

А. Ф. РАБ, канд. техн. наук, Ф. В. НОВИКОВ

ДИНАМИКА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕЖУЩЕГО КЛИНА ИНСТРУМЕНТА С ОБРАБАТЫВАЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ

При обработке металлов резанием значительная часть инструментов работает в условиях ударного взаимодействия режущего клина с изделием, что обусловлено обработкой прерывистых поверхностей, неоднородностью физико-механических свойств обрабатываемого материала, неравномерностью снимаемого припуска, кинематикой резания, например при фрезеровании, шлифовании и т.д.

Резание с ударным характером взаимодействия резко снижает стойкость инструмента, вызывает частые его поломки, повышенный износ оборудования и многие другие отрицательные явления.

Поэтому изучение особенностей динамики переходных процессов взаимодействия инструмента с обрабатываемым изделием представляет определенный интерес и позволяет наметить научно обоснованные способы эффективного использования режущего инструмента и управления процессом резания.

В статье рассматривается динамическое состояние системы инструмент–изделие при различных формах импульсов силового воздействия в процессе резания, показана роль переходных процессов силовой напряженности системы.

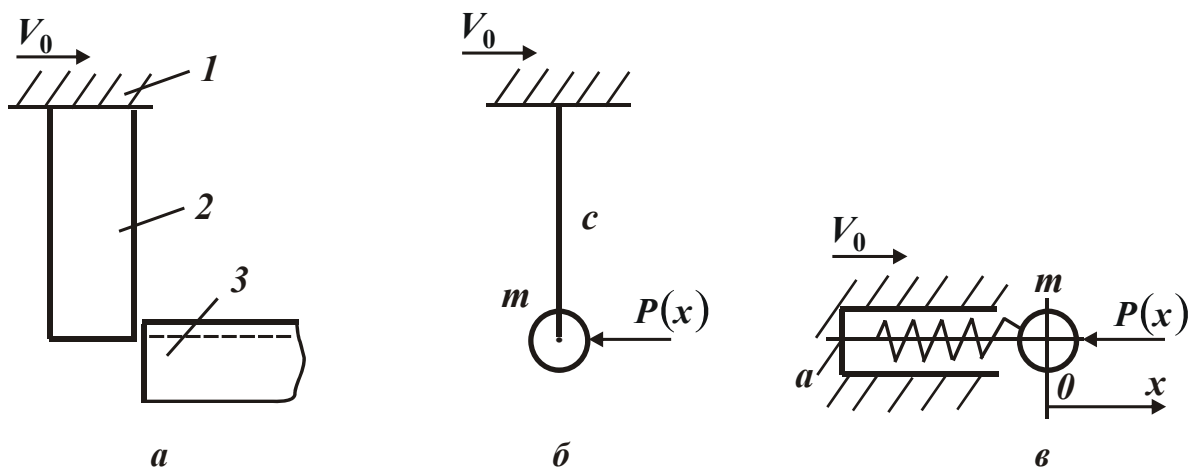


Рис. 1. Схемы взаимодействия инструмента с изделием:

а – реальная модель процесса резания; б, в – динамическая модель процесса резания; 1 – привод; 2 – режущий инструмент; 3 – обрабатываемое изделие.

Для раскрытия механизма взаимодействия инструмента с изделием, определения динамической силы, действующей на режущий клин, и изменения скорости его движения при различных формах импульсов силового воздействия рассмотрим динамическую модель системы инструмент–изделие.

Переход от реальной модели процесса резания к динамической показан на рис. 1. В динамической модели процесса резания (рис. 1,в) система «инструмента» представлена приведенной массой m , связанной с движущейся опорой a (узел крепления инструмента) посредством пружины жесткостью c .

Система «изделия» представлена силой $P(x)$, действующей на приведенную массу m .

В момент времени $t=0$ система «инструмента» ударяет в изделие со скоростью V_0 . При этом происходит сжатие пружины жесткостью c .

В отличие от свободного удара, когда имеет место полное превращение кинетической энергии в потенциальную, в реальных процессах резания благодаря большой инерционности привода уменьшение кинетической энергии движущегося инструмента мгновенно компенсируется, и скорость движения опоры a сохраняется практически равной V_0 .

Принимая во внимание изложенное, составим уравнение движения сосредоточенной массы m без учета диссипативных сил:

$$c \cdot (V_0 \cdot t - x) - P(x) = m \cdot \ddot{x}, \quad (1)$$

где $(V_0 \cdot t - x)$ – величина сжатия пружины.

Сила $P(x)$ может иметь различное выражение в зависимости от формы импульсов силового воздействия (рис. 2).

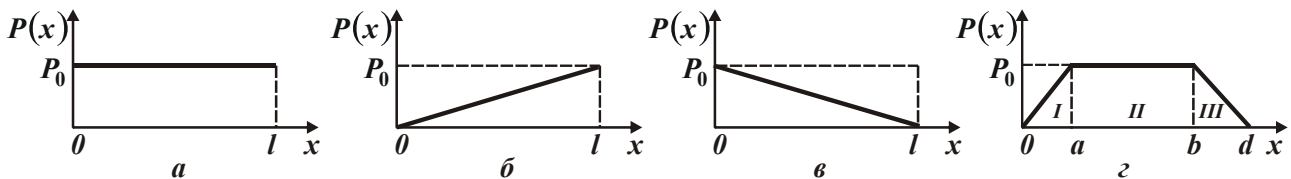


Рис. 2. Форма импульсов силового воздействия: а – прямоугольная; б, в – треугольные; г – комбинированная.

Так, при форме импульса, представленной на рис. 2,а, $P(x) = P_0$. Такая форма импульса может иметь место при периодическом резании с постоянным сечением среза за один ход инструмента, например при строгании, долблении протягивании и т.д.

Характер взаимодействия инструмента с изделием будет определяться соотношением периода собственных колебаний инструмента T и продолжительности цикла обработки $t_{\text{конт}}$. Предположим, что $t_{\text{конт}} \gg T = 2\pi / k$, где $k = \sqrt{c/m}$ – собственная частота системы «инструмента».

Решив уравнение (1), получим:

$$x = A \cdot \sin kt + B \cdot \cos kt + V_0 \cdot t - \frac{P_0}{c}. \quad (2)$$

Постоянные A , B определяются из начальных условий движения инструмента:

$$x(0) = 0; \quad \dot{x}(0) = V_0. \quad (3)$$

После решения уравнения (2) с учетом (3) запишем

$$x = x_{cm} \cdot \cos kt + V_0 \cdot t - x_{cm}, \quad (4)$$

где $x_{cm} = P_0 / c$ – статическое перемещение массы m от действия силы P_0 .

Скорость движения массы m будет иметь вид:

$$x = V_0 - k \cdot x_{cm} \cdot \sin kt. \quad (5)$$

Графически зависимость (5) с учетом диссипации примет вид рис. 3,а. Как видно из графика, в момент врезания наблюдается падение скорости движения инструмента, обусловленное его упруго-восстанавливающими свойствами. Время затухания колебаний инструмента зависит от сил диссипации, затем наступает стабилизация скорости движения инструмента. Динамическую силу, действующую при этом на инструмент, запишем в виде

$$F_\delta = c \cdot (V_0 \cdot t - x) = P_0 \cdot (1 - \cos kt). \quad (6)$$

Графически изменение силы показано на рис. 3,б. Как следует из (6), при $\cos kt = -1$ сила F_δ принимает максимальное значение и в зависимости от степени рассеивания энергии в системе может изменяться в пределах $F_\delta^{max} = P_0 \dots 2P_0$.

Таким образом, при врезании инструмент испытывает дополнительные динамические нагрузки, которые приводят к более высокому уровню напряженности процесса резания в сравнении с установившимся процессом.

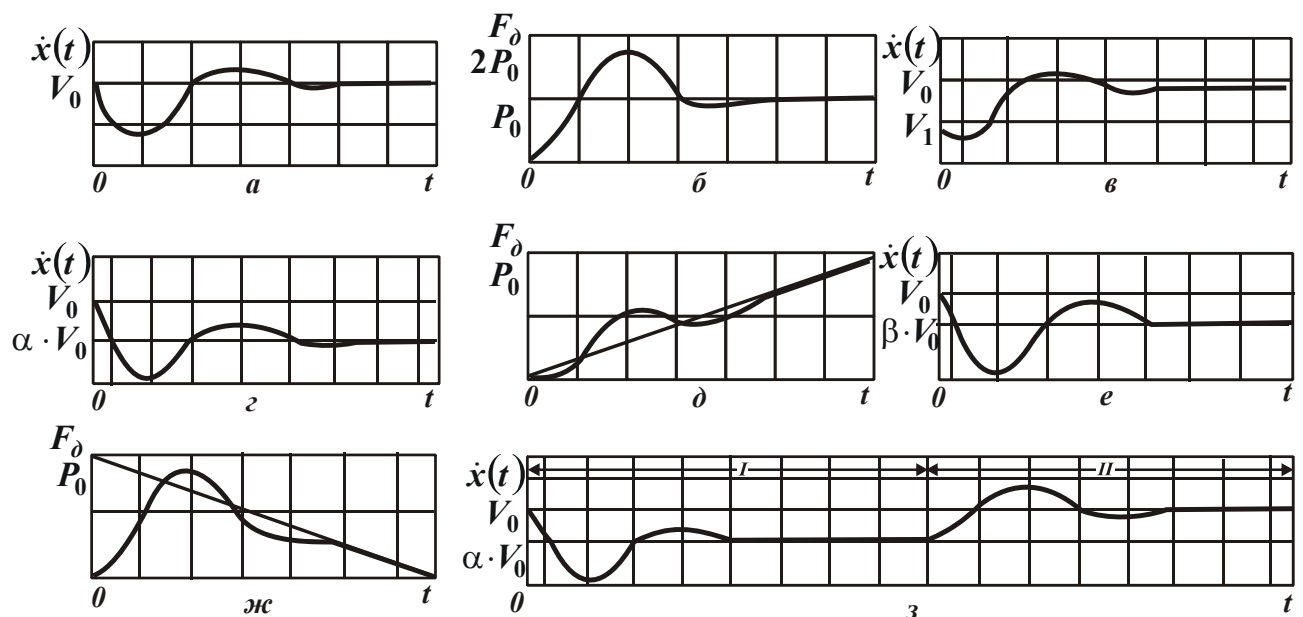


Рис. 3. Изменение динамических характеристик $x(t)$, $\dot{x}(t)$ и F_δ в процессе взаимодействия: а, б, в – при прямоугольной форме импульса; г, д – при треугольной форме импульса (встречное фрезерование); е, ж – попутное фрезерование; з – при комбинированной форме импульса.

Помимо динамики контакта режущего клина с изделием имеет место динамика, вызванная уменьшением скорости взаимного перемещения режущего клина и изделия вследствие деформации и выборки люфтов в стыках узлов крепления инструмента и передаточных звеньев от привода. Это приведет к тому, что опора a будет двигаться с неизменной скоростью V_0 , а режущий клин приведенной массой m – со скоростью $V_1 < V_0$ (рис. 1,в).

Начальные условия примут вид:

$$x(0) = 0; \quad \dot{x}(0) = V_1. \quad (7)$$

Решив уравнение (1) с учетом (7), получим

$$\begin{aligned} x &= x_{cm} \cdot \cos kt - \frac{(V_0 - V_1)}{k} \cdot \sin kt + V_0 \cdot t - x_{cm} = \\ &= V_0 \cdot t - x_{cm} - \sqrt{\frac{(V_0 - V_1)^2}{k^2} + x_{cm}^2} \cdot \sin(kt + \varphi), \end{aligned} \quad (8)$$

где $\varphi = \operatorname{tg} \frac{x_{cm} \cdot k}{(V_0 - V_1)}$. Скорость движения массы m :

$$\dot{x} = V_0 - k \cdot \sqrt{\frac{(V_0 - V_1)^2}{k^2} + x_{cm}^2} \cdot \sin(kt + \varphi). \quad (9)$$

Графическая зависимость (9) с учетом диссипации имеет вид рис. 3,в. Динамическая сила, действующая при этом на режущий клин, равна

$$F_\delta = c \cdot (V_0 \cdot t - x) = P_0 + \sqrt{\frac{(V_0 - V_1)^2}{k^2} + P_0^2} \cdot \sin(kt + \varphi). \quad (10)$$

Максимальное значение F_δ^{max} получим при $\sin(kt + \varphi) = 1$:

$$F_\delta^{max} = P_0 + \sqrt{\frac{(V_0 - V_1)^2}{k^2} + P_0^2}. \quad (11)$$

Из формулы (11) видно, что при $V_0 = V_1$ минимальное значение $F_\delta = 2P_0$.

В то же время по формуле (6) $F_\delta = 2P_0$ получалась как максимально возможная динамическая сила.

Следовательно, учет нежесткости и люфтов в стыках изменяет динамическую силу, действующую на режущий клин в момент врезания.

Таким образом, значительные динамические силы, вызванные особенностями переходных процессов в момент врезания, могут приводить к увеличению вероятности образования сколов и снижению стойкости режущих инструментов, работающих в условиях ударного нагружения режущего клина.

Рассмотрим динамическое состояние режущего клина при формах импульсов, характерных для встречного и попутного фрезерования (рис. 2, б,в). Форму импульса (рис. 2,б) выразим уравнением $P(x) = c_1 x$, где $c_1 = P_0 / l$; l – длина траектории режущего клина в металле.

При этом уравнение движения (1) будет иметь вид:

$$c \cdot (V_0 \cdot t - x) - c_1 \cdot x = m \cdot \ddot{x}. \quad (12)$$

Преобразовав уравнение (12) с учетом (3), получим

$$x = \frac{1}{k_1} \cdot (1 - \alpha) \cdot V_0 \cdot \sin k_1 t + \alpha \cdot V_0 \cdot t, \quad (13)$$

где $k_1^2 = \frac{c + c_1}{m}$; $\alpha = \frac{k^2}{k_1^2} = \frac{c}{c + c_1} \leq 1$.

Скорость движения режущего клина представим уравнением:

$$\dot{x} = (1 - \alpha) \cdot V_0 \cdot \cos k_1 t + \alpha \cdot V_0. \quad (14)$$

Зависимость (14) с учетом сил диссипации графически представлена на рис. 3,г. Как следует из графика, при встречном фрезеровании в момент врезания наблюдается падение скорости, затем скорость восстанавливается до значения $\alpha \cdot V_0$, т.е. режущий клин в процессе стружкообразования движется со скоростью, которая меньше исходной.

Указанное явление отставания скорости вызвано характером изменения динамической силы:

$$F_{\partial} = c \cdot (1 - \alpha) \cdot V_0 \cdot \left(t - \frac{1}{k_1} \sin k_1 t \right). \quad (15)$$

После затухания колебаний режущего клина $\sin k_1 t = 0$ на режущий клин действует сила, постоянно увеличивающаяся пропорционально изменению сечения среза (рис. 3,д). Максимальное значение сила принимает в момент выхода режущего клина из обрабатываемого материала. Таким образом, переходные процессы с точки зрения силовой напряженности не вызывают дополнительных динамических усилий и не представляют опасности для разрушения режущего клина.

При попутном фрезеровании, когда сечение среза максимально в момент врезания, форма импульса (рис. 2,в) описывается уравнением $P(x) = P_0 - c_1 \cdot x$.

Учитывая (3), уравнение (1) представим в виде:

$$x = \sqrt{\frac{V_0^2}{k_2^2} (1 - \beta)^2 + \frac{P_0^2}{(c - c_1)^2}} \cdot \sin(k_2 t - \psi) + \beta \cdot V_0 \cdot t - \frac{P_0}{(c - c_1)}, \quad (16)$$

где

$$k_2^2 = \frac{c - c_1}{m}; \quad \beta = \frac{k^2}{k_2^2}; \quad \psi = \operatorname{tg} \frac{P_0 \cdot k_2}{(c - c_1) \cdot V_0 \cdot (1 - \beta)};$$

$$\dot{x} = k_2 \cdot \sqrt{\frac{V_0^2}{k_2^2} (1 - \beta)^2 + \frac{P_0^2}{(c - c_1)^2}} \cdot \cos(k_2 t - \psi) + \beta \cdot V_0; \quad (17)$$

$$F_{\partial} = \beta \cdot P_0 - c_1 \cdot \beta \cdot V_0 \cdot t - c \cdot \sqrt{\frac{V_0^2}{k_2^2} (1 - \beta)^2 + \frac{P_0^2}{(c - c_1)^2}} \cdot \sin(k_2 t - \psi). \quad (18)$$

С учетом затухания в системе скорость x графически примет вид, показанный на рис. 3,е. как и в случае встречного фрезерования, в начальный момент взаимодействия скорость движения режущего клина падает, затем восстанавливается до величины $\beta \cdot V_0 < V_0$. Из отношения скоростей $\frac{\alpha \cdot V_0}{\beta \cdot V_0} = \frac{c - c_1}{c + c_1} < 1$ следует, что установившаяся скорость деформации режущего клина под действием уменьшающегося сечения среза и нагрузки при попутном фрезеровании меньше, чем при встречном.

Из графика (рис. 3,ж) следует, что в зависимости от V_0 , c_1 динамическая сила F_∂ может быть меньше статической P_0 . Это объясняется запаздыванием роста динамической силы от снижения статической силы F_∂ , изменяющейся по закону уменьшения сечения среза.

Следовательно, динамические нагрузки, обусловленные переходным процессом при попутном фрезеровании, могут вызывать меньшую силовую напряженность режущего клина в сравнении со встречным фрезерованием.

Рассмотрим динамику взаимодействия режущего клина с изделием при комбинированной форме импульса, характерной для процесса шлифования (рис. 2,г). Следует отметить, что комбинированная форма импульса не является простым суммированием ранее рассмотренных форм импульсов - прямоугольной и треугольной, характерных для периодического резания, встречного и попутного фрезерования (рис. 2, а,б,в).

Динамическое состояние режущего клина на участке I комбинированной формы импульса аналогично встречному фрезерованию описывается уравнениями (13), (14), (15). Значения x и \dot{x} , полученные из уравнений (13) и (14), являются начальными условиями при описании динамического состояния режущего клина на участке II :

$$x(0) = -x_{cm} = \frac{P_0}{c}; \quad \dot{x}(0) = \alpha \cdot V_0. \quad (19)$$

Здесь за начало отсчета принято $x = a$.

Решив уравнение (1) $P(x) = P_0$ с учетом (19), получим

$$x = -\frac{1}{k} \cdot V_0 \cdot (1 - \alpha) \cdot \sin kt + V_0 \cdot t - x_{cm}; \quad (20)$$

$$\dot{x} = -V_0 \cdot (1 - \alpha) \cdot \cos kt + V_0. \quad (21)$$

Графически уравнение (21) представлено на рис. 3,з, где показана зависимость изменения скорости на участках I и II .

Динамическую силу, действующую на режущий клин на участке II , выразим уравнением:

$$F_\partial = P_0 + \frac{V_0}{k} \cdot \frac{1}{\frac{1}{c} + \frac{1}{c_1}} \cdot \sin kt. \quad (22)$$

Максимальное значение F_∂^{max} получим при $\sin kt = 1$:

$$F_\partial^{max} = P_0 + \frac{V_0}{k} \cdot \frac{1}{\frac{1}{c} + \frac{1}{c_1}}. \quad (23)$$

Первое слагаемое P_0 представляет собой статическую силу, действующую на режущий клин, второе – динамическую, обусловленную восстановлением скорости движения режущего клина в момент перехода участка I в участок II . Как следует из (23), с ростом $c_1 = P_0 / t$, характеризующим интенсивность увеличения сечения среза (геометрическую жесткость припуска), F_∂^{max}

растет при $c_1 \rightarrow \infty$ (мгновенное изменение сечения среза от нуля до максимального значения):

$$F_{\partial}^{max} = P_0 + \frac{V_0}{k} \cdot c. \quad (24)$$

Анализ формул (15), (18), (23) и графиков рис. 3 позволяет сделать вывод о большей динамической напряженности участка II комбинированной формы импульса в сравнении с отдельными прямоугольными и треугольными формами импульсов. Участок III комбинированной формы импульса в силу отсутствия падения скорости движения режущего клина при переходе с участка II на участок III не является существенным источником динамической напряженности процесса резания.

Таким образом, удалось вскрыть физическую сущность одной из возможных причин снижения работоспособности инструмента в условиях ударного нагружения.

Падение скорости движения режущего клина вследствие ударного воздействия является определяющим фактором, вызывающим «всплеск» динамической силы взаимодействия. Причем, чем значительнее и интенсивнее падение скорости, тем напряженнее динамическое состояние режущего клина и тем в большей степени определяется роль переходных процессов во взаимодействии его с изделием.

Поступила 20 июня 1979 г.