

Метод измерения силы резания при обработке металлов со сверхвысокими скоростями

В. М. КОРНЕЕВА, С. С. КОРНЕЕВ

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
Москва, Россия, e-mail: v_korneeva@list.ru

Разработан метод измерения силы резания при обработке металлов со сверхвысокими скоростями, позволяющий оценивать эту силу в процессе обработки. Сконструирован специальный измерительный преобразователь и создана методика расшифровки сигнала преобразователя непосредственно по его записи с помощью регистрирующей аппаратуры.

Ключевые слова: сверхскоростное резание, измерительный преобразователь, акселерометр, пьезокерамический чувствительный элемент.

Designed method for the measurement of cutting forces when machining with highest speeds, allowing you make an assesment of the denamics of the processing with ultra high speeds. Designed special measuring transducer and methodology of decoding signal, removable with transmitter, directly on his writing by equipment was elaborated.

Key words: ultra high-speed cutting, measuring transducer, accelerometer, piezoceramic sensor.

Механическая обработка металлов со сверхвысокими скоростями имеет большое практическое значение для развития технологии машиностроения. Однако отсутствие точных сведений о силовых нагрузках затрудняет разработку конструкций инструмента, удовлетворяющего требованиям производства, и создание новых высокопроизводительных приводов главного движения для станков сверхскоростного фрезерования, а также самих станков, обладающих жёсткостью технологической системы и широкими технологическими возможностями. Специфические особенности механической обработки со сверхвысокими скоростями ограничивают использование известных методов и средств измерений силы резания. Чувствительные измерительные преобразователи (ИП) закрепляют на резце для достижения высокой частоты собственных колебаний. Однако этого оказывается недостаточно, чтобы исключить влияние на результат измерений различных механических связей, присутствующих в конструкциях специальных динамометров для измерения усилий резания. Поэтому требуется зафиксировать ИП в непосредственной близости от режущей кромки инструмента, но это невозможно из-за относительно больших габаритных размеров ИП.

При сверхскоростном фрезеровании применяют небольшую по размерам фрезу для достижения высокой частоты вращения (десятки тысяч оборотов в минуту). Поэтому практически чрезвычайно сложно установить ИП непосредственно на режущий инструмент, а также обеспечить передачу информации от ИП к стационарной регистрирующей аппаратуре. Таким образом, актуальна разработка принципиально нового метода измерения силы резания при обработке со сверхвысокими скоростями.

Использование для обработки металлов баллистической установки, реализующей схему свободного прямоуголь-

ного резания со сверхвысокими скоростями, упрощает задачу измерения силовых нагрузок, действующих на инструмент. В [1] приведены результаты теоретических исследований динамики процесса резания с помощью этой установки. При работе на баллистической установке масса обрабатываемого образца практически остается постоянной, т. е. масса снимаемой стружки минимальна, следовательно, характер изменения и значение силы резания в процессе обработки определяются только ускорением обработки образца. Поэтому для изменения силы резания в качестве ИП можно выбрать акселерометр, способный с минимальными искажениями фиксировать изменение ускорения.

Для высокочастотных (более 1000 Гц) процессов в роли акселерометров целесообразно использовать пьезоэлектрические преобразователи (приборы генераторного типа) с высокой собственной частотой, работающие без источников питания. Однако в стандартных пьезокерамических акселерометрах при высокоскоростных нагрузках происходит отрыв инерционного груза от пьезокерамического основания. Это обстоятельство, а также конструктивные особенности баллистической установки для сверхскоростного резания приводят к необходимости разработки специального ИП.

Применение ИП-акселерометра нестандартной конструкции требует его обязательной калибровки. Использование разработанной авторами методики расшифровки сигнала ИП непосредственно по записи сигнала с помощью регистрирующей аппаратуры (определение чувствительности акселерометра по осциллограмме) позволяет отказаться от предварительной калибровки ИП-акселерометра, установленного в обрабатываемый образец. Однако при этом возникают трудности при передаче информации регистрирующей аппаратуре.

На рис. 1 представлена конструкция ИП-акселерометра, расположенного в обрабатываемом образце 8. На дне металлического корпуса 12 ИП фиксируется пьезо-керамический чувствительный элемент (ПЧЭ) 6 в форме таблетки с отверстием в центре. Противоположный полюс ПЧЭ через отверстие с помощью изолированного проводника 9 и припоя 7 крепится к металлической шайбе 10 в корпусе 12, которая изолирована от ИП текстолитовыми шайбой 5 и втулкой 4. Металлическая втулка 11 с внутренней и наружной резьбой прижимает металлическую 10 и текстолитовую 5 шайбы к корпусу 12. Все элементы по поверхности контакта заливают эпоксидной смолой.

В качестве ПЧЭ был выбран цирконат-титанат свинца ЦТС-19, обладающий высокой температурной стабильностью. Роль инерционного груза, который при перегрузках давит на ПЧЭ 6, выполняет капля припоя 7 массой 0,1 г. Для предотвращения отрыва инерционной массы под действием перегрузок, а также для устранения воздействия влаги, ПЧЭ заливают эпоксидным компаундом. С помощью резьбового соединения ИП располагают в обрабатываемом образце.

Для передачи генерируемого ПЧЭ электрического заряда регистрирующей аппаратуре в резьбовое отверстие в корпусе ИП ввинчивают металлическую спицу 1 диаметром 3 мм с заостренным концом. Спица имеет утонченную шейку для слома при попадании в ловитель образцов установки. Кроме того, для предохранения от разрушений при попадании образца в ловитель на спицу предварительно навинчивают металлическую гайку 2, изолированную от образца текстолитовой шайбой 3. Спица совместно со специальным токосъемником, установленным на срезе ствола установки с помощью кронштейна, образует один из подвижных контактов, обеспечивающих связь ИП с регистратором. Токосъемник выполнен в виде текстолитовой рамки, в которую вложена медная фольга толщиной 0,2 мм, свернутая в 2-3 слоя. Второй подвижный контакт осуществляется резцами в процессе обработки.

Эквивалентная схема колебательной системы «обрабатываемый образец — ИП» характеризуется двумя основными собственными частотами обрабатываемого образца (низкой) и ИП (высокой). Если представить обрабатываемый образец как стержень, один конец которого жестко закреплён, то его собственная частота определяется выражением $f_c = c/(4L_c)$, где c — скорость звука в материале стержня; L_c — длина стержня (образца). Отсюда получим частоты собственных колебаний образцов из стали и алюминия $f_c = 31 \text{ кГц}$ ($c = 5100 \text{ м/с}$); из латуни $f_c = 21 \text{ кГц}$ ($c = 3400 \text{ м/с}$). Частоту ИП можно оценить с применением уравнения

$$m_{\text{ИП}} d^2 x / dt^2 + k_{\text{ИП}} x = 0$$

$$\text{или } d^2 x / dt^2 + x k_{\text{ИП}} / m_{\text{ИП}} = d^2 x / dt^2 + \omega_{\text{ИП}}^2 x = 0,$$

где $m_{\text{ИП}}$ — наседающая масса ИП; τ — текущее время; $k_{\text{ИП}}$ — жёсткость чувствительного элемента ИП; $\omega_{\text{ИП}}$ — угловая частота собственных колебаний ИП; x — смещение инерционной наседающей массы ИП.

Отсюда частота собственных колебаний ИП будет равна $f_{\text{ИП}} = \sqrt{k_{\text{ИП}} / m_{\text{ИП}}} / (2\pi)$. Жёсткость ПЧЭ рассчитывается по

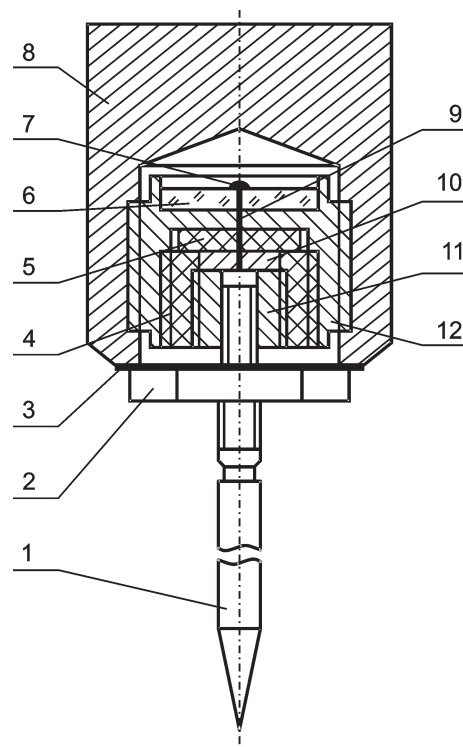


Рис. 1. Конструкция ИП-акселерометра, расположенного в обрабатываемом образце:

1 — спица; 2, 10 — металлические гайка и шайба; 3, 5 — текстолитовые шайбы; 4 — текстолитовая втулка; 6 — пьезо-керамический чувствительный элемент; 7 — припой; 8 — обрабатываемый образец; 9 — изолированный проводник; 11 — металлическая втулка; 12 — металлический корпус

формуле $k_{\text{ИП}} = ES_{\text{ПЧЭ}} / \Delta_{\text{ПЧЭ}}$, где E — модуль Юнга ($E = 5,5 \dots 8,5 \cdot 10^{10} \text{ Н}^2/\text{м}^2$ для ЦТС-19); $S_{\text{ПЧЭ}} = \pi D^4/4$, $\Delta_{\text{ПЧЭ}}$ — площадь и толщина ПЧЭ диаметром D . Для ПЧЭ размерами $D = 10 \text{ мм}$, $\Delta_{\text{ПЧЭ}} = 0,4 \text{ мм}$ получили частоту собственных колебаний $f_{\text{ИП}} = 300 \text{ кГц}$. При этом наседающая масса $m_{\text{ИП}}$ составила половину массы ПЧЭ с учётом масс капли припоя и слоя эпоксидной смолы, покрывающей ПЧЭ (1,5 г).

Неточность определения наседающей массы и изменения чувствительности ИП из-за заливки ПЧЭ эпоксидным компаундом, а также влияние механических связей при установке ИП в обрабатываемый образец потребовали экспериментального определения собственной частоты ИП при его нахождении внутри образца. Использовали обратный пьезоэффект: к обкладкам ПЧЭ подавали напряжение от генератора синусоидальных колебаний, частота при этом плавно увеличивалась от нуля, и ИП таким образом становился генератором механических колебаний. Механические колебания ИП передавались образцу, на котором с помощью пайки был установлен другой ПЧЭ, а его обкладки подключены к электронному осциллографу. На осциллограммах сигнала ИП при обработке резанием собственная частота имела вид высокочастотных колебаний, наложенных на кривую усилия резания с периодом около 10 мкс, что соответствует собственной частоте ИП $f_{\text{ИП}} \approx 300 \text{ кГц}$.

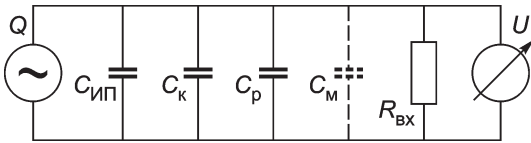


Рис. 2. Эквивалентная схема включения измерительного преобразователя в измерительную цепь

Запишем уравнение динамики акселерометра, измеряющего линейные ускорения [2]:

$$m_{\text{ИП}} d^2 x / dt^2 + g dx / dt + k_{\text{ИП}} x = -m_{\text{ИП}} d^2 y / dt^2, \quad (1)$$

где g — коэффициент демпфирования; y — длина реза (длины пути торможения образца на резцах).

Если полагать вид экспериментальной зависимости ускорения от времени близким к синусоидальному: $d^2 y / dt^2 = a$, $y = y_0 \sin \omega_{\text{ИП}} t$, то решение уравнения (1) будет следующим:

$$x = e^{-\xi \omega_{\text{ИП}} t} \left[A_1 e^{j \omega_{\text{ИП}} t \sqrt{1-\xi^2}} + A_2 e^{-j \omega_{\text{ИП}} t \sqrt{1-\xi^2}} \right] + \beta^2 y_0 \sin(\omega_p t - \varphi') / \left[(1-\beta)^2 + (2\xi\beta)^2 \right]; \quad (2)$$

$$g / m_{\text{ИП}} = 2\xi \omega_{\text{ИП}}; k_{\text{ИП}} / m_{\text{ИП}} = \omega_{\text{ИП}}^2,$$

где a — фиксируемое значение ускорения; y_0 — амплитуда колебаний обрабатываемого образца; A_1, A_2 — коэффициенты; $\beta = \omega_p / \omega_{\text{ИП}} = f_p / f_{\text{ИП}}$ — отношения частоты и угловой частоты исследуемого процесса резания к собственной частоте колебания ИП; $\varphi' = \arctg(2\xi\beta / (1-\beta^2))$ — угол сдвига фаз.

Первый член суммы (2) характеризует собственные колебания, затухающие через некоторое время. Вынужденные колебания будут происходить по гармоническому закону с частотой ω_p и зависящей от β, ξ амплитудой

$$x = \beta^2 y_0 \sin(\omega_p t - \varphi') / \left[(1-\beta)^2 + (2\xi\beta)^2 \right]. \quad (3)$$

Из (3) следует, что при малых (менее 1) β, ξ амплитуда $x = \sin(\omega_p t - \varphi') y_0 \omega_p^2 / \omega_{\text{ИП}}^2$, и перемещение инерционной массы станет пропорциональным ускорению образца $y_0 \omega_p^2$

в масштабе $\omega_{\text{ИП}}^{-2}$. Тогда при возбуждении колебательной системы ниже частоты резонанса она будет работать в режиме акселерометра, а выше — в режиме виброметра [3]. С учётом (3) максимальное смещение инерционной массы

ИП имеет вид $x_{\text{max}} = \beta^2 y_0 / \sqrt{(1-\beta^2) + (2\xi\beta)^2} = \lambda y_0$, откуда сле-

дует, что для обеспечения линейности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ИП необходимо при известной частоте исследуемого процесса резания ω_p получить такое β ,

чтобы соблюдалось равенство $\lambda = 1$, т. е. собственная частота ИП должна значительно превышать частоту резания. Нижняя граничная частота $f_{p,н}$ определяется общим временем процесса при наименьшей скорости резания. Время обработки экспериментального образца длиной 40 мм с минимальной скоростью резания $v = 50$ м/с составляет $\tau_p = 800$ мкс, отсюда $f_{p,н} = 1/\tau_p = 1,25$ кГц. Верхняя граничная частота диапазона определяется длительностью τ_ϕ фронта регистрируемых значений ускорений (сигнала осциллографа) оказывается приблизительно равной 20 мкс. Поэтому верхняя граничная частота исследуемого процесса резания будет $f_{p,в} = 1/(2\tau_\phi) = 25$ кГц. Тогда соотношение частот $\beta = 0,25$. В [3] представлены графические зависимости смещения инерционного тела от затухания ξ и соотношения β , откуда следует, что даже для недемпфированной системы ($\xi = 0$) при $\beta = 0,25$ ИП-акселерометр можно использовать для изучения сверхскоростного резания, при этом обеспечивается динамическая погрешность регистрации по АЧХ не более 6 %.

На рис. 2 приведена эквивалентная схема включения ИП в измерительную цепь, которое сопровождается подключением ёмкости соединительного кабеля C_k , входной ёмкости усилителя C_y , параллельно его собственной ёмкости $C_{\text{ИП}}$. Напряжение, фиксируемое регистратором, описывается выражением

$$U = Q / C_\Sigma = d_{11} P / (C_{\text{ИП}} + C_k + C_y), \quad (4)$$

где Q — заряд, образующийся на ПЧЭ; d_{11} — пьезомодуль ПЧЭ; P — сила, действующая на ПЧЭ.

Из (4) следует, что для достижения максимальной чувствительности ИП необходимо уменьшать каждую составляющую суммарной ёмкости. Однако C_Σ определяет возможность регистрации нижних гармонических составляющих частот резания $f_{\text{вх}} = 1/\tau_{\text{вх}}$, где $\tau_{\text{вх}}$ — постоянная времени входной цепи. Для пьезоэлектрических схем измерения $\tau_{\text{вх}}$ зависит от входного сопротивления регистратора и суммарной ёмкости электрической цепи: $\tau_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} C_\Sigma$. При приложении постоянной нагрузки ($P = \text{const}$) напряжение на входе регистратора не будет неизменным, а со временем станет непрерывно уменьшаться из-за разряда конденсаторов через резистор $R_{\text{вх}}$ по закону

$$U = U_0 \cdot e^{-\tau_p / C_\Sigma R_{\text{вх}}} = Q e^{-\tau_p / C_\Sigma R_{\text{вх}}} / C_\Sigma, \quad (5)$$

где U_0 — напряжение в начале разряда.

Согласно (5), чем больше постоянная времени, тем медленнее снижается напряжение и уменьшается амплитудная погрешность регистрируемого импульса ускорения

$\eta' = U_{R_{\text{вх}}} / U_{\text{ИП}}$, где $U_{R_{\text{вх}}}, U_{\text{ИП}}$ — напряжения на входе регистратора и ИП, соответственно. Амплитудная погрешность η' уменьшается с увеличением соотношения $\tau_{\text{вх}}/\tau_p$, и при $\tau_{\text{вх}}/\tau_p > 20$ будет практически отсутствовать [2].

Собственную ёмкость ИП можно записать как $C_{\text{ИП}} = \epsilon_g r^2 / 3,6 \Delta_n$, где ϵ_g, r — диэлектрическая проницаемость и радиус ПЧЭ, соответственно. Используемый ПЧЭ, изготовленный из ЦТС-19, обладает диэлектрической проницаемостью $\epsilon_g = 170 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, откуда $C_{\text{ИП}} = 225$ пФ.

Ёмкость кабеля длиной $L = 7$ м и погонной ёмкостью $C_{п.к} = 109$ пФ/м: $C_k = C_{п.к} L_k = 763$ пФ. Суммарная ёмкость

измерительной цепи при использовании в качестве регистратора осциллографа с входной ёмкостью $C_p = 50$ пФ: $C_\Sigma = C_{ИП} + C_p + C_y = 1038$ пФ. При данном значении C_Σ измерительной цепи с входным сопротивлением регистратора $R_{вх} = 500$ кОм обеспечивается постоянная времени $\tau_{вх} = 519$ мкс, что приводит к значительной амплитудной погрешности регистрируемого сигнала. Увеличить $\tau_{вх}$ можно увеличением любого из сомножителей $R_{вх}C_\Sigma$. Для этого параллельно входу регистратора была подключена так называемая масштабная ёмкость $C_m = 50000$ пФ. Таким образом удалось получить соотношение $\tau_{вх}/\tau_p > 32$ и обеспечить пренебрежимо малую амплитудную погрешность регистрируемого сигнала и регистрацию процессов с минимальной частотой $f_{вх} = 38$ Гц.

Анализ АЧХ используемого ИП и регистратора показывает, что ИП полностью удовлетворяет исследуемому процессу резания, а регистратор фиксирует действительную картину изменения ускорения или силы резания обрабатываемого образца во времени. Частотная характеристика резания принадлежит частотному диапазону, в котором амплитудная характеристика регистратора линейна. Схема регистрации ускорения обрабатываемого образца приведена на рис. 3, а на рис. 4 — типичная форма сигнала ИП на экране осциллографа. По осциллограмме можно определить, что сигнал характеризуется совокупностью нескольких колебаний, наложенных на так называемую «статическую» составляющую.

Расшифровку полученных осциллограмм проводили по специальной методике. Поскольку амплитудная характеристика ИП линейна в диапазоне измеряемых ускорений, осциллограммы можно расшифровывать на основании теоремы импульсов:

$$m_\Sigma \Delta v = \int_0^{\tau_p} P_z dt,$$

где m_Σ — масса обрабатываемого образца с ИП и спицей; Δv — потеря скорости образца за время резания; P_z — составляющая силы резания, действующая в направлении движения образца, т. е. главная составляющая.

Электрический сигнал ИП пропорционален силе P_z :

$$U = \Pi P_z; \Pi = \int_0^{\tau_p} U dt / (m_\Sigma \Delta v),$$

где Π — коэффициент чувствительности или пропорциональности ИП, интеграл в числителе графически соответствует площади под осциллограммой.

Таким образом, для определения коэффициента чувствительности ИП требуется измерить скорости движения образца до и после резания — v_1 , v_2 , соответственно, найти изменение (потерю) $\Delta v = v_1 - v_2$ и рассчитать площадь под

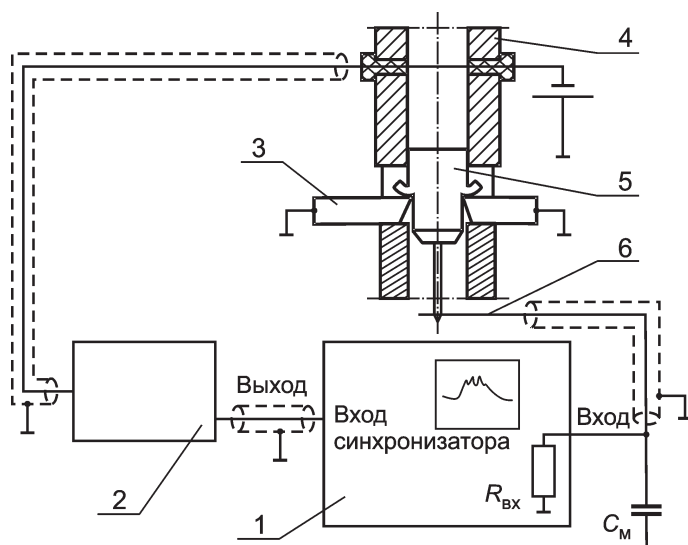


Рис. 3. Схема регистрации ускорения обрабатываемого образца: 1 — осциллограф С8-9А; 2 — генератор Г5-54; 3 — резец; 4 — ствол установки; 5 — образец; 6 — медная фольга токосъёмника

кривой на осциллограмме. По значению Π можно определить силу резания в любой момент этого процесса: $P_z(\tau) = \Pi U(\tau)$. Поскольку для одного и того же ИП значение Π постоянно, при последующем использовании этого ИП расшифровку осциллограммы выполняют без подсчёта Π . Применение разработанного метода измерения силы резания позволило получить суммарную погрешность результата измерения 13,5 % при доверительной вероятности 0,95.

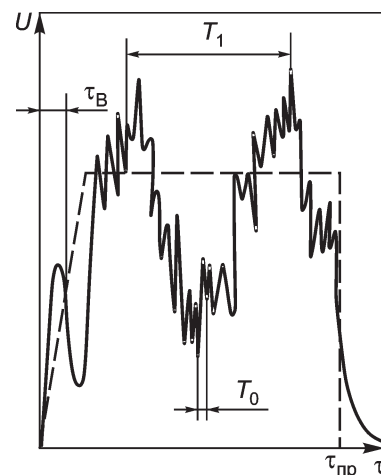


Рис. 4. Осциллограмма электрического сигнала измерительного преобразователя

Литература

1. Корнеева В. М., Корнеев С. С. Теоретическая оценка силового нагружения режущего инструмента при сверхвысоких скоростях резания // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2015. № 3. С. 100—105.
2. Ю. В. Иориш. Виброметрия. М.: Машиностроение, 1963.
3. В. Н. Логинов. Электрические измерения механических величин. М.: Энергия, 1970.

Дата принятия: 13.05.2016.