

УДК 621.91.01:621.952.8

И. Б. Шендеров, доктор технических наук, Пермский научно-исследовательский технологический институт

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРИ РАСТАЧИВАНИИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ В ИНТЕРАКТИВНОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК

На основе уравнений совместности деформаций элементов системы «СПИД» при растачивании построена математическая модель, позволяющая прогнозировать продольный профиль растачиваемого отверстия в длинномерных заготовках. Организация интерактивного технологического процесса «получение исходного отверстия – измерения – черновое растачивание» с настройкой операции чернового растачивания по результатам измерений является путем существенного и экономичного повышения качества продукции.

Ключевые слова: черновое растачивание, глубокие отверстия, прямолинейность, математическая модель, оптимизация.

Обработка глубоких отверстий (длиной свыше 5 диаметров) является элементом технологии изготовления деталей машин и оборудования различного назначения и достаточно активно исследуется. Известные публикации посвящены совершенствованию методов растачивания [1, 2] и инструмента [3, 4], исследованию процесса резания [5]. В монографии [6] проведен обзор исследований и анализ моделей формообразования, однако удовлетворительные результаты получены только для частных случаев.

В настоящей работе предлагается деформационная модель формообразования при черновом растачивании, в основе которой – учет совместных деформаций системы «СПИД» (станок – приспособление – инструмент – деталь).

Длинномерные заготовки растачивают на станках типа РТ-401 или РТ-2652 для обработки глубоких отверстий по схеме «на сжатие» – прямым ходом стеблевой бабки станка или «на растяжение» – обратным ходом стеблевой бабки. Расточная головка, установленная на борштанге (стебле станка) – однолезвийная, с определенностью базирования. Расточные головки изготавливают с передним (относительно резца и по ходу движения расточной головки) или задним расположением направляющих. В первом случае расточная головка базируется в исходном отверстии заготовки, во втором – в растачиваемом канале, т. е. растачивание производится с обратной связью по результату обработки.

Заготовка взаимодействует с инструментом в двух сечениях: в зоне резания (в сечении расположения вершины резца), где $y(x) = w(x) - u$, и в сечении опоры направляющих; соответствующие уравнения приведены в табл. 1.

В этих уравнениях обозначено: x – осевая координата, измеряемая вдоль оси станка от торца заготовки со стороны сверлильной бабки станка; y , $y(x)$ – отклонение фактической оси расточенного отверстия заготовки от оси станка; w , $w(x)$ – радиальное перемещение инструмента вследствие изгибной деформации борштанги; u – радиальное пере-

мещение инструмента вследствие контактной деформации заготовки в зоне резания; y_0 , $y_0(x)$ – отклонение фактической оси исходного отверстия в заготовке от оси станка при растачивании, причем $y_0(0) = y_0(l) = 0$, что обеспечивается выверкой заготовки по торцам при установке в станке; b – осевое смещение вершины резца относительно направляющих расточной головки; l – длина детали.

К указанным уравнениям добавляются следующие:

а) если разность материалов при растачивании существенно меньше глубины резания, то зависимость радиальной составляющей силы резания от глубины резания можно линеаризовать, в результате чего получится зависимость $u = k(y - y_0)$;

б) для консольно закрепленной борштанги угол поворота сечения и линейное смещение связаны уравнением $\frac{dw}{dx} = 1,5 \frac{w}{L}$ (модель борштанги – балка постоянного сечения, нагруженная поперечной силой).

Здесь обозначено: k – коэффициент, зависящий от геометрии режущей кромки резца расточной головки и средней глубины резания; L – длина рабочей части борштанги, $L = x + a$; a – расстояние от заготовки до кондукторной втулки направляющей стойки расточного станка со стороны стеблевой бабки.

Из приведенных выше уравнений и уравнения совместности деформаций в сечении направляющих (см. табл. 1) получаются уравнения формообразования, сведенные в табл. 1.

В этих формулах учитываются основные составляющие деформации системы «СПИД». Влияние весового прогиба устраняют, устанавливая невращающуюся расточную головку резцом в горизонтальной плоскости. Вибрации инструмента при растачивании демпфируют специальными элементами и устройствами расточной головки.

Погрешности установки и выверки заготовки и инструмента и некоторые менее значимые составляющие деформации в настоящей работе не учитываются, поэтому полученные результаты расчета следует рассматривать как предельно достижимые средние значения характеристик.

Качество растачивания оценивается отклонением оси отверстия от прямолинейности и уводом оси отверстия на выходе инструмента. Сравнение результатов математического моделирования с практическими данными показало не только качественное, но и удовлетворительное количественное совпадение.

Моделирование проводилось для заготовки с реальным продольным профилем исходного отверстия и для практически реализуемых параметров системы «СПИД». Для сопоставимости результатов принималось, что растачивание «на сжатие» и «на

растяжение» начинается от одного и того же торца заготовки.

Отклонение оси от прямолинейности измеряется относительно линии, соединяющей центры торцовых сечений отверстия, что зачастую оправдано [7].

Исходные данные и некоторые результаты расчетов представлены в табл. 2. Растачивание расточной головкой с передними направляющими практически точно воспроизводит продольный профиль исходного отверстия, поэтому соответствующие значения не приводятся.

Таблица 1. Математическая модель глубокого растачивания

| Вид растачивания | Уравнение совместности деформаций в сечении направляющих | Уравнение формообразования | Начальные условия |
|---|--|---|--|
| Расточная головка с передними направляющими | | | |
| На сжатие | $w(x+b) = y_0(x+b)$ | $y = y_0 + \frac{b}{1+k} \left(\frac{dy_0}{dx} - 1,5 \frac{y_0}{L} \right)$ | $y(0) = \frac{b}{1+k} \frac{dy_0}{dx}(0)$ |
| На растяжение | $w(x-b) = y_0(x-b)$ | $y = y_0 - \frac{b}{1+k} \left(\frac{dy_0}{dx} - 1,5 \frac{y_0}{L} \right)$ | $y(l) = -\frac{b}{1+k} \frac{dy_0}{dx}(l)$ |
| Расточная головка с задними направляющими | | | |
| На сжатие | $w(x-b) = y(x-b)$ | $\frac{dy}{dx} - \left(\frac{1,5}{L} + \frac{k}{b} \right) y = \frac{k}{b} y_0$ | $y(0) = 0$ |
| На растяжение | $w(x+b) = y_0(x+b)$ | $\frac{dy}{dx} - \left(\frac{1,5}{L} - \frac{k}{b} \right) y = -\frac{k}{b} y_0$ | $y(l) = 0$ |

Таблица 2. Продольный профиль отверстия, расточенного инструментом с задним расположением направляющих (параметры системы «СПИД»: $k = 0,025$, $b = 10$ мм, $a = 500$ мм), мм

| Координата сечения заготовки | Отклонение оси исходного отверстия от прямолинейности | Схема растачивания | | |
|--------------------------------------|---|----------------------------|---------------|--|
| | | на сжатие | на растяжение | на сжатие |
| | | Выверка заготовки в станке | | на расстоянии 700 мм и 1000 мм от торцов |
| по торцам | | | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 400 | -0,29 | -0,17 | -0,01 | 0,32 |
| 800 | -0,54 | -0,50 | -0,05 | 0,35 |
| 1200 | -0,69 | -0,88 | -0,08 | 0,26 |
| 1600 | -0,81 | -1,26 | -0,12 | 0,12 |
| 2000 | -0,90 | -1,66 | -0,14 | -0,04 |
| 2400 | -0,88 | -2,03 | -0,14 | -0,20 |
| 2800 | -0,84 | -2,36 | -0,12 | -0,33 |
| 3200 | -0,73 | -2,65 | -0,07 | -0,43 |
| 3600 | -0,57 | -2,87 | 0,01 | -0,46 |
| 4000 | -0,48 | -3,04 | 0,12 | -0,46 |
| 4400 | -0,21 | -3,15 | 0,24 | -0,39 |
| 4800 | 0 | -3,17 | 0,28 | -0,23 |
| Отклонение оси от прямолинейности | 0,90 | 0,54 | 0,29 | 0,39 |
| Увод оси на выходе расточной головки | - | 3,17 | 0,28 | 0,23 |

В табл. 3 и 4 показана зависимость точности растачивания от вылета резца и от контактной деформации заготовки под вершиной резца.

Результаты выполненного исследования могут быть положены в основу оптимизации технологических процессов.

Традиционно технологические процессы настраиваются на средние или худшие характеристики исходных заготовок, чтобы обеспечить требуемое качество готовой продукции.

В [8] предложен алгоритм «настройки» технологии растачивания на характеристики конкретной исход-

ной заготовки. С использованием электронно-механических приборов «Визит-1М», «Струна» производства ОАО «ПНИТИ» (г. Пермь) или лазерных приборов «Пика-Н6», «Пика-Н7» производства НПП «Пика» (г. Пермь) измеряют отклонение фактической оси отверстия от прямолинейности и рассчитывают схему установки заготовки в станок. Заготовку при установке в расточном станке выверяют уже не по торцовым сечениям исходного отверстия, а в сечениях, удаленных от торцов на расчетную величину, т. е. в данном случае $y_0(0) \cdot y_0(l) \neq 0$. Для выверки могут применяться приборы типа «Центр-6» (ОАО «ПНИТИ»).

Таблица 3. Зависимость продольного профиля отверстия от вылета резца расточной головки с задними направляющими (параметры системы «СПИД»: $k = 0,025$, $b = (5-15)$ мм, $a = 500$ мм), мм

| b | Схема растачивания | | | |
|----|-----------------------------------|----------|-----------------------------------|----------|
| | На сжатие | | На растяжение | |
| | Отклонение оси от прямолинейности | Увод оси | Отклонение оси от прямолинейности | Увод оси |
| 5 | 0,70 | 4,56 | 0,41 | 1,11 |
| 6 | 0,64 | 4,10 | 0,37 | 0,65 |
| 7 | 0,61 | 3,77 | 0,33 | 0,32 |
| 8 | 0,58 | 3,52 | 0,31 | 0,07 |
| 9 | 0,56 | 3,33 | 0,30 | 0,12 |
| 10 | 0,54 | 3,17 | 0,29 | 0,28 |
| 11 | 0,52 | 3,04 | 0,28 | 0,40 |
| 12 | 0,51 | 2,94 | 0,27 | 0,51 |
| 13 | 0,50 | 2,85 | 0,27 | 0,60 |
| 14 | 0,50 | 2,77 | 0,26 | 0,67 |
| 15 | 0,49 | 2,71 | 0,26 | 0,74 |

Таблица 4. Зависимость продольного профиля отверстия от контактной деформации в зоне резания расточной головкой с задними направляющими (параметры системы «СПИД»: $k = 0,001-0,010$, $b = 10$ мм, $a = 500$ мм), мм

| k | Схема растачивания | | | |
|-------|-----------------------------------|----------|-----------------------------------|----------|
| | На сжатие | | На растяжение | |
| | Отклонение оси от прямолинейности | Увод оси | Отклонение оси от прямолинейности | Увод оси |
| 0,001 | 0,45 | 2,34 | 0,25 | 1,11 |
| 0,002 | 0,51 | 2,89 | 0,27 | 0,56 |
| 0,003 | 0,57 | 3,45 | 0,31 | 0,00 |
| 0,004 | 0,63 | 4,00 | 0,36 | 0,56 |
| 0,005 | 0,70 | 4,56 | 0,41 | 1,11 |
| 0,006 | 0,76 | 5,12 | 0,47 | 1,67 |
| 0,007 | 0,83 | 5,67 | 0,54 | 2,23 |
| 0,008 | 0,89 | 6,23 | 0,60 | 2,78 |
| 0,009 | 0,96 | 6,78 | 0,67 | 3,34 |
| 0,010 | 1,02 | 7,34 | 0,73 | 3,89 |

Некоторые результаты расчета по формулам табл. 1, показывающие возможность и эффективность предложенного технического решения, приведены в табл. 2 и 5. Видно, что оптимизация установки и выверки заготовки в станке приводит к значительному

повышению точности обработки. Например, точность растачивания «на сжатие», а этот вариант технологии легче реализуется и лучше обеспечен режущим инструментом, становится сравнима с результатами растачивания «на растяжение».

Таблица 5. Продольный профиль расточенного отверстия при оптимизации установки заготовки в расточной станке (параметры системы «СПИД»: $k = 0,025$, $b = 10$ мм, $a = 500$ мм), мм

| Расстояние между люнетом 1 и торцом заготовки со стороны начала растачивания | Расстояние между люнетом 2 и торцом заготовки со стороны начала растачивания | | | | | | |
|--|--|-------------|------|------|-------------|------|------|
| | 4100 | 4200 | 4300 | 4400 | 4500 | 4600 | 4800 |
| Растачивание «на сжатие» | | | | | | | |
| Отклонение оси от прямолинейности | | | | | | | |
| 0 | 0,71 | 0,68 | 0,65 | 0,62 | 0,59 | 0,57 | 0,54 |
| 300 | 0,51 | 0,48 | 0,44 | 0,41 | 0,38 | 0,36 | 0,33 |
| 400 | 0,44 | 0,41 | 0,37 | 0,34 | 0,31 | 0,33 | 0,35 |
| 500 | 0,37 | 0,33 | 0,34 | 0,37 | 0,40 | 0,42 | 0,44 |
| 600 | 0,36 | 0,39 | 0,42 | 0,46 | 0,48 | 0,50 | 0,53 |
| Увод оси на выходе расточной головки | | | | | | | |
| 0 | 1,97 | 2,18 | 2,41 | 2,63 | 2,82 | 2,97 | 3,17 |
| 100 | 1,78 | 1,98 | 2,20 | 2,41 | 2,59 | 2,74 | 2,92 |
| 800 | 0,24 | 0,37 | 0,51 | 0,64 | 0,76 | 0,84 | 0,93 |
| 900 | 0,05 | 0,16 | 0,29 | 0,41 | 0,52 | 0,59 | 0,68 |
| 1000 | 0,13 | 0,03 | 0,09 | 0,20 | 0,30 | 0,36 | 0,44 |

Окончание табл. 5

| Расстояние между люнетом 1 и торцом заготовки со стороны начала растачивания | Расстояние между люнетом 2 и торцом заготовки со стороны начала растачивания | | | | | | |
|--|--|------|-------------|------|-------------|------|------|
| | 4100 | 4200 | 4300 | 4400 | 4500 | 4600 | 4800 |
| Растачивание «на растяжение» | | | | | | | |
| Отклонение оси от прямолинейности | | | | | | | |
| 0 | 0,33 | 0,26 | 0,19 | 0,13 | 0,18 | 0,22 | 0,29 |
| 100 | 0,32 | 0,26 | 0,19 | 0,12 | 0,16 | 0,21 | 0,27 |
| 800 | 0,28 | 0,23 | 0,16 | 0,11 | 0,08 | 0,12 | 0,16 |
| 900 | 0,28 | 0,22 | 0,16 | 0,11 | 0,07 | 0,11 | 0,15 |
| 1000 | 0,27 | 0,22 | 0,16 | 0,10 | 0,06 | 0,10 | 0,13 |
| Увод оси на выходе расточной головки | | | | | | | |
| 0 | 0,40 | 0,29 | 0,16 | 0,03 | 0,08 | 0,17 | 0,28 |
| 100 | 0,39 | 0,27 | 0,14 | 0,02 | 0,09 | 0,17 | 0,28 |
| 800 | 0,24 | 0,14 | 0,03 | 0,08 | 0,17 | 0,24 | 0,32 |
| 900 | 0,22 | 0,12 | 0,01 | 0,09 | 0,18 | 0,25 | 0,32 |
| 1000 | 0,20 | 0,11 | 0,00 | 0,11 | 0,19 | 0,26 | 0,32 |

Библиографические ссылки

1. Джунгуриян Т. Г. Технологические основы управления точностью и качеством обработки при прецизионном растачивании : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Харьков : Нац. тех. ун-т «Харк. політех. ін-т», 2001. – 36 с.

2. Серебренникий П. П. Черновое растачивание глубоких отверстий. – URL: <http://www.mirprom.ru/pubs.aspx?id=10686> (дата обращения: 11.11.2011).

3. Обработка глубоких отверстий в машиностроении : справочник / С. В. Кирсанов [и др.]. – М. : Машиностроение, 2010. – 344 с.

4. Инструменты для обработки точных отверстий / С. В. Кирсанов [и др.]. – М. : Машиностроение, 2003. – 330 с.

5. Курган В. П., Панкин А. А. Приближенное исследование автоколебаний в нелинейной модели процесса растачивания // Математическое моделирование и краевые задачи : Тр. Всерос. науч. конф. – Самарский государственный технический университет, 2004. – Вып. 2. – С. 136–139.

6. Обработка глубоких отверстий / Н. Ф. Уткин [и др.] ; под общ. ред. Н. Ф. Уткина. – Л. : Машиностроение, 1988. – 269 с.

7. Шендеров И. Б. Статистически обоснованная оценка прямолинейности оси длинномерных деталей // Вестник машиностроения. – 2005. – № 3. – С. 17–20.

8. Пат. 2008126 РФ. В23 b1/00. Способ глубокого растачивания прецизионных цилиндров / И. Б. Шендеров; опубл. 28.02.94. Бюл. № 4. С. 47–48.

I. B. Shenderov, Doctor of Technical Sciences, Perm Research Technological Institute

Long Boring Quality Management in the Interactive Technology Manufacturing Process of Tubing Stock

A mathematical model based on equations of joint deformities of "Machine tool-Adapter-Tool-Part" system elements at boring is worked out. A model allows predicting the longitudinal profile of the long bore deep openings. "Drilling -Measurements-Draft boring" interactive technology with measurement based rough boring leads to substantial and cost-effective improvement of product quality.

Key words: draft boring, long bore, straightness, mathematical model, optimization.