

УДК 621.923

Ф.В. Новиков, докт. техн. наук

А.А. Якимов, канд. техн. наук, доц.

## УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

Ф.В. Новіков, О.О. Якімов. Умови виникнення коливань при різанні металів. Теоретично визначені умови виникнення коливань при різанні металів і показані шляхи їх усунення.

F.V. Novikov, A.A. Yakimov Conditions of origin of oscillations at cutting of metals The conditions of excitation of oscillations are theoretically defined at cutting of metals and the paths of their removal (elimination) are rotined.

При резании металлов в результате интенсивного механического взаимодействия инструмента с обрабатываемой заготовкой происходят различного рода динамические процессы (вынужденные колебания, автоколебания, удар и т.д.), которые вызывают снижение точности, качества и производительности обработки, приводят к преждевременному выходу из строя инструмента. Этим объясняются многочисленные исследования, посвящённые проблеме динамики резания металлов [1 – 8]. Однако, многие важные задачи динамики резания до настоящего времени не решены. Например, отсутствует единая точка зрения относительно причин возникновения автоколебаний при резании. Окончательно не изучены причины пониженной стойкости инструмента при его ударном взаимодействии с обрабатываемым материалом и т.д. Всё это свидетельствует об актуальности дальнейших исследований динамики процесса резания металлов.

Принято считать, что самовозбуждение высокочастотных незатухающих колебаний (автоколебаний) происходит в связи с падающей характеристикой силы резания – трения от скорости или отставанием роста силы резания во времени от роста толщины среза. В данной работе оценим первую причину.

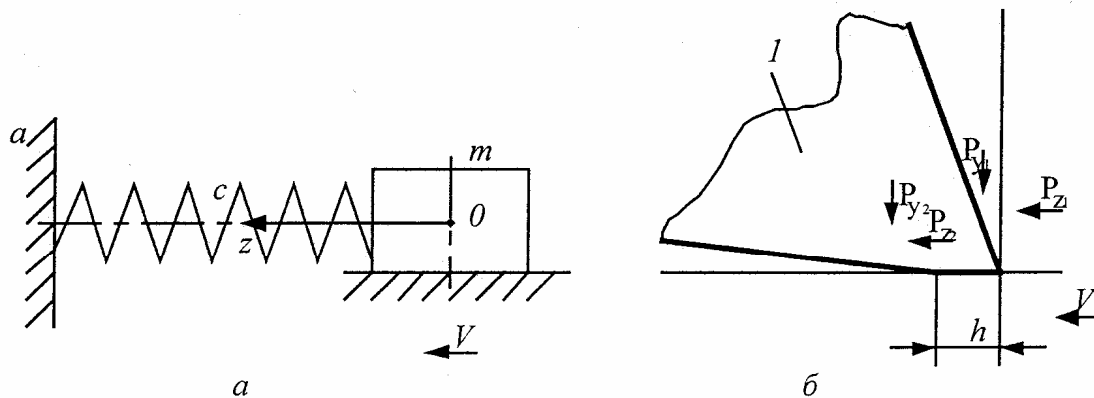


Рис. 1. Расчётная схема (а) и система сил, действующих на резец (б): 1 – резец.

Рассмотрим упрощённую динамическую модель инструмента в виде одномассовой системы, которая совершает движение под действием силы упругости системы –  $c \cdot z$ ; силы сопротивления –  $k_1 \cdot \dot{z}$ ; тангенциальной составляющей силы резания, действующей на передней ( $P_{z1}$ ) и задней ( $P_{z2}$ ) поверхностях лезвийного инструмента (рис. 1):

$$-c \cdot z - k_1 \cdot \dot{z} + P_{z1} + P_{z2} = m \cdot \ddot{z} \quad (1)$$

где  $c, m$  – соответственно приведенные жёсткость и масса системы;

$k_1$  – коэффициент пропорциональности;

$z, \dot{z}, \ddot{z}$  – соответственно, перемещение, скорость и ускорение движения системы;

$P_{z2} = P_{y2} \cdot f$ ;  $P_{y2} = F \cdot q$  - радиальная составляющая силы резания (сила трения), действующая на задней поверхности инструмента;

$F = b \cdot h$  - площадь контакта задней поверхности инструмента с обрабатываемым металлом;

$h$  - величина износа инструмента по задней поверхности;

$b$  - ширина среза;

$q = HV$  - радиальное давление, действующее на задней поверхности инструмента;

$HV$  - твёрдость обрабатываемого материала (по Виккерсу);

$f$  - коэффициент трения задней поверхности инструмента с обрабатываемым металлом.

В расчётной схеме опора инструмента  $a$  неподвижна, обрабатываемая заготовка движется со скоростью резания (скольжения)  $V$ .

Как известно, коэффициент трения  $f$  зависит от скорости скольжения инструмента по обрабатываемому металлу и изменяется по закону, показанному на рис. 2. Положим, что в окрестности состояния равновесия в слабо нелинейных системах (при определённой скорости резания  $V_0$ ) коэффициент трения  $f$  можно представить суммой [7].

$$f = f_0 - f_0' \cdot \dot{z} + f_0'' \cdot \frac{\dot{z}^2}{2} - f_0''' \cdot \frac{\dot{z}^3}{6} + \dots, \quad (2)$$

где  $f_0, f_0', f_0'', f_0''', \dots$  - значения функции  $f$  и её производных по скорости резания.

Подставим (2) в (1), учитывая  $z_0 = \frac{P_{z1} + P_{z20}}{c}$  и  $\bar{z} = z - z_0$ :

$$m \cdot \ddot{\bar{z}} + (P_{z20}' + k_1) \cdot \dot{\bar{z}} - P_{z20}'' \cdot \frac{\dot{\bar{z}}^2}{2} + P_{z20}''' \cdot \frac{\dot{\bar{z}}^3}{6} + c \cdot \bar{z} = 0. \quad (3)$$

где  $P_{z20}' = P_{y2} \cdot f_0'$ ;  $P_{z20}'' = P_{y2} \cdot f_0''$ ;  $P_{z20}''' = P_{y2} \cdot f_0'''$ .

В результате пришли к нелинейному дифференциальному уравнению, описывающему движение массы  $m$ . Сумма  $(P_{z20}' + k_1)$  играет роль эффективного коэффициента вязкого трения. При положительном значении этой суммы колебания массы  $m$  с течением времени будут затухать. Положительное значение  $P_{z20}'$  достигается на правой ветви зависимости (рис. 2).

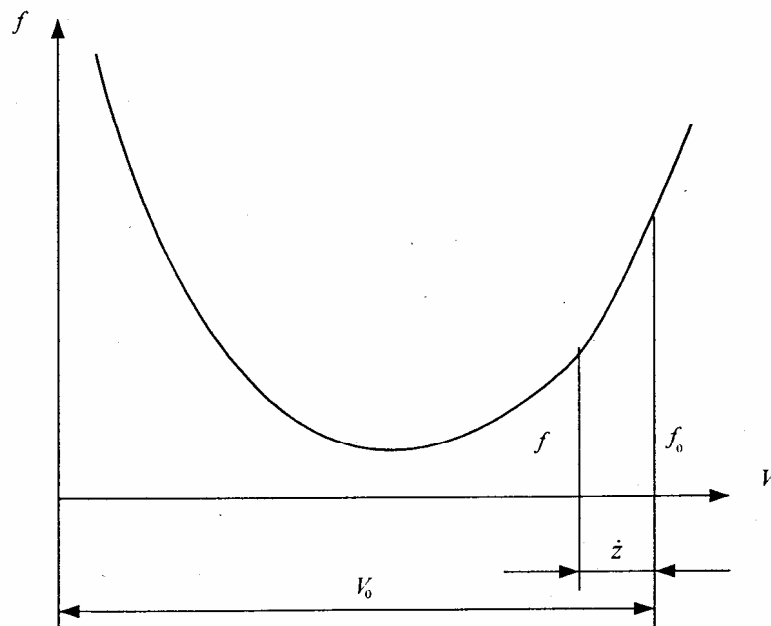


Рис. 2. Зависимость  $f$  от  $V$ .

При  $(P'_{z20} + k_1) < 0$  вязкое трение в системе отсутствует и масса  $m$  будет совершать незатухающие колебания (автоколебания). Этот случай возможен при отрицательном значении  $P'_{z20}$ , т.е. на левой ветви зависимости (рис. 2).

Для решения уравнения (3) примем, что масса  $m$  совершает стационарные автоколебания по гармоническому закону  $\ddot{z} = A \cdot \sin k\tau$  с частотой свободных колебаний

$$k = \sqrt{\frac{c}{m}}.$$

По методике, основанной на методе энергетического баланса и приведенной в работе [7], определим амплитуду автоколебаний

$$A = \frac{2}{k} \cdot \sqrt{\frac{-2 \cdot (P'_{z20} + k_1)}{P''_{z20}}}, \quad (4)$$

где  $P''_{z20}$  - третья производная функции  $P_{z20}$ .

При отрицательном значении  $(P'_{z20} + k_1)$ , что соответствует неустойчивости системы, и при положительном значении  $P''_{z20}$  подкоренное выражение (4) примет положительное значение. В этом случае система будет совершать автоколебания с амплитудой  $A$ . Амплитуда  $A$  тем больше, чем больше значение  $(P'_{z20} + k_1)$  и меньше собственная частота системы  $k$ .

Проанализируем величину

$$(P'_{z20} + k_1) = (b \cdot h \cdot HV \cdot f'_0 + k_1) \quad (5)$$

при отрицательном значении  $f'_0$ .

По мере износа инструмента по задней поверхности (увеличении  $h$ ) величина  $P'_{z20}$  с течением времени увеличивается. В начальный момент обработки (при относительно небольших значениях  $h$ ) выполняется условие  $(P'_{z20} + k_1) > 0$  и автоколебания не возбуждаются. По мере роста  $h$  и  $P'_{z20}$  возможно условие  $(P'_{z20} + k_1) < 0$  и в системе появятся автоколебания с возрастающей во времени амплитудой. В конечном итоге это приведёт к прекращению процесса резания или поломке инструмента. Чем больше параметры  $b$ ,  $HV$ ,  $f'_0$ , тем быстрее во времени увеличивается амплитуда автоколебаний.

С увеличением скорости резания в связи с увеличением температуры резания интенсивность износа инструмента по задней поверхности возрастает, что приводит к росту параметров  $h$ ,  $P'_{z20}$  и соответственно  $A$ . Данная закономерность справедлива для левой ветви зависимости (рис. 2). При скоростях резания, реализующих правую ветвь зависимости, автоколебания отсутствуют. Следовательно, с увеличением скорости резания амплитуда автоколебаний первоначально увеличивается, затем уменьшается до нуля, проходя точку максимума. С уменьшением переднего угла инструмента, как известно, увеличиваются сила резания, действующая на задней поверхности инструмента и скорость его износа. Это ведёт к росту параметров  $h$ ,  $P'_{z20}$  и  $A$ , особенно при резании инструментом с отрицательным передним углом.

Величина подачи непосредственно на  $P'_{z20}$  не влияет. Однако, с увеличением подачи (за счёт роста суммарной тангенциальной составляющей силы резания  $P_z = P_{z1} + P_{z20}$ ) увеличивается статическое перемещение системы  $z_0 = \frac{P_z}{c}$ . Это уменьшает зазоры в стыках элементов технологической системы и увеличивает сопротивление (вязкое трения)  $k_1$ . При достижении значений  $|k_1| > |P'_{z20}|$  автоколебания в системе исчезают.

Сделанные теоретические выводы согласуются с экспериментальными данными [2], согласно которым при точении с увеличением ширины среза  $b$  и твёрдости обрабатываемого металла  $HV$  амплитуда автоколебаний увеличивается; с увеличением скорости резания амплитуда изменяется по экстремальной зависимости, достигая максимума, а с увеличением подачи - непрерывно уменьшается. Из зависимости (4) следует, что уменьшить величину

$P'_{z20}$  и исключить автоколебания можно уменьшением параметров  $h \rightarrow 0$ ,  $f'_0 \rightarrow 0$  (применением, например, инструментов из синтетических сверхтвёрдых материалов, характеризующихся высокой износостойкостью и низким коэффициентом трения, практически не зависящим от скорости скольжения). Уменьшение ширины среза  $b$  приводит к уменьшению  $P'_{z20}$ , однако это связано с уменьшением производительности обработки, что не всегда экономически целесообразно. Важными резервами устранения автоколебаний, как отмечалось выше, являются увеличение скорости резания и подачи. Увеличение собственной частоты системы  $k$ , исходя из зависимости (4), позволяет уменьшить амплитуду автоколебаний  $A$ , что хорошо согласуется с практикой резания.

Если коэффициент трения  $f$  изменяется по линейной зависимости от скорости резания  $V$  (рис. 2), то зависимость (2) примет вид  $f = f_0 - f'_0 \cdot z$ , а дифференциальное уравнение (3) соответственно вид

$$m \cdot \ddot{z} + (P'_{z20} + k_1) \cdot \dot{z} + c \cdot z = 0$$

или

$$\ddot{z} + 2n \cdot \dot{z} + k^2 \cdot z = 0, \quad (6)$$

где  $2n = \frac{(P'_{z20} + k_1)}{m}$ ;  $k = \sqrt{\frac{c}{m}}$  - собственная частота системы.

При  $k^2 > n^2$  общее решение дифференциального уравнения (6) может быть представлено

$$\bar{z} = A_1 \cdot e^{-n\tau} \cdot \sin(\sqrt{k^2 - n^2} \cdot \tau + \varphi), \quad (7)$$

где  $\tau$  - время;  $A$  - амплитуда колебаний;  $\varphi$  - угол, определяемый из начальных условий. В зависимости от величины  $n$  возможны три решения (7):

- 1) при  $n > 0$  масса  $m$  совершает затухающие свободные колебания;
- 2) при  $n = 0$  масса  $m$  совершает незатухающие свободные колебания, так как отсутствует сила сопротивления системе;
- 3) при  $n < 0$  масса  $m$  совершает свободные колебания с возрастающей во времени амплитудой.

Это связано с тем, что сила сопротивления направлена в сторону движения массы  $m$  и выполняет роль раскачивающей силы. Очевидно, незатухающие колебания возможны при отрицательном значении  $P'_{z20}$  и выполняются при условии  $P'_{z20} + k_1 < 0$ , т.е. на падающем участке зависимости  $f - V$ , рис. 2.

Амплитуда  $A_1$  и угол  $\varphi$  определяются из начальных условий  $\bar{z}(0) = \frac{P'_{z20}}{c}$ ;  $\dot{\bar{z}}(0) = V$ , тогда

$$A_1 = \sqrt{\left(\frac{P'_{z20}}{c}\right)^2 + \left(\frac{V}{k}\right)^2}; \quad \varphi = \arctg\left(\frac{P'_{z20} \cdot k}{c \cdot V}\right)$$

или

$$A_1 = \sqrt{\left(\frac{b \cdot h \cdot HV \cdot f_0}{c}\right)^2 + \left(\frac{V}{k}\right)^2}. \quad (8)$$

Амплитуда колебаний  $A_1$  тем больше, чем больше параметры  $P'_{z20}$ ,  $V$  и меньше  $c$  и  $k$ .

Как видим, увеличение силы  $P'_{z20}$  ведёт к увеличению  $\bar{z}$ , в соответствии с зависимостью (7), за счёт увеличения двух множителей  $A_1$  и  $e^{-n\tau}$ . В принципе, характер протекания процесса незатухающих свободных колебаний, описываемый уравнением (6), мало чем отличается от процесса автоколебаний, описываемых уравнением (3). В первом и втором случаях условием возникновения неустойчивости системы является падающий

участок характеристики трения, когда справедливо неравенство  $P'_{z20} + k_1 < 0$ . Колебания в двух случаях описываются гармоническим законом.

Необходимо отметить, что незатухающие колебания возможны и на возрастающем участке зависимости  $f-V$  (рис. 2), т.е. при  $n > 0$ . В этом случае они будут отличаться от гармонического закона. Определённую часть периода колебаний (за счёт силы трения) вершина инструмента будет жёстко связана с обрабатываемой заготовкой и двигаться со скоростью резания  $V$ . В момент времени, когда сила трения достигнет значения силы  $P_{z2}$ , инструмент (приведенная масса  $m$ , рис. 1) начнёт совершать незатухающие ( $n > 0$ ) колебания, описываемые зависимостью (7). Следовательно, первую часть периода колебаний инструмент будет двигаться с постоянной скоростью  $V$ , а вторую часть – совершать колебательное движение по закону (7). По природе такие колебания следует рассматривать как релаксационные автоколебания. Амплитуда колебаний, исходя из (7), определяется произведением двух множителей  $A_1$  и  $e^{-nt}$ . Чем больше  $n > 0$ , тем меньше амплитуда колебаний. Влияние отдельных параметров процесса резания на амплитуду колебаний такое же, как и для рассмотренных выше случаев. Основным условием уменьшения или устранения колебаний данного типа является существенное уменьшение силы трения  $P_{z2}$  путём уменьшения  $h \rightarrow 0$ , т.е. путём обеспечения в процессе резания высокой остроты режущей кромки инструмента. Наличие площадки износа на задней поверхности инструмента ведёт к появлению силы трения  $P_{z2}$  и колебаний системы.

При алмазном шлифовании важно исключить из контакта с обрабатываемым металлом связку круга, что является основным источником трения и возбуждения автоколебаний. Затупление режущих зёрен также ведёт к увеличению силы трения при шлифовании, однако, в меньшей мере по сравнению с влиянием трения связки круга, особенно в условиях засаливания круга. Эффективными методами уменьшения сил трения следует рассматривать методы комбинированного шлифования, сочетающие механическое резание с дополнительным электрофизикохимическим воздействием на обрабатываемый материал и алмазный круг на металлической связке. Например, в результате электроэрозионного воздействия обеспечивается увеличенное выступание режущих зёрен над уровнем связки круга, что уменьшает (или даже исключает) трение связки с обрабатываемым материалом и повышает остроту режущих зёрен.

Таким образом, определены условия возникновения колебаний при резании металлов и показаны пути их устранения.

### Литература

1. Каширин А.И. Исследование вибраций при резании металлов. – М. Изд-во АН СССР, 1944.
2. Кучма Л.К. Экспериментальные исследования вибраций при резании на токарном станке. – В кн. «Новые исследования в области резания металлов» – М.: Л.: Mashgiz, 1948. – С. 100 – 128.
3. Ташлицкий И.И. Первичный источник энергии возбуждения автоколебаний при резании металлов //Вестник машиностроения, – 1960, №2. – С. 45 – 50.
4. Мурашкин А.С., Мурашкин С.А. Прикладная нелинейная механика станков. – Л.: Машиностроение, 1977.
5. Кудинов В.А. Динамика станков. – Машиностроение, 1967.
6. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отдел, 1986.
7. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара, 4-е изд. – Л.: Политехника, 1990.
8. Качество и производительность абразивно-алмазной обработки: Учебн. пособ. /Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Якимов А.А. – Одесса: ОГПУ, 1999.