. DOI: 10.1016/S0890-6955(99)00084-X.
5. 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, iss. 2, pp. 121–126. DOI: 10.1016/j.ndteint.2006.09.006.
6. Tobias S.A. *Vibraciones en máquinas-herramientas* [Machine tools vibrations]. Bilbao, Ediciones Urmo, 1961. (In Spanish).
7. Namachchivaya S., Beddini. Spindle speed variation for the suppression of regenerative chatter. *Journal of Nonlinear Science*, 2003, vol. 13, pp. 265–288. DOI: 10.1007/s00332-003-0518-4.
8. Wahi P., Chatterjee A. Regenerative tool chatter near a codimension 2 Hopf point using multiple scales. *Nonlinear Dynamics*, 2005, vol. 40, iss. 4, pp. 323–338.
9. 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. 09, pp. 2783–2798. DOI: 10.1142/S0218127405013642.
10. 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, iss. 8, pp. 1050–1066. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2010.03.014.
11. 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.
12. 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.
13. Tobias S.A., Fishwick W. Theory of regenerative machine tool chatter. *The Engineer*, 1958, vol. 205, no. 7, pp. 199–203.
14. Merritt H.E. Theory of self-excited machine-tool chatter: contribution to machine-tool chatter research – 1. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1965, vol. 87, iss. 4, pp. 447–454. DOI: 10.1115/1.3670861.
15. Grabec I. Chaos generated by the cutting process. *Physics Letter A*, 1986, vol. 117, iss. 8, pp. 384–386. DOI: 10.1016/0375-9601(86)90003-4.
16. 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. DOI: 10.1098/rsta.2000.0755.
17. Stepan G. Modelling nonlinear regenerative effects in metal cutting. *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2001, vol. 359 (1781), pp. 739–757. DOI: 10.1098/rsta.2000.0753.
18. Litak G. Chaotic vibrations in a regenerative cutting process. *Chaos Solitons & Fractals*, 2002, vol. 13, iss. 7, pp. 1531–1535. DOI: 10.1016/S0960-0779(01)00176-X.
19. 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. Bauman. Seriya: Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2007, no. 1 (66), pp. 3–19.
20. Vasin S.A., Vasin L.A. Sinergeticheskii podkhod k opisaniyu prirody vozniknoveniya i razvitiya avtokolebaniy pri tochenii [Synergetic approach to description of occurrence and development nature of self-oscillations in turning]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2012, no. 1, pp. 11–16.
21. Voronin A.A. Vliyanie ul'trazvukovykh kolebaniy na protsess rezaniya zharoprochnykh splavov [Influence of the ultrasound oscillations on the cutting process of the high-temperature alloy]. *Stanki i instrument = Machines and Tooling*, 1960, no. 11, pp. 15–18. (In Russian).

22. Zakovorotny V.L., Lapshin V.P., Babenko T.S. Assessing the regenerative effect impact on the dynamics of deformation movements of the tool during turning. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 68–73. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.439.
23. 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.
24. Zakovorotny V., Lapshin V., Gvindjiliya V. Tool wear due to deformation displacements during metal turning. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2188, no. 1, p. 030002. DOI: 10.1063/1.5138395.
25. 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. DOI: 10.3103/S1068798X18090290.
26. Zharkov I.G. *Vibratsii pri obrabotke lezviinym instrumentom* [Vibrations when processing with a blade tool]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986. 184 p.
27. Markov A.I. *Ul'trazvukovoe rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov* [Ultrasonic cutting of hard-to-process materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 367 p.
28. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 278 p.
29. Zakovorotnyi 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.
30. 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.
31. 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, iss. 3, pp. 259–265. DOI: 10.3103/S1068798X20030156.
32. Lapshin V.P., Babenko T.S., Moiseev D.V. Experimental evaluation of influence of tool wear on quality of turning. *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering ICIE 2018*. Springer, Cham, 2018, pp. 853–859. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_89.
33. Lapshin V., Moiseev D., Minakov V. Diagnosing cutting tool wear after change of cutting forces during turning. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2188, iss. 1, p. 030001. DOI: 10.1063/1.5138394.
34. Lapshin V.P. Modifitsirovannyi operator Vol'terra kak sposob modelirovaniya temperatury pri metalloobrabotke [Modified Volterra operator as a temperature modelling technique while metalworking]. *Teplovye protsessy v tekhnike = Thermal Processes in Engineering*, 2019, vol. 11, no. 11, pp. 505–513. DOI: 10.34759/TPT-2019-11-11-505-513.
35. Bordachev E.V., Lapshin V.P. Matematicheskoe modelirovanie temperatury v zone kontakta instrumenta i izdeliya pri tokarnoi obrabotke metallov [Mathematical temperature simulation in tool-to-work contact zone 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.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2020 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/>).