

УДК 621.91.06

Г.А. Оборський, д-р техн. наук, проф.,
П.А. Лінчевський, д-р техн. наук, проф.,
Одес. нац. політехн. ун-т,
А.А. Оргіян, д-р техн. наук, проф.,
Р.А. Мацей, канд. техн. наук, доц.,
Одес. гос. акад. стр-ва и архитектуры

ОБОБЩЕНИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Г.О. Оборський, А.А. Оргіян, П.А. Лінчевський, Р.А. Мацей. Узагальнення уявлень про динамічну характеристику процесу різання. Розглянуто уточнені аналітичні вирази динамічної характеристики процесу різання, визначені її характеристики розрахунком і за експериментальною амплітудно-фазовою частотною характеристикою, що дозволяє описати замкнуті динамічні моделі верстатів.

Ключові слова: динамічна характеристика процесу різання, постійна часу стружкоутворення, коефіцієнт різання, передатна функція.

Г.А. Оборский, А.А. Оргиан, П.А. Линчевский, Р.А. Мацей. Обобщение представлений о динамической характеристике процесса резания. Рассмотрены уточненные аналитические выражения динамической характеристики процесса резания, определены ее характеристики расчетом и по экспериментальной амплитудно-фазовой частотной характеристике, что позволяет описать замкнутые динамические модели станков.

Ключевые слова: динамическая характеристика процесса резания, постоянная времени стружкообразования, коэффициент резания, передаточная функция.

G.A. Oborsky, A.A. Orgiyan, P.A. Linchevsky, R.A. Matsey. Synthesis of views on the dynamic characteristics of the cutting process. The updated analytical expressions of the dynamic characteristics of the cutting process are considered. The features are determined by calculation and by the experimental amplitude and phase frequency response, which allows to describe the closed dynamic models of machines.

Keywords: dynamic characteristics of the cutting process, chip formation time constant, cutting value, transfer function.

Зависимость изменения силы резания P от смещений y инструмента и заготовки называют динамической характеристикой процесса резания (ДХР) [1]. Эту зависимость можно считать линейной при достаточно малых значениях отношения амплитуды скорости колебаний к скорости резания. ДХР может быть представлена в одной из трех эквивалентных форм: дифференциального уравнения, операторной передаточной функции и амплитудно-фазовой частотной характеристики — АФЧХ. Все эти представления ДХР описывают совокупность явлений пластического деформирования стружки, трения на поверхности инструмента, а также кинематической зависимости площади сечения срезаемого слоя от изменений скорости главного движения и подачи.

В применении к нестационарной замкнутой динамической системе станка при прерывистом резании может оказаться существенной и скоростная зависимость силы резания, поскольку динамические перемещения в направлениях нормали и касательной к обрабатываемой поверхности всегда связаны между собой. Изменения скорости тангенциальных перемещений вызывают приращения главной составляющей силы резания.

Дифференциальная зависимость силы резания от приращений упругих перемещений \tilde{y} и приращения скорости $\dot{\tilde{z}}$ может быть представлена в виде

$$T_p \dot{\tilde{z}} + P_z = -K_p \tilde{y} + \beta \tilde{z}, \quad (1)$$

где $\beta = \frac{dP_z}{dz}$ — скоростной коэффициент;
 T_p — постоянная времени стружкообразования;
 K_p — коэффициент резания
 P_z — главная составляющая силы резания.

Для определения β был проведен эксперимент по растачиванию гладких образцов неподвижными борштангами. Датчики и тензостанция измеряли изгибные перемещения борштанги по направлению z тангенциальной составляющей силы резания P_z . Регистрирующим прибором являлся амперовольтметр, показания которого были протарированы в единицах силы. Растачивались образцы из стали 45 с глубиной резания 0,1 мм, подачей 0,02...0,06 мм/об. Скорость резания изменилась от 1,5 до 4 м/с. Определена зависимость изменения силы резания от изменения скорости, которая показана на (рис. 1). На графике можно выделить четыре диапазона значений скорости резания, в которых характер изменения β существенно отличается. Определяя отношения приращения силы резания к соответствующим приращениям скорости, получаем четыре характерных значения β , которые приведены в таблице.

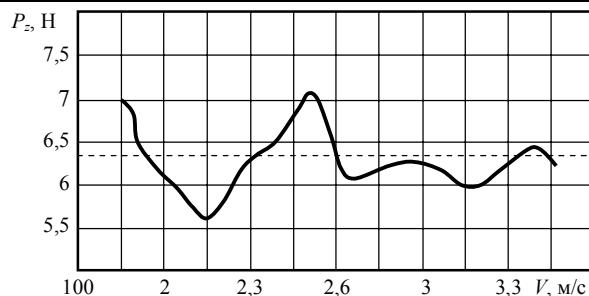


Рис. 1. Зависимость P_z от скорости резания

Зависимость скоростного коэффициента от скорости резания

$V, \text{ м/с}$	1,5...2	2...2,5	2,5...2,7	2,7...3,5
$\beta, \frac{\text{Нс}}{\text{м}}$	-5	2	-0,4	$0,6 \cdot 10^{-3}$

Для расчетов изменения полной составляющей силы резания перейдем от ДХР, описывающей динамические приращения силы резания, к дифференциальному уравнению процесса резания. Полную составляющую силы резания представим в виде

$$P_z = P_z^* + P_z, \quad (2)$$

где P_z^* — установившееся значение силы резания, а полные упругие перемещения y и z представим в виде

$$\begin{aligned} y &= y^* + \tilde{y}, \\ z &= z^* + \tilde{z}, \end{aligned} \quad (3)$$

где y^*, z^* — составляющие упругих перемещений, возникающих из-за отжима;
 \tilde{y}, \tilde{z} — динамические приращения упругих перемещений.

Установившееся значение силы резания равно произведению коэффициента резания K_p на среднюю толщину срезаемого слоя

$$P^* = K_p (W - y^*), \quad (4)$$

где W — заданная толщина срезаемого слоя. Складывая уравнения (1) и (4) и учитывая, что

$$\dot{P}_z = \dot{\phi}_z \quad \text{и} \quad \dot{z} = \dot{\tilde{z}},$$

получим дифференциальное уравнение процесса резания

$$T_p \dot{P}_z + P_z = K_p (y - W) + \beta \dot{z}. \quad (5)$$

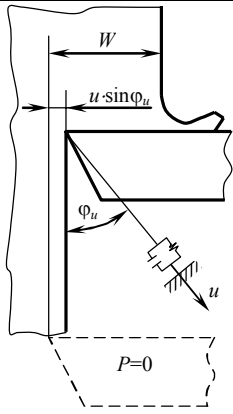


Рис. 2. Координаты в зоне резания

Расчет полной составляющей силы резания удобно выполнять при больших значениях постоянной составляющей силы резания, например при прерывистом резании.

В общем случае дифференциальное уравнение, описывающее ДХР в зависимости от перемещений по оси u (рис. 2), представим в виде

$$T_p \dot{P}_z + P = -K_p \sin \varphi_u u + K_s \cos \varphi_u \dot{u} \quad (6)$$

Сила $K_s \dot{z} = K_s \dot{u} \cos \varphi_u$ определяется как сумма изменения силы трения на задней поверхности резца $K_{тр} \dot{z}$ и изменения силы резания вследствие изменения сечения срезаемого слоя $\frac{K_p s \dot{z}}{V}$ (V — скорость резания, s —

подача на один оборот). Отсюда получаем выражение

$$K_s = \frac{K_p s}{V} - K_{тр} \quad (7)$$

из которого видно, что скоростной коэффициент резания K_s может принимать положительные либо отрицательные значения в зависимости от соотношения между физическими и кинематическими параметрами процесса резания.

Уравнению (5) соответствует передаточная функция

$$W_p = \frac{K_p K_{2p} - K_s K_{2s} \wp}{1 + T_p \wp} \quad (8)$$

где \wp — символ оператора дифференцирования,

$K_{2p} = \sin \varphi_u$ и $K_{2s} = \cos \varphi_u$ — проектирующие коэффициенты, и АФЧХ процесса резания

$$W_p = \frac{K_p K_{2p} - K_s K_{2s} T_p \omega^2 - i\omega(K_p K_{2p} T_p + K_s K_{2s})}{1 + \omega^2 T_p^2} \quad (9)$$

Известно, что в плоскости комплексного переменного АФЧХ (9) изображается полуокружностью (рис. 3, а) радиуса $\frac{K_p K_{2p}}{2} + \frac{K_s K_{2s}}{2T_p}$ с центром в точке $\left(\frac{K_p K_{2p}}{2} + \frac{K_s K_{2s}}{2T_p}, 0\right)$. Ми-

нимум $\text{Im}W_p$ (нижняя точка АФЧХ) соответствует круговой частоте колебания $\omega_{\min} = \frac{1}{T_p}$. В

зависимости от знака $K_s K_{2s}$ (рис. 3, б) проявляется стабилизирующее ($K_s K_{2s} < 0$) либо дестабилизирующее ($K_s K_{2s} > 0$) влияние изменения скорости колебаний в замкнутой динамической системе станка.

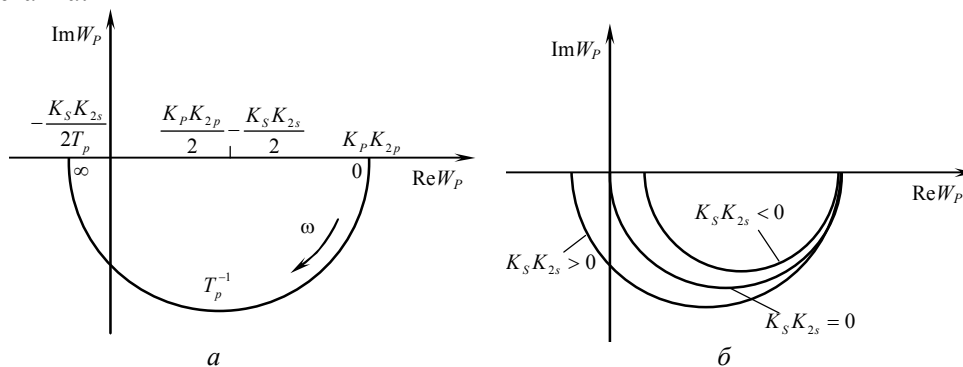


Рис. 3. АФЧХ процесса резания

Параметры динамической характеристики процесса резания можно определить по экспериментальной АФЧХ: T_p по ω_{\min} , а K_p и K_S по положению точек пересечения с действительной осью. Зная K_p и K_S , можно, используя (7), найти и величину сил трения на задней грани резца.

АФЧХ процесса тонкого точения стали и чугуна были получены на экспериментальном стенде, собранном на базе отделочно-расточного станка. Выполнялась подрезка торцов образцов кольцевого сечения из стали 45 и серого чугуна 21 широколезвийным твердосплавным резцом ($\alpha=6^\circ$, $\gamma=5^\circ$, $\lambda=0^\circ$). Ширина среза задавалась толщиной стенки образца и изменялась в пределах от 0,5 до 2 мм. Скорость резания менялась от 1 до 3 м/с, а средняя толщина среза (подача на 1 оборот) — от 0,01 до 0,04 мм. Колебания в системе возбуждались на частотах в диапазоне от 40 до 600 Гц (рис. 4).

Для исключения явления регенерации следа обрабатываемая поверхность предварительно зачищалась, а система возбуждения колебаний включалась только на время одного оборота шпинделя. Проверка показала, что переходные процессы затухали за время, равное 0,2...0,3 длительности одного оборота шпинделя, и поэтому на осциллограммах удавалось получить участок установившихся колебаний достаточной протяженности.

Сопоставление данных, полученных при тонком точении стали и чугуна, показывает подобие динамических характеристик процессов резания при обработке пластичного и хрупкого материалов. В этом проявляется присущее всем процессам обработки отставание во времени изменений сил от порождающих их перемещений.

Соответствие наблюдается, однако, лишь в среднем, так как значительные случайные изменения параметров процесса резания при обработке чугуна приводят к значительному рассеиванию значений амплитуды и фазы силы резания. Изменения режима обработки одинаковым образом влияют на частотные характеристики процессов тонкого точения стали и чугуна в соответствии с общим закономерностями.

При увеличении скорости резания и толщины срезаемого слоя T_p уменьшается. Коэффициент резания K_p возрастает пропорционально ширине срезаемого слоя. При скоростях резания 1,5...2,5 м/с скоростной коэффициент резания K_S принимает близкие к нулю значения, и становится применимой простейшая форма динамической характеристики процесса резания

$$W_p = \frac{K_p K_{2p}}{1 + T_p \omega}$$

При решении задач технологической динамики для описания математической модели замкнутой динамической системы станка при прерывистом резании удобно представлять ДХР в виде

$$T_p \dot{P}_z + P_z = -K_p (y - W) \Phi(t),$$

где $\Phi(t)$ — функция времени периода $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{l_n + l_b}{V}$, определяемая для случая равнорасположенных пазов соотношением (рис. 5).

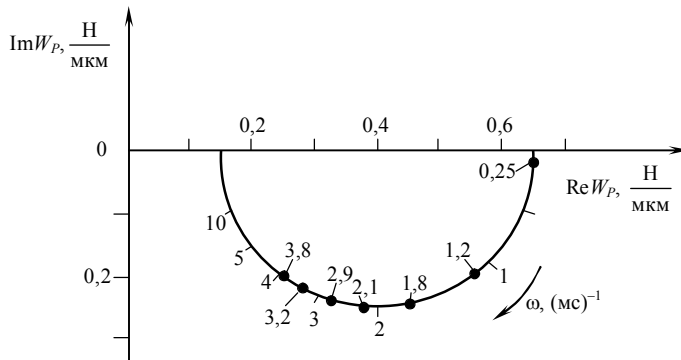


Рис. 4. АФЧХ процесса точения стали 45 при $b=0,5$ мм, $S=0,2$ мм/об, $V=1$ м/с: точки — данные эксперимента; линия — расчетная аппроксимация

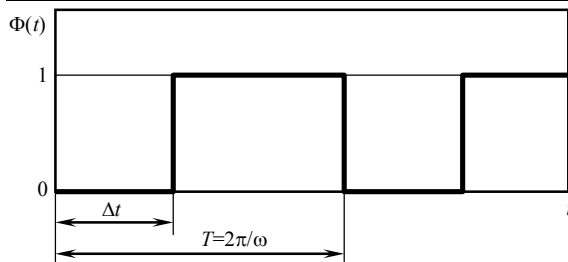


Рис. 5. АФЧХ процесса резания

$$\Phi(t) = 0 \text{ при } i \frac{l_n + l_b}{V} \leq t \leq i \frac{l_n + l_b}{V} + i \frac{l_n}{V},$$

$$\Phi(t) = 1 \text{ при } i \frac{l_n + l_b}{V} + \frac{l_n}{V} \leq t \leq (i+1) \frac{l_n + l_b}{V} + i \frac{l_n}{V},$$

где l_n — длина паза;

l_b — длина выступа;

$i = 0, 1, 2, \dots$

Так как $\Phi(t)$ принимает значения либо 0,

либо 1, то можно считать, что в условиях пре-

рывистого резания коэффициент резания K_p периодически меняется по кусочно-постоянному закону, принимая значения, соответствующие выбранному режиму резания и обрабатываемому материалу для тех интервалов времени, когда резание осуществляется, и, обращаясь в нуль, для тех интервалов времени, когда резание прерывается.

Динамическая характеристика процесса резания была применена в ряде работ для определения уровня колебаний, исследования устойчивости и изучения демпфирующего действия резания [2, 3, 4].

Литература

1. Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. — М.: Машиностроение, 1967. — 360с.
2. Кедров, С.С. Колебания металлорежущих станков / С.С. Кедров. — М.: Машиностроение, 1978. — 199 с.
3. Копелев, Ю.Ф. Условия возбуждения и гашения автоколебания при резании / Ю.Ф. Копелев // Металлорежущие станки. — 1978. — Вып. 6. — С. 3 — 9
4. Линчевский, П.А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках / П.А. Линчевский, Т.Г. Джугурян, А.А. Оргиян. — К.: Техника, 2001. — 300 с.

References

1. Kudinov, V.A. Dinamika stankov [Dynamics of Machine Tools] / V.A. Kudinov. — Moscow, 1967. — 360 p.
2. Kedrov, S.S. Kolebaniya metallorazhushchikh stankov [Vibrations of Machine Tools] / S.S. Kedrov. — Moscow, 1978. — 199 p.
3. Kopelev, Yu.F. Usloviya vzbuzhdeniya i gasheniya avtokolebaniya pri rezanii [The Conditions of Exciting and Damping Oscillations in Cutting] / Yu.F. Kopelev // Metallorazhushchie stanki [Metal-Cutting Machines], 1978. — Issue 6. — pp. 3 — 9.
4. Linchevskiy, P.A. Obrabotka detaley na otdelochno-rastochnykh stankakh [Processing Parts on Finishing and Boring Machines] / P.A. Linchevskiy, T.G. Dzhuguryan, A.A. Ogriyan. — Kyiv, 2001. — 300 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. гос. акад. стр-ва и архитектуры Джугурян Т.Г.

Поступила в редакцию 12 апреля 2012 г.