

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ТОЧНОСТЬ ПРОДОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ОТВЕРСТИЯ ПРИ ЧИСТОВОЙ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ

Татьянченко А.Г.

(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Одним из видов погрешности отверстия при чистовой лезвийной обработке является искажение его продольного профиля, который принимает характерный бочкообразный вид [1,2]. В работах [3-6] было показано, что причиной образования такой формы

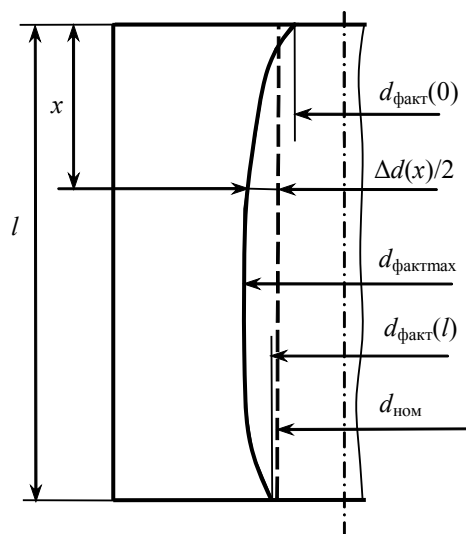


Рис. 1. Структура продольного профиля отверстия

продольного сечения являются термоупругие деформации материала инструмента и детали в окрестностях зоны резания, вызванные тепловыделением и нагревом инструмента и детали от трения контактных поверхностей и резания металла. Поскольку негативное влияние тепловыделения при лезвийной обработке устранить невозможно, для повышения точности отверстия необходимо искать новые нетрадиционные решения, основанные на научно обоснованных методах прогнозирования погрешности продольного сечения отверстия, четких представлениях о причинах и характере образования этой погрешности и влияния на нее различных рабочих процессов.

Для прогнозирования формы и размеров продольного профиля отверстия при чистовой обработке осевым инструментом в работе [6] была предложена комплексная математическая модель формирования продольного профиля отверстия и

$$d_{факт}(x) = d_{ном} \pm k_0 \Delta_1(x) + k_0 \Delta_2(x) - \Delta_3(x) - \Delta_4(x) + k_0 \Delta_5(x), \quad (1)$$

метод определения фактического диаметра $d_{факт}(x)$ отверстия в произвольном поперечном сечении x (рис. 1)

где $\Delta_1(x)$ и $\Delta_2(x)$ – температурные деформации детали и инструмента, $\Delta_3(x)$ и $\Delta_4(x)$ – упругие контактные деформации детали и инструмента по задней поверхности инструмента, $\Delta_5(x)$ – смещение оси инструмента от действия неуравновешенной радиальной силы резания, k_0 – коэффициент, учитывающий условия охлаждения.

Погрешность отверстия в произвольном сечении x при этом составит (рис. 1)

$$\Delta d(x) = \pm k_0 \Delta_1(x) + k_0 \Delta_2(x) - \Delta_3(x) - \Delta_4(x) + k_0 \Delta_5(x). \quad (2)$$

Исходными данными для определения $d_{факт}(x)$ и $\Delta d(x)$ являются физико-механические и тепловые свойства материалов инструмента и детали, параметры геометрической модели детали, параметры геометрической модели инструмента, режимы резания и параметры охлаждения.

Для оценки адекватности прогнозируемой формы продольного профиля отверстия и разработанной математической модели автором были проведены теоретические и

экспериментальные исследования погрешности продольного профиля отверстия при развертывании и зенкерования.

Погрешность продольного профиля отверстия определялась для отверстий в деталях из стали 45 в виде цилиндрической втулки длиной $L = 50$ мм, наружным диаметром $D = 55$ мм, диаметром отверстия $d = 16$ мм. При развертывании использовалась восьмизубая развертка из стали Р6М5 ($z = 8$, $\alpha = 10^\circ$, $\gamma = 8^\circ$, $\varphi = 15^\circ$), при зенкерования – четырехзубый зенкер ($\alpha = 8^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $\varphi = 45^\circ$).

Адекватность математической модели формирования продольного профиля отверстия проверялась численным моделированием и экспериментальными замерами.

Для численного моделирования использовались конечно-элементные тепломеханические и контактные модели детали и инструмента, учитывающие характерные особенности протекания рабочих процессов в зоне резания при обработке отверстий – упруго-пластическое деформирование и отжим поверхности детали по задней поверхности инструмента, вторичный теплообмен в зоне резания, различные условия протекания рабочих процессов в начале, середине и конце отверстия и другие. В качестве исходных данных использовались те же параметры, что для аналитического метода.

При экспериментальных замерах искажения продольного профиля отклонение размеров отверстия определялось по среднему значению четырех замеров в двух взаимно перпендикулярных продольных сечениях (прямой и обратный ход) отверстия через 1 мм по глубине отверстия для каждой группы образцов.

Для всех вариантов режимов резания наблюдалась хорошая сходимость результатов аналитических и экспериментальных исследований. На рис. 2 и 3 приведены диаграммы отклонения продольного профиля отверстия от номинального размера инструмента согласно (2) при развертывании ($S = 0,8$ мм/об, $V = 6,28$ м/мин, $t = 0,2$ мм) и зенкерования ($S = 0,4$ мм/об, $V = 23,28$ м/мин, $t = 0,8$ мм), полученные на основе аналитической математической модели, численного моделирования и определенные в ходе эксперимента. Результаты экспериментальных исследований и конечно-элементного

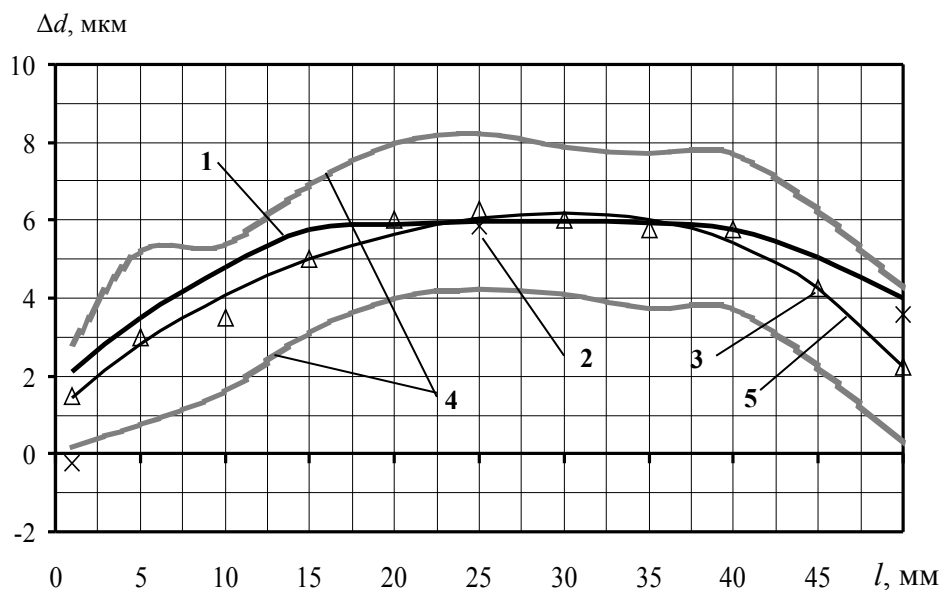


Рис.2. Отклонение размеров поперечного сечения вдоль по глубине отверстия при развертывании отверстия $d = 16$ мм: 1) численный метод, 2) аналитический метод 3) средние экспериментальные данные, 4) доверительный интервал, 5) кривая регрессии

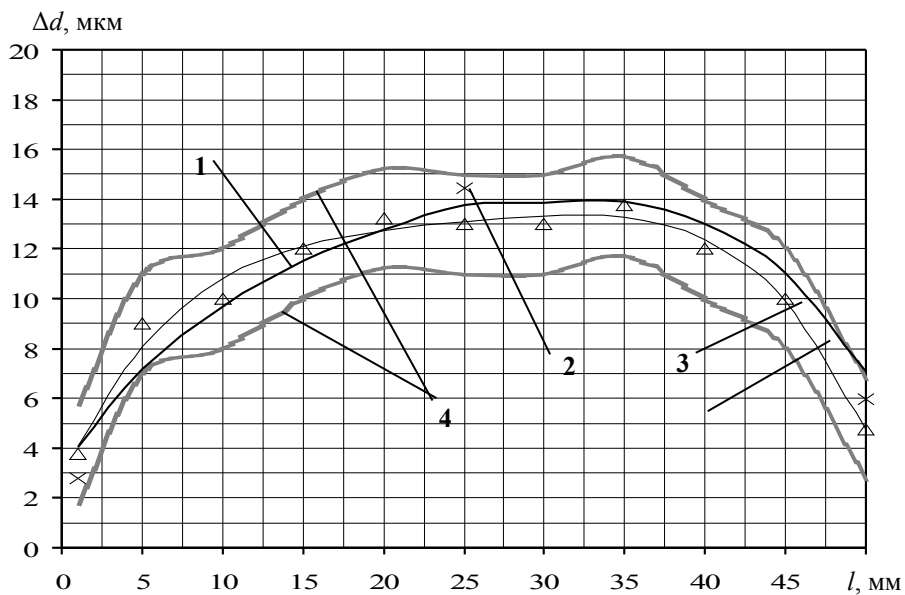


Рис.3. Отклонение размеров поперечного сечения вдоль по глубине отверстия при зенкерении отверстия $d = 15,6$ мм: 1) численный метод, 2) аналитический метод 3) средние экспериментальные данные, 4) доверительный интервал, 5) кривая регрессии моделирования подтвердили адекватность разработанной математической модели тепловых процессов при обработке отверстий.

Наибольшая погрешность наблюдалась для значений, полученных аналитическим способом в начале отверстия. Это связано с особенностями динамики процесса врезания инструмента, не рассмотренными в данной математической модели. Для всех вариантов условий резания для экспериментальных данных также была характерна большая усадка в конце отверстия по сравнению с расчетными данными, что связано с влиянием осевой составляющей силы резания, не учтенной в аналитической модели.

В целом полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанная комплексная математическая модель позволяет с достаточной точностью оценивать и предварительно прогнозировать качественно и количественно форму и размеры продольного профиля отверстия.

Для количественной оценки адекватности математической модели в качестве основных характеристик погрешности продольного профиля были приняты разбивание Δ_p и бочкообразность Δ_b отверстия. Разбивание отверстия Δ_p определялось как максимальная величина отклонения продольного профиля от номинального размера инструмента $\Delta d_{\max}(x)$ (рис.1)

$$\Delta_p = d_{\text{факт max}} - d_{\text{ном}} = \Delta d_{\max}(x), \quad (3)$$

а бочкообразность Δ_b – как величина отклонения продольного профиля отверстия от прямолинейности (рис. 1)

$$\Delta_b = [d_{\text{факт max}} - (d_{\text{факт}}(0) + d_{\text{факт}}(l)) / 2] / 2, \quad (4)$$

где $d_{\text{факт}}(0)$ и $d_{\text{факт}}(l)$ – фактический диаметр в начале и конце отверстия.

Вспомогательными характеристиками погрешности продольного профиля отверстия были приняты бочкообразность продольного профиля в начале

$$\Delta \delta_n = [d_{\text{факт max}} - d_{\text{факт}}(0)]/2 \quad (5)$$

и в конце отверстия (рис. 1)

$$\Delta \delta_k = |d_{\text{факт max}} - d_{\text{факт}}(l)|/2. \quad (6)$$

Сравнение характеристик погрешности продольного профиля отверстия, полученных согласно (3)-(6) аналитически, численным методом и в результате экспериментальных замеров, показало их хорошую сходимость. Расхождение результатов основных характеристик погрешности, полученных на основе аналитической модели и путем экспериментальных замеров, не превышало 8% по разбиванию отверстия и 10% по бочкообразности. В таблицах 1 и 2 приведены характеристики погрешности продольного профиля отверстия при развертывании ($S = 0,8$ мм/об, $V = 6,28$ м/мин, $t = 0,2$ мм) и зенкерования ($S = 0,4$ мм/об, $V = 23,28$ м/мин, $t = 0,8$ мм) для одного из вариантов режимов резания, полученных на основе комплексной математической модели формирования продольного профиля отверстия, численного моделирования на основе конечно-элементных моделей и экспериментальных замеров.

Исследования процесса формирования продольного профиля отверстия, проведенные на основе конечно-элементного моделирования, позволили определить степень влияния различных рабочих процессов на бочкообразность и разбивание отверстия. На рис. 4 и 5 приведены диаграммы формирования продольного профиля отверстия при развертывании ($S = 0,8$ мм/об, $V = 6,28$ м/мин, $t = 0,2$ мм) и зенкерования ($S = 0,4$ мм/об, $V = 23,28$ м/мин, $t = 0,8$ мм) и влияние на него различных компонентов деформаций в зоне резания. Для всех случаев вариантов режимов резания при развертывании и зенкерования было характерно преобладающее влияние температурных деформаций инструмента на бочкообразность в начале отверстия и температурных деформаций детали в

Таблица 1. Погрешность профиля продольного сечения по глубине отверстия $d = 16$ мм и $l = 50$ мм, при развертывании ($V = 6,28$ м/мин, $S = 0,8$ мм/об)

$\Delta \Delta d$, мкм (без охлаждения)	
Анал.	Числ.
Δ_p	5,8285,983
Δ_o	6,250
$\Delta_{он}$	4,1532,7704,375
Δ_k	6,0753,8664,75
$\Delta \Delta d$, мкм (с охлаждением)	
Анал.	Числ.
Δ_p	3,9824,01
Δ_o	04,250
$\Delta_{он}$	2,4951,6502,70
Δ_k	3,6482,3203,45
$\Delta_{ок}$	1,3411,0091,95

Таблица 2. Погрешность профиля продольного сечения по глубине отверстия $d = 16$ мм и $l = 50$ мм, при зенкерования ($V = 23,28$ м/мин, $S = 0,4$ мм/об)

$\Delta \Delta d$, мкм (без охлаждения)	
Анал.	Числ.
Δ_p	14,40313,
Δ_o	87713,25
$\Delta_{он}$	10,0657,859,00
Δ_k	13,6739,8539
$\Delta \Delta d$, мкм (с охлаждением)	
Анал.	Числ.
Δ_p	9,5059,1
Δ_o	059,250
$\Delta_{он}$	6,0384,705,75
Δ_k	8,2095,9127,25
$\Delta_{ок}$	3,8783,4884,25

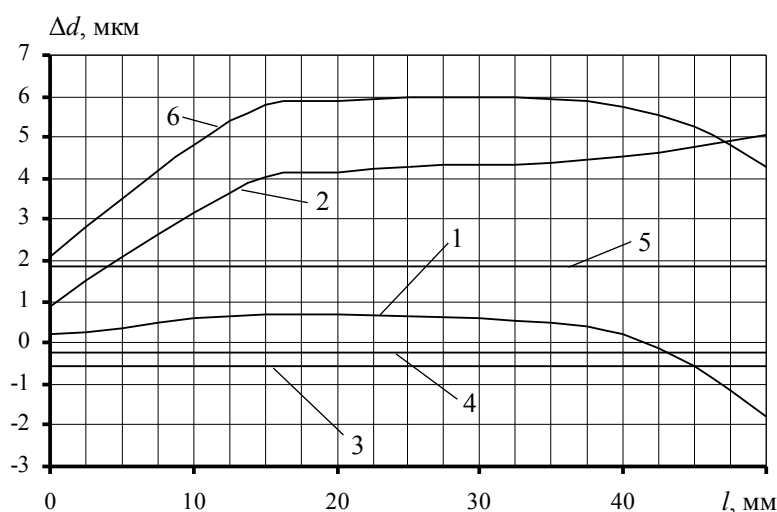


Рис.4. Формирование продольного профиля отверстия (6) при развертывании за счет: 1) упругих деформаций детали, 2) упругих деформаций инструмента, 3) увода оси инструмента, 4) температурных деформаций детали, 5) температурных деформаций инструмента

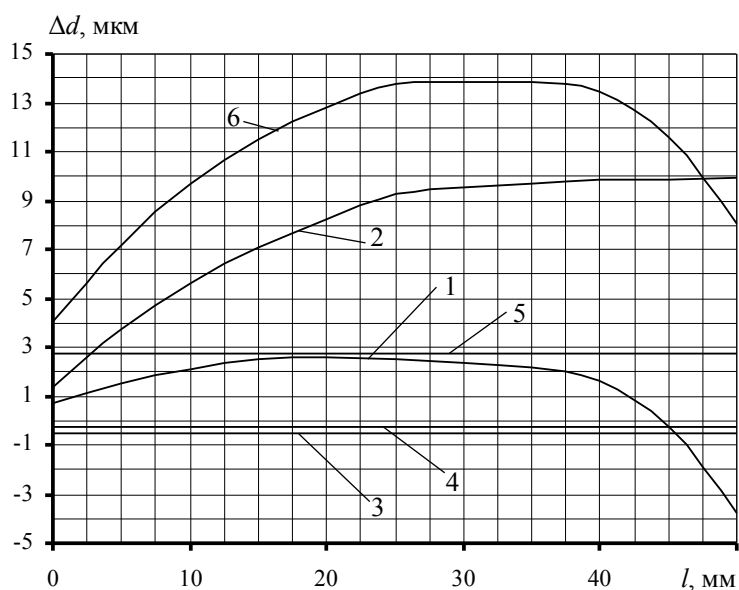


Рис.5. Формирование продольного профиля отверстия (6) при зенкеровании за счет: 1) упругих деформаций детали, 2) упругих деформаций инструмента, 3) увода оси инструмента, 4) температурных деформаций детали, 5) температурных деформаций инструмента

конце отверстия. На разбивание отверстия преимущественное влияние оказывают температурные деформации инструмента. В меньшей степени разбиванию отверстия способствует увод оси инструмента. Упругие контактные деформации инструмента и детали по задней поверхности инструмента способствуют усадке отверстия. Температурные деформации детали могут способствовать как разбиванию отверстия, так и его усадке.

Разработанная комплексная математическая модель и конечно-элементная модель формирования продольного профиля отверстия позволяют не только прогнозировать погрешность продольного профиля отверстия, но и определить перспективные

направления её устранения. Эти модели учитывают сложные нелинейные функциональные зависимости между различными группами объективных факторов и точностью отверстия. Большая часть этих факторов, такие как механические и теплофизические свойства материалов инструмента и детали, параметры износа и другие являются неуправляемыми и их влияние можно лишь учитывать на основе разработанных выше математических моделей образования продольного профиля отверстия. Часть факторов, такие как геометрия инструмента и глубина резания, являются условно управляемыми, поскольку их величину невозможно изменить непосредственно в процессе обработки отверстия. Поэтому за счет их варьирования можно уменьшить разбивание, но невозможно устранить бочкообразность продольного профиля отверстия. Анализ технических возможностей современных станков с ЧПУ позволяет утверждать, что единственными параметрами, величиной которых можно управлять в процессе обработки отверстий являются скорость резания и подача. Поэтому при разработке методов устранения бочкообразной формы продольного профиля отверстия можно использовать известные объективные данные о влиянии скорости резания на характер протекания различных рабочих процессов, например, на развитие термоупругих деформаций инструмента и детали, на характер наростообразования по передней поверхности инструмента и другие.

Проведенные комплексные исследования точности продольного профиля отверстия при чистовой лезвийной обработке подтвердили адекватность комплексной математической модели формирования продольного профиля отверстия при чистовой лезвийной обработке. Они позволили определить особенности влияния рабочих процессов на характеристики погрешности продольного профиля и установить основные регулируемые параметры, позволяющие управлять величиной погрешности в начале, конце и середине отверстия.

В результате проведенных исследований также были определены направления совершенствования аналитической и конечно-элементной модели формирования продольного профиля при чистовой обработке отверстий осевым инструментом. Это, прежде всего, учет осевой составляющей силы резания, оказывающей вдавливающее воздействие на материал детали в начале отверстия и выталкивающее – в конце отверстия. Также необходимо учесть динамическую разбивку в начале отверстия при неустановившемся режиме врезания инструмента.

Список литературы: 1. Резников А.Н., Яценко Л.Е. Термоупругие деформации изделия и инструмента в процессе развертывания / Теплофизика технологических процессов. Межвед. науч. сб. – Вып.1. – Саратов: Изд. Саратовского университета, 1973. – С. 24-35. 2. Якимов О.В., Усов А.В., Слободяник П.Т., Юргачов Д.В. Теплофізика механічної обробки. – Одеса: Астропринт, 2000. – 256 с. 3. Татьяначенко А.Г. Погрешность профиля продольного сечения отверстия за счет температурных деформаций детали и инструмента // Проблемы создания новых машин и технологий. Науч. тр. КГПУ. Вып. 1 (10). – Кременчуг, 2001. – С. 401-404. 4. Малышко И.А., Татьяначенко А.Г. Температурные деформации детали при обработке отверстий // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Международный сборник научных трудов. Вып.17. – Донецк, 2001. – С. 45-51. 5. Татьяначенко А.Г., Малышко И.А. Прогнозирование точности обработки отверстий по температурным деформациям детали в зоне резания // Вісник двигунобудування. Научно-технический журнал. – Запорожье: ОАО „Мотор-Січ”, 2004. – №3. – С. 80-85. 6. Малышко И.А., Татьяначенко А.Г. Прогнозирование формы и размеров продольного профиля отверстия при обработке осевым инструментом // Надійність інструменту та

оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. Вип.17. – Краматорськ: ДДМА, 2005. – С. 30–37.

ВПЛИВ ТЕРМОПРУЖНИХ ДЕФОРМАЦІЙ НА ТОЧНІСТЬ ПОЗДОВЖНЬОГО
ПРОФІЛЮ ОТВОРУ ПРИ ЧИСТОВІЙ ЛЕЗОВІЙ ОБРОБЦІ

Татьянченко О.Г.

Досліджено вплив робочих процесів та різних компонентів деформації в зоні різання на похибку поздовжнього профілю отвору і визначені перспективні напрямки її усунення при чистовій лезовій обробці. Перевірена адекватність математичної моделі формування поздовжнього профілю отвору і визначені головні шляхи її удосконалення.

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ТОЧНОСТЬ ПРОДОЛЬНОГО
ПРОФИЛЯ ОТВЕРСТИЯ ПРИ ЧИСТОВОЙ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКЕ

Татьянченко А.Г.

Исследовано влияние рабочих процессов и различных компонентов деформации в зоне резания на погрешность продольного профиля отверстия и определены перспективные направления ее устранения при чистовой лезвийной обработке. Проверена адекватность математической модели формирования продольного профиля отверстия и определены основные пути ее совершенствования.

INFLUENCE THERMOELASTIC DEFORMATIONS ON ACCURACY
OF THE LONGITUDINAL STRUCTURE OF THE HOLE PROCESSING

Tatyanchenko A.G.

Influence of working processes and various components of deformation in a zone of cutting on an error of a longitudinal structure of hole is investigated and perspective directions of its elimination are determined at hole processing. Adequacy of mathematical model of formation of a longitudinal structure of hole is checked up and the basic ways of its perfection are determined.

Рецензент: д.т.н., проф. Малышко И.А.