

Ф.В. НОВИКОВ (д-р техн. наук, проф.) fokusnic1@rambler.ru

И.Е. ИВАНОВ (канд. техн. наук)

Харьковский национальный экономический университет, г. Харьков, Украина

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ИХ УМЕНЬШЕНИЯ

Введение

При механической обработке деталей машин постоянно возникают проблемы повышения точности обрабатываемых поверхностей. В особой мере это относится к обработке отверстий в деталях гидроаппаратуры авиационного назначения и других ответственных деталях, изготовленных из труднообрабатываемых материалов. К настоящему времени в научно-технической литературе [1-3] сложилось достаточно полное представление о закономерностях формирования погрешностей обработки отверстий и условиях их устранения. Однако, при исследовании, как правило, используются эмпирические подходы, основанные на результатах экспериментальных исследований. Фактически отсутствуют теоретические решения, позволяющие аналитически увязать погрешности обработки с параметрами режима резания, характеристиками инструмента, жесткостью технологической системы и т.д. Все это ограничивает возможности научно обоснованного выбора оптимальных параметров обработки, обеспечивающих решение задач по одновременному повышению точности и производительности обработки. В связи с этим, представляется важным и актуальным поиск новых технологических решений на основе аналитического представления процесса обработки с учетом основных факторов, определяющих погрешности обработки отверстий. Поэтому в настоящей работе решается задача аналитического описания технологических закономерностей формирования погрешностей обработки и определения условий их уменьшения на примере процесса рассверливания отверстий.

Цель работы – теоретическое обоснование условий уменьшения погрешностей обработки при рассверливании отверстия при обеспечении наименьшего основного времени обработки.

Основное содержание работы

В работе [4] приведено важное теоретическое решение о величине смещения оси обрабатываемого отверстия относительно ее номинального положения Δ (равной величине упругого перемещения в технологической системе, рис. 1) вследствие нарушения условия равновесия радиальных составляющих сил резания, действующих на оба режущих лезвия сверла при рассверливании отверстия:

$$\Delta = \frac{\Delta P_y}{c} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \Delta t \cdot \cos \varphi}{K_{рез} \cdot c}, \quad (1)$$

де ΔP_y – наибольшая разница радиальных составляющих сил резания, действующих на оба лезвия сверла, Н;

$K_{рез} = P_z / P_0$ – коэффициент резания;

$$P_0 = \sqrt{P_y^2 + P_x^2};$$

P_z, P_y, P_x – тангенциальная, радиальная и осевая составляющие силы резания при сверлении, Н;

c – приведенная жесткость технологической системы, Н/м;

σ – условное напряжение резания, Н/м²;

S – подача, м/об;

$\Delta t = t_1 - t_2$ – наибольшая разница глубин резания, приходящихся на оба лезвия сверла, м;

2φ – двойной угол в плане сверла.

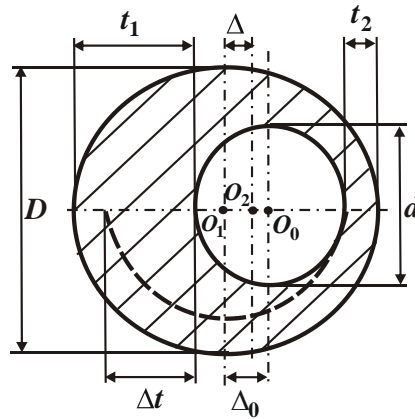


Рис. 1. Расчетная схема величины смещения оси обработанного отверстия относительно ее номинального положения Δ .

Входящая в зависимость разность глубин резания $\Delta t = t_1 - t_2$ определяется с учетом следующих соотношений: $t_1 = 0,5 \cdot (D - d) + \Delta_0$; $t_2 = 0,5 \cdot (D - d) - \Delta_0$, где D – диаметр сверла, м; d – диаметр рассверливаемого отверстия, м; Δ_0 – величина отклонения между осями рассверливаемого отверстия и сверла, м. Тогда $\Delta t = 2 \cdot \Delta_0$.

Как видно величина Δ не зависит от диаметра начального отверстия, а определяется лишь величиной Δ_0 . Если окажется, что величина Δ превышает допустимое значение, то для ее уменьшения можно осуществить повторный проход тем же инструментом с тем же режимом резания. Для выполнения расчетов величину Δ обозначим как Δ_2 . Она, по сути, определяется зависимостью (1) с тем отличием, что вместо значения Δ_0 необходимо рассматривать значение Δ_1 , определяемое по зависимости (1) для первого прохода сверла. Это обусловлено тем, что $\Delta t = t_1 - t_2 = \left(\frac{D}{2} + \Delta_1\right) - \left(\frac{D}{2} - \Delta_1\right) = 2 \cdot \Delta_1$. Тогда

$$\Delta_2 = \frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta_1}{c \cdot K_{рез}} = \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{рез}}\right)^2 \cdot \Delta_0. \quad (2)$$

Поскольку $\left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{рез}}\right) < 1$, то множитель $\left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{рез}}\right)^2$ будет еще меньше. Это приведет к уменьшению величины Δ_2 после второго прохода сверла. При необходимости может быть осуществлен третий проход сверла. В этом случае величина Δ_3 опишется зависимостью (2) с учетом того, что в ней вместо величины Δ_1 необходимо рассматривать величину Δ_2 . В результате получим:

$$\Delta_3 = \frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta_2}{c \cdot K_{рез}} = \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{рез}}\right)^3 \cdot \Delta_0. \quad (3)$$

Очевидно, справедливо неравенство $\Delta_3 < \Delta_2$. Следовательно, в процессе рассверливания отверстия будет иметь место исправление погрешности обработки отверстия по мере увеличения количества проходов сверла. После n -го прохода сверла величина Δ_n опишется:

$$\Delta_n = \frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta_{n-1}}{c \cdot K_{рез}} = \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{рез}} \right)^n \cdot \Delta_0, \quad (4)$$

где Δ_{n-1} – смещение оси обрабатываемого отверстия относительно ее номинального положения после $n-1$ -го прохода сверла, м.

Отношение Δ_0 / Δ_n определяет суммарное уточнение [1]:

$$\varepsilon_{сум} = \frac{\Delta_0}{\Delta_n} = \left(\frac{c \cdot K_{рез}}{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \right)^n. \quad (5)$$

Как видно, по мере увеличения количества проходов сверла n суммарное уточнение $\varepsilon_{сум}$ увеличивается. При этом уточнение на каждом проходе сверла $\varepsilon = \sqrt[n]{\varepsilon_{сум}}$ остается одинаковым, равным

$$\varepsilon = \frac{c \cdot K_{рез}}{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}. \quad (6)$$

Из зависимости (6) следует, что уточнение ε тем больше, чем больше жесткость технологической системы c , угол $\varphi \rightarrow 90^0$ и меньше отношение $\sigma / K_{рез}$ и подача S . По физической сути, зависимости (4) и (5) описывают процесс выхаживания, когда съем металла происходит в результате действия упруго-восстанавливающей силы [5]. Данный процесс затухающий, т.к. интенсивность съема металла уменьшается по мере увеличения количества проходов сверла. В пределе при условии $n \rightarrow \infty$ справедливо условие $\Delta_n \rightarrow \Delta_{n-1}$.

С точки зрения теории резания металлов осуществить съем металла в данных условиях весьма сложно в связи с небольшой толщиной среза. В результате отношение $\sigma / K_{рез}$ будет увеличиваться по мере увеличения количества проходов сверла n , что приведет к преждевременному прекращению съема металла. Чтобы исключить данное явление и обеспечить съем металла, необходимо с каждым последующим проходом сверла увеличивать его диаметр. О необходимости применения сверл разного диаметра указывает также тот факт, что уменьшение величины Δ_n (с увеличением n при обработке сверлом одного диаметра) будет приводить к фактическому увеличению диаметра обрабатываемого отверстия на величину Δ_n . Иными словами, с одной стороны, будет уменьшаться величина Δ_n с увеличением количества проходов сверла n , а с другой стороны, будет увеличиваться диаметр обрабатываемого отверстия на величину Δ_n , что не позволит устранить начальную погрешность обработки. Поэтому, очевидно, устранить погрешность обработки можно на основе применения сверл разных диаметров. В этом случае с каждым проходом сверла будет формироваться новое отверстие со смещением его оси относительно номинального положения на величину Δ_n . С увеличением количества проходов сверла величина $\Delta_n \rightarrow 0$ и таким образом будет обеспечена требуемая точность обрабатываемого отверстия.

В данном случае приведенные выше аналитические зависимости останутся справедливыми, поскольку диаметр сверла не влияет на величину смещения оси обрабатываемого отверстия относительно ее номинального положения.

Из зависимости (4) следует, что величина Δ_n определяется в первую очередь количеством проходов сверла n . В связи с этим определим оптимальное количество проходов сверла n из условия обеспечения наименьшего основного времени обработки τ , которое можно выразить зависимостью: $\tau = n \cdot L / S$, где L – длина обрабатываемого отверстия, м. Подачу S определим из зависимости (5). Тогда

$$\tau = \frac{2 \cdot n \cdot L \cdot \sigma \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{рез}} \cdot \sqrt[n]{\varepsilon_{сум}} = A \cdot n \cdot \sqrt[n]{\varepsilon_{сум}}, \quad (7)$$

где $A = \frac{2 \cdot L \cdot \sigma \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{рез}}$.

В итоге получена аналитическая зависимость для определения основного времени обработки τ . Как видно, количество проходов сверла n неоднозначно влияет на основное время обработки τ , т.е. существует экстремум функции τ от n . Для его определения подчиним функцию τ необходимому условию экстремума: $\tau'_n = 0$. После соответствующих преобразований получено $n = \ln \varepsilon_{сум}$. Таким образом установлено, что экстремальное количество проходов сверла n вполне однозначно определяется суммарным уточнением $\varepsilon_{сум}$: чем оно больше, тем больше n .

Установлено, что вторая производная в точке экстремума функции τ всегда положительна. Поэтому имеет место минимум функции τ . Это указывает на то, что количество проходов сверла n , определяемое зависимостью $n = \ln \varepsilon_{сум}$, является оптимальным, обеспечивающим наименьшее основное время обработки τ_{\min} .

Таблица 1. Расчетные значения суммарного уточнения $\varepsilon_{сум}$

n	1	2	3	4	5	6
$\varepsilon_{сум}$	2,72	7,4	20,1	54,7	148,9	405

В табл. 1 приведены расчетные значения суммарного уточнения $\varepsilon_{сум}$ для различного количества проходов сверла n . Нетрудно видеть, что с увеличением n суммарное уточнение $\varepsilon_{сум}$ изменяется в широких пределах. Следовательно, для обеспечения заданного значения $\varepsilon_{сум}$, даже достаточно большого, например, равного 150, необходимо произвести всего 5 проходов сверла. Для обеспечения значений $\varepsilon_{сум} = 20 \dots 150$, которые могут быть реально реализованы на практике, достаточно произвести 3–4 прохода сверла, что согласуется с известными экспериментальными данными, а также с опытом применения механической обработки.

Представим зависимость $n = \ln \varepsilon_{сум}$ в виде $\varepsilon_{сум} = e^n$. Суммарное уточнение $\varepsilon_{сум}$ выразим зависимостью $\varepsilon_{сум} = \varepsilon^n$. Тогда справедливо условие: $\varepsilon = e$. Следовательно, оптимальное значение уточнения на проходе сверла ε равно числу $e \approx 2,72$. Поэтому достичь наименьшего значения основного времени обработки τ_{\min} можно установлением уточнения на проходе сверла ε , равным числу $e \approx 2,72$. Данное условие можно выполнить на основе установления параметров обработки в соответствии с зависимостью (6), например, путем выбора оптимальной подачи S для заданных значений c , φ и $\sigma / K_{рез}$. Минимальное основное время обработки τ_{\min} определяется:

$$\tau_{\min} = \frac{2 \cdot L \cdot \sigma \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{рез}} \cdot e \cdot \ln \varepsilon_{сум}. \quad (8)$$

В данном случае τ_{\min} зависит от суммарного уточнения $\varepsilon_{сум}$: чем оно больше, тем больше τ_{\min} . Таким образом, получено общее теоретическое решение определения оптимальных условий по уменьшению погрешностей обработки отверстия при рассверливании. Доказано, что существует оптимальное количество проходов сверла n , при котором заданную погрешность обработки

отверстия Δ_n можно достичь за минимальное основное время обработки τ_{\min} . Установлено, что в этом случае уточнение на проходе сверла ε должно быть равно числу $e \approx 2,72$. Это достигается установлением соответствующей подачи S .

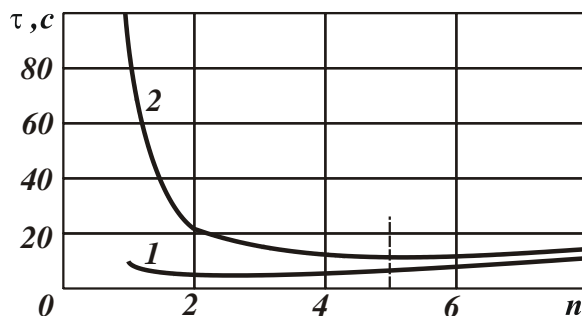


Рис. 2. Зависимость τ_{\min} от n для разных значений $\varepsilon_{\text{сум}}$: 1 – $\varepsilon_{\text{сум}} = 10$; 2 – $\varepsilon_{\text{сум}} = 100$ ($A = 1\text{с}$).

Таблица 2. Расчетные значения основного времени обработки τ для $\varepsilon_{\text{сум}} = 100$ ($A = 1\text{с}$)

n	1	2	3	4	5	6
$\tau, \text{с}$	100,0	20,0	13,95	12,6	12,6	12,9

На рис. 2 приведены рассчитанные по зависимости (7) графики основного времени обработки τ для различного количества проходов сверла n (табл. 2). Как видно, в широких пределах изменения величины n основное время обработки τ , начиная с $n=2$ (для $\varepsilon_{\text{сум}} = 100$) изменяется незначительно. Следовательно, принимая количество проходов сверла n близким к оптимальному значению, можно достичь приблизительно одинакового результата по основному времени обработки τ . Этим, по-видимому, можно объяснить то, что на практике рекомендуется для реализации определенного диапазона изменения количества проходов инструмента n , обеспечивающий требуемую точность обработки с учетом достижения наименьшего основного времени обработки τ .

Выводы

В работе предложено новое теоретическое решение о закономерностях формирования погрешностей обработки при рассверливании отверстия. Доказано, что обеспечить требуемую точность обработки отверстия можно за счет применения многопроходной обработки сверлами разного диаметра, увеличивая на каждом проходе диаметр сверла. Доказано также, что диаметр сверла не влияет на величину смещения оси обрабатываемого отверстия относительно ее номинального положения. Это позволяет выбирать и устанавливать диаметры сверл по разным законам.

В работе определено наименьшее основное время обработки с учетом ограничения по точности обрабатываемого отверстия. Установлено, что оптимальное уточнение на каждом проходе сверла одинаково и равно числу $e \approx 2,72$. Полученные результаты использованы на ряде предприятий при внедрении в производство эффективных технологий обработки отверстий деталей машин.

Библиографический список

1. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов: учебник / С.Н. Корчак, А.А. Кошин, А.Г. Ракович, Б.И. Сеницын; Под общ. ред. С.Н. Корчака. – М.: Машиностроение, 1988. – 352 с.
3. Колев К.С. Точность обработки и режимы резания / К.С. Колев, Л.М. Горчаков. – М.: Машиностроение, 1976. – 144 с.
4. Иванов И.Е. Технологическое обеспечение точности и стабильности изготовления резьбовых отверстий в баллонах в условиях массового производства: автореф. дис. на соискание научн. степени

канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / И.Е. Иванов. – Мариуполь, 2008. – 21 с.

5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т.7. “Точность обработки деталей машин ” – Одесса: ОНПУ, 2004. – 546 с.

Поступила в редколлегию 26.02.2013