

УДК 534.1

О ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЕ ЭФФЕКТОВ, ЛЕЖАЩИХ В ОСНОВЕ МОДЕЛИ ВОЗБУЖДЕНИЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ РЕЗАНИИ КАШИРИНА

© Георгий Константинович Корендясев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия
korenduba@gmail.com

Аннотация. В статье производится анализ физических причин, лежащих в основе модели возбуждения автоколебаний при резании, разработанной А.И. Кашириным. Анализ производится аналитическими методами на примере упрощенной модели резания с одной степенью свободы с учетом термомеханических процессов.

Ключевые слова: модель Каширина, резание металлов, фрикционная аналогия, математическая модель, автоколебания.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда. Проект № 19-19-00065.

ON THE PHYSICAL NATURE OF THE KASHIRIN'S MODEL OF EXCITATION OF SELF-OSCILLATION IN CUTTING

© G.K. Korendyasev

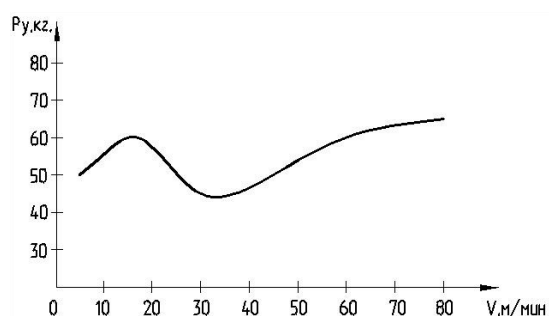
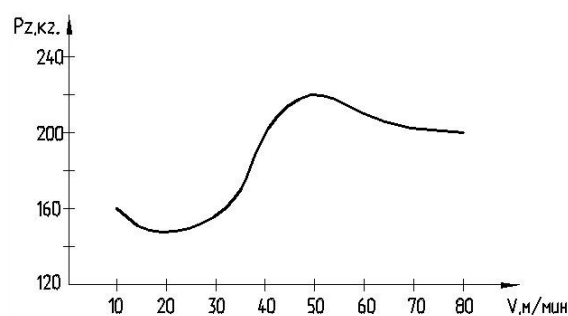
Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Moscow, Russia

Abstract. The article analyzes the physical causes underlying the model of excitation of self-oscillations during cutting, developed by A.I. Kashirin. The analysis is performed using the analytical methods on the example of a simplified model of cutting with one degree of freedom, taking into account thermomechanical processes.

Keywords: Kashirin's model, metal cutting, frictional analogy, mathematical model, self-oscillations.

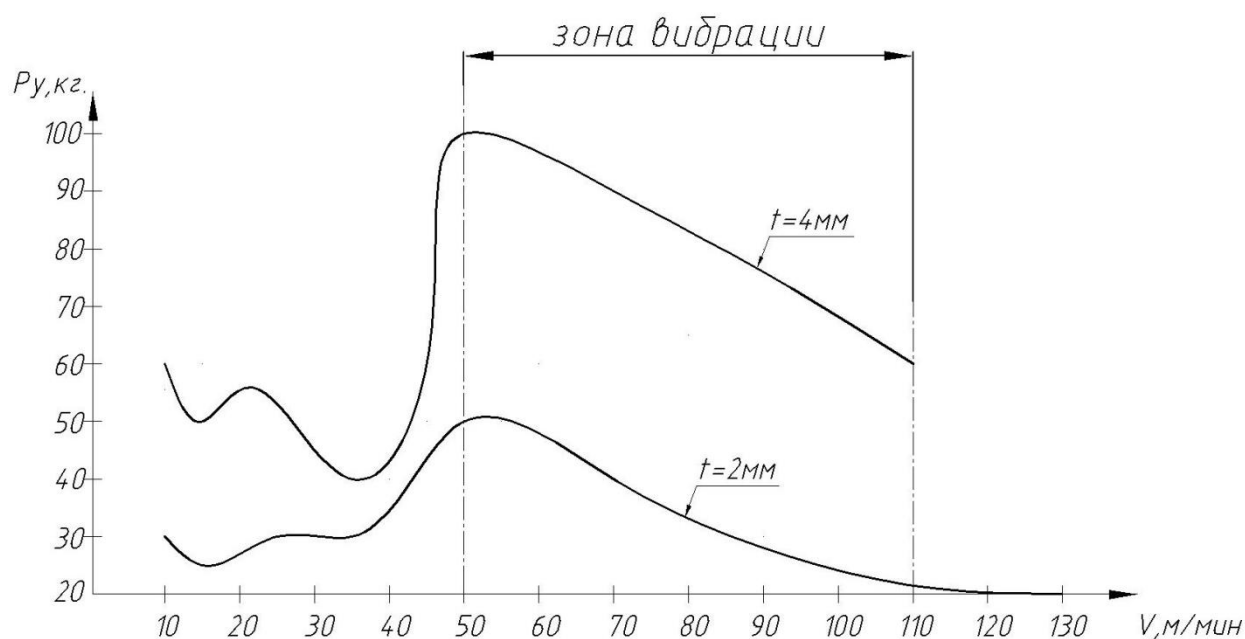
Acknowledgements. The work was supported by the Russian Science Foundation. Project No. 19-19-00065.

Исследование А.И. Каширина является одним из первых систематических исследований вибрации при обработке лезвийным инструментом как автоколебательного процесса [1]. В основе его модели лежит эмпирически установленная падающая зависимость силы резания от скорости резания. Каширин провел экспериментальную работу по определению зависимости радиальной (P_y) и тангенциальной (P_z) компонент силы резания от скорости резания для различных сортов стали и чугуна. В ходе экспериментов было установлено следующее: При обработке чугуна сила резания практически не изменяется с изменением скорости резания. При обработке среднеуглеродистых сталей P_z остается постоянной, а P_y существенно изменяется (рис. 1).

Рис.1. Зависимость $P_y(v_{рез})$ для стали 35.Рис.2. Зависимость $P_z(v_{рез})$ для стали 15.

Совершенно иной результат был получен для малоуглеродистых вязких сталей. На рисунке 2 показана кривая тангенциальной составляющей при изменении скорости резания от 10 до 80 м/мин при обработке стали «15». При увеличении скорости резания от 16 до 50 м/мин составляющая P_z увеличивается до своего максимального значения, равного 150% от минимального значения; при дальнейшем увеличении скорости резания составляющая P_z медленно снижается.

Еще более резкие изменения наблюдались у радиальной составляющей P_y от скорости резания. На рисунке 3 показаны две кривые этой зависимости: в пределах изменения скорости резания от 10 до 130 м/мин для глубины резания 2 мм и в пределах скоростей от 10 до 110 м/мин для глубины резания 4 мм. Обе кривые дают по существу одинаковую картину: начиная со скорости резания 35 м/мин, составляющая P_y сравнительно резко увеличивается и достигает максимума при скорости 54 м/мин.

Рис.3. Зависимость $P_y(v_{рез})$ для стали 15.

При проведении данных экспериментов было обнаружена еще одна важная закономерность: в интервале скоростей от 54 до 110 м/мин, т.е. на спадающей ветви указанных выше кривых,

наблюдались резко выраженные вибрации, которые оставляли волнообразный след на обрабатываемой поверхности и на поверхности резания. При обработке чугуна периодических колебаний не наблюдалось во всем диапазоне скоростей резания, вибрации носили случайный характер. На основании этих наблюдений А.И. Каширин провел аналогию между автоколебаниями при резании и автоколебаниями подпружиненного тела, расположенного на движущейся с постоянной скоростью шероховатой ленте [2], где самовозбуждение колебаний происходит при убывающей по скорости силе трения (рис.4а). Зависимость силы трения от скорости в этом случае также выражается графиком, имеющим ярко выраженный падающий участок (рис. 4б).

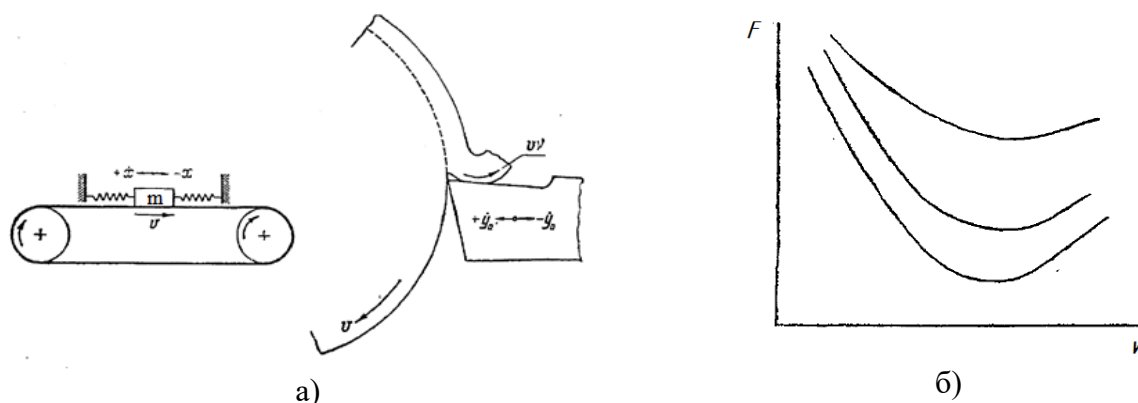


Рис. 4. Аналогия между фрикционными автоколебаниями и автоколебаниями при резании.

Процесс возбуждения фрикционных автоколебаний можно представить следующим образом. При движении груза в направлении скорости ленты сила трения будет меньше, чем при обратном движении. Следовательно, в течение каждого периода системе будет сообщаться добавочная энергия, равная разности между работами трения, соответствующими каждому полупериоду, причем эта энергия будет сообщаться в направлении движения в течение одного из полупериодов. Сила трения сообщает системе импульсы при каждом колебании в направлении движения системы и таким образом поддерживает или усиливает колебательное движение.

Математические соотношения в случае модели процесса резания аналогичны соотношениям, полученным для фрикционной модели. Исследование Каширина является первой попыткой дать математическое описание автоколебаний при резании и имеет весьма важное значение для понимания механизма этого явления, однако многочисленные последующие эксперименты других исследователей показали, что вибрация часто возникает и на возрастающей ветви зависимости силы резания от скорости. И.С. Штейнберг [3], Л.К. Кучма [4], проведя экспериментальные исследования условий появления вибрации, пришли к выводу, что возникновение низкочастотных колебаний не всегда связано с падающей характеристикой сил резания. Согласно этим экспериментам, зона вибрации захватывает восходящую часть кривой $F=F(v)$, ее вершину и часть нисходящей ветви. Однако Л.К. Кучма и И.С. Штейнберг исследовали процесс установившихся автоколебаний, поэтому из их экспериментов неясно, на какой части кривой $F=F(v)$ происходит самовозбуждение автоколебаний.

Настоящая работа представляет попытку объяснения физических причин эффектов, наблюдаемых Кашириным.

Возникающие в процессе резания силы резания создаются в основном за счет пластической деформации срезаемого слоя материала заготовки и преодоления сил трения на рабочих поверхностях режущего инструмента [9], причем силы трения напрямую зависят от сил пластического деформирования. Механическая энергия, затраченная на срезание стружки, преобразуется в тепловую энергию, которая приводит к нагреву зоны резания. Температура в зоне контакта резца и заготовки при тяжелых условиях обработки может достигать 1000-1100°C. При таком значительном 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. Таким образом, механические и тепловые процессы, происходящие при резании, оказываются неразрывно связанными между собой и зависящими один от другого.

На рис. 5 представлены графики зависимости некоторых механических характеристик низкоуглеродистой стали от температуры [10].

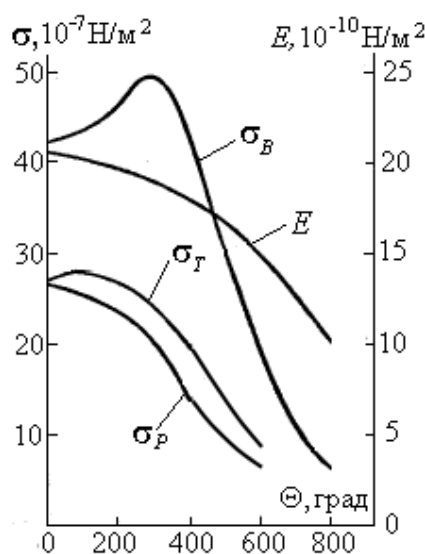


Рис. 5. Зависимости механических свойств стали от температуры.

Здесь E – модуль упругости, σ_B – предел прочности, σ_T – предел текучести, σ_P – предел пропорциональности. Из рисунка видно, что все характеристики имеют участки с ярко выраженной падающей зависимостью от температуры. Подобного рода зависимости характерны практически для всех металлов, обрабатываемых резанием. Сила резания непосредственно зависит от механических характеристик и в первом приближении прямо пропорциональна пределу прочности обрабатываемого материала [5]. Следовательно, сила резания так же имеет участки с падающей зависимостью от температуры.

Рассмотрение связей между тепловыми и механическими процессами при резании позволяет выдвинуть гипотезу о термомеханической природе автоколебаний при лезвийной обработке. Именно учет уменьшения силы резания с ростом температуры позволяет вскрыть взаимосвязи, возникающие в процессе резания, и превращает систему «резец-заготовка» в систему с отрицательной диссипацией, т.е. автоколебательную. Физический механизм термомеханических автоколебаний действует следующим образом. Любое случайное воздействие выводит систему «резец-заготовка» из равновесия и приводит к возникновению собственных колебаний технологической системы, вследствие которых изменяется скорость

резания, а следовательно и работа силы резания, уровень тепловыделения и температура в зоне контакта резца с заготовкой. Изменение температуры, влияя на механические характеристики обрабатываемого материала, приводит к изменению силы резания. Цикл замкнулся. При определенных условиях за время цикла может произойти возрастание интенсивности колебаний, т.е. возбуждение автоколебаний. Таким образом, данная модель имеет все признаки автоколебательной системы.

Рассмотрим динамическую модель, представленную на рис.6, в которой сила резания $F = F(\Theta)$ является известной монотонно убывающей функцией от температуры Θ в зоне резания.

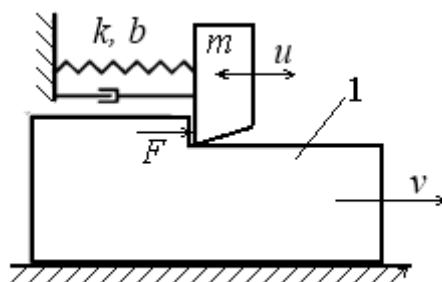


Рис.6. Модель автоколебательной системы.

Уравнение колебаний резца имеет вид

$$m\ddot{u} + \beta\dot{u} + ku = F(\Theta) \quad (1)$$

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

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

Пример графического решения уравнения (4) показан на рис. 7.

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.

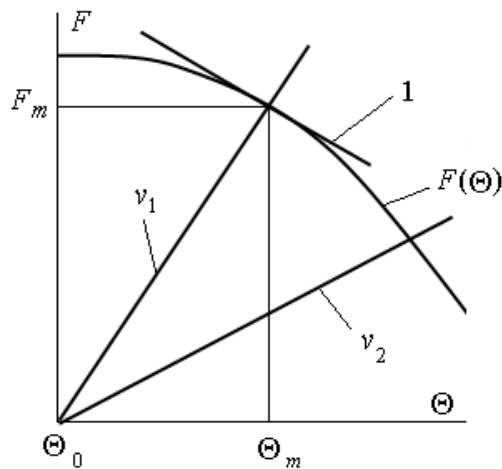


Рис.7. Графическое решение.

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

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

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

Линеаризованная характеристика показана на рис. 7 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

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = \chi\vartheta, \tag{5}$$

$$CM\dot{\vartheta} + (H - v\vartheta) = -cu_m\dot{x} \tag{6}$$

Из уравнения (14) находим

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

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

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

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 $a_0 = 1$; $a_1 = 2n + h - Gv$; $a_2 = \omega_0^2 + 2n(h - Gv) + G\omega_0^2 u_m$; $a_3 = (h - Gv)\omega_0^2$

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 (рис. 3), при котором производная $\chi < 0$, и согласно принятым в (8) обозначениям $G < 0$. В этом случае 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 использование 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 $\chi < 0$). Аналогичное явление происходит и в рассмотренной в п.1 системе с падающей характеристикой сухого трения.

Разработанная модель дает наглядное качественное описание и понимание природы падающей характеристики силы резания и возбуждения автоколебаний. Данная 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 исследований температурных процессов, сопровождающих резание металлов [6], известно, что зона наивысших температур действительно располагается в достаточно узкой окрестности контакта резца и заготовки, а изменением температур при отводе тепла в среду происходит с достаточно высоким градиентом. Решение уточненной модели этого процесса возможно с применением численного моделирования.

Список литературы

1. Каширин А.И. Исследование вибраций при резании металлов. - М.-Л.: АН СССР, 1944. - 282 с.
2. Мандельштам Л.И. Лекции по теории колебаний. - М.: Наука, 1972. – 470 с.
3. Штейнберг И.С. Устранение вибраций, возникающих при резании металлов на токарном станке. - М.: Машгиз, 1947.
4. Кучма Л.К. Устранение вибраций при обработке металлов резанием. Сб. «Исследование колебаний металлорежущих станков при резании металлов». - М.: Изд-во АН СССР, 1958.
5. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. - М.: Высшая школа, 1985. - 304 с.
6. Kalthori. Modelling and Simulation of Mechanical Cutting. Doctoral thesis. Lulea University of Technology. – Sweden, 2001. - 103 с.

Дата поступления: 2 декабря 2019 г.