

Keywords: manufacturing system, control mechanism, situational center, decision making algorithm

Получено: 29.10.13

УДК 621.941

А. В. Гусев, аспирант;

В. В. Закураев, кандидат технических наук, доцент;

Новоуральский технологический институт – филиал государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Ю. В. Турыгин, доктор технических наук, профессор

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ПРОЦЕСС СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ И ЕГО ИЗУЧЕНИЕ НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНОГО И СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Объектом научной работы является разработка способа и средств определения эффективных режимов механической обработки путем диагностики процесса резания. В рамках данной работы рассматривается изучение деформационных характеристик процесса стружкообразования на основе частотного и спектрального анализа. Цель данной работы – на основе изучения деформационных характеристик процесса резания, записи и обработки вибрационных (информационных) характеристик процесса механической обработки установить возможность определения эффективного режима обработки.

Ключевые слова: токарная обработка, эффективные режимы резания, деформационные характеристики, спектральный анализ

В современном машиностроительном производстве отмечаются тенденции значительного повышения затрат на механическую обработку. Одной из причин такого положения является увеличение трудоемкости технологической подготовки производства наряду с ростом цен на материалы, инструменты, оборудование и т. д. [1].

Эффективность работы современных металлообрабатывающих систем во многом определяется режимами резания. Повышение интенсивности режима обработки вызывает необходимость контроля (управления) процессом резания. Выбор оптимального режима особенно актуален на начальной стадии запуска изделий в производство (период освоения). Обычно «стартовый» вариант режима резания устанавливается по справочнику или рекомендациям фирм-производителей инструмента, а фактически режимы устанавливаются экспериментально при отладке процесса. При этом невозможно учесть многие факторы, имеющиеся в реальном производстве.

На основе многолетнего опыта работы лабораторий, опытных подразделений НИИ, а также передовых машиностроительных заводов созданы нормативы режимов механической обработки.

В основу этих нормативов положены технико-экономические критерии механической обработки: обеспечение требуемых параметров качества поверхности, точности размеров, обеспечение экономической стойкости инструмента (скорости изнашивания), силовые и энергетические характеристики процесса. Существует термин «обрабатываемость» материалов резанием, который косвенно отражает совокупность перечисленных параметров. В литературе имеются данные [2] о разделении многочисленных машиностроительных материалов на определенные группы обрабатываемости.

Приводимые режимы обработки, по мнению создателей нормативов, отражают наиболее эффективные условия процесса резания. Существующие рекомендации (нормативы режимов) не предполагают возможности изменения параметров режима резания в процессе обработки одной детали. При возникновении автоматизированной механической обработки на станках с ЧПУ такая необходимость возникает (контурное точение). Переменными параметрами являются не только режимы, но и размеры поверхностей. В таких условиях появилась насущная необходимость контроля процесса резания на соответствие оптимальным параметрам.

По мнению авторов, при оптимальных режимах механической обработки должны существовать определенные физические условия (или совокупность условий) в технологической системе резания, обеспечивающие эту оптимальность. Под физическими условиями в данном случае следует понимать: деформационные процессы стружкообразования и их связь с физико-механическими характеристиками материалов при высокоскоростном пластическом деформировании; уровни и динамические характеристики самой технологической системы; проявление параметров вибрационного взаимодействия элементов системы с деформационными процессами.

При установлении определенных соответствий между перечисленными факторами возникает возможность создания системы контроля всего процесса механической обработки.

В научно-технической литературе рассматриваются несколько направлений совершенствования технологических процессов механической обработки [3]. Определяющим фактором в разработке системы контроля являются результаты изучения процесса стружкообразования.

Многочисленные результаты изучения микрошлифов стружек и самих стружек свидетельствуют о циклическом характере процесса стружкообразования, что подтверждается моделью стружкообразования, предложенной рядом ученых (Н. Н. Зорев, А. М. Розенберг и др.). На рис. 1 изображена геометрическая модель стружкообразования при резании пластических материалов.

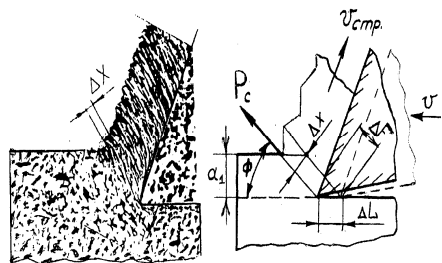


Рис. 1. Геометрическая модель стружкообразования при резании пластических материалов: а – корень стружки; б – геометрическая модель стружкообразования

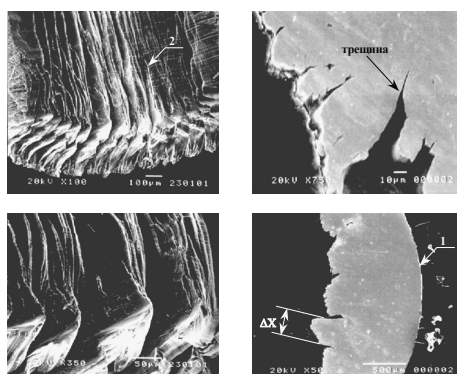


Рис. 2. Фотографии фрагментов стружек и микрошлифов стружек

В соответствии с принятой моделью формирующиеся дискретные сдвиги материала стружки следует считать элементами пространственно-временной структуры. Эти процессы развиваются во времени в результате деформации материала припуска. Статистическая обработка значений величины пластически деформируемой зоны указывает на стохастический (случайный, вероятностный, непредсказуемый) характер сдвиговых деформаций. На рис. 2 изображены фотографии фрагментов стружек и микрошлифов стружек. Учитывая дискретный характер сдвиговых деформаций при стружкообразовании, который отражается на колебании мгновенных сил резания (амплитуда, частота), следует полагать, что амплитудно-частотные и спектральные характеристики мгновенных сил должны коррелировать с поведением деформационных показателей процесса (ϵ , Δx). Для изучения процессов стружкообразования в подобных условиях наиболее приемлемым является использование методов, основанных на анализе случайных процессов [3].

Цель работы – на основе изучения деформационных характеристик процесса резания, записи и обра-

ботки вибрационных (информационных) характеристик процесса механической обработки установить возможность определения оптимального режима обработки.

Проверка всех предположений выполнялась по уже известной методике на экспериментальной установке, изображенной на рис. 3. Запись колебаний осуществлялась цифровым осциллографом Tektronix TDS3034 с вибропреобразователя, установленного на корпусе резца. Запись реализации случайного процесса велась в формате MathCAD и затем обрабатывалась на ПК. В данных опытах осуществлялась токарная обработка заготовок из стали 40XH (диаметр заготовки 97 мм и длина 330 мм, твердость 30 HRC) проходным резцом из сплава T15K6 в широком диапазоне режимов: $S = 0,21$ мм/об ($=\text{const}$), $V = 0,47 \dots 5,9$ м/с и $V = 2,97$ м/с ($=\text{const}$), $S = 0,075 \dots 0,6$ мм/об. Обработка была проведена на токарно-винторезном станке 16K20. С целью установления соответствия в характере изменения деформационных и спектральных характеристик были проведены три записи для каждого режима резания.

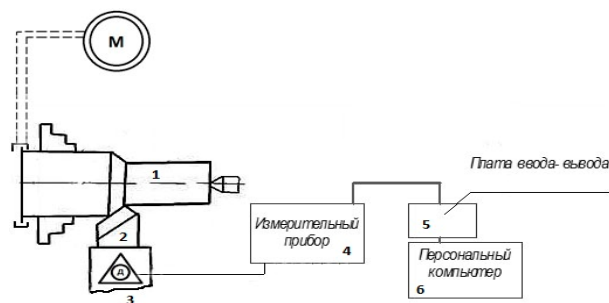


Рис. 3. Схема лабораторной установки

На первом этапе работы были оценены некоторые деформационные характеристики процесса стружкообразования: значения пластически деформируемой зоны – Δx ; коэффициент усадки стружки – K_a ; характер изменения текстуры стружки; время τ_M и частота образования сдвиговых деформаций – f_c . Для расчета указанных характеристик принята модель стружкообразования с параллельными границами (рис. 1).

Также изучались фотографии стружек, полученные на электронном микроскопе (рис. 2). Результаты измерения толщины деформационной зоны стружки – Δx от изменения режимов резания приведены на рис. 4 (а, б). Величина толщины сдвигающихся фрагментов – Δx возрастает при увеличении подачи и падает при увеличении скорости.

В соответствии с принятой моделью процесса стружкообразования изменение фрагментов стружки (рис. 2) оцениваются толщиной элементов формирующийся стружки – Δx и толщиной самой стружки – a_c (размеры берутся в сечении нормальному к главной режущей кромке). На рис. 5 представлены изменения $\Delta x/a$ от изменения режимов резания.

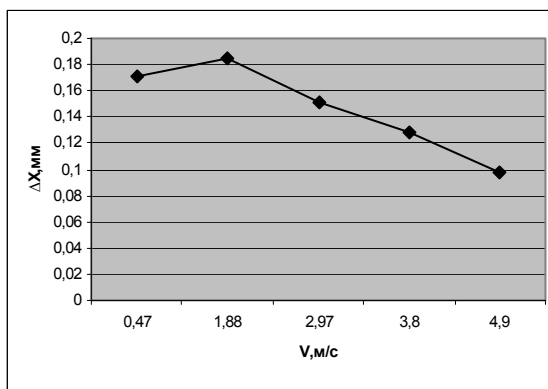


Рис. 4, а. Величина толщины сдвигающихся фрагментов от изменения скорости резания

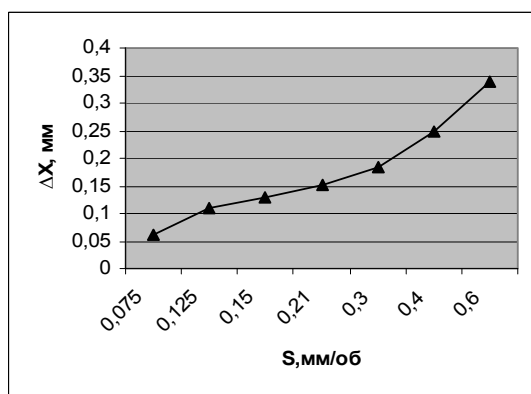


Рис. 4, б. Величина толщины сдвигающихся фрагментов от изменения рабочей подачи

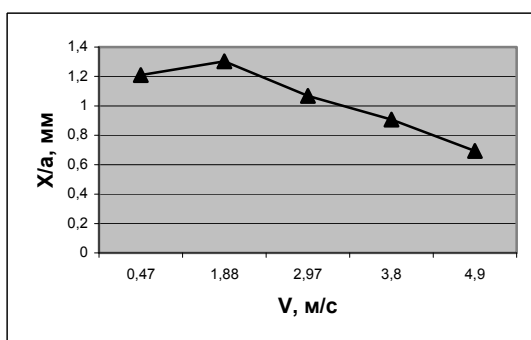


Рис. 5, а. График изменения $\Delta x/a$ от изменения скорости резания

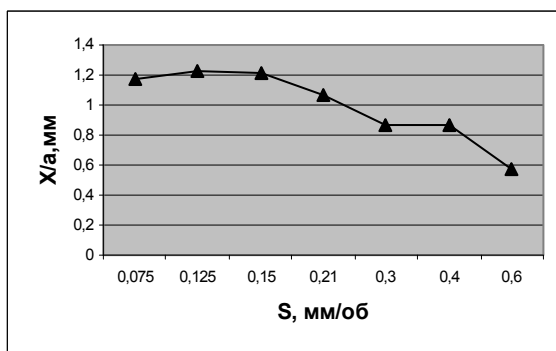


Рис. 5, б. График изменения $\Delta x/a$ от изменения рабочей подачи

Относительная величина сдвиговых деформаций – отношение толщины сдвигающихся фрагментов – Δx к толщине срезаемого слоя – a снижается при увеличении скорости резания и при увеличении толщины срезаемого слоя.

Учитывая, что при стружкообразовании осуществляется в основном деформация сдвига, а изменение элементарного объема осуществляется в двух направлениях, то фрагменты стружки, кроме изменения своих размеров, совершают и поворот (ротацию) в пределах изменения угла наклона условной плоскости сдвига – Φ (рис. 6, а, б). Замечено, что при скоростях резания (подачах), считающихся оптимальными, относительные величины сдвиговых деформаций ($\Delta x/a$) стремятся к значениям, близким к 1.

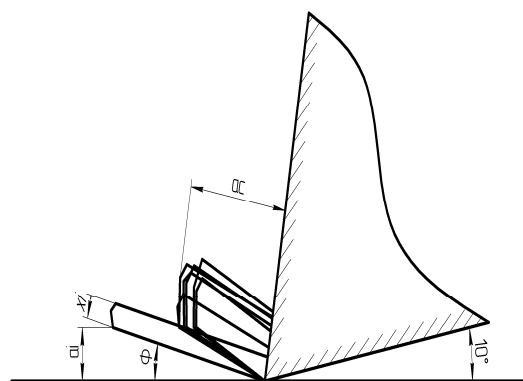


Рис. 6, а. Схема изменения локальных объемов стружки в зависимости от скорости резания

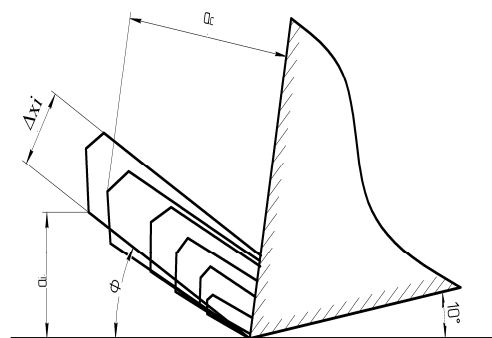


Рис. 6, б. Схема изменения локальных объемов стружки в зависимости от рабочей подачи

Это говорит о том, что фрагменты сдвиговых деформаций при оптимальных скоростях резания становятся одинаковых размеров в направлении сдвига и направлении схода стружки [4].

Поведение данного критерия ($\Delta x/a \approx 1$) обусловлено совокупностью явлений, сопровождающих процесс высокоскоростной деформации, а именно: формирование критической фрагментированной структуры материала заготовки в зоне стружкообразования, необходимых условий в зоне пластического контакта на передней поверхности лезвия за счет нагрева и рассеивания тепла в системе стружкообразования, т. е. созданием условий, обеспечивающих наименьшие затраты энергии для осуществления деформации и разрушения материала. По современ-

ным физическим представлениям эта совокупность носит название «самоорганизации» процесса пластической деформации материала. Равенство размеров локальных объемов материала является признаком самоорганизации процесса.

Стружкообразование при резании пластичных материалов – процесс дискретного сдвига локальных объемов материала (рис. 2). Сдвиг при стружкообразовании (момент устойчивого нарушения сплошности материала) осуществляют в результате образования критической фрагментированной неоднородной структуры материала. Неоднородность процесса фрагментации материала обусловлена неоднородностью рассеивания подводимой механической энергии. Как правило, при стружкообразовании преобладают механизмы ротационной пластичности, и формирующаяся текстура стружки возникает путем поворотов (разворотов) локальных макрообъемов материала. Наши исследования показывают, что сдвиг и поворот локальных макрообъемов (элементов) энергетически «выгоднее» осуществляется при одинаковых размерах сторон этих элементов. На фиг. 6 показана схема изменения локальных объемов стружки при различных режимах резания в масштабе 100 : 1 [5].

Далее, по данным измеренных Δx , теоретически была рассчитана частота образования сдвиговых деформаций (частота стружкообразования) – f_c по следующей формуле:

$$f_c = \frac{1000 \cdot V_c}{k_a \cdot \Delta x_{cp}}, \quad (1)$$

где V_c – скорость резания, м/с; k_a – коэффициент усадки стружки; Δx_{cp} – среднее значение пластически деформируемой зоны, мм.

На рис. 7 представлены графики зависимостей частот сдвиговых деформаций от скорости резания и рабочей подачи.

С целью идентификации условий улучшения обрабатываемости материала и установления связи деформационных характеристик процесса резания с информационными получены амплитудно-частотные и спектральные характеристики процесса.

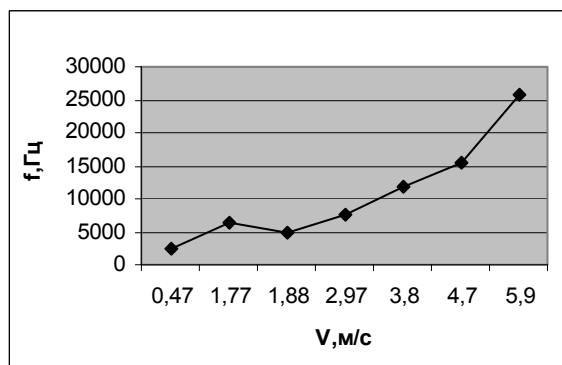


Рис. 7, а. График зависимости частот сдвиговых деформаций от скорости резания

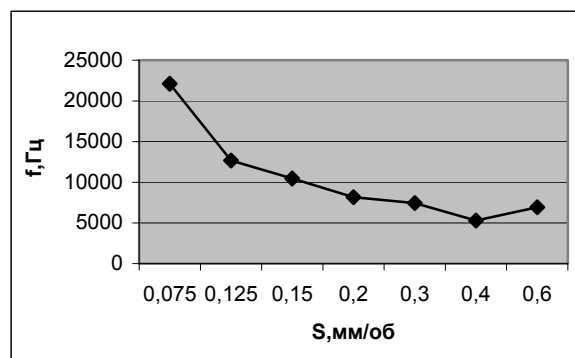


Рис. 7, б. График зависимости частот стружкообразования от рабочей подачи

На рис. 8, а изображена осциллограмма сигнала напряжения, полученная с вибропреобразователя. На рис. 8, б изображен пример разложения осциллограммы в ряд Фурье.

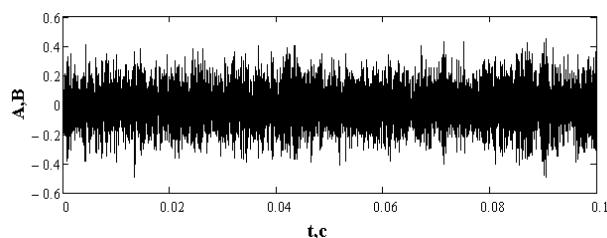


Рис. 8, а. Осциллограмма сигнала напряжения, полученная с вибропреобразователя при $S = 0,15$ мм/об; $V = 2,97$ м/с; $t = 1,0$ мм

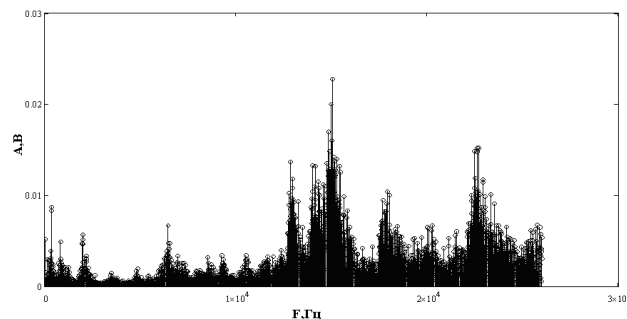


Рис. 8, б. Пример разложения осциллограммы в частотный ряд Фурье

На основании полученных результатов построены корреляционные зависимости между величиной пластически деформируемой зоны Δx и амплитудными значениями сигналов, записанных вибродатчиком и амплитудами акустико-эмиссионных сигналов. Данные, характеризующие корреляционную связь между величиной Δx и амплитудами сигналов, представлены на рис. 9.

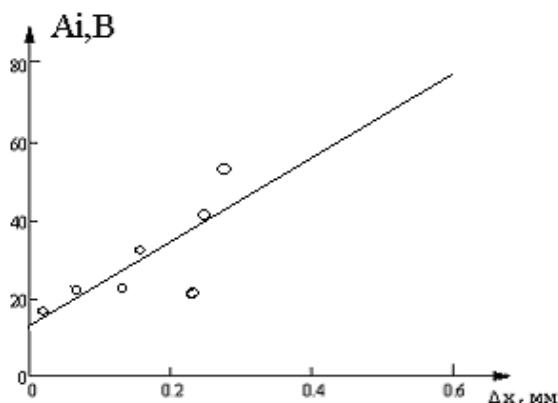


Рис. 9. Корреляционная связь между величиной Δx и амплитудами сигналов с вибродатчика при изменении скорости резания

Таким образом, гипотеза о возможной связи деформационных характеристик с амплитудными параметрами вибросигналов подтвердилась.

Полученные данные создают предпосылки к разработке метода определения оптимальных режимов механической обработки.

В связи с этим осциллограммы сигналов напряжения, полученные с вибропреобразователя, были разложены по частотам в ряд Фурье, после чего была рассчитана спектральная плотность сигналов в каждой реализации:

$$G_x(f) \approx \frac{S_x^2}{\Delta f}, \quad (2)$$

где S_x – среднее значение квадратов амплитуд сигналов, B^2 ; Δf – длина частотного спектра, Гц.

На рис. 10 приведены значения спектральной плотности вибросигналов, полученных в результате обработки на различных скоростях резания и подачах.

Изменение спектральной плотности (G) вибросигналов носит немонотонный характер (рис. 10). Имеются участки с низкими и высокими значениями амплитуд. Причин увеличения спектральной плотности колебаний может быть несколько. Одна из них – совпадение частот сдвиговых деформаций стружкообразования и частот собственных колебаний резца.

Для проверки этого предположения был проведен тест-удар: 1) резец закреплялся в резцедержателе; 2) на корпусе резца закреплялся вибропреобразователь; 3) далее были произведены удары молотком по кончику резца с разным усилием; 4) напряжение, поступающее с вибропреобразователя, фиксировалось на осциллограф корпорации Tektronix, Inc. Полученная осциллограмма сигналов напряжения представлена на рис. 11, а.

Далее осциллограммы сигналов напряжения были разложены по частотам в ряд Фурье. Результаты преобразования представлены на рис. 11, б.

Из теории известно, что виброускорение характеризует силовое динамическое взаимодействие элементов внутри системы, которое вызвало данную вибрацию.

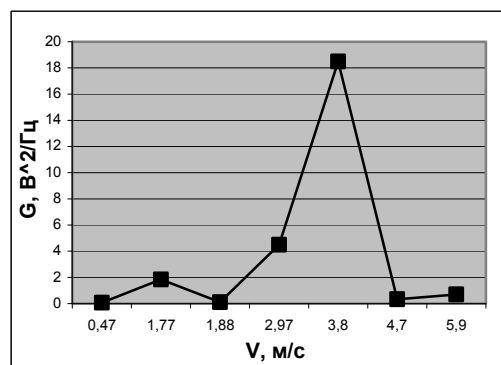


Рис. 10, а. График зависимости спектральной плотности от скорости резания

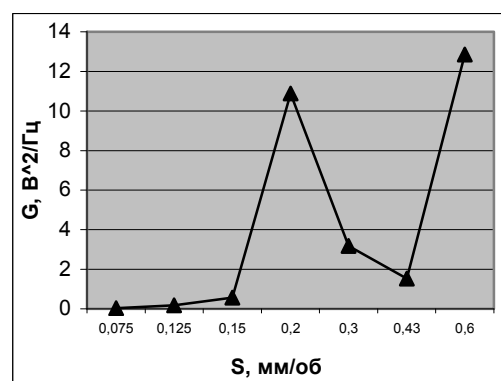


Рис. 10, б. График зависимости спектральной плотности от рабочей подачи

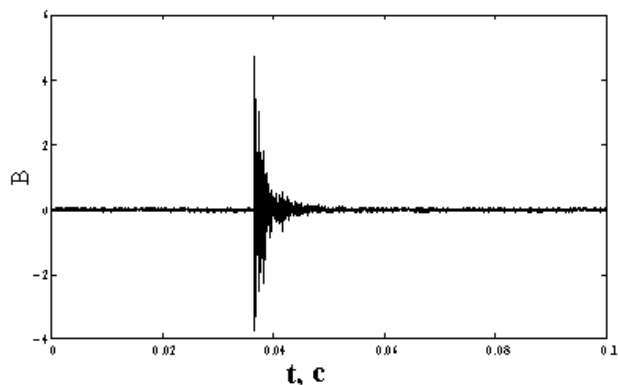


Рис. 11, а. Осциллограмма сигналов напряжения

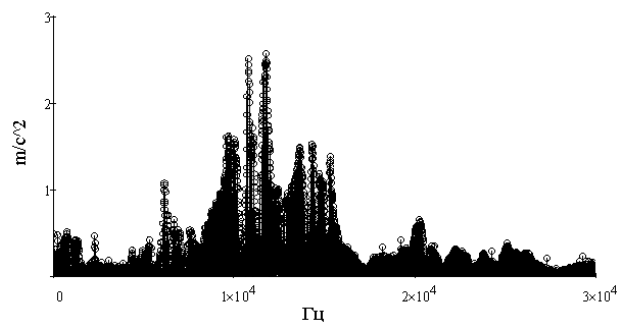


Рис. 11, б. Результат разложения осциллограммы сигналов напряжения в ряд Фурье

Из полученных спектров виброускорения видно, что наибольший пик амплитуды, а следовательно, и наибольшее усилие возникает на частоте 10–12 кГц.

Затем для обоснования полученных результатов был произведен расчет частот свободных продольных колебаний резца (3). Система резец – резцедержатель рассматривалась как консольно закрепленная балка, на конце которой действует осевая, сосредоточенная сжимающая сила, равная главной составляющей силе резания P_z .

В этом случае частота продольных свободных колебаний балки определяется как

$$F = \sqrt{\frac{g}{X_{ST}}} = \sqrt{\frac{gEA}{PL}}, \quad (3)$$

где $P = P_z$ – сосредоточенная сжимающая сила, Н; L – длина консольно закрепленной балки, м; E – модуль упругости материала балки, Па; A – площадь поперечного сечения балки, м²; g – ускорения свободного падения, м/с².

Графики результатов расчета частоты свободных продольных колебаний резца от скорости резания и рабочей подачи представлены на рис. 12.

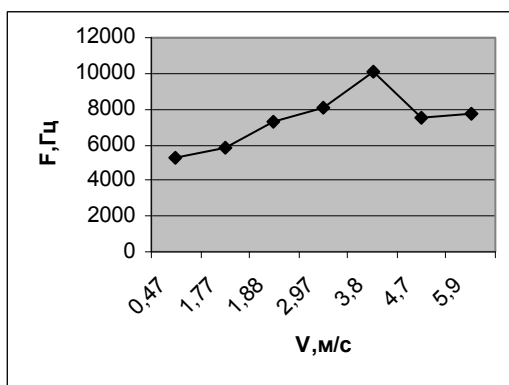


Рис. 12, а. График результата расчета частоты свободных продольных колебаний резца от скорости резания

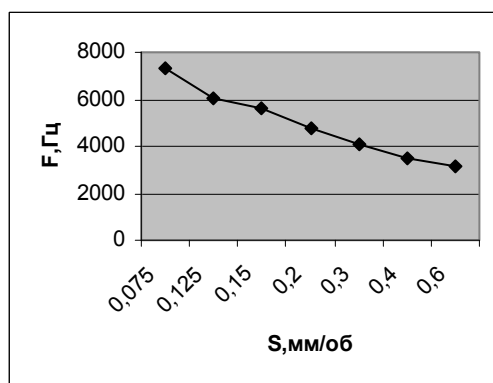


Рис. 12, б. График результата расчета частоты свободных продольных колебаний резца от рабочей подачи

Полученные графики результатов расчетной частоты колебаний резца свидетельствуют о том, что существует некий диапазон скоростей резания, сила резания которого достигает такого значения, при котором частота свободных колебаний резца становится приблизительно равной 10–12 кГц (это отмечается на скоростях 2,97–3,8 м/с).

Таким образом, из вышесказанного, а также из рис. 11, б можно сделать заключение, что в зоне резания при определенных режимах (условиях) происходит совпадение частот собственных колебаний резца и вынужденных частот стружкообразования, возникающих в процессе резания, а значит, возникает резонанс. Об этом также свидетельствует резкий рост амплитудных значений на графиках спектральных плотностей (рис. 10).

Выводы:

- 1) установлена корреляционная связь между величиной Δx и амплитудами сигналов с вибродатчика при изменении скорости резания и рабочей подачи;
- 2) установлена частота собственных колебаний резца;
- 3) в наблюдаемых графиках спектральной плотности вибросигналов в диапазоне рабочих скоростей и подач ($V = 0,47$ – $5,9$ м/с) и $S = 0,075$ – $0,6$ мм/об) наибольшая мощность сигналов G соответствует скоростям 2,97–3,8 м/с; данный диапазон соответствует рекомендуемому значению для практики [2];
- 4) в результате экспериментальных исследований определены интервалы частот на спектрах сигналов, полученных с вибропреобразователя, которые соответствуют наилучшему осуществлению сдвиговых деформаций; уточнение конкретной величины скорости резания будут выполняться на исследовании математической модели.

Библиографические ссылки

1. Технологические проблемы в современном машиностроительном производстве : сб. науч. тр. – М. : МГТУ «Станкин», 1998. – 240 с.
2. Баранчиков В. И., Боровский Г. В., Гречишников В. А. Справочник конструктора-инструментальщика / под общ. ред. А. М. Дальского. – М. : Машиностроение, 1994. – 280 с.
3. Тартанов О. В., Клепиков В. В. Новые концепции совершенствования технологических систем в машиностроительной промышленности // Вестн. машиностроения. – 2005. – № 8. – С. 57–58.
4. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов / пер. с англ. В. Е. Привальского, А. И. Кочубинского. – М. : Мир, 1989. – 540 с.
5. Заявка на патент РФ №2012131289/02. Способ определения оптимальных режимов резания. Авторы: Гусев А. В., Закураев В. В.

* * *

A. V. Gusev, Post-graduate, Novouralsk Institute of Technology – branch of the State educational institution of higher professional education "National Research Nuclear University "MEPhI"

V. V. Zakuraev, PhD in Engineering, Associate Professor, Novouralsk Institute of Technology – branch of the State educational institution of higher professional education "National Research Nuclear University "MEPhI"

Yu. V. Turygin, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Chip forming process and its investigation on basis of frequency and spectral analysis

The object of the scientific work is the development of the method and facilities for the optimal machining parameters through diagnostics of the cutting process. Within the framework of the given work the deformation characteristics of the chip forming process are studied based on the frequency and spectral analysis. The purpose of this scientific work is to set the possibility of determining optimal machining parameters on the basis of studying the deformation characteristics of the cutting process, recording and processing of vibration (information) characteristics of the machining process.

Keywords: turning, optimal parameters of machining, deformation characteristics, spectral analysis

Получено: 08.11.13

УДК 629.1.02

А. Р. Имангулов, аспирант;

Н. М. Филькин, доктор технических наук, профессор

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

ОБ УПРОЩЕНИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРАНСМИССИИ ГИБРИДНОГО ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ

Упрощение динамических моделей выполняется с целью ускорения и облегчения проведения расчетов, связанных с динамикой механических систем, при практически неизменной точности. Рассмотрен вопрос о необходимости упрощения динамической модели трансмиссии легкового автомобиля с гибридной энергосиловой установкой параллельной компоновочной схемы.

Ключевые слова: гибридный автомобиль, трансмиссия, динамическая модель, метод парциальных частот

Любую механическую трансмиссию можно рассматривать как систему, состоящую из ряда сосредоточенных масс, соединенных между собой валами различной жесткости. В общем случае в силу инерционности деталей трансмиссии машины при передаче крутящего момента от двигателя к движителю происходит закручивание валов, т. е. трансмиссия работает как упругий элемент. Кроме того, в трансмиссии возникают силы неупругого сопротивления (демпфирования), зависящие от трения в трансмиссии, угловой скорости вращения, частоты изменения подводимого крутящего момента и ряда других факторов.

Для наглядного отражения динамических связей рассматриваемых объектов разрабатывают динамические модели, состоящие из отдельных элементов и представляющие собой условное графическое изображение основных свойств объекта: инерционных, упругих, диссипативных, фрикционных. Далее на их основании строятся математические модели, описывающие определенный режим работы трансмиссии.

На рис. 1 представлена приведенная к первичному валу динамическая модель трансмиссии автомобиля с гибридной энергосиловой установкой (ГЭСУ) параллельной компоновочной схемы, которая включает в себя маховые массы с моментами инерции: J_{em} – вращающихся масс электродвигателя; J_{ice} – вращающихся масс двигателя внутреннего сгорания и маховика; J_{bd} – ременной передачи согласующего редуктора и ведущих деталей сцепления; J_1 – ведомых деталей сцепления; J_2 – деталей коробки передач; J_3 – деталей карданной передачи; J_4 – деталей карданной и главной передач с дифференциалом; J_5 – полуосей и ведущих колес автомо-

биля; J_6 – балки ведущего моста относительно оси вращения колес; J_7 – маховика, эквивалентного поступательно движущейся массе автомобиля. Упругим звеньям соответствуют крутильные жесткости: c_{em} – привода электродвигателя; c_d – демпфера; c_1 – первичного вала; c_2 – деталей коробки передач; c_3 – карданной и главной передач; c_4 – полуосей; c_5 – шин ведущих колес; c_6 – упругих элементов подвески на выкручивание. Диссипативные свойства звеньев отражают коэффициенты демпфирования $K_{em}, K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$.

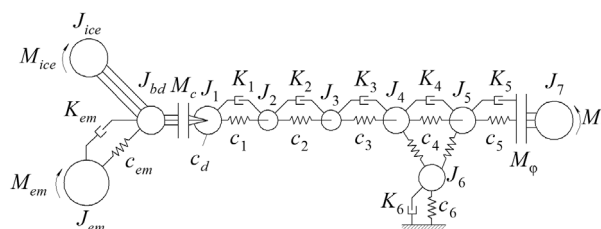


Рис. 1. Приведенная динамическая модель трансмиссии автомобиля с ГЭСУ

Электродвигатель создает крутящий момент M_{em} , а двигатель внутреннего сгорания – момент M_{ice} . Крутящие моменты M_{em} и M_{ice} определяются внешними скоростными характеристиками соответствующих двигателей. К массе J_1 приложен момент трения в сцеплении M_c . Передаваемый ведущими колесами момент ограничен моментом M_ϕ . К массе J_7 приложен момент сопротивления движению M_ψ .

Однако приведенная динамическая модель содержит ряд звеньев, мало влияющих на протекающие в ней процессы, поэтому ее можно упростить. Согласно