

УДК 534.1

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

© 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.П. Соколовским. Анализ производится с помощью метода конечных элементов на примере модели прямоугольного свободного резания с учетом термомеханических процессов.

Ключевые слова: модель Соколовского, прямоугольное свободное резание металлов, конечноэлементное моделирование, математическая модель, автоколебания.

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

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

© G.K. Korendyasev

Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of RAS, Moscow, Russia
korenduba@gmail.com

Abstract. The article analyzes the physical causes underlying the model of excitation of self-oscillations during cutting, developed by A.P. Sokolovsky. The analysis is performed using the finite element method on the example of a model of rectangular free cutting, taking into account thermomechanical processes.

Keywords: Sokolovsky's model, rectangular free cutting of metals, finite element simulation, mathematical model, self-oscillations.

Acknowledgements: The research was supported by Russian Science Foundation (project №19-19-00065).

Проблеме возникновения вибрации при обработке металлов резанием посвящено множество работ. Эта проблема начала серьезно изучаться в 30х годах XX века, когда на фоне научно-технической революции стали повышаться требования к точности и производительности механической обработки металлов. К этому времени относятся первые математические модели этого явления. Необходимо отметить, что несмотря на то, что с тех пор по данной тематике было написано множество серьезных научных трудов, первые модели этого явления достаточно достоверно описывали эффекты, происходящие при обработке металлов в условиях автоколебаний. Это связано с тем, что данные модели с одной стороны были

полностью основаны на эмпирических данных, с другой стороны были достаточно просты, чтобы применять их для практических расчетов. Однако на тот момент не проводилась работа по исследованию физических причин, лежащих в основе этого явления.

В настоящей работе предпринята попытка объяснения физики процессов, лежащих в основе одной из ранних работ по автоколебаниям при резании - работе А.П. Соколовского [1].

Причиной автоколебаний, по мнению Соколовского, является переменная величина радиальной компоненты силы резания P_y при периодическом сближении и удалении детали и инструмента.

Он рассматривает колебания, нормальные к обрабатываемой поверхности (рис.1). Именно колебания этого направления влияют на волнистость обрабатываемой поверхности.

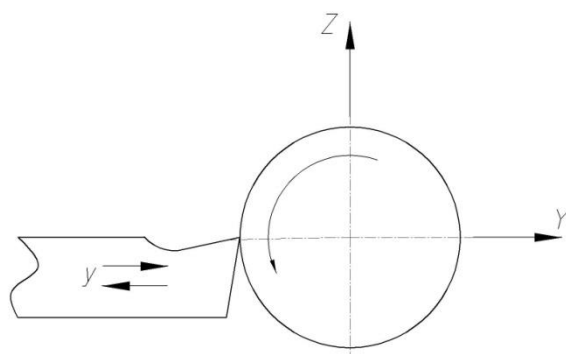


Рис. 1.7. Радиальные колебания резца.

Сила P_y при точении в первом предположении определяется выражением [2]:

$$P_y = C_r \cdot B \cdot s^q, \quad (1)$$

где C_r – коэффициент, зависящий от рода обрабатываемого материала, геометрии инструмента и некоторых других факторов;

B – ширина среза; s – толщина среза; q – показатель степени, имеющий значение меньше единицы, приблизительно $q=0,75$.

При возникновении колебаний мгновенная толщина среза не будет равна толщине среза (s) при спокойной работе, а будет циклически изменяться. Принимая, что при отсутствии вибраций $y=0$, получим простое выражение:

$$s_{\text{мгн.}} = s - y, \quad (2)$$

где $s_{\text{мгн.}}$ – мгновенное значение толщины среза.

Если считать, что формула 1 справедлива для системы, находящейся в состоянии колебательного движения, мгновенное значение силы $P_{y \text{ мгн.}}$ будет равно:

$$P_{y \text{ мгн.}} = C_r \cdot B \cdot (s - y)^q = C_r \cdot B \cdot s^q \left(1 - \frac{y}{s}\right)^q = P_y \left(1 - \frac{y}{s}\right)^q, \quad (3)$$

Простота полученного выражения является следствием предположения, что при быстром колебательном движении резца (как при его врезании, так и при отходе) справедливы те же зависимости, которые были получены опытным путем для значения усилий в квазистатическом состоянии системы.

Очевидно, что при однозначном виде зависимости $P_y=f(y)$, т.е. если каждому данному значению y соответствует одно, вполне определенное значение P_y , то сила P_y не может поддерживать автоколебательный процесс. Работа такой силы за полный цикл (врезание и

отход резца), равная $\int_{y_0}^{y_0} f(y)dy$, где y_0 – значение y , соответствующее началу и концу

периода, равна нулю, вне зависимости от характера изменения y в функции времени. Графически зависимость $P_y=f(y)$ изображается линией АВ, показанной пунктиром на рисунке 2.

В реальных системах необходимо учитывать присутствие диссипативных сил, которые за каждый цикл поглощают некоторое количество энергии. Эта энергия может быть восполнена только за счет работы силы резания, из чего следует, что $P_y=f(y)$ есть неоднозначная функция. Значение силы P_y при врезании резца в металл должно быть меньше, чем при его отходе. (сплошные линии на рис. 2).

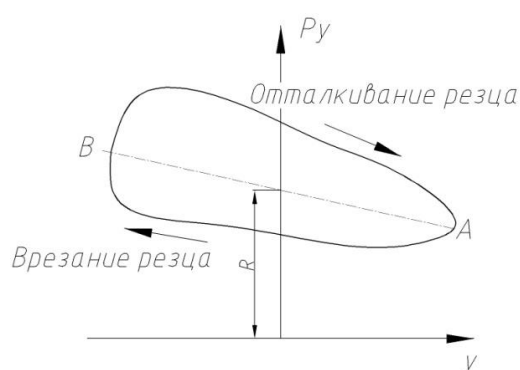


Рис. 2. Изменение силы резания в цикле колебаний по Соколовскому.

Различие усилий при врезании и при отталкивании Соколовский объясняет действием наклепа в слое, прилегающем к режущей кромке. «При врезании режущая кромка срезает свежие, слабо деформированные слои металла. При отталкивании режущая кромка срезает сильно деформированные, наклепанные слои металла с повышенной твердостью». Сравнение теоретических выводов с результатами экспериментов показало, что предложенная модель качественно описывает автоколебательный процесс при точении. Однако физический принцип, объясняющий наличие двузначности силы и отраженный в приведенной выше формулировке гипотезы, в действительности не существует.

Л.С. Мурашкин [3] на основании энергетической теории прочности показал, что деформационное упрочнение слоев металла в зоне резания с одним и тем же значением мгновенной толщины срезаемого слоя при врезании и отталкивании резца одинаково. Он также экспериментально показал [4], что интенсивное автоколебательное движение имеет место и при обработке неупрочняющихся материалов.

Подробная критика модели Соколовского содержится также в работе [5].

Для проверки адекватности модели Соколовского было проведено конечноэлементное моделирование процесса прямоугольного свободной резания на основе зависимостей, полученных в работе [6].

Задача решалась в двумерной постановке с помощью программы *abaqus explicit (student edition)* с использованием явного метода интегрирования уравнений динамики.

Исходными данными для моделирования являются:

- а) модели материалов заготовки и инструмента;
 б) модель трения между поверхностями инструмента и заготовки;
 в) модель стружкоотделения;
 г) геометрия инструмента и заготовки.

При моделировании использовалась идеальная упруго-пластическая модель обрабатываемого материала. Данные по зависимости модуля упругости и предела текучести обрабатываемого материала от температуры заимствованы из источников [7,8]. В качестве материала заготовки выбрана сталь AISI 1045. Необходимые для моделирования свойства этой стали в зависимости от температуры приведены в табл. 1.

Инструмент предполагается абсолютно жестким, поэтому его материал описывался лишь термодинамическими параметрами и плотностью. В качестве инструментального материала был выбран твердый сплав H10F, обладающий следующими свойствами: плотность $\rho=14500$ кг/м³; коэффициент линейного теплового расширения $\alpha=5,4 \cdot 10^{-6}$; теплоемкость $C_p=400$ Дж/(кг·°С); теплопроводность $H=50$ Вт/(м·°К).

Таблица 1

Температура $T, ^\circ\text{C}$	20	200	400	600	1800
Модуль упругости $E, \text{ГПа}$	215	210	165	160	0
Коэффициент Пуассона, ν	0,3				–
Предел текучести $\sigma_T, \text{МПа}$	400	340	300	160	0
Удельная теплоемкость $C_p, \text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$	461				
Теплопроводность $H, \text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{К})$	23	23,5	25,5	26,5	30
Плотность $\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	7750				
Коэффициент линейного теплового расширения $10^5 \alpha$	1,2				

Была принята кулоновская модель трения: $\tau = \mu \sigma \text{sgn}v$, где τ – напряжение сдвига в контакте, σ – нормальное напряжение в контакте, μ – коэффициент кулоновского трения. На основании обзора литературы значение коэффициента трения на контактных площадках «инструмент – стружка» и «инструмент – заготовка» было выбрано $\mu=0.2$.

В качестве критерия стружкоотделения выбрано критическое значение деформации сдвига в слое, разделяющем заготовку и стружку.

При моделировании приняты следующие геометрические параметры процесса, инструмента и заготовки: глубина резания 2 мм; ширина среза 3 мм; передний угол инструмента 10°; задний угол инструмента 5°.

В модели использованы 4-х узловые элементы CPE4RT с использованием опции «distortion control» для сохранения качества сетки при значительных пластических деформациях материала заготовки. Сетка уплотнялась вблизи зон ожидаемого высокого градиента напряжений, деформаций и температур. Размер сетки выбирался таким образом, что бы с одной стороны обеспечить достаточную точность расчета, а с другой стороны приемлемую размерность задачи.

Граничные условия модели приведены на рисунке 3. Заготовка движется с постоянной скоростью $V_{рез}$ навстречу инструменту. Инструмент с массой m соединен с неподвижным основанием упруго-диссипативной связью с коэффициентами жесткости c и вязкого сопротивления b и имеет возможность перемещения только вдоль оси X . Начальные условия:

заданная температура системы и начальная скорость заготовки, равная постоянной составляющей скорости резания.

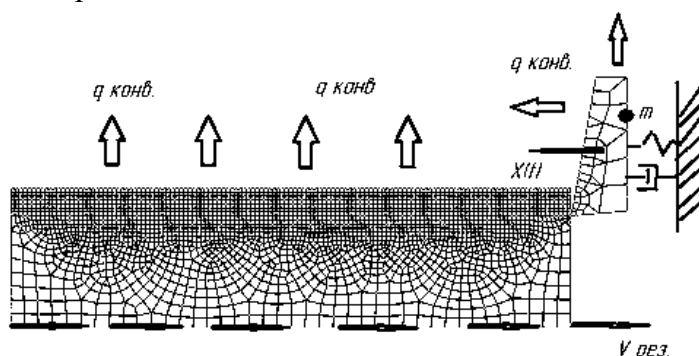


Рис.3. Граничные условия модели.

Максимальный шаг интегрирования равен $\Delta t_{max} = \min(L/c)$; где L – характерный размер конечного элемента, $c = \sqrt{E/\rho}$ – скорость продольной волны в материале изделия.

С помощью данной модели был получен режим установившихся автоколебаний. При определенных соотношениях механических и тепловых параметров обрабатываемого материала происходит самовозбуждение автоколебаний и их переход к установившимся периодическим режимам.

В ходе моделирования были получены графики (рис. 4) изменения основных параметров установившегося автоколебательного процесса от времени: 1 – смещение резца; 2 – относительная скорость резца и заготовки; 3 – сила резания; 4 – средняя температура в контакте резца и стружки. Для наглядности представленные кривые показаны в нормированном виде.

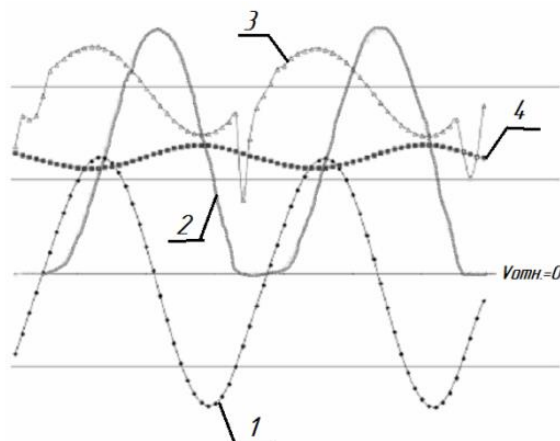


Рис.4. Графики изменения основных параметров установившегося автоколебательного процесса от времени.

В первую очередь следует уделить внимание графикам зависимости силы резания от времени (кривая 3) и средней температуры в зоне резания. Из этих графиков видно, что сила резания изменяется в зависимости от температуры в зоне резания.

Следует отметить, что столь значительные колебания температуры происходят в достаточно малом объеме. На рис. 5 приведены картины распределения температур в зоне резания в двух фазах колебаний резца в установившемся режиме в моменты достижения температурой максимального (рис. 5,а) и минимального (рис. 5,б) значений. На рис. 5,а отчетливо видна локальная область высокой температуры в первичной зоне сдвига при формировании стружки.

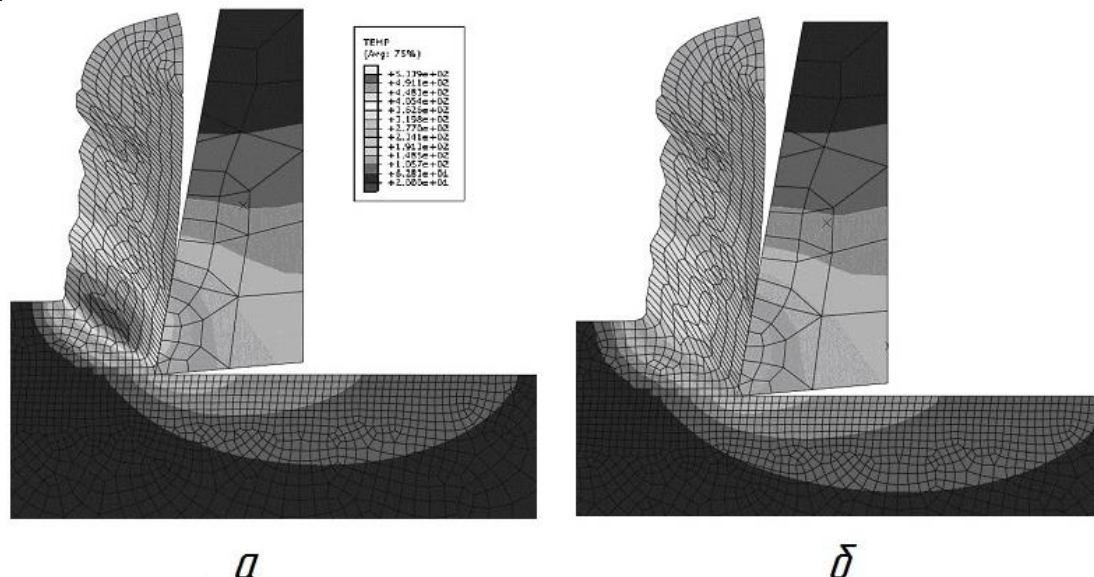


Рис.5. Распределение температур в зоне резания в противоположных фазах колебания.

На рис. 6 показан график изменения температуры на площадке контакта инструмента с деталью в процессе установления автоколебаний при врезании инструмента в материал. Видно, что в начале резания процесс сопровождается быстрым разогревом материала, и при определенной температуре происходит самовозбуждение автоколебаний, а затем и дальнейший переход к установившемуся режиму автоколебаний, сопровождающийся возрастанием как средней за цикл температуры, так и амплитуды ее циклического изменения.

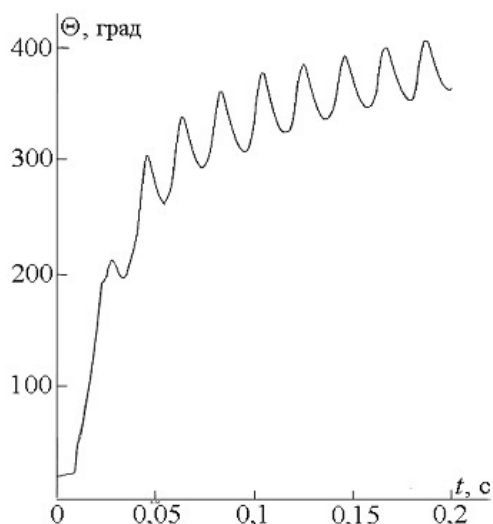


Рис. 6. График изменения температуры на площадке контакта инструмента с деталью в процессе установления автоколебаний при врезании инструмента в материал.

Анализ зависимости контактной температуры от времени показывает, что изменение температуры на контактной площадке за один период установившихся колебаний составляет $50^{\circ} - 60^{\circ} \text{C}$, а в зоне сдвига до 100°C , что при средней температуре в зоне резания равной примерно 500°C обеспечивает изменение предела текучести в области сдвига на 10-15 мПа. Эти данные дают представление о том, насколько мощным источником возбуждения автоколебаний является разупрочнение материала заготовки при повышении температуры в зоне резания.

Анализ графиков (рис.4) показывает, что максимальное значение силы резания соответствует минимальной температуре в зоне резания и завершению фазы «отталкивания» резца. Минимальное значение силы резания и максимальная температура в зоне резания соответствуют окончанию фазы «врезания» резца.

Данная модель полностью описывает эффекты, наблюдаемые Соколовским. В процессе установившихся автоколебаний сила резания при врезании резца получается меньше, чем при отталкивании, однако этот эффект является не причиной, а следствием возникновения автоколебаний. Требуемая двузначность зависимости силы резания от координаты резца в процессе колебаний $P(y)$ достигается за счет упругой разгрузки системы.

Таким образом, двузначный характер силы резания, наблюдаемый Соколовским, может быть объяснен возбуждением автоколебаний, связанных с падающей зависимостью силы резания от температуры. Подобное объяснение физической природы различия сил резания в цикле автоколебаний позволяет разработать новые пути снижения вибрации при резании, связанные с воздействием на температурный режим обработки.

Список литературы

1. Соколовский А.П. Вибрации при работе на металлорежущих станках. Сборник «Исследование колебаний металлорежущих станков при резании металлов». - М.: Машгиз, 1958.
2. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. - М.: Высшая школа, 1985. - 304 с.
3. Мурашкин Л.С., Мурашкин С.Л. Прикладная нелинейная механика станков. - Л.: «Машиностроение», 1977. - 192 с.
4. Мурашкин Л.С. Развитие теории резания металлов//Труды ЛПИ. Машиностроение. – 1967. - №282. - С. 79-103.
5. Гуськов А. М. Разработка методов построения и анализа динамических моделей технологических процессов при механической обработке. // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. МГТУ им. Баумана. – 1997. – 335 с.
6. Асташев В.К., Корендясев Г.К. Термомеханическая модель возникновения автоколебаний при резании// Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2012. - №3.
7. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. - М.: Металлургия, 1989. - 384 с.
8. Kesharwani R. High temperature behavior of copper. thesis for the Degree of Master of Science. National Institute of TechnologyRourkela-769008, Orissa, India, 2010.

Дата поступления: 1 ноября 2019 г.