

УДК 621.9.015

## МОДЕЛИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ ДВУХЛЕЗВИЙНЫМИ КОНЦЕВЫМИ МЕРНЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ

*С.П. Пестов*

Предложены модели точности формообразования отверстий двухлезвийными концевыми мерными инструментами типа спиральных, перовых и т.п. свёрл в виде уравнений, учитывающих формирование отверстия режущими лезвиями, которые срезают переменные площади в зависимости от их реальной геометрии, предшествующих положений лезвий, осевых биений шпинделя и жесткости элементов технологической системы.

Ключевые слова: модели; точность, формообразование; отверстия; концевые мерные инструменты; двухлезвийные инструменты; свёрла.

Ранее в работе [1] отмечалось, что процесс формообразования отверстий концевыми мерными инструментами целесообразно исследовать с помощью системы частных моделей точности для отдельных переходов, основанных на общем научно-методическом подходе к моделированию. Этот подход базируется на разработке математических моделей в виде уравнений с запаздывающим аргументом и учётом условия обеспечения точности концевыми мерными инструментами – копирования размера инструмента на обрабатываемое отверстие.

Для целей моделирования точности формообразования отверстий концевыми мерными инструментами на станках с ЧПУ в работе [2] была предложена структура системы частных математических моделей. Согласно этой структуре, в зависимости от применяемого режущего инструмента и вида обработки, модели подразделяются на группы. Площади слоев, срезаемых режущими лезвиями, а следовательно, и силы резания, как будет показано ниже, существенно зависят от соотношения подачи на зуб инструмента  $S/z$  и осевого сдвига лезвий или осевого биения режущих лезвий инструмента  $\tau$ . Исходя из этого, модели каждой группы подразделяются на следующие подгруппы:

- с относительно большими подачами, когда  $S \geq \tau z$  ( $z$  – число лезвий или зубьев режущего инструмента);
- с относительно малыми подачами, когда  $S < \tau z$ .

С учётом принятого подхода рассмотрим модели формообразования при черновой обработке отверстий в сплошном материале (модели сверления двухлезвийными свёрлами) или модели группы А (модели А1, А2).

Расчётные схемы моделей А1 и А2 приведены соответственно на рис. 1 и 2. Эти схемы одинаково применимы для любых двухлезвийных сверл, независимо от типа сверла (спиральное, перовое и т.п.).

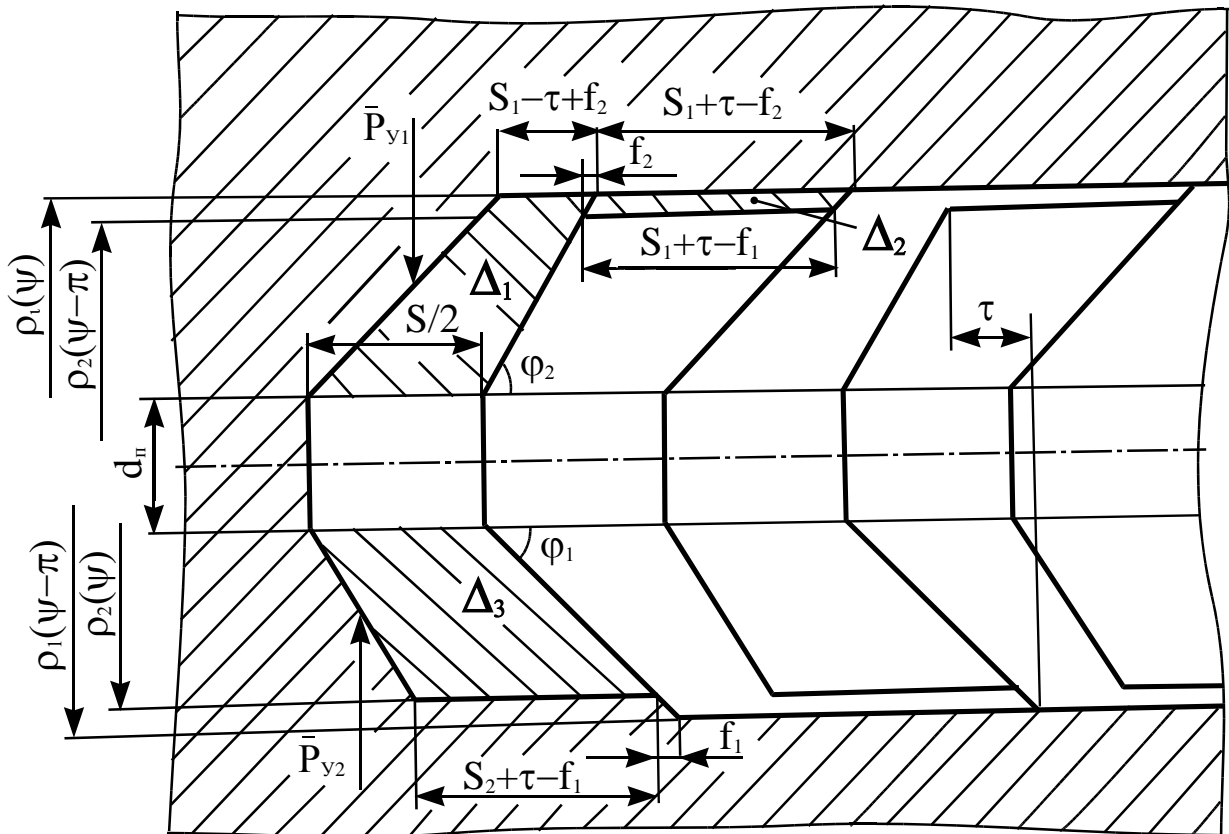


Рис. 1. Расчётная схема формообразования отверстий двухлезвийными сверлами в сплошном металле с относительно большими подачами  $S \geq 2\tau$  (модель А1)

Обозначив текущие радиус-векторы вершин каждого режущего лезвия рассматриваемых двухлезвийных инструментов как  $\rho_1(\psi)$  и  $\rho_2(\psi)$ , где  $\psi$  – текущий угол поворота режущего инструмента от начала обработки, можно с помощью этих радиус-векторов описать положение каждого режущего лезвия в любой момент времени. При движении двухлезвийного инструмента с осевой подачей  $S$  каждое лезвие снимает суммарные площади среза  $\Delta_{(1)} = \Delta_1 + \Delta_2$  и  $\Delta_{(2)} = \Delta_3$ .

Тогда модель формообразования отверстия двухлезвийным концевым мерным инструментом при сверлении описывается системой:

$$\begin{cases} |K_2\Delta_{(2)} - K_1\Delta_{(1)}| = J\delta(\psi), \\ \rho_1(\psi) = \frac{D_u}{2} + \delta(\psi), \\ \rho_2(\psi) = \frac{D_u}{2} - \delta(\psi), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\rho_1(\psi)$  и  $\rho_2(\psi)$  – радиус-вектора текущего положения вершин соответственно первого и второго лезвия;  $\psi$  – текущий угол поворота инструмен-

та;  $\Delta_{(1)}$  и  $\Delta_{(2)}$  – суммарные площади срезаемого слоя соответственно первым и вторым лезвиями;  $D_u$  – диаметр режущего инструмента;  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты пропорциональности сил резания площадям срезаемых слоев соответственно первым и вторым лезвиями;  $\delta(\psi)$  – смещение оси инструмента при формообразовании;  $J$  – радиальная жесткость инструмента (в общем случае – жесткость элементов технологической системы).

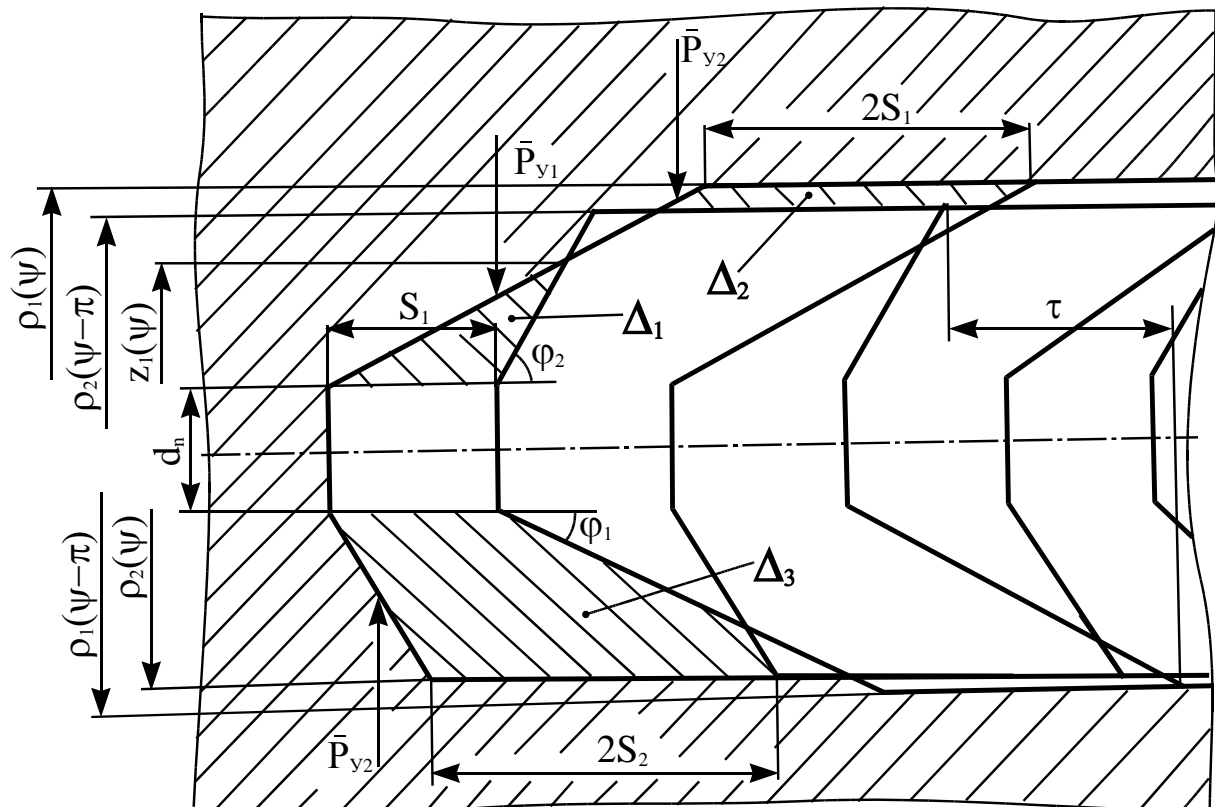


Рис. 2. Расчётная схема формообразования отверстий двухлезвийными сверлами в сплошном металле с относительно малыми подачами  $S < 2\tau$  (модель А2)

Первое уравнение системы (1) учитывает равновесие инструмента в процессе обработки под действием радиальных сил, действующих на каждое лезвие и сил упругости инструмента  $J\delta(\psi)$  или сил упругости элементов технологической системы.

Далее подробно рассмотрим вычисление площадей срезаемых слоёв для различных моделей, т.к. параметры площадей, при данном подходе к моделированию, являются определяющими. Из-за различия площадей срезов на этапе врезания заборным конусом инструмента и на этапе дальнейшей обработки следует выделить соответственно два случая:

- а) врезание инструмента на длине заборного конуса;

б) последующая обработка после врезания заборного конуса (установившийся процесс резания).

Определим сначала площади срезаемых слоёв при врезании заборного конуса инструмента в металл при  $\psi < 360^\circ$ .

Для двухлезвийных свёрл с относительно большими подачами  $S \geq 2\tau$  (см. рис. 1):

$$\Delta_{(1)} = \left( S_1 - \frac{\tau}{2} \right) \left( \rho_1(\psi) - \frac{d_n}{2} \right),$$

$$\Delta_{(2)} = \left( S_2 + \frac{\tau}{2} \right) \left( \rho_2(\psi) - \frac{d_n}{2} \right),$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – подачи на зуб с учетом осевых биений шпинделя (рассмотрено ниже), определяющие толщины срезаемых слоев;  $\tau$  – осевое биение режущих лезвий;  $d_n$  – диаметр перемычки ( $d_n \approx 0,13 D_u$ );  $\rho_1(\psi)$ ,  $\rho_2(\psi)$  – радиус-векторы вершин соответственно первого и второго лезвий.

Для двухлезвийных свёрл с относительно малыми подачами  $S < 2\tau$  (см. рис. 2)

$$\Delta_{(1)} = \left( z_1 - \frac{d_n}{2} \right) \frac{S_1}{2},$$

$$\Delta_{(2)} = 2S_2 \left( \rho_2(\psi) - \frac{d_n}{2} \right) - \Delta_1(\psi - \pi),$$

где  $z_1$  – радиус-вектор вершины первого срезаемого слоя.

Определим далее площади срезаемых слоёв после врезания заборного конуса инструмента в металл при  $\psi > 360^\circ$  (установившийся процесс).

Для двухлезвийных свёрл с относительно большими подачами (см. рис. 1):

$$\Delta_{(1)} = \Delta_1 + \Delta_2 = \left( \rho_1(\psi) - \frac{d_n}{2} \right) \left( S_1 + \frac{f_2 - \tau}{2} \right) +$$

$$+ \left( \rho_1(\psi) - \rho_2(\psi - \pi) \right) \left( S_1 + \tau - \frac{f_1 + f_2}{2} \right),$$

$$\Delta_{(2)} = \Delta_3 = \left( \rho_2(\psi) - \frac{d_n}{2} \right) \left( S_2 + \frac{\tau - f_1}{2} \right),$$

где параметры:

$$f_1 = \frac{\rho_1(\psi - \pi) - \rho_2(\psi)}{\operatorname{tg} \varphi_1},$$

$$f_2 = \frac{\rho_1(\psi) - \rho_2(\psi - \pi)}{\operatorname{tg} \varphi_2}.$$

Для двухлезвийных свёрл с относительно малыми подачами (см. рис. 2):

$$\Delta_{(1)} = \Delta_1 + \Delta_2 = \left( z_1 - \frac{d_n}{2} \right) \frac{S_1}{2} + 2S_1(\rho_1(\psi) - \rho_2(\psi - \pi)),$$

$$\Delta_{(2)} = \Delta_3 = 2S_2 \left( \rho_2(\psi) - \frac{d_n}{2} \right) - \Delta_1(\psi - \pi),$$

где:

$$z_1 = \frac{S_1}{2(\operatorname{ctg} \varphi_1 - \operatorname{ctg} \varphi_2)} + \frac{d_n}{2} = \frac{S_1(D_u - d_n)}{4\tau} + \frac{d_n}{2}.$$

Обработка отверстий концевыми мерными инструментами сопровождается осевыми биениями шпинделя металлорежущего станка. Осевые биения шпинделя станка вызваны перекосом его опорных подшипников, не зависят от подачи механизма станка и определяются конкретной моделью станка. При учёте осевых биений шпинделя подача на зуб режущего инструмента, т.е. толщина срезаемого слоя изменяется, что приводит к изменению площадей срезаемых слоев. Проанализируем влияние осевых биений шпинделя на подачу для двухлезвийного инструмента.

Пусть подача  $S_1(\psi)$  для первого лезвия инструмента:

$$S_1(\psi) = \frac{S}{2} + \frac{O_S}{2}(\cos(n\psi)),$$

где  $S$  – номинальная осевая подача механизмом станка;  $O_S$  – амплитуда осевого биения шпинделя станка;  $n$  – число осевых биений за один оборот шпинделя.

Тогда подача для второго лезвия  $S_2(\psi)$ :

$$S_2(\psi) = \frac{S}{2} + \frac{O_S}{2}(\cos(n(\psi + \pi))),$$

где  $\pi$  – угол между лезвиями.

Если подача  $S_1(\psi) < 0$ , то  $S_1(\psi) = 0$ , т.е. первое лезвие не режет, так как второе лезвие уже срезало его припуск. Если же  $S_2(\psi) < 0$ , то  $S_2(\psi) = 0$ , т.е. второе лезвие не режет, так как первое лезвие уже срезало припуск. Таким образом, для инструмента должно выполняться условие:

$$S_1(\psi) + S_2(\psi - \pi) = S.$$

При компьютерном решении предлагаемых уравнений моделей формообразования отверстий двухлезвийными концевыми мерными инструментами необходимо определить радиус-векторы вершин лезвий. Нормируемые параметры точности отверстий (позиционное отклонение, отклонение от перпендикулярности, отклонение от круглости) определяются из числового массива координат точек профиля отверстия, формируемых радиус-

векторами  $\rho_i$  вершин лезвий инструмента в любом продольном и поперечном сечениях. Методика оценки нормируемых параметров точности отверстий при компьютерном моделировании этапа формообразования описана в работе [3].

В соответствии с этой методикой, например, оценку позиционных отклонений оси отверстия производят на стадии врезания режущего инструмента, а за номинальное положение оси принимают наладочное положение оси шпинделя. В этом случае в расчётах используются только площади, срезаемые заборным конусом инструмента, причём, позиционное отклонение вычисляется на последнем повороте при его полном врезании. По физическому смыслу позиционное отклонение определяют начальное смещение оси отверстия. Если разделить оборот (в  $360^\circ$ ) при вращении сверла (число лезвий  $z = 2$ ) на равные углы  $\Delta\psi$ , например, на  $\Delta\psi = 1^\circ$ , то можно определить массив радиус-векторов  $\rho'_i$  отверстия, формируемых каждым лезвием инструмента на последнем обороте при его врезании:

$$\{\rho'_i[\psi - \pi(i-1)], i = \overline{1,2}, \psi = \overline{1^\circ, 360^\circ}\}.$$

Далее учитывая функцию копирования концевых мерных инструментов при обработке, из массива находят наибольшие радиус-вектора  $\rho'_0$  для углов поворота  $0^\circ$  и  $180^\circ$  (по координате  $X$ );  $90^\circ$  и  $270^\circ$  (по координате  $Y$ ) каждого лезвия, т.е., соответственно,  $\rho'_0(0^\circ), \rho'_0(180^\circ), \rho'_0(90^\circ), \rho'_0(270^\circ)$ . Тогда позиционное отклонение  $x_\oplus, y_\oplus$  по координатным осям можно определить следующим образом:

$$\begin{cases} x_\oplus = \frac{\rho'_0(0^\circ) + \rho'_0(180^\circ) - D_u}{2}, \\ y_\oplus = \frac{\rho'_0(90^\circ) + \rho'_0(270^\circ) - D_u}{2}, \end{cases}$$

где  $D_u$  – диаметр инструмента.

Полное позиционное отклонение  $\Delta'_\oplus$  вычисляется по формуле:

$$\Delta'_\oplus = 2\sqrt{x_\oplus^2 + y_\oplus^2}.$$

Разработанные математические модели формообразования для двухлезвийных концевых мерных инструментов позволяют учесть влияние подачи, осевых биений шпинделя, параметров заточки режущих лезвий инструментов, жесткости элементов технологической системы на обеспечение точности отверстий и могут быть использованы, например, в САМ/САРР-системах.

### Библиографический список

1. Пестов, С.П. Особенности моделирования обработки отверстий на станках с ЧПУ / С.П. Пестов // Наука ЮУрГУ: материалы 66-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. 2014. – С. 1483–1486.
2. Пестов, С.П. Система математических моделей формообразования отверстий концевыми мерными инструментами на станках с ЧПУ / С.П. Пестов, О.О. Беляев, П.Г. Мазеин // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. - 2003. – № 4 (21). – С. 83–87.
3. Пестов, С.П. Оценка нормируемых параметров точности отверстий при компьютерном моделировании на этапе формообразования / С.П. Пестов // Информатизация и автоматизация в машиностроении: тематический сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – С. 66–70.