

**Ф.В. НОВИКОВ**, докт. техн. наук, ХНЭУ, Харьков;  
**А.Г. КРЮК**, канд. техн. наук, ХНЭУ, Харьков;  
**И.А. РЯБЕНКОВ**, канд. техн. наук, ГП ХМЗ “ФЭД”, Харьков;  
**И.Е. ИВАНОВ**, ГВУЗ “ПГТУ”, Мариуполь

## **АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ ТОЧЕНИИ**

В работе приведено аналитическое решение определения амплитуды автоколебаний, возбуждаемых при точении в результате трения задней поверхности инструмента с обрабатываемым материалом в связи с падающей характеристикой силы резания – трения от скорости резания. Теоретически обоснованы условия возникновения колебаний при точении и определены пути их устранения. Показано, что уменьшить амплитуду колебаний можно за счет существенного увеличения скорости резания, увеличения переднего угла резца и уменьшения площадки износа на его задней поверхности, применяя для этого, например, алмазные резцы.

**Ключевые слова:** точение, инструмент, автоколебания, амплитуда колебаний, сила резания, скорость резания, подача, площадка износа

**Введение.** В условиях обработки материалов резанием в результате интенсивного механического взаимодействия инструмента с обрабатываемой заготовкой возбуждаются автоколебания, которые вызывают снижение точности, качества и производительности обработки, приводят к преждевременному выходу из строя инструмента. Поэтому определение условий их устранения или хотя бы уменьшения амплитуды колебаний является актуальной задачей.

Практика обработки материалов резанием показывает, что возбуждение незатухающих колебаний происходит, как правило, по мере затупления инструмента. В связи с этим важно проанализировать влияние величины площадки износа инструмента (резца) на его задней поверхности на условия возникновения автоколебаний при точении и обосновать условия их устранения.

**Анализ последних достижений и литературы.** Несмотря на многочисленные исследования, посвященные проблеме динамики резания металлов [1–6], в частности, определению условий возникновения автоколебаний, многие важные задачи динамики резания до настоящего времени не решены. Это свидетельствует об актуальности дальнейших исследований динамики процесса

резания материалов. В особой мере это относится к обоснованию условий возбуждения и устранения автоколебаний от трения задней поверхности режущего инструмента с обрабатываемым материалом, которые имеют место при точении. Принято считать, что самовозбуждение высокочастотных незатухающих колебаний (автоколебаний) происходит в связи с падающей характеристикой силы резания – трения от скорости или отставанием просто силы резания во времени от роста толщины среза. В данной работе следует рассмотреть первую причину.

**Цель работы, постановка проблемы.** Целью работы является обоснование условий уменьшения амплитуды колебаний при точении с учетом величины площадки износа инструмента на его задней поверхности.

**Материалы исследований.** Для решения поставленной задачи рассмотрено упрощенную 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  $c$  - приведенные жесткость системы, Н/м;  $m$  – приведенная масса системы, кг;  $k_1$  - 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, Н;  $F = b \cdot h$  - площадь контакта задней поверхности инструмента с обрабатываемым металлом, м<sup>2</sup>;  $h$  - величина износа инструмента по задней поверхности, м;  $b$  - ширина среза, м;  $q$  - радиальное давление, действующее на задней поверхности инструмента, Н/м<sup>2</sup>;  $HV$  - твердость обрабатываемого материала (по Виккерсу), Н/м<sup>2</sup>;  $f$  - коэффициент трения задней поверхности инструмента с обрабатываемым металлом.

В расчетной схеме (рис. 1а) 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. Можно допустить, что в окрестности состояния равновесия в слабо нелинейных системах (при определенной скорости резания  $V_0$ ) коэффициент трения  $f$  описывается суммой [5]:

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

где  $f_0, f_0', f_0'', f_0'''$  - значения функции  $f$  и ее производных по скорости резания.

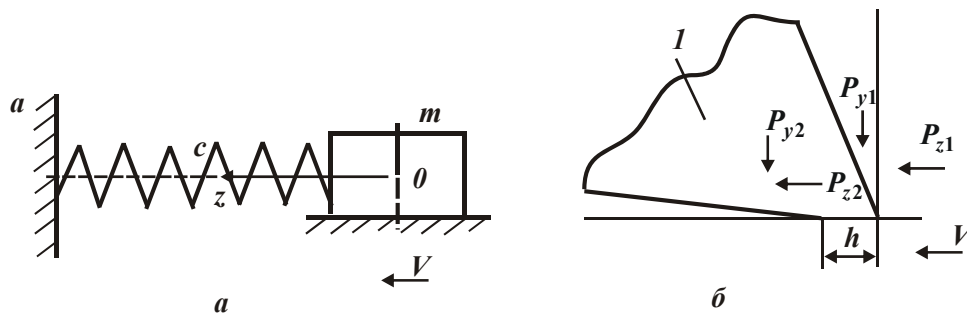


Рис. 1 – Расчетная схема (а) и система сил, действующих на резец (б): 1 – резец

Подставляя зависимость (2) в (1) с учетом  $z_0 = \frac{P_{z1} + P_{z20}}{c}$  и  $\bar{z} = z - z_0$ , имеем:

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

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

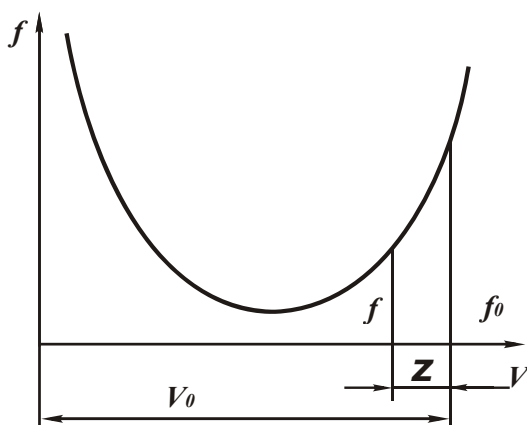


Рис. 2. Зависимость  $f$  от  $V$

В результате получено нелинейное дифференциальное уравнение, описывающее движение массы  $m$ . Сумма  $(P_{z20}' + k_1)$  выполняет 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).

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) следует принять, что масса  $m$  совершает стационарные автоколебания по гармоническому закону  $\dot{z} = A \cdot \sin k\tau$  с частотой свободных колебаний  $k = \sqrt{\frac{c}{m}}$ .

По методике, основанной на методе энергетического баланса и приведенной в работе [5], определена амплитуда 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  $k$ .

Важно проанализировать 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 приведет 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 ведет 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 счет роста суммарной тангенциальной составляющей силы резания  $P_z = P_{z1} + P_{z20}$ ) увеличивается статическое перемещение системы  $z_0 = P_z / c$ . 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 известными экспериментальными данными, согласно которым при точении с увеличением ширины среза  $b$  и твердости 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 сверхтвердых материалов, характеризующихся высокой износостойкостью и низким коэффициентом

том 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.

Полученные решения могут быть использованы для анализа условий устранения автоколебаний, возникающих при шлифовании. Например, экспериментально установлено, что при круглом шлифовании деталей с высокотвердыми наплавочными материалами с увеличением радиальной подачи в технологической системе возникают автоколебания. Исходя из полученных теоретических решений, это может быть связано с интенсификацией процесса трения связки абразивного круга с обрабатываемым материалом, что равносильно трению задней поверхности резца с обрабатываемым материалом. Как показано выше, наличие площадки износа на задней поверхности резца усиливает возбуждение автоколебаний. Поэтому основным путем снижения автоколебаний при шлифовании следует рассматривать обеспечение работы шлифовального круга в режиме самозатачивания с целью снижения интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом. Иными словами, в этих условиях нецелесообразно применять абразивные круги, работающие в режиме затупления. Нецелесообразно также применять алмазные круги на высокопрочных металлических связках, эффективно использовать алмазные круги на относительно мягких органических и керамических связках, снижающих трение в зоне резания.

**Выводы.** В работе приведено аналитическое решение определения амплитуды автоколебаний, возбуждаемых при точении в результате трения задней поверхности инструмента с обрабатываемым материалом в связи с падающей характеристикой силы резания – трения от скорости резания. Теоретически обоснованы условия возникновения колебаний при точении и определены пути

их устранения. Показано, что уменьшить амплитуду колебаний можно за счет существенного увеличения скорости резания, увеличения переднего угла резца и уменьшения площадки износа на его задней поверхности, применяя для этого, например, алмазные резцы. Обоснованы возможности исключения автоколебаний при шлифовании за счет обеспечения работы круга в режиме самозатачивания и снижения интенсивности трения в зоне резания.

**Список литературы:** 1. *Каширин А.И.* Исследование вибраций при резании металлов / *А.И. Каширин*. – М.: Изд-во АН СССР, 1944. – 262 с. 2. *Ташлицкий И.И.* Первичный источник энергии возбуждения автоколебаний при резании металлов / *И.И. Ташлицкий* // Вестник машиностроения. – 1960. – №2. – С. 45–50. 3. *Кудинов В.А.* Динамика станков / *В.А. Кудинов*. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с. 4. *Жарков И.Г.* Вибрации при обработке лезвийным инструментом / *И.Г. Жарков*. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отдел, 1986. – 184 с. 5. *Пановко Е.Г.* Основы прикладной теории колебаний и ударов / *Е.Г. Пановко*, 4-е изд. – Л.: Политехника, 1990. – 272 с. 6. Качество и производительность абразивно-алмазной обработки: учебное пособие / *А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, А.А. Якимов*. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 212 с.