

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ

Постановка проблемы. При обработке отверстий постоянно возникают задачи обеспечения точности и производительности, что связано с относительно высокой силовой напряженностью процесса и низкой жесткостью технологической системы. Собственно, этим объясняется многообразие режущих инструментов, применяемых при обработке отверстий: сверла, зенкеры, развертки, резцы, фрезы, протяжки, шлифовальные круги и т.д. В настоящее время накоплен значительный опыт механической обработки отверстий. Вместе с тем, высокие требования, предъявляемые, например, к обработке высокоточных отверстий в деталях, изготовленных из труднообрабатываемых материалов, предусматривают непрерывный поиск новых технологических решений по совершенствованию процессов обработки. Поэтому настоящая работа посвящена решению актуальной задачи исследования закономерностей формирования погрешностей обработки отверстий и условий их устранения с учетом динамического состояния технологической системы.

Анализ последних исследований и публикаций. При механической обработке отверстий существенным фактором, снижающим точность и производительность, является возникновение в технологической системе интенсивных колебательных процессов, связанных, прежде всего, с неравномерностью снимаемого припуска. Вопросы изучения колебательных процессов при резании материалов, в том числе и при обработке отверстий, в научно-технической литературе уделено большое внимание [1-3]. Однако до сих пор отсутствует четкое аналитическое представление о физической сущности возникновения колебаний при обработке отверстий и путях их устранения. В связи с этим требуется разработка новых подходов к математическому моделированию колебательных процессов при обработке отверстий и выработке практических рекомендаций по их устранению.

Цель работы – теоретическое обоснование условий повышения точности и производительности обработки отверстий на основе исследования динамического состояния технологической системы.

Изложение основного материала. В основу работы положены теоретические решения [4], полученные применительно к процессу рассверливания отверстия в случае несовпадения осей сверла радиусом R и рассверливаемого отверстия радиусом r на величину Δ (рис. 1). Установлено, что при этом на два лезвия сверла действуют разные по величине радиальные составляющие силы резания $P_{y1} = \frac{\sigma \cdot S \cdot (t_1 - y) \cdot \cos \varphi}{2 \cdot K_{рез}}$, $P_{y2} = \frac{\sigma \cdot S \cdot (t_2 + y) \cdot \cos \varphi}{2 \cdot K_{рез}}$, где σ – условное напряжение резания, Н/м²; $K_{рез} = P_{z1} / P_{y1} = P_{z2} / P_{y2}$ – коэффициент резания; P_{z1} , P_{z2} – тангенциальные составляющие силы резания, действующие на оба лезвия сверла, Н; S – подача, м/об; t_1 , t_2 – глубины резания, приходящиеся на оба лезвия сверла, м; φ – половина главного угла сверла в плане; y – величина упругого перемещения сверла в радиальном направлении (амплитуда колебаний сверла), м.

Тогда результирующая радиальная составляющая силы резания определяется:

$$\Delta P_y = P_{y1} - P_{y2} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{2 \cdot K_{рез}} \cdot [(t_1 - t_2) - 2y], \quad (1)$$

где $(t_1 - t_2) = 2 \cdot \Delta \cdot \cos \alpha$; α – угол, определяющий положение лезвий сверла (рис. 1).

Для удобства расчетов угол α целесообразно представить в виде $\alpha = 90^\circ - \alpha_1$ (рис. 1). Тогда разность глубин резания $(t_1 - t_2) = 2 \cdot \Delta \cdot \sin \alpha_1$ и зависимость (1) преобразуется:

$$\Delta P_y = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{K_{рез}} \cdot (\Delta \cdot \sin \alpha_1 - y). \quad (2)$$

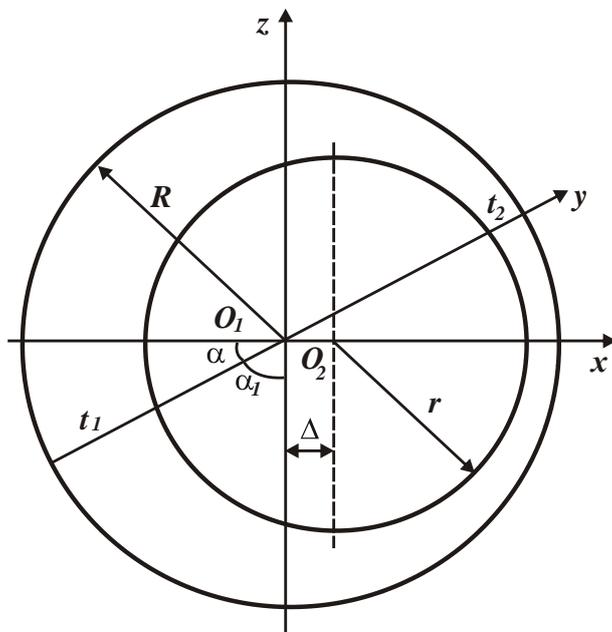


Рис. 1. Расчетная схема погрешности обработки отверстия

Как видно, сила ΔP_y изменяется по закону $\sin \alpha_1$. Учитывая, что в резании участвуют два лезвия сверла, угол α_1 может изменяться в пределах $0 \dots 180^\circ$. Через 180° процесс повторяется (рис. 2). Частота действия силы ΔP_y равна $\omega = 2\pi / \tau_1$, где τ_1 – период действия силы ΔP_y , т.е. это время, за которое угол α_1 изменяется от 0 до 180° , с. Частота ω действия силы ΔP_y равна половине частоты вращения сверла, поскольку сверло имеет два лезвия.

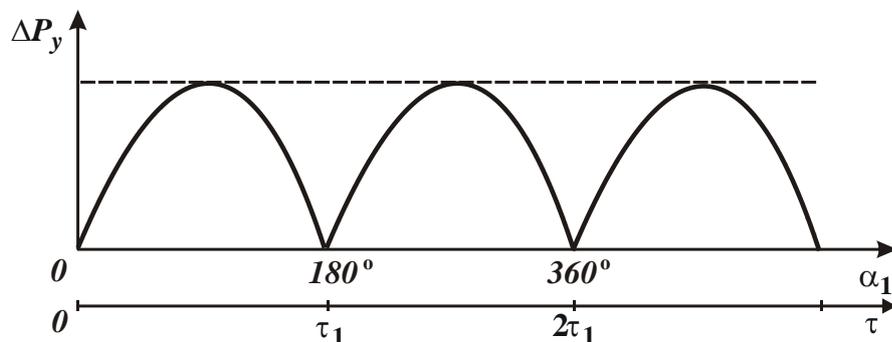


Рис. 2. Характер изменения силы ΔP_y с течением времени τ

Периодически изменяющаяся сила ΔP_y будет вызывать вынужденные колебания сверла в радиальном направлении, что приведет к возникновению погрешностей обработки и разбивке отверстия. Для анализа закономерностей изменения амплитуды колебаний y сверла при обработке рассмотрим упругую схему технологической системы (рис. 3), в которой сверло представлено в виде сосредоточенной массы m , имеющей упругую связь (жесткостью c) с механизмом крепления сверла на станке. На массу m действует периодически изменяющаяся сила ΔP_y .

Дифференциальное уравнение колебаний сосредоточенной массы m по координате y без учета диссипативных сил имеет вид [5]:

$$m \cdot \ddot{y} + c \cdot y = \Delta P_y. \quad (3)$$

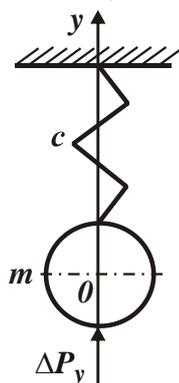


Рис. 3. Расчетная схема колебаний массы m

С учетом зависимости (2) и соотношения $\alpha_1 = \omega \cdot \tau$ дифференциальное уравнение (3) опишется:

$$\ddot{y} + k_1^2 \cdot y = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{m \cdot K_{рез}} \cdot \Delta \cdot \sin \omega \tau, \quad (4)$$

где $k_1^2 = k^2 + \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{m \cdot K_{рез}}$; $k = \sqrt{\frac{c}{m}}$ – собственная частота технологической системы, c^{-1} ;

τ – текущее время, с.

Как видно, параметр k_1 , по сути, определяющий собственную частоту “процесса резания”, больше параметра k , определяющего собственную частоту технологической системы. При этом, чем больше отношение $\sigma / K_{рез}$, подача S и меньше половина главного угла сверла в плане φ и сосредоточенная масса m , тем больше параметр k_1 , который можно представить в виде:

$$k_1^2 = k^2 + \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{m \cdot K_{рез}} = \frac{1}{m} \cdot \left(c + \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{K_{рез}} \right). \quad (5)$$

Расчеты показали, что для исходных данных: $\sigma = 10^4$ Н/мм²; $K_{рез} = 2$; $S = 0,1$ мм/об; $\varphi = 45^\circ$ (или $\cos 45^\circ = 0,7$) второе слагаемое зависимости (5) равно 350 Н/мм, тогда как жесткость токарного станка c может быть до 10 раз больше. Следовательно, в зависимости (5) преобладает первое слагаемое и справедливо условие: $k_1 \approx k$.

При анализе будем рассматривать установившийся во времени процесс колебаний сосредоточенной массы m (сверла), см. рис. 2. Тогда начальные условия примут вид:

$$\begin{cases} y(\tau = 0) = y(\tau = \tau_1), \\ \dot{y}(\tau = 0) = \dot{y}(\tau = \tau_1). \end{cases} \quad (6)$$

Решение однородного дифференциального уравнения (4), т.е. без правой части, общеизвестно [5]:

$$y = A \cdot \sin k_1 \tau + B \cdot \cos k_1 \tau, \quad (7)$$

где A , B – постоянные, определяются из начальных условий (6).

Частное решение дифференциального уравнения (4) следует рассматривать в виде:

$$y = D \cdot \sin \omega \tau, \quad (8)$$

где D – неизвестная величина.

Для определения величины D необходимо зависимость (8) подставить в дифференциальное уравнение (4). После преобразований получено:

$$D = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta}{m \cdot K_{pez} \cdot (k_1^2 - \omega^2)}. \quad (9)$$

Тогда общее решение дифференциального уравнения (4) опишется:

$$y = A \cdot \sin k_1 \tau + B \cdot \cos k_1 \tau + D \cdot \sin \omega \tau. \quad (10)$$

Подчиняя полученное решение (10) начальным условиям (6), получена система двух уравнений с двумя неизвестными величинами A и B :

$$\begin{cases} B \cdot (1 - \cos k_1 \tau_1) = A \cdot \sin k_1 \tau_1 + D \cdot \sin \omega \tau_1, \\ B \cdot \cos k_1 \tau_1 = -A \cdot (1 - \cos k_1 \tau_1) - D \cdot \frac{\omega}{k_1} \cdot (1 - \cos \omega \tau_1). \end{cases} \quad (11)$$

Из решения системы уравнений (11) определены неизвестные величины A и B :

$$A = - \frac{D \cdot \left[\sin \omega \tau_1 \cdot \cos k_1 \tau_1 + \frac{\omega}{k_1} \cdot (1 - \cos \omega \tau_1) \cdot (1 - \cos k_1 \tau_1) \right]}{\left[\sin k_1 \tau_1 \cdot \cos k_1 \tau_1 + (1 - \cos k_1 \tau_1)^2 \right]}; \quad (12)$$

$$B = \operatorname{ctg} \frac{k_1 \tau_1}{2} \cdot \left(A + D \cdot \frac{\sin \omega \tau_1}{\sin k_1 \tau_1} \right). \quad (13)$$

Амплитуда колебаний y , аналитически описываемая зависимостью (10), определяется величинами D , A и B . Поэтому проведем анализ этих величин. Из зависимости (9) следует, что при условии $\omega = k_1$ в технологической системе наступает резонанс, т.е. $D \rightarrow \infty$ и, соответственно, неограниченно увеличивается амплитуда колебаний y . Следовательно, с целью повышения точности обработки необходимо частоту ω действия силы ΔP_y (и, соответственно, частоту вращения сверла) устанавливать меньше параметра k_1 , который приблизительно равен собственной частоте колебаний технологической системы k . Из зависимости (9) также следует, что в случае $\omega < k_1$ уменьшить параметр D и соответственно амплитуду колебаний можно за счет уменьшения отношения σ / K_{pez} , подачи S и увеличения половины главного угла сверла в плане φ , сосредоточенной массы m .

Анализируя зависимость (13), видим, что резонансное состояние технологической системы наступает и при условии $ig \frac{k_1 \tau_1}{2} = 0$, так как при этом величина $B \rightarrow \infty$.

В данном случае $\frac{k_1 \tau_1}{2} = \pi \cdot n$, где $n = 0; 1; 2; \dots$. Следовательно, при времени действия силы ΔP_y , равной

$$\tau_1 = \frac{2\pi \cdot n}{k_1}, \quad (14)$$

в технологической системе неограниченно увеличивается амплитуда колебаний y , и наступает так называемый ударный резонанс. Учитывая то, что параметр n может принимать любые целые положительные значения, явление ударного резонанса возможно в широких диапазонах изменения времени τ_1 . Очевидно, при относительно больших значениях τ_1 (небольших значениях частоты ω действия силы ΔP_y) вследствие возникновения в технологической системе силы сопротивления, которая в расчетах не учитывалась, ударный резонанс будет отсутствовать. Однако при небольших значениях $n = 0; 1; 2$ возникновение резонансного состояния технологической системы вполне вероятно. Это указывает на то, что при сверлении необходимо стремиться увеличить время τ_1 , увеличивая тем самым значение $n > 1$ и фактически исключая резонансное состояние технологической системы за счет проявления в большей мере силы сопротивления. Однако, увеличение времени τ_1 ведет к уменьшению производительности обработки, что неэффективно. В связи с этим, основным путем ухода от резонансного состояния технологической системы (при обеспечении условия уменьшения времени τ_1) является увеличение собственной частоты системы k за счет повышения жесткости системы c .

Необходимо отметить, что при выполнении условия (14), знаменатель зависимости (12), который может быть преобразован к виду $(\sin \frac{k_1 \tau_1}{2} + 0,5 \cdot \sin 2k_1 \tau_1)$, принимает нулевое значение. Следовательно, и в этом случае в технологической системе наступает ударный резонанс ($A \rightarrow \infty$ и $y \rightarrow \infty$), что усиливает вышеприведенные решения.

Период действия силы ΔP_y определяется зависимостью:

$$\tau_1 = \frac{2 \cdot \pi}{\omega}. \quad (15)$$

Сравнивая зависимости (15) и (16), видно, что значения периода τ_1 будут одинаковыми при условии:

$$\frac{k_1}{\omega} = n. \quad (16)$$

Поскольку n может принимать лишь целые положительные числа, то ударный резонанс, вызванный неограниченным увеличением величин A и B , будет проявляться при значениях $k_1 > \omega$. Исходя из зависимости (9), резонансное состояние технологической системы, связанное с увеличением величины $D \rightarrow \infty$ вследствие изменения силы ΔP_y по закону $\sin \omega t$, имеет место при условии $k_1 / \omega = 1$. Следовательно, ударный резонанс, вызванный неограниченным увеличением величин A и B , будет достигаться при меньшей частоте ω действия силы ΔP_y . Поэтому для ис-

ключения ударного резонанса частоту вращения сверла и, соответственно, скорость резания и производительность обработки при рассверливании отверстия необходимо уменьшать. По-видимому, этим можно объяснить то, что процесс рассверливания отверстия с целью исключения вибраций и повышения точности обработки рекомендуется осуществлять с относительно небольшой скоростью резания. Этим фактором также обусловлена относительно низкая точность обработки при рассверливании отверстий и целесообразность применения последующих технологических операций зенкерования и развертывания, поскольку зенкеры и развертки имеют большее число лезвий и снижают вероятность возникновения в технологической системе ударного резонанса, связанного с повторностью действия силы ΔP_y (рис. 2). В конечном итоге применение этих режущих инструментов приводит к повышению точности обработки отверстия.

ВЫВОДЫ

В работе приведено теоретическое решение задачи определения амплитуды вынужденных колебаний, возникающих при рассверливании отверстия в случае несовпадения осей сверла и обрабатываемого отверстия, т.е. при съеме неравномерного припуска. Расчетами установлено, что в технологической системе возможно возникновение резонанса, связанного с синусоидальным законом изменения суммарной радиальной составляющей силы резания, действующей на оба лезвия сверла, и так называемого ударного резонанса, связанного с периодическим ударным характером взаимодействия лезвий сверла с обрабатываемым материалом. Показано, что ударный резонанс наступает при частоте действия импульса силы, кратной собственной частоте системы, т.е. при небольшой частоте вращения сверла. Это предопределяет низкие показатели точности и производительности обработки при рассверливании отверстий и необходимость применения последующих технологических операций зенкерования и развертывания отверстия.

Перечень ссылок

1. Маталин А.А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов / А.А. Маталин. – М.: Машиностроение, 1970. – 390 с.
2. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. "Механика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.
3. Колев К.С. Точность обработки и режимы резания / К.С. Колев, Л.М. Горчаков. – М.: Машиностроение, 1976. – 144 с.
4. Брижан Т.М. Математическая модель определения закономерностей формирования погрешностей механической обработки отверстий / Т.М. Брижан // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2014. – Вип. 28. – С. 165–169.
5. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Политехника, 1990. – 272 с.

*Рецензент: В.В. Суглобов
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ "ПГТУ"*

Статья поступила 07.06.2014 г.