

АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ ОБРОБКИ ЧИСТОВИМ І ТОНКИМ ТОЧІННЯМ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК ЗОВНІШНІХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ДОВГИХ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ ТИПУ «СТУПІНЧАСТИЙ ВАЛ»

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Проаналізовано технологічні фактори, які впливають на точність обробки чистовим і тонким точінням на прикладі обробки заготовки деталі типу «Ступінчастий вал» на токарному верстаті з ЧПК високої точності. Це дозволило виявити й проаналізувати рівень впливу елементарних похибок на точність розмірів, знайти сумарну похибку обробки і коефіцієнт уточнення.

Ключові слова: токарний верстат з ЧПК, механічна обробка, чистове точіння, тонке точіння, точність, сумарна похибка обробки, елементарні похибки обробки, коефіцієнт уточнення

Abstract The technological factors that affect the accuracy of finishing and fine turning are analyzed on the example of processing a workpiece of the "Stepped shaft" type on a high-precision CNC lathe. This made it possible to identify and analyze the level of influence of elementary errors on the accuracy of dimensions, to find the total processing error and the refinement factor.

Keywords: CNC lathe, machining, finishing, fine turning, accuracy, total machining error, elementary machining errors, refinement factor

Вступ

Важливою перевагою лезової обробки на верстатах з ЧПК (у т. ч. — токарних) є можливість здійснювати як попередню, так і фінішну обробку багатьох як циліндричних, так і плоских поверхонь (торців) на одній операції з одного установа. Це дозволяє суттєво підвищити точність відносного розташування цих поверхонь завдяки усуненню впливу похибки установа. Тому певний практичний інтерес складає встановлення показників точності, що забезпечуються чистовою і фінішною лезовою обробкою на сучасних токарних верстатах з ЧПК високої точності. Дослідження виконувались на прикладі виготовлення деталі «Шток ГЦ 05.017.002». Слід зазначити, деталь має достатньо велику довжину й відносно невеликий діаметр стрижня.

Отже, метою дослідження є виявлення рівня впливу елементарних похибок на сумарну похибку обробки довгих заготовок деталей типу «Ступінчастий вал» чистовим і тонким точінням на токарних верстатах з ЧПК високої точності, а також визначення коефіцієнта уточнення, що забезпечуються у процесі такої обробки.

Результати дослідження

Дослідження виконано на прикладі технологічного процесу виготовлення деталі типу «Шток ГЦ 05.017.002» в умовах серійного виробництва. Ескіз обробки показано на рис. 1.

Матеріал деталі – Сталь 40Х з твердістю після поліпшення 240...260 НВ.

Прийнято, що обробка здійснюється за таких технологічних умов: операція виконується на токарному верстаті з ЧПК моделі МК6801Ф3 (клас точності – В); тонке точіння здійснюється після чистового точіння; чистове точіння забезпечує діаметральний розмір поверхні за ІТ9 (для прийнятого номінального розміру величина допуску складає 62 мкм); тонке точіння виконується після чистового точіння з одного установа; тонке точіння має забезпечити розмір обробленої поверхні $\varnothing 40h7_{(-0,025)}$ мм; партія заготовок (160 шт.) обробляється за автоматичного отримання розмірів на настроєному верстаті; матеріали різальної

частини різців такі: чистове точіння – твердий сплав Т60К6, тонке точіння – оксидно-карбідна мінерало-кераміка ВОК-60.

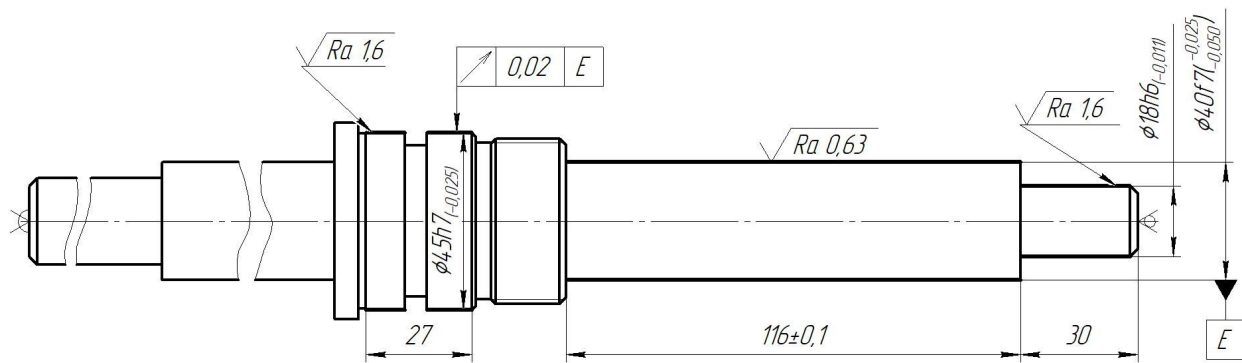


Рис. 1. Ескіз обробки

Сумарну похибку обробки (поле розсіювання розмірів) у т. ч. діаметральних розмірів зовнішніх циліндричних поверхонь, що отримуються в результаті обробки на токарних верстатах з ЧПК згідно з [1] можна визначити за формулою

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{2}{K} \sqrt{(K_2 \varepsilon_{\text{пд}})^2 + (K_3 \varepsilon_{\text{поз.}})^2 + (K_4 \varepsilon_{\text{п.р.г.}})^2 + (K_5 \varepsilon_{\text{н}})^2 + (K_6 \varepsilon_{\text{і}})^2 + (K_7 \varepsilon_{\text{в}})^2 + (K_8 \varepsilon_{\text{т}})^2}, \quad (1)$$

де $\varepsilon_{\text{пд}}$ — похибка, що спричиняється пружними деформаціями технологічної системи; $\varepsilon_{\text{поз.}}$ — похибка позиціонування поперечного супорта; $\varepsilon_{\text{п.р.г.}}$ — похибка, що зумовлена неточністю повороту револьверної головки; $\varepsilon_{\text{н}}$ — похибка настроювання інструмента (різця) на розмір обробки; $\varepsilon_{\text{і}}$ — похибка, зумовлена розмірним зносом різця; $\varepsilon_{\text{в}}$ — похибка, що зумовлена геометричною неточністю верстата; $\varepsilon_{\text{т}}$ — похибка, що зумовлена тепловими деформаціями технологічної системи; $1/K$ — коефіцієнт, що залежить від бажаної гарантованої імовірності роботи без браку; $K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7$ — коефіцієнти, значення яких визначаються характером законів розподілу відповідних елементарних похибок.

Прийнято, що $1/K = 1$. Це відповідає гарантованій імовірності 0,9973 роботи без браку. Прийнято також, що похибки $\varepsilon_{\text{пд}}, \varepsilon_{\text{поз.}}, \varepsilon_{\text{п.р.г.}}, \varepsilon_{\text{н}}$ є випадковими похибками, і тому $K_2 = K_3 = K_4 = K_5 = 1$, а похибки $\varepsilon_{\text{і}}, \varepsilon_{\text{в}}, \varepsilon_{\text{т}}$ — систематичними і тому $K_6 = K_7 = K_8 = 1,73$.

Якщо визначити похибку обробки для певного переходу (наприклад, під час тонкого точіння) і знайти похибку обробки, що виникає на чистовому точінні, то можна для заданих технологічних умов визначити коефіцієнт уточнення за формулою [2, 5]

$$K_y = \varepsilon_{\Sigma_{\text{ч.т.}}} / \varepsilon_{\Sigma_{\text{т.т.}}}, \quad (2)$$

де ε — сумарні похибки, що виникають під час відповідно чистового і тонкого точіння;

Визначимо величини елементарних похибок, що впливатимуть на точність обробки в процесі завершального переходу — тонкого точіння.

Похибку обробки від пружних деформаціями елементів технологічної системи визначалась за формулою [3]

$$\varepsilon_{\text{пд}} = \omega_{\Sigma} (P_{y_{\text{max}}} - P_{y_{\text{min}}}), \quad (3)$$

де ω_{Σ} — сумарна податливість технологічної системи, яка враховує податливості верстата, верстатного пристрою, інструмента і заготовки; $P_{y_{\max}}$ і $P_{y_{\min}}$ — максимальна і мінімальна величини складової сили різання.

Заготовка на операції, що розглядається, встановлюється в на центрах передньої і задньої бабок (рис. 2). За такої схеми установа на величину ω_{Σ} впливають усі елементи технологічної системи. Для такого випадку згідно з [4] величина ω_{Σ} визначається за формулою

$$\omega_{\Sigma} = \frac{x^2(l_d - x)^2}{3EI l_d} + \left(1 - \frac{x}{l_d}\right)^2 \omega_{п.б} + \left(\frac{x}{l_d}\right)^2 \omega_{з.б} + \omega_{суп}, \quad (4)$$

де $\omega_{п.б}$, $\omega_{з.б}$, $\omega_{суп}$ — відповідно, податливості передньої бабки, задньої бабки і супорта, мм/Н; l_d — довжина заготовки, мм; x — відстань від лівого торця заготовки до границі зони обробки, мм; E — модуль пружності матеріалу заготовки I — момент інерції перерізу заготовки, мм⁴

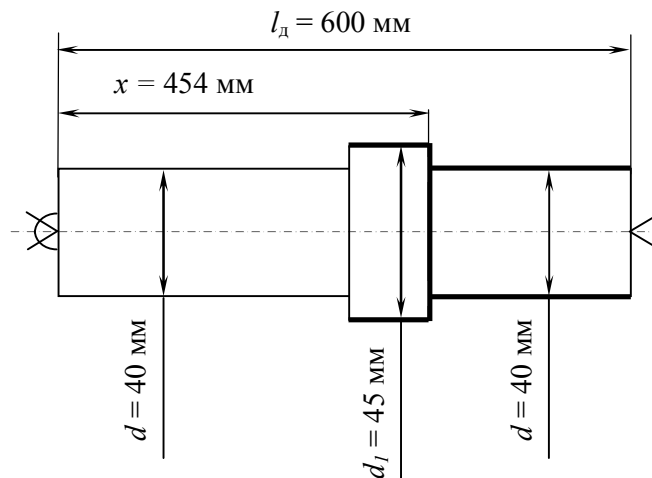


Рис. 2 — Розрахункова схема для визначення ω_{Σ}

В результаті розрахунку за формулою (4) отримано визначимо величину $\omega_{\Sigma} = \text{мкм/Н}$.

На зміну величини P_y впливатиме коливання припуску на чистове точіння. Вважалося, що на цьому переході $t_{\min} = 0,15$ мм, $t_{\max} = 0,20$ мм. Для прийнятих технологічних умов з використанням відомої формули отримано: $P_{y_{\max}} = 70$ Н; $P_{y_{\min}} = 58$ Н. Визначена за формулою (2) величина $\varepsilon_{пд}$ склала 11 мкм.

Згідно з [1] вважалося, що для виконання попереднього (чистового) точіння різець на виконуваний розмір не настроюється, а переміщується у початкову точку відповідно до команди від керувальної програми. Тому прийнято, що для переходу чистового точіння можна визначити певну комплексну похибку, яка враховує як похибку позиціонування $\varepsilon_{поз}$, так і похибку вимірювання $\varepsilon_{вм}$ за формулою

$$\varepsilon_K = K \sqrt{\varepsilon_{поз}^2 + \left(\frac{\varepsilon_{вм}}{2}\right)^2}, \quad (5)$$

Похибка позиціонування $\varepsilon_{поз}$ поперечного супорта згідно з паспортними даними верстата МК6801Ф3 становить 0,003 мм. $K=1,2$ — коефіцієнт, який враховує відхилення законів розподілу похибок, які входять до формули (5) від нормального закону. Вважалося також, що похибка вимірю-

вання складає 10 мкм (вимірювання обробленої поверхні здійснюється за допомогою мікрометра з ціною поділки 0,01 мм). Тоді похибка ε_k складе 8 мкм

Визначимо похибку ε_{i1} , що виникає через розмірний знос різця в процесі обробки однієї заготовки за формулою [1]

$$\varepsilon_{i1} = \frac{L_1 u_0}{1000}, \quad (6)$$

де $L_1 = 123$ м — довжина шляху, який проходить вершина різця під час обробки однієї заготовки; $u_0 = 2$ мкм/км — відносний знос різця, оснащеного пластиною з твердого сплаву Т60К6.

Вважалось, що система ЧПК верстата виконуватиме автоматичну корекцію вершини різця після обробки $N = 50$ заготовок, тобто після обробки третини заготовок партії. За такої умови похибка, що виникає через розмірний знос складе 12 мкм.

Визначимо похибку, що зумовлена геометричною неточністю верстата (ε_B). На переході, що розглядається, ця похибка виникатиме через відхилення від паралельності осі обертання заготовки відносно напрямку руху поздовжнього супорта.

Згідно з [1],

$$\varepsilon_B = \frac{CL}{L_0}, \quad (7)$$

де C — допустиме відхилення від паралельності між напрямком руху поздовжнього супорта і віссю обертання заготовки на базовій довжині L_0 ; L — довжина оброблюваної поверхні.

Відповідно до прийнятих норм точності для токарних верстатів класу точності В на базовій довжині 250 мм величина C складає 3 мкм. Отже, вирахована за формулою (5) величина ε_B склала 2 мкм

Згідно з [1], похибка, що зумовлена температурними деформаціями технологічної системи ε_T , складає близько 10 — 15% від суми інших похибок. З урахуванням цього встановлено, що ε_T 3 мкм.

Розрахована за формулою (1) сумарна похибка обробки партії заготовок під час чистового точіння склала 59 мкм. За результатами розрахунків побудована діаграма величин елементарних і сумарної похибки. На цій діаграмі показано вплив елементарних похибок у радіальному вимірі, а сумарної похибки — в діаметральному.

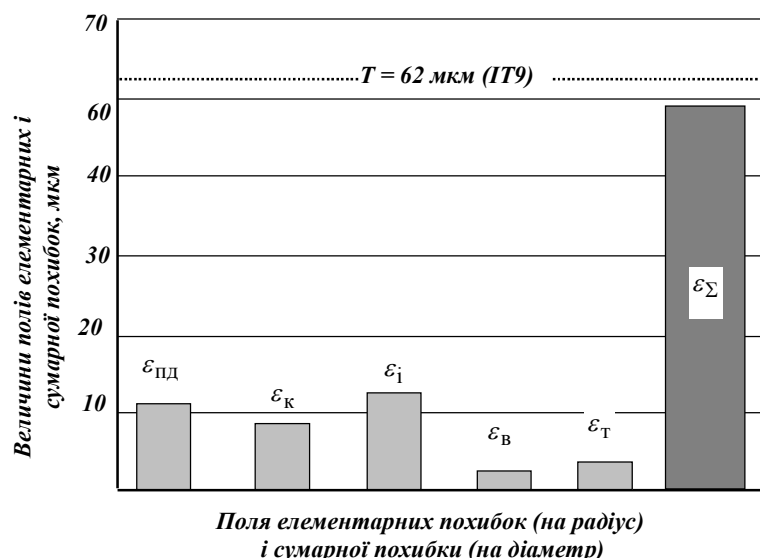


Рис. 3 — Поля елементарних похибок і сумарної похибки, що виникають в процесі чистового точіння поверхні до розміру $\varnothing 40h9_{(-0,062)}$ мм

З порівняльного аналізу елементарних похибок випливає, що найсуттєвіший вплив на точність обробки чистовим точінням чинить похибка, що спричиняється розмірним зносом різця ε_{i_1} . За необхідності вплив цієї похибки суттєво зменшити завдяки виконанню корекції вершини інструмента (різця) через меншу кількість оброблених заготовок, наприклад, через 25 шт. У цьому випадку величина цієї похибки складатиме 6 мкм. Через відносно невелику жорсткість оброблюваної заготовки значної довжини помітний вплив на точність обробки має і похибка $\varepsilon_{\text{пд}}$. Разом з тим, навіть за прийнятих технологічних умов, сумарна похибка (59 мкм) не перевищує допуск розміру поверхні (62 мкм).

Визначимо величини елементарних похибок, що впливають на точність обробки в процесі тонкого точіння поверхні $\varnothing 40$ мм. В результаті виготовлення партії деталей має забезпечуватись розмір $\varnothing 40h7_{(-0,025)}$ мм.

Похибки $\varepsilon_{\text{пд}}$, $\varepsilon_{\text{в}}$ і $\varepsilon_{\text{т}}$ визначались з використанням вищеописаних підходів. Ці похибки склали: $\varepsilon_{\text{пд}} = 6$ мкм, $\varepsilon_{\text{в}} = 2$ мкм і $\varepsilon_{\text{т}} = 2$ мкм.

Прийнято, що настроювання різця на розмір обробки (тонкого точіння) виконується з використанням способу пробних заготовок, тому похибка настроєння $\varepsilon_{\text{н}}$ визначалась за формулою [2]

$$\varepsilon_{\text{н}} = 1,2 \sqrt{\varepsilon_{\text{р}}^2 + \left(\frac{\varepsilon_{\text{вм}}}{2}\right)^2} + \varepsilon_{\text{зм}}^2, \quad (8)$$

де $\varepsilon_{\text{р}}$ — похибка регулювання положення різця; $\varepsilon_{\text{зм}} = 3$ мкм — похибка, яка враховує зміщення центра групування розмірів пробних заготовок відносно середини поля розсіювання.

Вважалось, що вимірювання пробних заготовок здійснюватиметься за допомогою важільної скоби (пасаметра) з ціною поділки 0,001 мм, і тому похибка вимірювання $\varepsilon_{\text{вм}} = 1$ мкм. Тоді похибка настроєння, розрахована за формулою (8), складе 5 мкм.

Похибка ε_{i_1} , що виникає через розмірний знос різця в процесі тонкого точіння однієї заготовки, визначалась за формулою (6). Вважалось, що величина подачі складає 0,07 мм/об. Визначена за таких умов похибка ε_{i_1} склала 0,2 мкм.

Прийнято, що система ЧПК верстата повинна виконувати автоматичну корекцію вершини різця після обробки $N = 15$ заготовок. За такої умови похибка, що виникає через розмірний знос складе 15 мкм.

Сумарна похибка обробки, що впливатиме на точність обробки в процесі тонкого точіння, визначена за формулою (1), склала 21 мкм. Визначений за формулою (1) коефіцієнт уточнення склав 2,8.

На рис. 4 показано діаграму отриманих величин елементарних похибок і сумарної похибки.

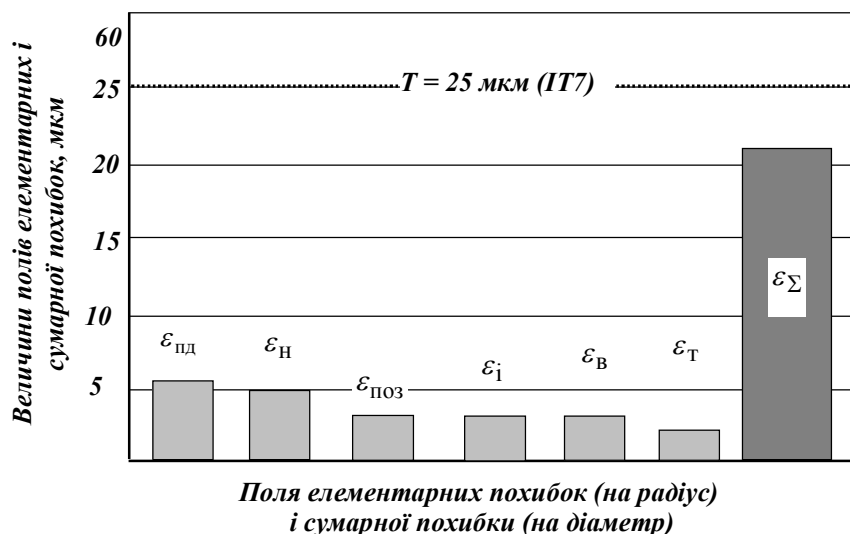


Рис. 4. Поля елементарних похибок і сумарної похибки, що виникають в процесі тонкого точіння поверхні до розміру $\varnothing 40h7_{(-0,025)}$ мм

Висновки

1. На прикладі чистового і тонкого точіння точної зовнішньої циліндричної поверхні довгої заготовки деталі типу «Ступінчастий вал», виконано порівняльний аналіз з кількісним визначенням елементарних похибок, сумарних похибок і коефіцієнта уточнення.
2. Аналіз величин елементарних похибок показав, що найсуттєвіший вплив на точність обробки як чистовим, так і тонким точінням за прийнятих технологічних умов має похибка, що спричиняється податливістю заготовки через її значну довжину. Зі збільшенням довжини заготовки ця похибка може спричинити неможливість забезпечення точності її діаметральних розмірів і точності форми циліндричних поверхонь. Для зменшення впливу цієї похибки як під час фінішної обробки можна порекомендувати використання люнету, розташування якого в осьовому напрямі керує система ЧПК верстата. Такі можливості має, наприклад, верстат моделі В1200У, що виготовляється фірмою «Biglia» (Італія).
3. Встановлено, що під час точіння зовнішніх циліндричних поверхонь значної довжини, похибка, що зумовлена розмірним зносом різця, в процесі обробки партії заготовок з автоматичним отриманням розмірів на настроєному верстаті може помітно впливати на точність діаметральних розмірів, але, за необхідністю, ця похибка може компенсуватися використанням автоматичної корекції положення вершини різця.
4. Отриманий коефіцієнт уточнення для тонкого точіння (2,8) навіть дещо перевищує загальноприйнятий [4].
5. Аналіз показників точності, що забезпечуються тонким точінням на токарному верстаті з ЧПК високої точності, показує, що за розглянутих технологічних умов на переході остаточної обробки (тонкого точіння) може забезпечуватись 7 квалітет точності.
6. Отримані результати можуть бути корисними в практиці машинобудування і у навчальному процесі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дерібо О.В. Технології для верстатів з числовим програмним керуванням: електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання / Дерібо О.В., Лозінський Д.О., Сердюк О.В. — Вінниця : ВНТУ, 2023. — 116 с. Електронний ресурс: https://iq.vntu.edu.ua/method/getfile.php?fname=5927.pdf&card_id=1949&id=5927
2. Дерібо О. В. Основи технології машинобудування. Частина 1 : навчальний посібник / О. В. Дерібо — Вінниця : ВНТУ, 2013. — 125 с.
3. Дерібо О. В. Основи технології машинобудування. Частина 1: практикум / О. В. Дерібо, Ж. П. Дусанюк, С. В. Репінський — Вінниця: ВНТУ, 2017. — 106 с.
4. Руденко П. О. Проектування технологічних процесів у машинобудуванні / П. О. Руденко. — К. : Вища школа, 1993. — 414 с.

Шамрай Владислав Сергійович – студент групи ІПМ-22м, факультет машинобудування та транспорту, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, email: 1pm.17b.shamray@gmail.com.

Таранік Артём Вікторович – студент групи ІПМ-22м, факультет машинобудування та транспорту, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, archipro12@gmail.com.

Дерібо Олександр Володимирович – к. т. н., доцент, професор кафедри технологій та автоматизації машинобудування. Вінницький національний технічний університет, Вінниця, email: deriboov@ukr.net.

Shamrai Vladyslav S. – Student of Department of Mechanical Engineering and Transport. Vinnytsia National Technical University. Vinnytsia, email: 1pm.17b.shamray@gmail.com.

Taranik Artom V. – Student of the Faculty of Mechanical Engineering and Transport, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: archipro12@gmail.com.

Deribo Oleksandr V. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Chair of Mechanical Engineering Technologies and Automation. Vinnytsia National Technical University. Vinnytsia, email: deriboov@ukr.net;