

2. Бурмистров Е.В., Маркушин Е.М., Тарасов А.В. Исследование динамики процесса сверления отверстий малых диаметров в деталях из жаропрочных и титановых сплавов. — В сб.: Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов. — Куйбышев: КуАИ, вып. 4, 1976.
3. Бурмистров Е.В., Жунин В.В., Маркушин Е.М. Исследование поперечных колебаний разверток при обработке высокопрочных сталей. — В сб.: Обработка высокопрочных сталей и сплавов инструментами из сверхтвердых синтетических материалов. — Куйбышев: КИТИ, 1980.
4. Жарков И.Г. Исследование автоколебаний, возникающих при обработке резанием конструкционных материалов. — Автореф. дисс. докт. техн. наук. — Куйбышев: КИТИ, 1974.
5. Урывский Ф.П., Маркушин Е.М., Баландин Г.П. Вибрации при внутреннем шлифовании и волнистость обработанной поверхности. — В сб.: Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов. — Куйбышев: КуАИ, вып. 4, 1976.
6. Резников Н.И. Механика износа твердосплавных режущих инструментов. — В сб.: Инструментальные режущие материалы. — М.: Изд. АН СССР, 1960.
7. Попов И.Г. Исследование вибраций при обработке титановых сплавов концевыми фрезами: Дисс. канд. техн. наук. — Куйбышев: КуАИ, 1971.
8. Алимочкин В.М. Применение составного режущего инструмента с клеевым соединением режущей части. — Контактные процессы при больших пластических деформациях. — Харьков: Харьк. обл. книжн. изд-во, 1982.
9. Дворов В.И., Коротков В.В. Клеесборные шпоночные протяжки. — Станки и инструменты, 1982, № 6.

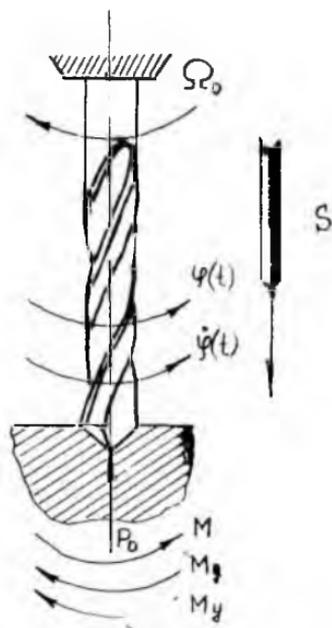
УДК 621.91.01:621.95.025

Е.Н.Воронов, Е.М.Маркушин

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АУТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА ПРИ СВЕРЛЕНИИ

В процессе резания на сверло, представляющее собой естественно закрученный стержень сложной формы и сечения, действует пространственная система сил, которую можно привести к суммарной осевой силе P ,

крутящему моменту резания " M " и избыточной (неуравновешенной) радиальной силе (рис.1). Переменность указанных сил и момента, вызванная различными факторами, приводит к возникновению колебаний: осевых, крутильных и поперечных. При этом наибольшее влияние на работоспособность сверд (на их стойкость и усталостную прочность) оказывают крутильные колебания.



Р и с. 1. Схема процесса сверления

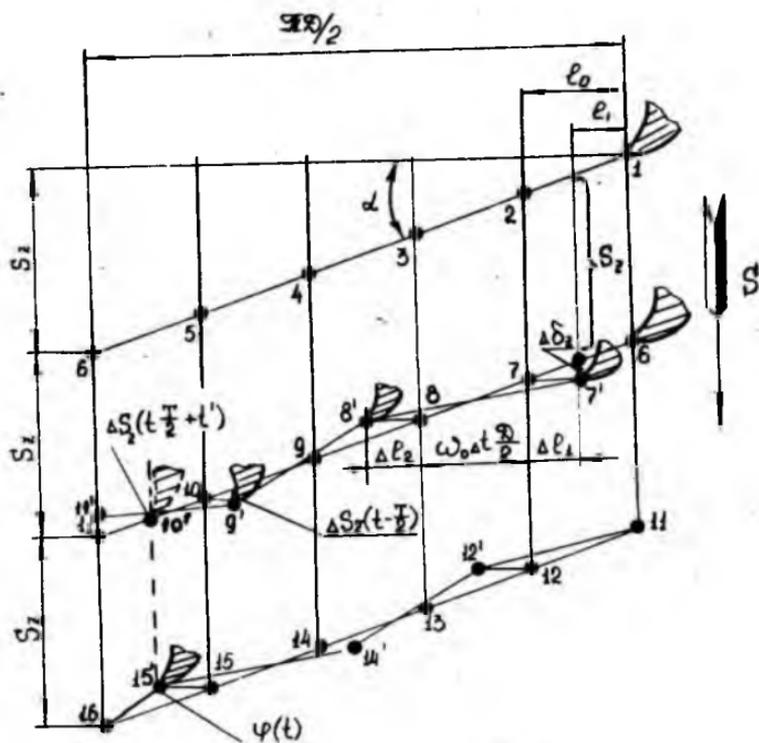
Как показано в работах [1], [2], [3], основными причинами, определяющими возникновение и развитие автоколебаний при резании, является изменение толщины срезаемого слоя при относительных виброперемещениях инструмента и обрабатываемой детали, а также сдвиг по фазе изменяющейся силы резания по отношению к толщине среза (чаще всего, отставание силы резания от изменения толщины среза).

В процессе сверления изменение толщины среза может быть объяснено изменением длины рабочей части сверла, вызванным его угловыми деформациями при возникновении крутильных колебаний и влиянием волнообразного следа, оставляемого на поверхности резания "предыдущей" режущей кромкой [4].

Однако, как показали дальнейшие исследования [5], причиной периодического изменения толщины среза, наряду со сказанным, может быть также изменение угловой скорости сверла, вызванное его крутильными колебаниями.

Для анализа характера изменения толщины среза за счет изменения угловой скорости сверла рассмотрим схему, представленную на рис.2. В начальный момент сверло начинает работать с переменной толщиной среза. В этот период происходит постепенное врезание режущего клина в обрабатываемый материал, в результате чего режущей кромкой сверла формируется поверхность резания, представляющая собой некоторую винтовую поверхность, развертку которой для периферийной точки режущей кромки можно изобразить в виде прямой линии 1-2...6.

Если крутильные колебания отсутствуют и угловая скорость постоянна, то, начиная со второй половины оборота (точка 6), режущая кромка сверла будет снимать сечение среза постоянной толщины



Р и с. 2. Изменение толщины среза, вызванное изменением угловой скорости сверла

$\alpha_0 = S_z \sin \gamma_{3, \kappa}$. При этом номинальная траектория движения периферийной точки режущей кромки на схеме будет представлена прямой линией 6-7...11.

При возникновении крутильных колебаний угловая скорость сверла начнет изменяться

$$\Omega(t) = \Omega_0 - \dot{\varphi}(t),$$

где Ω_0 - номинальная угловая скорость вращения сверла; $\Omega_0 = \frac{\pi n}{30}$; n - частота вращения шпинделя станка; $\dot{\varphi}$ - скорость колебательного движения сверла (за положительное принимается ее значение, противоположное по направлению вращения сверла, т.е. скорость раскручивания сверла).

В результате изменения угловой скорости при постоянной скорости поступательного движения (подачи), как видно из схемы (см.рис.2), сверло будет больше или меньше врезаться в обрабатываемый материал, чем при безвибрационной работе. Так, например, если на участке 6-7

угловая скорость сверла была меньше ее номинального значения, то, спустя промежуток времени Δt , режущий клин сверла будет находиться не в точке 7, а в точке 7'. В этом случае сверло углубится в обрабатываемый материал дополнительно на величину ΔS_1 , что приведет к увеличению толщины среза.

При увеличении угловой скорости, как, например, на участке 7-8, наоборот, произойдет уменьшение толщины среза.

Таким образом, рассмотренные изменения угловой скорости при постоянной скорости движения подачи приводят к тому, что в любой момент времени t режущий клин сверла может быть сдвинут относительно своего номинального положения, определяемого точками, расположенными на прямой 6-7...II. Величина этого сдвига будет определяться угловой деформацией сверла, вызванной его крутильными колебаниями $\varphi(t)$. Нетрудно показать, что приращение толщины среза в этом случае составит

$$\Delta a(t) = \frac{S_z}{\pi} \varphi(t) \sin \varphi_{3\kappa} \quad (1)$$

В результате фактическая траектория движения точки режущей кромки будет представлена линией 6-7' - 8'...II', которая спустя время $\frac{T}{2}$ (T - время одного оборота сверла) будет играть роль "следа", оставленного на поверхности резания "предыдущей" режущей кромкой сверла. Это приведет к еще более значительному изменению толщины среза:

$$\Delta a(t) = \frac{S_z}{\pi} \left[\varphi(t) - \varphi\left(t - \frac{T}{2}\right) \right] \sin \varphi_{3\kappa} \quad (2)$$

В общем случае, для моментов времени t и $t - \frac{T}{2}$, например, в точках I4 и 8, фазы колебаний $\varphi(t)$ и $\varphi\left(t - \frac{T}{2}\right)$ могут не совпадать. Поэтому для того, чтобы правильно учесть влияние "следа" на толщину среза, необходимо ввести временную поправку - t' , величина которой будет

$$t' = \frac{30 \left[\varphi\left(t - \frac{T}{2}\right) - \varphi(t) \right]}{\pi n} \quad (3)$$

С учетом поправки (3) приращение толщины среза (2), вызванное изменением угловой скорости сверла при его крутильных колебаниях, окончательно запишется в виде

$$\Delta a(t) = \frac{S_z}{\pi} \left[\varphi(t) - \varphi\left(t - \frac{T}{2} + t'\right) \right] \sin \varphi_{3\kappa} \quad (4)$$

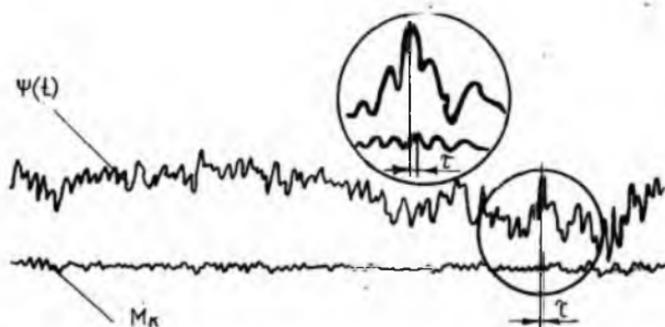
Таким образом, фактическая толщина среза, снимаемая режущей кромкой сверла в момент времени t , может быть представлена в виде

$$\alpha(t) = \left[S_z + \delta y(t) + \frac{S_z}{\pi} y(t) - \delta y(t - \frac{T}{2} + t') - \frac{S_z}{\pi} y(t - \frac{T}{2} + t') \right] \sin \beta_{\phi} \quad (5)$$

где δ - коэффициент, учитывающий связь продольных деформаций сверла с угловыми.

Изменения толщины среза могут быть вызваны и такими причинами периодического характера, как биение режущих кромок сверла, погрешности его заточки и др. Учесть влияние этих изменений можно путем введения в выражение (5) дополнительного члена $A = \varepsilon \omega t$, где ε - амплитуда изменений толщины среза, вызванных указанными факторами; ω - круговая частота этих изменений.

Другой важной причиной, обуславливающей возникновение и развитие автоколебаний в технологических системах, как указывалось выше, является наличие фазового сдвига между изменяющимися силой резания и толщиной среза. Как показали исследования [2], [3], [6], в связи с инерционностью процесса пластической деформации при резании, а также процессов, протекающих в зоне контакта инструмента со стружкой и обрабатываемой заготовкой, сила резания в своем изменении, как правило, отстает от изменения толщины среза. Это подтверждается и результатами наших исследований. Так, например, на рис. 3 приведены осциллограммы крутящего момента и угловых деформаций сверла при его крутильных колебаниях, полученные при сверлении отверстий диаметром 5 мм в титановом сплаве BT20.



Р и с. 3. Осциллограмма крутящего момента и угловых деформаций сверла при его крутильных колебаниях

Как видно из этих осциллограмм, момент резания M отстает от угловой деформации сверла $\varphi(t)$, а следовательно, от вызванного ею изменения толщины среза. Величина отставания τ зависит от свойств обрабатываемого материала, геометрии инструмента, режимов резания и составляет $\tau = 2 \dots 8$ мс.

Следует отметить, что фазовый сдвиг между изменяющимися силой резания и толщиной среза является сложной по своей физической природе величиной и исследован еще недостаточно. Так, например, в работе [7] показано, что при изменении толщины среза, вызванном влиянием волнообразного "следа", должно наблюдаться опережение силы резания по отношению к изменению толщины среза. Сказанное нашло экспериментальное подтверждение в наших опытах.

Таким образом, момент резания, действующий на сверло, с учетом рассмотренного выше изменения толщины среза и фазового сдвига между изменяющимися силой резания и толщиной среза, можно представить в виде

$$M = C_M D^{x_M} \left[S_E + \delta \sin \omega(t - \tau) + \delta \varphi(t - \tau) + \frac{\delta E}{\pi} \varphi(t - \tau) - \epsilon \sin \omega(t - \tau_1) - \delta \varphi(t - \tau_1) - \frac{\delta E}{\pi} (t - \tau_1) \right]^{y_M}, \quad (6)$$

где C_M - коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала, геометрии сверла, скорости резания и других факторов; D - диаметр сверла;

$$\tau_1 = \frac{T}{2} - \frac{T[y(t) + \varphi(t - \frac{T}{2})]}{2\pi} \mp \tau \pm \tau_1;$$

τ_1 - опережение силы резания от толщины срезаемого слоя.

Коэффициент C_M и показатели степени x_M и y_M могут быть найдены путем экспериментальных исследований либо по нормативам режимов резания при сверлении. Так, применительно к обработке титанового сплава BT20 стандартными сверлами при скорости резания $v = 0,13$ м/с было получено: $C_M = 590$; $x_M = 1,77$; $y_M = 0,857$.

При разработке математической модели крутильных автоколебаний при сверлении в качестве доминирующей колебательной системы можно рассматривать систему сверла. Такое допущение вполне оправдано, так как крутильная жесткость шпиндельной группы сверлильного станка например, 2Н135 в 200...1000 раз превышает жесткость сверла. Кроме того, как показано в работе [8], изменения толщины среза, вызванные изменениями скорости вращения шпинделя и подачи, не превышают 3...8% от изменений, вызванных крутильными колебаниями сверла. Поэтому при анализе автоколебательного процесса при сверлении, в первом приближении, можно исключить из рассмотрения станок и как колебательную

систему, и как источник возникновения вибраций инструмента.

Таким образом, рассматривая сверло как колебательную систему с одной степенью свободы и сосредоточенными параметрами на основании принципа Даламбера, получим:

$$J_p \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \eta_0 \frac{dy(t)}{dt} + C y(t) = M, \quad (7)$$

где J_p - полярный момент инерции сверла; η_0 - обобщенный коэффициент сопротивления (демпфирования); C - приведенная жесткость сверла; M - крутящий момент сил, действующих на сверло.

Принимая во внимание, что при врезании заборного конуса, момент, действующий на сверло, возрастает постепенно, а также с учетом выражения (6), справедливого для времени $t > t_1$, где t_1 - время врезания, момент M в правой части уравнения (7) можно представить в виде следующего оператора:

$$M = \left\{ \begin{array}{l} 1. 0, \text{ при } 0 < t \leq \tau \\ 2. C'_M [S_Z n(t-\tau)]^{x_M} S_Z^{y_M} \text{ при } \tau < t \leq t_1 \\ 3. C_M D^{x_M} [S_Z + \varepsilon \sin \omega(t-\tau) + \delta y(t-\tau) + \frac{S_Z}{\pi} y(t-\tau) - \\ - \varepsilon \sin \omega(t-T_1) - \delta y(t-T_1) - \frac{S_Z}{\pi} y(t-T_1)]^{y_M} \\ \text{при } t > t_1 \text{ и } [S_Z + \varepsilon \sin \omega(t-\tau) + \delta y(t-\tau) + \\ + \frac{S_Z}{\pi} y(t-\tau) - \varepsilon \sin \omega(t-T_1) - \delta y(t-T_1) - \frac{S_Z}{\pi} y(t-T_1)] \geq 0 \\ 4. 0, \text{ при } t > t_1, \text{ и } [S_Z + \varepsilon \sin \omega(t-\tau) + \\ + \delta y(t-\tau) + \frac{S_Z}{\pi} y(t-\tau) - \varepsilon \sin \omega(t-T_1) - \\ - \delta y(t-T_1) - \frac{S_Z}{\pi} y(t-T_1)] < 0. \end{array} \right. \quad (8)$$

Представление оператора в виде (8) позволяет также учесть прекращение процесса резания (нарушение его непрерывности) при условии, если фактическая толщина среза станет равной нулю или примет отрицательное значение, т.е. произойдет отрыв режущих кромок от обрабатываемого материала.

Как видно из выражений (7) и (8), крутильные колебания сверла описываются нелинейным дифференциально-разностным уравнением второго порядка. Решение такого уравнения может быть осуществлено численным методом с использованием ЭЦМ.

Л и т е р а т у р а

1. К у д и н о в В.А. Динамика станков.-М.:Машиностроение, 1967.
2. Т а ш л и ц к и й Н.И. Первичный источник возбуждения автоколебаний при резании металлов. -Вестник машиностроения, 1960.
3. Ж а р к о в И.Г. Исследование автоколебаний, возникающих при обработке резанием конструкционных материалов: Автореф.дисс.докт. техн.наук. - Куйбышев:КПТИ, 1974.
4. Б у р м и с т р о в Е.В., М а р к у ш и н Е.М., Т а р а с о в А.В. Исследование динамики процесса сверления отверстий малых диаметров в деталях из жаропрочных и титановых сплавов.-Межвуз.сб.: Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов.- Куйбышев: КуАИ, вып.4, 1976.
5. Б у р м и с т р о в Е.В., М а р к у ш и н Е.М., В о р о н о в Е.И. Влияние крутильных колебаний на изменение толщины срезаемого слоя. В сб.:Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов.-Куйбышев: КуАИ, вып.5, 1978.
6. Э л ь я с б е р г М.Е. О независимости границы устойчивости процесса резания от возмущений по следу.- Станки и инструменты, 1976, №11.
7. О т о н , К о н о К. О самовозбуждающихся вибрациях станка или обрабатываемой детали, вызываемых регенеративным влиянием следа и запаздыванием.-Труды американского общества инженеров-механиков "Конструирование и технология машиностроения", Изд.Мир, 1974, №4.
8. Т а р а с о в А.В. Исследование мгновенных скоростей вращения шпинделя и подачи в связи с их влиянием на изменение толщины срезаемого слоя.-В сб.:Обработка высокопрочных сталей и сплавов инструментами из сверхтвердых синтетических материалов.-Куйбышев: КуАИ, 1980.

УДК 621.914.7-752

А.Н.Волков, В.И.Стебихов, А.В.Тарасов

ОБРАЗОВАНИЕ ВОЛНИСТОСТИ НА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ФРЕЗЕРОВАНИЯ

При фрезеровании деталей концевыми, цилиндрическими или дисковыми фрезами на обработанной поверхности образуется значительная волнистость. Причины появления волнистости при фрезеровании рассматривались