

УДК 534.1

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЗБУЖДЕНИЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

© 2013 г.

В.К. Асташев¹, Г.К. Корендюшев¹, В.И. Ерофеев²

¹ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва

² Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

korenduba@gmail.com

Поступила в редакцию 03.12.2012

Предложена гипотеза о термомеханической природе автоколебаний при обработке металлов резанием, позволяющая обобщить основные известные модели этого явления. На основе предложенной гипотезы разработаны аналитическая и численная модели возбуждения автоколебаний. Адекватность полученных результатов подтверждается результатами натурных экспериментов.

Ключевые слова: автоколебания, термомеханическая модель, падающая характеристика силы резания, конечно-элементная модель.

Автоколебания, возникающие при обработке металлов резанием, являются основным ограничителем производительности и точности обработки на металлорежущих станках. Поиском физических причин возникновения автоколебаний при резании занимались многие отечественные и зарубежные исследователи. Было разработано большое число различных моделей этого процесса. Предложенные модели можно условно разделить на две большие группы. В основе моделей первой группы лежит статическая или динамическая двузначность силы резания, причем выявление причин двузначности производится с помощью систем с одной степенью свободы. Наиболее распространенные модели, относящиеся к этой группе: модель, базирующаяся на падающей по скорости зависимости силы резания [1]; модель, базирующаяся на неоднозначности силы резания при врезании и отталивании инструмента [2]; модель, базирующаяся на отставании изменения силы резания от изменения толщины среза [3]. Все известные нам теории, принадлежащие к этой группе, базируются на закономерностях, наблюдаемых экспериментально, однако они не раскрывают истинных физических причин этих явлений и не позволяют прогнозировать уровень вибрации при резании. Ко второй группе относятся теории, основанные на представлении технологической системы в виде системы с двумя или более степенями свободы, где автоколебания объясняются наличием координатной связи между ними [4, 5]. Это явление изучено достаточно хорошо. Сформированы математические модели, разработаны методы борьбы с этим ти-

пом автоколебаний. Однако принцип координатной связи не может объяснить возбуждения автоколебаний в крутильных системах и системах с одной степенью свободы. На металлорежущих станках крутильные системы весьма распространены, а системы с одной степенью свободы часто встречаются при работе инструментом с симметрично расположенными кромками, т.е. при сверлении, зенкеровании, протягивании и т.д. Из этих рассуждений следует, что физический принцип возбуждения автоколебаний в технологических системах, описываемых моделями с одной степенью свободы, все же существует.

Внимательное рассмотрение существующих моделей автоколебаний при резании с одной степенью свободы [1–3] наводит на мысль о том, что явления, лежащие в их основе, являются следствием единого глубинного физического принципа. Раскрытие указанного принципа позволит глубже понять природу автоколебаний при резании и предложить способы борьбы с этим явлением.

Рассмотрение связей между механическими и термодинамическими процессами, происходящими при обработке металлов резанием, позволило выдвинуть гипотезу о термомеханической природе автоколебаний при резании.

Возникающие в процессе резания силы создаются главным образом за счет пластической деформации срезаемого слоя материала заготовки и преодоления сил трения на рабочих поверхностях режущего инструмента. Механическая энергия, затраченная на пластическое деформирование материала заготовки и трение

между поверхностями инструмента, стружки и изделия, преобразуется в тепловую энергию, которая приводит к существенному нагреву зоны резания [6, 7]. При повышении температуры в материале заготовки происходят структурные превращения и, как следствие, изменяются механические свойства обрабатываемого материала, такие как модуль упругости, предел текучести и предел прочности, что в свою очередь приводит к изменению силы резания. Таким образом, механические и тепловые процессы, происходящие при резании, оказываются неразрывно связанными между собой и зависящими один от другого.

Для большинства металлов, обрабатываемых резанием, характерна падающая зависимость механических характеристик от температуры. Сила резания непосредственно зависит от предела прочности σ_v обрабатываемого материала и в первом приближении оказывается пропорциональной ему. Следовательно, зависимость «сила резания – температура» также имеет отрицательный угол наклона, что определяет потенциальную неустойчивость системы и, как следствие, возможность возникновения в ней незатухающих автоколебаний.

Рассмотрим динамическую модель, представленную на рис. 1, в которой сила резания $F = F(\Theta)$ является известной монотонно убывающей функцией от температуры Θ в зоне резания.

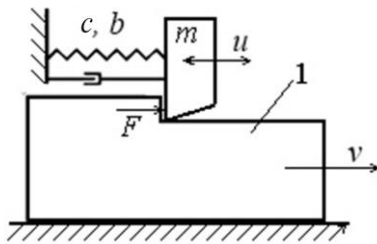


Рис. 1. Модель автоколебательной системы

Уравнение колебаний резца имеет вид

$$m\ddot{u} + b\dot{u} + cu = F(\Theta). \quad (1)$$

Для расчета температуры в зоне резания запишем уравнение энергетического баланса, связывающее изменение температуры в зоне резания с механической энергией, превращаемой в тепловую, и теплом, отдаваемым в окружающую среду:

$$CM\dot{\Theta} + H(\Theta - \Theta_0) = F(\Theta)(v - \dot{u}), \quad (2)$$

где Θ_0 – температура окружающей среды; M – нагреваемая масса; C – удельная теплоемкость; H – коэффициент теплоотдачи.

Система уравнений (1), (2) имеет частное

решение, соответствующее установившемуся равновесному состоянию $\dot{u} = 0, \dot{\Theta} = 0$. Из уравнения (1) находим положение резца в равновесном состоянии

$$u_m = F_m / c, \quad (3)$$

где $F_m = F(\Theta_m)$, а установившаяся температура Θ_m находится решением получаемого из (2) уравнения

$$F(\Theta) = (\Theta - \Theta_0)H / v. \quad (4)$$

Перейдем к оценке устойчивости найденного равновесного состояния. С этой целью введем новые координаты $x = u - u_m$ и $\vartheta = \Theta - \Theta_m$, описывающие малые отклонения координаты и температуры от полученных выше стационарных значений, и проведем линеаризацию зависимости силы резания от температуры в окрестности этих значений:

$$F(\Theta) = F(\Theta_m) + \chi(\Theta - \Theta_m) = F_m + \chi\vartheta, \quad (5)$$

где $\chi = \left. \frac{dF(\Theta)}{d\Theta} \right|_{\Theta=\Theta_m}$.

Линеаризованная характеристика показана на рис. 2 прямой линией 1, касательной к кривой $F = F(\Theta)$ в точке с координатами Θ_m, F_m .

В результате из уравнений (1), (2) с учетом равенств (3), (4), ограничиваясь величинами первого порядка малости, получим уравнения, описывающие малые колебания относительно положения равновесия:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = \chi\vartheta, \quad (6)$$

$$CM\dot{\vartheta} + (H - v\vartheta) = -cu_m\dot{x}.$$

Из уравнения (6) находим

$$\Theta = -\frac{1}{\chi}(m\ddot{x} + b\dot{x} + cx); \dot{\Theta} = -\frac{1}{\chi}(m\ddot{x} + b\dot{x} + \dot{c}) \quad (7)$$

После подстановки (3) в (2) и преобразований получим следующее уравнение относительно x :

$$\ddot{x} + (2n + h - Gv)\dot{x} + [\omega_0^2 + 2n(h - Gv) + G\omega_0^2 u_m]x + (h - Gv)\omega_0^2 x = 0, \quad (8)$$

где $2n = \frac{b}{m}$; $\omega_0^2 = \frac{c}{m}$; $h = \frac{H}{CM}$; $G = \frac{\chi}{CM}$

Запишем характеристическое уравнение:

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0, \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} a_0 &= 1; a_1 = 2n + h - Gv; \\ a_2 &= \omega_0^2 + 2n(h - Gv) + G\omega_0^2 u_m; \\ a_3 &= (h - Gv)\omega_0^2. \end{aligned}$$

Согласно критериям Рауса – Гурвица для устойчивости системы, описываемой уравнением третьего порядка, кроме положительности

коэффициентов характеристического уравнения (9) требуется выполнение условия $a_1 a_2 > a_0 a_3$, которое с учетом принятых обозначений принимает вид

$$(2n + h - Gv)[\omega_0^2 + 2n(h - Gv) + G\omega_0^2 u_m] > (h - Gv)\omega_0^2. \quad (10)$$

Прежде всего нас интересует случай падающей характеристики силы резания, при котором производная $\chi < 0$ и, согласно принятым в (8) обозначениям, $G < 0$. При этом в уравнении (9) коэффициенты $a_1 > 0$, $a_3 > 0$ и для обеспечения устойчивости, помимо условия (10), необходимо потребовать выполнения неравенства $a_2 > 0$. Легко показать, что это неравенство слабее условия (10). Действительно, если положить $a_2 = 0$, то левая часть неравенства (10) обращается в нуль и, следовательно, неравенство нарушается, т.е. имеет место потеря устойчивости и возбуждение автоколебаний. Таким образом, для оценки устойчивости и построения границы потери устойчивости достаточно использования неравенства (10). При отсутствии диссипации в колебательной системе, т.е. при $n=0$, неравенство (10) нарушается, и автоколебания возбуждаются при любом значении $G < 0$ (или $\chi < 0$).

Термомеханическая модель дает простое объяснение сущности некоторых явлений, лежащих в основе наиболее распространенных в настоящее время представлений о природе автоколебаний при резании. С позиций термомеханической модели объясняется физическая сущность некоторых явлений:

1) явления падающей по скорости зависимости силы резания, лежащего в основе модели Каширина;

2) явления запаздывания изменения силы резания от изменения толщины срезаемого слоя, лежащего в основе модели Эльясберга.

Модель Каширина. Пусть уравнение колебаний резца (см. рис. 1) имеет вид (2), а уравнение энергетического баланса имеет вид (3).

Как уже излагалось, система уравнений (1), (2) имеет частное решение, соответствующее установившемуся равновесному состоянию $\dot{i} = 0$, $\dot{\Theta} = 0$, (3), (4).

Пример графического решения уравнения (4) показан на рис. 2.

Установившиеся значения температуры Θ_m и силы F_m резания определяются координатами точки пересечения кривой $F = F(\Theta)$ и прямой, определяемой правой частью уравнения (4) при

заданном значении скорости резания v . Легко заметить, что при возрастании скорости резания (например $v_2 > v_1$) температура в зоне резания растет, а сила резания уменьшается. Таким образом, если построить зависимость силы резания от скорости, мы получим падающую характеристику силы резания, параметры которой в установившемся режиме зависят только от коэффициента H теплоотдачи.

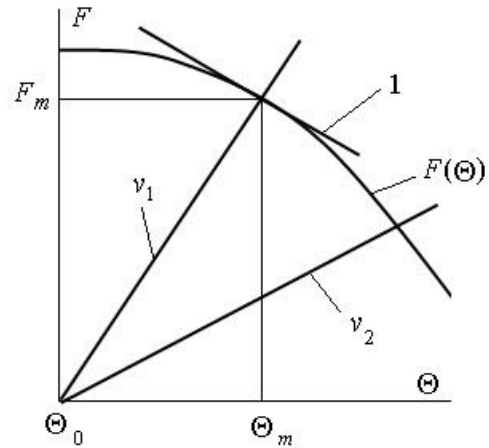


Рис. 2. Графическое решение уравнения 4.

Важным является вопрос о физической природе падающей характеристики силы резания. Величина силы резания в первую очередь определяется характером пластических деформаций в материале заготовки. В те времена, когда А.И. Каширин проводил свои исследования, металловедческая сторона вопроса о пластических деформациях металла при высоких скоростях деформирования была разработана крайне слабо. Каширин объяснял падающую характеристику силы резания изменением коэффициента трения между передней поверхностью инструмента и стружкой с ростом температуры

Но, как известно, значение силы резания в небольшой степени обусловлено значением силы трения резца о стружку. Поэтому столь значительное снижение силы резания при повышении скорости не может являться следствием изменения только силы трения.

Попробуем объяснить физический смысл падающей характеристики силы резания с помощью модели Джонсона–Кука [8], описывая поведение материала при высоких скоростях нагружения с помощью следующего уравнения:

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right]. \quad (11)$$

Напряжение пластического течения σ опре-

деляется произведением трех множителей. Первый множитель – статическая составляющая данного напряжения, где A – предел текучести, а B и n – коэффициенты, представляющие эффект упрочнения. Второй множитель отражает влияние скорости нагружения; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, $\dot{\epsilon}_0$ – скорость деформации при статических испытаниях; C – коэффициент чувствительности к скорости деформации. Третий множитель – фактор, соответствующий явлению теплового отпуска; T – текущая температура, T_0 – температура, при которой проводились статические испытания, $T_{пл}$ – температура плавления данного материала, m – показатель степени, характеризующий особенности разупрочнения материала с повышением температуры. Коэффициенты A , B , C , n , m определяются с помощью испытаний, методика которых также приведена в работе [7]. Там же приведены значения этих констант для некоторых материалов.

Очевидно, что сила резания пропорциональна напряжению пластического течения σ . Рассмотрим случай процесса резания со скоростью, линейно возрастающей с течением времени, тогда напряжение в области сдвига для каждого момента времени определяется произведением трех множителей, зависящих от времени. Работа силы резания в данном случае будет меняться по квадратичному закону. Некоторая доля работы, определяемая термодинамическими параметрами системы, будет идти на нагрев материала заготовки. Таким образом, в зоне низких скоростей доминирующим является второй множитель (напряжение возрастает по логарифмическому закону). Однако с повышением скорости температура в зоне резания будет меняться по закону, близкому к квадратичному, что приводит к разупрочнению материала в области сдвига. В какой-то момент эффект температурного разупрочнения полностью компенсирует эффект упрочнения, связанный с влиянием скорости деформации и характеристика $\sigma(v)$, а следовательно $F(v)$ станет падающей.

Модель Эльясберга. При наличии запаздывания дифференциальное уравнение колебаний резца относительно равновесного состояния описывается уравнением

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = -Kx(t - t_0), \quad (12)$$

где K – коэффициент пропорциональности; t_0 – время запаздывания силы резания от перемещения x резца.

Отыскивая решение уравнения (12) вида $x(t) = ae^{pt}$, получим характеристическое урав-

нение

$$-mp^2 + bp + c = -Ke^{-pt_0}. \quad (13)$$

Условием возникновения колебательной неустойчивости равновесного состояния является наличие пары мнимых корней $p = \pm j\omega t$ уравнения (12). Подставляя в (13) $p = j\omega t$, используя формулу Эйлера $e^{-j\omega t_0} = \cos \omega t_0 - j \sin \omega t_0$ и разделяя в полученном равенстве действительные и мнимые части, найдем

$$\begin{aligned} c - m\omega^2 &= K \cos \omega t_0, \\ b\omega &= K \sin \omega t_0. \end{aligned} \quad (14)$$

Физический смысл проученных соотношений очевиден: на частоте автоколебаний, удовлетворяющей равенствам (14), упругие, инерционные и диссипативные силы в колебательной системе полностью уравновешиваются силой возбуждения, определяемой правой частью уравнения (12). Равенства (14) можно рассматривать как параметрические уравнения границы D-разбиения, разделяющей области устойчивого и неустойчивого положения равновесия в плоскости параметров K и t_0 . Для удобства построения границ D-разбиения уравнения (14) приведем к безразмерному виду

$$\begin{aligned} \kappa &= \sqrt{(1 - \zeta^2)^2 + (\eta\zeta)^2}, \\ \tau_0 &= \frac{1}{\zeta} (\arcsin \frac{\eta\zeta}{\kappa} + 2\pi i), \\ &(i = 0, 1, 2, \dots), \end{aligned} \quad (15)$$

где $\kappa = K/c$, $\zeta = \omega/\omega_0$, $\omega_0 = \sqrt{c/m}$, $\eta = b/\sqrt{cm}$.

На рис. 3 показаны границы D-разбиения при $i=0$ и $i=1$. Штриховкой отмечена область устойчивого равновесного состояния.

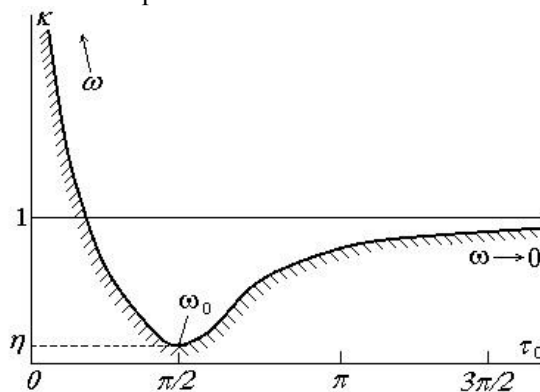


Рис. 3. Границы D-разбиения

Видно, что при заданной величине запаздывания возможно самовозбуждение колебаний определенной частоты, причем при величинах запаздывания $\tau_{0i} = \omega_0 t_{0i} = \frac{\pi}{2}(1 + 4i)$ возбуждение

колебаний с собственной частотой $\omega = \omega_0$ ($\zeta = 1$) происходит при минимальном значении коэффициента $\kappa = \eta$ ($K = b\omega_0$).

Ясный физический смысл запаздывания прослеживается в явлении возбуждения автоколебаний, связанном с так называемой обработкой по следу. В этом случае сила резания зависит от следа, оставленного инструментом на предыдущем проходе, и оказывается запаздывающей или на время $t_0 = 2\pi/nz$ (n – число оборотов изделия или инструмента в секунду; z – число режущих кромок инструмента) одного оборота изделия при токарной обработке ($z=1$), или на время между проходами двух смежных режущих кромок многолезвийного инструмента.

Хотя в работах Эльясберга и проведены эксперименты по определению величины запаздывания, физическая интерпретация этого явления не приводится. Попытаемся сделать это, записав динамическую характеристику силы резания

$$F(x, \dot{x}) = kx + \beta \dot{x}, \quad (16)$$

где k , β – эквивалентные коэффициенты упругих и диссипативных сил, возникающих при резании. Предположим, что сила резания возникает в результате гармонических колебаний $x(t) = ae^{j\omega t}$ и является запаздывающей на величину t_0 функцией времени, т.е. описывается уравнением

$$f(t) = F[x(t), \dot{x}(t)] = Kx(t - t_0). \quad (17)$$

В результате из соотношений (16), (17) с учетом характера рассматриваемых движений получаем равенство

$$k + j\omega\beta = Ke^{-j\omega t_0} = K(\cos \omega t_0 - j \sin \omega t_0), \quad (18)$$

из которого после разделения действительных и мнимых частей находим

$$k = K \cos \omega t_0, \quad \omega\beta = -K \sin \omega t_0. \quad (19)$$

Из уравнений (14) следует, что $K \sin \omega t_0 \geq 0$. Поэтому выполнение второго из соотношений (19) возможно только при $\beta < 0$, т.е. при отрицательной диссипации. Таким образом, по нашему мнению, наблюдаемое запаздывание силы от деформации является не причиной, а следствием возбуждения автоколебаний при падающей характеристике силы резания.

Рассмотренная модель построена при определенных предположениях. Так, предполагается, что нагрев при резании происходит равномерно в некотором объеме, обладающем массой M , а передача тепла в среду происходит через границу резкого перепада температур. Из ис-

следований температурных процессов, сопровождающих резание металлов, известно, что зона наивысших температур действительно располагается в достаточно узкой окрестности контакта резца и заготовки, а изменение температур при отводе тепла в среду происходит с достаточно высоким градиентом. Аналитическое решение уточненной модели этого процесса едва ли возможно. Поэтому дальнейшее изучение термомеханических автоколебаний производилось с помощью численных методов.

Двумерная конечно-элементная модель показана на рис. 4. При ее построении использована идеальная упругопластическая модель материала, модуль упругости и предел текучести которого зависят от температуры. Инструмент моделируется колебательной системой с одной степенью свободы. Трение между инструментом, заготовкой и стружкой считается кулоновским. В качестве критерия стружкообразования выбрано критическое значение деформации сдвига, при достижении которого элемент удаляется с сетки.

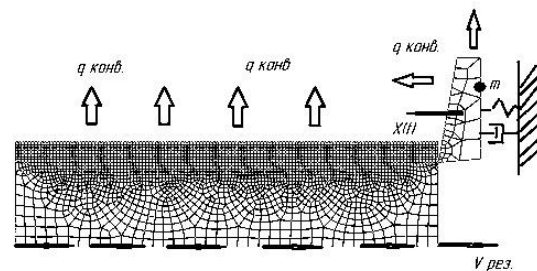


Рис. 4. Граничные условия КЭ модели

В результате расчетов подтверждена возможность возбуждения автоколебаний. Получены как переходные, так и установившиеся режимы автоколебаний. На рис. 5а показано изменение температуры в процессе установления автоколебаний при врезании инструмента в материал.

Видно, что в начале резания процесс сопровождается быстрым разогревом материала, и при температуре $\Theta \approx 200$ градусов происходит самовозбуждение автоколебаний. Дальнейший переход к установившемуся режиму автоколебаний с амплитудой колебаний температуры порядка 40 градусов в окрестности средней температуры около 400 градусов происходит вследствие нелинейности зависимости механических характеристик материала от температуры.

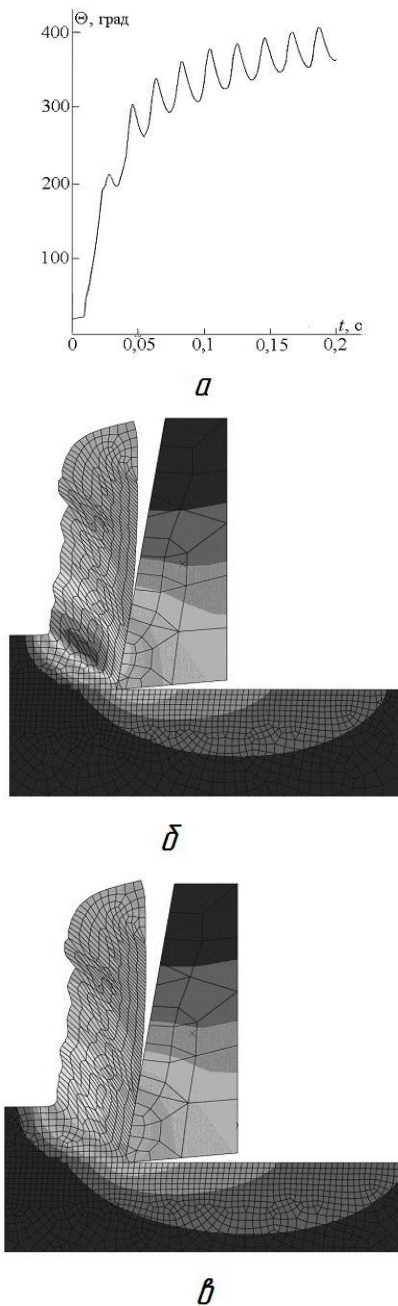


Рис. 5. Распределение температур в зоне резания в противоположных фазах колебания

На рис. 5б, 5в приведены картины распределения температур в зоне резания в двух фазах колебаний резца в установившемся режиме: в момент достижения температурой максимального значения и в момент достижения температурой минимального значения. На рис. 5б отчетливо видна локальная область высокой температуры в первичной зоне сдвига при формировании стружки. Именно предположение о подобной локализации и наличии границы резкого перепада температур с окружающей средой являлось одним из основных допущений, принятых при построении математической мо-

дели (1), (2).

Исследование данной модели позволяет провести анализ влияния свойств обрабатываемого материала, параметров технологической системы и режимов резания на характер и уровень вибрации при обработке металлов резанием. Найденны границы устойчивости, проведено исследование влияния автоколебаний на форму стружки, изучено влияние термомеханических свойств обрабатываемого материала на характер и интенсивность вибрации. В результате моделирования определены законы изменения во времени основных параметров автоколебательного процесса. Пример решения показан на рис. 6.

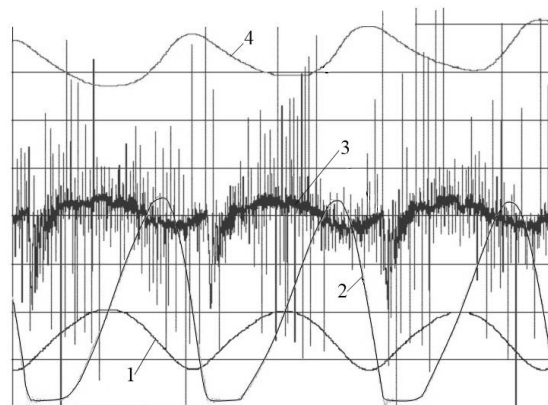


Рис. 6. Графики изменения основных параметров установившегося автоколебательного процесса от времени

Здесь 1 – колебания резца; 2 – скорость резца относительно заготовки, движущейся с постоянной скоростью; 3 – сила резания; 4 – температура в зоне контакта инструмента и стружки.

Колебания резца происходят с частотой собственных колебаний упругой системы по закону, близкому к гармоническому (кривая 1). Однако относительная скорость резца имеет участки, где эта скорость равна нулю, т.е. резец неподвижен относительно заготовки и его скорость в абсолютном движении равна скорости изделия. Во время совместного движения резца и заготовки энергия от привода заготовки запасается упругой системой резца, а затем, когда сила пружины оказывается достаточной для преодоления сопротивления резания, начинается встречное движение резца. Из сопоставления графика относительной скорости с графиком изменения температуры (кривая 4) видно, что при попутном движении и относительном останове температура в зоне резания уменьшается, при встречном движении возрастает. Именно такое изменение температур и создает условия возникновения и поддержания автоколебаний.

Особое внимание следует уделить графику зависимости силы резания от времени (кривая 3). Сила резания в среднем отслеживает изменение температуры, однако ее график содержит дополнительные высокочастотные составляющие. По-видимому, они являются следствием дискретности контактной линии, соединяющей стружку и заготовку. Верность этого предположения подтверждается тем, что частота высокочастотных колебаний приблизительно равна частоте разрушения конечных элементов на контактной линии. Некоторый вклад в общую картину колебаний силы резания вносят и упругие колебания стружки.

Здесь следует обратить внимание на наблюдаемый на графике характерный провал силы резания на границе перехода к участку относительного останова инструмента. Этот провал объясняется прохождением участков упругой разгрузки и нагружения в зоне резания при переходе от пластического деформирования к упругому напряженному состоянию и обратно.

Исследование конечно-элементной модели автоколебаний резца позволило проверить справедливость предположения о термомеханической природе автоколебаний при резании и адекватность математической модели этого процесса. Характер полученных результатов согласуется с результатами натурных экспериментов [8]. Сформированные модели могут служить для нахождения режимов резания, обеспечивающих минимальный уровень вибрации, а

также при проектировании металлорежущего инструмента и оснастки. Понимание физического механизма возбуждения автоколебаний как взаимосвязанного термомеханического процесса позволяет прояснить физический смысл явлений, лежащих в основе наиболее распространенных моделей автоколебаний при резании [1–3].

Список литературы

1. Каширин А.И. Исследование вибраций при резании металлов. М.-Л.: АН СССР, 1944. 282 с.
2. Соколовский А.П. Вибрации при работе на металлорежущих станках. Исследование колебаний металлорежущих станков при резании металлов. – М.: Машгиз, 1958.
3. Эльясберг М.Е. Основы теории автоколебаний при резании металлов // Станки и инструмент. 1962. № 10, №11.
4. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
5. Глустый И. Автоколебания в металлорежущих станках. М.: Машгиз. 1956.
6. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985. 304 с.
7. Johnson G.R., Cook W.H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands. 1983. P. 541–547.
8. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение, 1987. 184 с.

THERMAL-MECHANICAL MODEL OF THE EXCITATION OF SELF-OSCILLATIONS IN METALS MACHINED BY CUTTING

V.K. Astashev, G.K. Korendyasev, V.I. Yerofeyev

A hypothesis about the thermal-mechanical nature of self-oscillations of metals machined by cutting is introduced, that makes it possible to generalize the main available models of this effect. Based on the hypothesis, an analytical and a numerical models of excitation of self-vibrations are developed. The adequacy of the results obtained is corroborated by the results of realistic experiments.

Keywords: self-oscillations, thermal-mechanical model, decreasing characteristic of the cutting force, finite-element model.