

Математическая модель технологического процесса глубокого сверления

А. С. Дударев

В статье приведена аналитическая математическая модель динамической технологической системы глубокого сверления. Математическая модель создана на базе дифференциальных уравнений с целью управления объектом – технологической системой обработки сверлением. Управление осуществлено по каналу продольной подачи инструмента, вдоль оси сверла.

Ключевые слова:

сверло, подача, инструмент, модель, сверление, частота, резание, кромка, лезвие, срез, податливость

УДК 621.95.01 | ВАК 2.5.6

DOI: 10.22184/2499-9407.2023.30.1.52.56

Среди технологических операций резания, операция сверления занимает особую роль – как самая распространенная и экономически оправданная среди других методов формообразования отверстий [1–7].

Сверлением получают отверстия различного диаметра и глубины, либо многогранные отверстия различного сечения и глубины. Согласно классическому определению, отверстия с соотношением глубины к диаметру более 10 являются глубокими [8–17].

Для формообразования глубоких отверстий требуется, в первую очередь, специальный режущий инструмент, специальное технологическое оборудование и особая технология [12, 13, 16].

Для управления процессом глубокого сверления удлиненными сверлами, составим аналитическую модель процесса. Исследования проведенные на кафедре технологии машиностроения Челябинского политехнического института [18] показали, что управление процессом глубокого сверления целесообразно осуществлять путем изменения скорости продольной подачи, а не скорости резания. Действительно, сверление сложный процесс, где суммируются два кинематических движения: вращение сверла и продольная подача, которые могут быть кинематически независимы друг от друга, и при этом как завышены, так и занижены. Рекомендуется при назначении параметров режима

сверления сначала назначать максимально возможную подачу, при условии обеспечения качества обработки, а затем устанавливать в зависимости от типа обрабатываемого материала частоту вращения шпинделя. По общеизвестной формуле [12, 14, 17], связь между скоростью резания (v) и частотой вращения выглядит следующим образом:

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}, \quad (1)$$

где d – диаметр сверла; n – частота вращения.

Как видно, в выражении (1) нет величины подачи, поэтому подача не влияет на скорость резания, влияет только частота вращения шпинделя.

В работе [19] приводятся результаты исследований влияния режимов резания при сверлении на величину крутящего момента и осевой силы, которые показывают, что указанные параметры в значительно большей степени зависят от вариаций осевой подачи, чем от величины скорости резания. Для процесса сверления, так же как и для других процессов механической обработки, характерно так называемое явление резания «по следу» [20, 21]. Толщина слоя, срезаемого каждой из двух режущих кромок сверла, определяется координатой его вершины в момент времени $x(t)$ и предшествующим ходом процесса на отрезке времени τ , то есть следом от прохождения второй режущей кромки.

Полагая в дальнейшем частоту вращения шпинделя постоянной, запишем для времени одного оборота детали:

$$\tau_0 = \frac{1}{n}. \quad (2)$$

Для двухкромочного сверла с симметрично расположенными режущими кромками время запаздывания определяется как:

$$\tau = \frac{\tau_0}{2}. \quad (3)$$

При этом уравнение толщины среза для текущего значения среза [22]:

$$a(t) = x(t) - x(t - \tau), \quad (4)$$

где t – текущий момент времени.

В идеализированном случае абсолютно жесткой технологической системы (инструмента, детали и элементов станка) координата X кромки режущего инструмента как в текущий момент времени, так и в момент предыдущего оборота заготовки определялась бы исключительно скоростью осевой подачи (рис. 1) [23].

Причем, поскольку скорость подачи в системе управления является величиной переменной, уравнения для значений координат следовало бы записать в виде:

$$x(t) = \int_0^t v_f(t) dt, \quad (5)$$

$$x(t - \tau) = \int_0^{t-\tau} v_f(t) dt, \quad (6)$$

где v_f – скорость осевой подачи.

На самом деле, ввиду определенной податливости системы (главным образом из-за деформаций режущего инструмента), режущая кромка оказывается смещенной на величину упругих деформаций ΔY . Появление деформаций приводит к изменению толщины среза (особенно в момент врезания инструмента). На рис. 1 показано положение сверла с учетом упругих деформаций (пунктирными линиями). После соприкосновения сверла с обрабатываемой деталью влияние осевой силы вызывает, как контактные деформации инструмента Y_{kd} , так и деформацию упругой системы станка Y_{00} в осевом направлении. Кроме того, погрешности заточки режущих кромок сверла, неперпендикулярность положения заготовки относительно его оси, неоднородность твердости обрабатываемого материала и ряд других причин приводят к возникновению избыточной неуравновешенной радиальной силы, действующей в плоскости перпендикулярной оси сверла и вызывающей появление дополнительных деформаций Y_p .

Для характеристики свойств технологической системы введем понятие «жесткости» J и «податливости» H системы

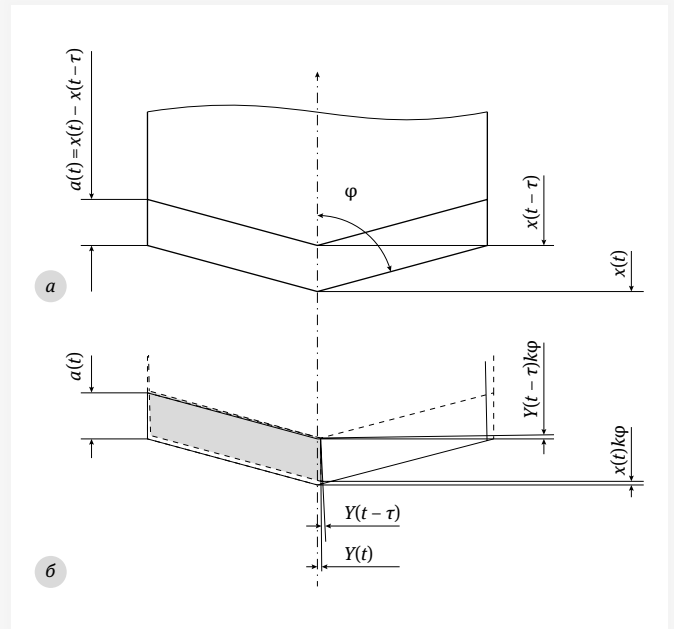


Рис. 1. Толщина срезаемого слоя при сверлении: а – схема формирования толщины среза; б – толщина срезаемого слоя с учетом упругих деформаций сверла

по отдельным координатам. Так, например, в осевом направлении (по координате x):

$$J_x = \frac{F_x}{Y_x}, \quad (7)$$

$$H_x = \frac{Y_x}{F_x}, \quad (8)$$

где F_x – сжимающая осевая сила; Y_x – деформация по оси X .

Таким образом, податливость технологической системы по координате X можно записать в виде:

$$H_x = H_{00} + H_{kd}, \quad (9)$$

где H_{00} – податливость элементов станка в осевом направлении; H_{kd} – податливость инструмента.

Величины контактных деформаций инструмента могут быть определены по формулам сопротивления материалов. Рассматривая режущий инструмент как длинный стержень площадью поперечного сечения F , можем записать:

$$\Delta l = \frac{F_f \cdot l}{E \cdot F}, \quad (10)$$

где F_f – сжимающая осевая сила, вдоль оси подачи; F – площадь поперечного сечения инструмента; E – модуль упругости материала инструмента; l – длина режущего инструмента.

Что касается податливости упругой системы станка, то исследованиями [24] установлено, что для типичных условий обработки величина H_{00} в осевом направлении составляет порядка $(2-4) \cdot 10^{-4}$ мм/Н. Значительно большие сложности представляет определение деформаций, возникающих под действием радиальных сил, ввиду того, что появление этих сил является следствием большого числа априорно непредсказуемых факторов. Величины радиальных сил могут быть выявлены на основании целевых экспериментальных исследований. В работе [25] приводится обширный материал по изучению причин возникновения радиальных сил при сверлении, результаты экспериментальных исследований по определению их значений, а также анализ влияния условий обработки на характер их изменения.

Считая эквивалентную упругую систему безинерционным звеном [26], запишем уравнения, описывающие ее поведение в следующем виде:

$$\Delta Y_x(s) = H_x(s) \Delta F_f(s), \quad (11)$$

$$\Delta Y_p(s) = H_p(s) \Delta F_p(s), \quad (12)$$

где ΔY_x – приращение деформаций по оси X; ΔY_p – приращение деформаций в радиальном направлении; H_x – податливость по оси X; H_p – податливость в радиальном направлении.

Приращения сил резания из (11), (12) в результате изменения толщины срезаемого слоя могут быть представлены:

$$\Delta F_f(s) = M_x(s) \Delta a(s), \quad (13)$$

$$\Delta F_p(s) = M_p(s) \Delta a(s), \quad (14)$$

где M_x – момент закручивания относительно X; M_p – момент сопротивления в радиальном направлении; Δa – изменение толщины среза.

Таким образом, с учетом упругих деформаций для текущего момента времени координата вершины сверла определяется из уравнения:

$$x(t) = \int_0^t v_f(t) dt - Y_x(t) - k_\phi Y_p(t), \quad (15)$$

где k_ϕ – коэффициент учитывающий геометрические параметры режущего инструмента.

Аналогично, для момента времени $(t - \tau)$:

$$x(t - \tau) = \int_0^{t-\tau} v_f(t) dt - Y_x(t - \tau) - k_\phi Y_p(t - \tau). \quad (16)$$

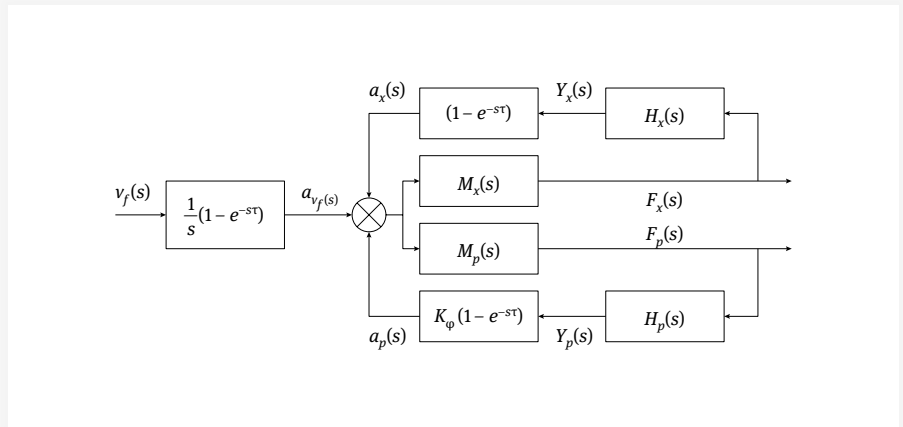


Рис. 2. Структурная схема объекта управления

С учетом выражений (15) и (16) уравнение (4) в операторной форме будет иметь вид:

$$a(s) = \frac{1}{s}(1 - e^{-s\tau}) \cdot v_f(s) - (1 - e^{-s\tau}) \cdot Y_x(s) - k_\phi(1 - e^{-s\tau}) \cdot Y_p(s). \quad (17)$$

Полученные соотношения (15), (16) и (17) представляют собой математическую модель объекта управления (ОУ) – технологической системы обработки сверлением при управлении по каналу продольной подачи вдоль оси сверла.

Структурная схема модели ОУ, составленная на основании уравнений (4)–(17), приведена на рис. 2.

Как следует из схемы ОУ, текущее значение толщины среза или его приращение определяются тремя составляющими:

$$a(s) = \Delta a_{v_f}(s) - \Delta a_x(s) - \Delta a_p(s), \quad (18)$$

где Δa_{v_f} – составляющая, обусловленная скоростью осевой подачи сверла; Δa_x , Δa_p – составляющие, обусловленные упругой деформацией в технологической системе под действием силы резания в направлениях оси X (вдоль осевой подачи сверла) и в радиальном направлении соответственно.

Таким образом, особенностью математической модели процесса глубокого сверления является наличие в ее структуре замкнутых контуров, причиной возникновения которых являются особенности резания «по следу», а также влияние упругих деформаций на толщину срезаемого слоя.

В качестве основного возмущающего воздействия на технологический процесс могут рассматриваться величины твердости обрабатываемого материала. В случае, если задан закон изменения твердости в функции $c_1(s)$, среднее значение на участке, ограниченном положениями режущей кромки в момент времени t и в момент $(t - \tau)$ можно, в операторной форме, записать как:

$$c(s) = \frac{1}{s\tau}(1 - e^{-s\tau})c_1(s). \quad (19)$$

С учетом (19), линеаризованные выражения для составляющих силы резания запишутся в следующем виде:

$$\Delta F_f(s) = M_x(s) \cdot \Delta a(s) + N_x(s) \cdot \Delta c_x(s), \quad (20)$$

$$\Delta F_p(s) = M_p(s) \cdot \Delta a(s) + N_p(s) \cdot \Delta c_p(s), \quad (21)$$

где M_i, N_i – коэффициенты передачи процесса резания по соответствующим переменным.

На рис. 3 показана структурная схема обобщенной математической модели объекта с учетом основного возмущения – изменения твердости обрабатываемого материала.

Как следует из рис. 3, обратная связь через звено $(1 - e^{-st})$ действует только в переходных режимах, а в установившихся режимах принимает значение, равное нулю.

В действительности, динамические свойства процесса резания будут описываться передаточной функцией (ПФ) аperiодического звена:

$$M_i(s) = \frac{\Delta F_f(s)}{\Delta a(s)} = \frac{m_x}{T_c \cdot s + 1}, \quad (22)$$

где T_c – постоянная времени стружкообразования; m_x – коэффициент передачи процесса резания по переменной X .

Передаточная функция эквивалентной упругой системы станка [26] может быть представлена ПФ вида:

$$G_{us}(s) = \frac{\Delta Y_i(s)}{\Delta F_i(s)} = \frac{H_i}{T_{us}^2 s^2 + 2\xi_c T_{us} s + 1}, \quad (23)$$

где H_i – податливость упругой системы станка; T_{us} – постоянная времени демпфирования упругой системы, ξ_c – коэффициент демпфирования упругой системы.

Таким образом, передаточная функция объекта при управлении по каналу подачи инструмента может быть представлена в виде:

$$G_x(s) = \frac{\Delta F_f(s)}{\Delta v_{\beta}(s)}, \quad (24)$$

$$G_x(s) = \frac{m_x \cdot (1 - e^{-st})}{s \cdot (T_{us}^2 s^2 + 2\xi_c T_{us} s + 1) \cdot (T_c s + 1) + B \cdot (1 - e^{-st})}, \quad (25)$$

где $B = m_x h_x + m_p h_p k_{\phi}$ – коэффициент относительной жесткости технологической системы.

Общие выводы

В линеаризованных уравнениях для силы резания ее приращение будет определяться двумя составляющими: одна составляющая характеризует изменение толщины

ПЕТЕРБУРГСКАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ЯРМАРКА

ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА:

- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ КОНГРЕСС
- КОНФЕРЕНЦИЯ «КРЕПЕЖ. КАЧЕСТВО И ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»
- БИРЖА ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

18-20 АПРЕЛЯ 2023

КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»
Петербургское шоссе, 64

+7 965 772 7759 | a.ilina@restec.ru | +7 929 106 2738 | v.zudina@restec.ru | ptfair.ru

среза, а другая – вариации твердости материала заготовки.

При аналитическом исследовании динамической технологической системы сверления, величину силы резания можно рассматривать как функцию твердости материала и площади сечения среза.

Литература

1. **Корягин С. И., Пименов И. В., Худяков В. К.** Способы обработки материалов: учебное пособие. Калининград: КГУ, 2000. 448 с.
2. **Кожевников Д. В., Кирсанов С. В.** Резание материалов. М.: Машиностроение, 2007. 304 с.
3. **Богодухов С. И., Сулейманов Р. М., Проскурин А. Д.** Технологические процессы в машиностроении: учебник для вузов / Под общ. ред. С. И. Богодухова. М.: Инновационное машиностроение, 2021. 640 с.
4. **Иванов В. П., Фруцкий В. А.** Технологические процессы в машиностроении: учеб. пособие. Новополюк: ПГУ, 2009. 240 с.
5. **Ярушин С. Г.** Технологические процессы в машиностроении. М.: Юрайт, 2019. 564 с.
6. **Бахвалов, В. А.** Процессы обработки заготовок. Часть 1: Методы механической обработки поверхностей деталей машин / 2-е изд., испр. и доп. Пермь: ПНИПУ, 2013. 229 с.
7. **Богодухов С. И., Бондаренко Е. В., Схиртладзе А. Г., Сулейманов Р. М.** Технологические процессы в машиностроении: учебник. М.: Машиностроение, 2009. 640 с.
8. **Антимонов А. М.** Основы технологии машиностроения: учебник. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. 176 с.
9. **Скворцов В. Ф.** Основы технологии машиностроения. Томск: Томский политехн. ун-т, 2013. 352 с.
10. **Макаров В. Ф.** Резание материалов. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2019. 499 с.
11. **Барботько А. И., Масленников А. В.** Резание материалов: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. Старый Оскол: ТНТ, 2009. 431 с.
12. **Якимов А. В., Якимов А. А., Ларшин В. П., Свирищев В. И.** Технология машиностроения: учебник. Пермь: ПГТУ, 2002. 563 с.
13. **Суслов А. Г.** Технология машиностроения: учебник для вузов / 2-е изд. М.: Машиностроение, 2007. 430 с.
14. **Бобров В. Ф.** Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
15. **Виноградов А. А.** Физические основы процесса сверления труднообрабатываемых металлов твердосплавными сверлами. Киев: Наук. думка, 1985. 263 с.
16. **Троицкий Н. Д.** Глубокое сверление. Ленинград: Машиностроение, 1971. 174 с.
17. **Фельдштейн Е. Э., Корниевич М. А.** Справочник сверловщика. Минск: Дизайн ПРО, 2000. 271 с.
18. Самоподнастраивающиеся станки. Управление упругими перемещениями системы СПИД / Под ред. Б. С. Балакшина. М.: Машиностроение, 1970. 416 с.
19. **Костюкович С. С., Дечко Э. М., Долгов В. И.** Точность обработки глубоких отверстий. Минск: Вышэйш. школа, 1978. 144 с.
20. **Тверской М. М.** Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках. М.: Машиностроение, 1982. 208 с.
21. **Тверской М. М., Свиридов Ю. Н., Нуждов В. М.** Основы теории автоматического управления производственными процессами. Челябинск: ЧПИ, 1982. 46 с.
22. **Левченко А. И.** Повышение эффективности автоматизированного процесса сверления глубоких отверстий: автореферат дис. ... канд. техн. наук / Севастопольский гос. техн. ун-т. Севастополь, 2001. 18 с.
23. **Головин В. И., Харченко А. О.** Надежность электроинструмента на примере сверлильных машин. М.: ИНФРА-М, 2015. 147 с.
24. **Тараненко В. А., Абакумов А. М.** Динамические модели для оценки точности технологических систем. М.: ВНИИТЭМР, 1989. 56 с.
25. **Холмогорцев Ю. П.** Оптимизация процессов обработки отверстий. М.: Машиностроение, 1984. 184 с.
26. **Кудинов В. А.** Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 358 с.

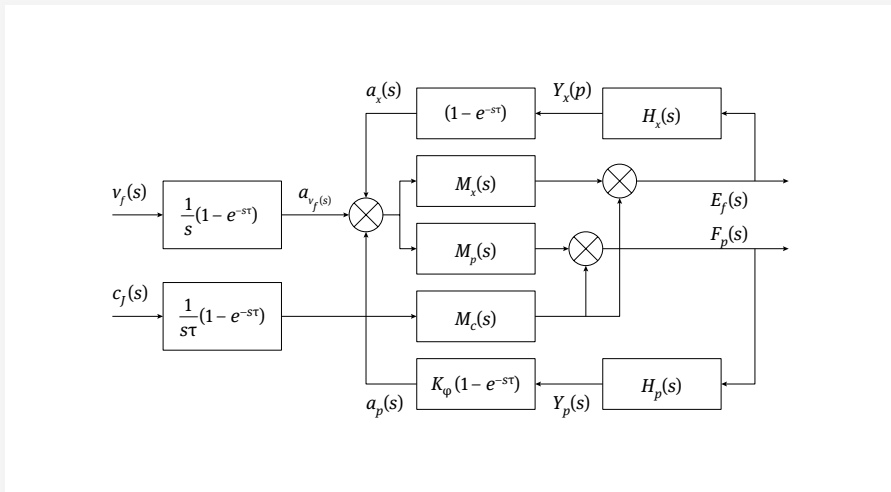


Рис. 3. Обобщенная структурная схема объекта управления

Автор

Дударев Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Инновационные технологии машиностроения» Пермского национального исследовательского политехнического университета

ОРГАНИЗАТОР



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЫСТАВОЧНЫЙ ОПЕРАТОР



МКВ

МЕЖДУНАРОДНЫЕ
КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ



**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ФОРУМ «АРМИЯ-2023»**

**14–20 АВГУСТА
ПАТРИОТ ЭКСПО**

www.rusarmyexpo.ru