

4. Kistler, A.L. The fluctuating pressure field in a supersonic turbulent boundary layer [Текст]/ A.L. Kistler, W.S. Chen// Jet Propulsion Laboratory Technical Report, № 32, 1962. – 277 p.
5. Parks, P.C. A "Random" Siren Using Cycle Chain Codes [Текст]/ P.C. Parks, C.A. Mercer// Reports 5 Congres International D'Acoustique, 1965, vol. 54. – P. 1072-1076.
6. Allen, C.H., A powerful high frequency siren [Текст]/ C.H. Allen, J.A. Rudneck // JASA. 1947. - 19, № 5. – P. 874 – 879.
7. Карачун, В.В. Некоторые вопросы расчета сирен [Текст]/ В.В. Карачун // Пробл. прочности. - 1990. - № 6. – С. 123 – 124.
8. Карачун, В.В. Волновые задачи поплавокowego гироскопа [Текст]/ В.В. Карачун, Я.Ф. Каюк, В.Н. Мельник. – К.: «Корнейчук». – 2007. – 228 с., ил.
9. Патент 32273А Україна, G10K7/02. Спосіб збудження звукових коливань за допомогою динамічної сирени [Текст]/ В.В. Карачун, М.С. Тривайло, О.В. Петрик, Н.В. Гнатейко. – 99020598. – Заявл. 02.02.99.; опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7-11. – 1 с.
10. Патент 33211А Україна, G10K7/02. Динамічна сирена [Текст]/ В.В. Карачун, М.С. Тривайло, О.В. Петрик, Н.В. Гнатейко. – 99010272; - Заявл. 19.01.1999; опубл. 15.02.2001. – Бюл. № 1. – 1 с.

Експериментально доведено, що при вимірюваннях нежорстких деталей контактним методом внаслідок сили взаємодії вимірювального щупа з деталлю виникає похибка вимірювань, яка є детермінованою і визначається деформацією технологічної системи під дією цієї сили. Запропоновано алгоритм корекції з використанням залежностей, який дає змогу усунути похибку вимірювань при обробленні даних за допомогою розробленої методики

Ключові слова: точність, шліфування, нежорсткі деталі, криволінійна утворююча, похибка вимірювання

Експериментально доказано, что при измерении нежестких деталей контактным методом вследствие силы взаимодействия измерительного щупа с деталью возникает погрешность измерения, которая является детерминированной и определяется деформацией технологической системы под действием этой силы. Предложен алгоритм коррекции с использованием зависимостей, который дает возможность устранить погрешность измерения при обработке данных с помощью разработанной методики

Ключевые слова: точность, шлифование, нежесткие детали, криволинейная образующая, погрешность измерения

УДК 621.924:753

ВИМІРЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ШЛІФУВАННЯ НЕЖОРСТКИХ ДЕТАЛЕЙ З КРИВОЛІНІЙНОЮ УТВОРЮЮЧОЮ

Ю. В. Петраков

Доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри*

E-mail: yp-86@yandex.ru

К. М. Паньків

Кандидат технічних наук, асистент*

E-mail: kmp7@i.ua

С. М. Чамата

Аспірант*

*Кафедра технології машинобудування
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

E-mail: chamatik@ukr.net

1. Вступ

В багатьох сучасних агрегатах, машинах і механізмах використовують відповідальні нежорсткі деталі типу вал [1, 2]. Але визначення точності виготовлення нежорстких деталей завжди викликає певні труднощі на виробництві [3, 4, 5].

Ця задача значно ускладнюється, коли необхідно визначити точність нежорстких деталей з криволінійною утворюючою. До таких деталей відносяться оправки станів холодної прокатки труб (ХПТ) малого діаметру з криволінійною утворюючою робочою

поверхні [6, 7]. За умовами технологічного процесу пільгування труб до точності робочої поверхні оправки пред'являються високі вимоги $\pm 0,03\text{мм}$ за діаметральним розміром за всією довжиною робочої поверхні.

2. Постановка задачі

Оправки станів ХПТ виготовляються зі спеціальної сталі (Сталь 60С2ХФА, твердість HRC 54..58, Сталь S 690 BOHLER, твердість HRC 58..64 тощо),

мають жорсткі вимоги до точності (допуск на діаметр робочої частини $\pm 0,03\text{мм}$) та якості поверхні ($Ra\ 0,16\mu\text{км}$).

Тому немає альтернативи оброблення робочої поверхні оправок шліфуванням. Оправки станів ХПТ за своїми геометричними параметрами відносяться до нежорстких деталей (відношення довжини до діаметру 30..50) і переважно мають робочу поверхню круглого поперечного перерізу, але зі зміною координати x за довжиною z за спеціальним законом (рис. 1):

$$x_i = 0.5 \left[d_{\min} + (d_{\max} - d_{\min} - kL_r) \left(\frac{z_i}{L_r} \right)^n + kz_i \right], \quad (1)$$

де d_{\min} , d_{\max} – мінімальний і максимальний діаметри профільної частини оправки, L_r – довжина робочої частини, k – початкова конусність, n – показник ступеня.

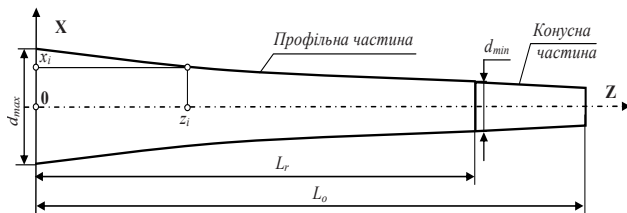


Рис. 1. Профіль оправки стану ХПТ

Заключна операція виготовлення оправок виконується на шліфувальних верстатах з ЧПК при використанні спеціальної опори, що управляється від системи ЧПК і виконує роль люнета.

В табл. 1 наведені геометричні параметри оправки ХПТ 6-20 для виготовлення труб з внутрішнім діаметром 6мм.

Таблиця 1

Геометричні параметри оправки стану ХПТ

Позначення типу оправки	n	k	d_{\max} , мм	d_{\min} , мм	L_r , мм	L_o , мм
ХПТ 6-20	2,5	0,005	12	6	300	420

Контроль оправки вимагає перевірки відповідності її 3D форми кресленню, а точніше таблиці діаметрів, розрахованої за формулою (1). Такий контроль здійснюється безпосередньо на верстаті вимірною щупом фірми Heidenhain [8, 9] (рис. 2) при виконанні спеціальної програми, яка забезпечує відповідні рухи для вимірів кожного перерізу оправки з заданими кроком за кутом обертання і з заданим кроком по вздовжньому переміщенню. Щуп (рис. 2,а) має ножеподібний накінцівник (рис. 2,б) і забезпечує точність вимірювань $\pm 1\mu\text{км}$.

Оскільки вимірювання здійснюються контактним методом, то стрижень щупа притискається до деталі з певним зусиллям, яке залежить від довжини вимірювання і напрямку руху стрижня при вимірюваннях (рис. 2,в).

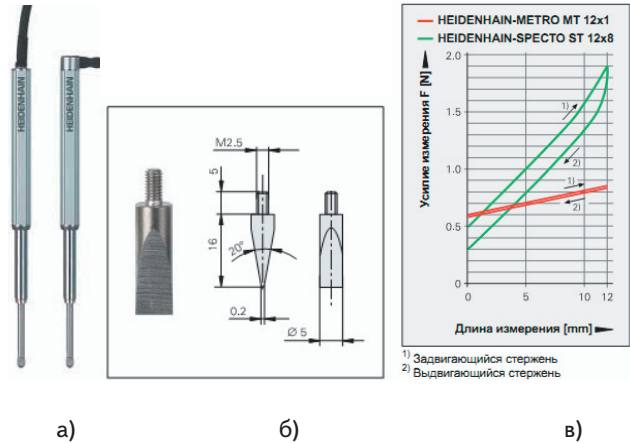


Рис. 2. Щуп фірми Heidenhain (а), накінцівник щупа (б), зусилля при вимірюванні (в)

Вимірювання здійснюються за схемою, яка показана на рис. 3. При виконанні циклу вимірювань оправка 1 залишається встановленою в центрах 2 верстата, як при виконанні операції шліфування. Щуп 3 підводиться гідроциліндром 4 в позицію вимірювань, яка визначається безконтактним датчиком 5 і приводи верстата за командою від системи ЧПК виконують вимірні рухи за наступними осями: за віссю С обертальний на визначений крок, а за віссю Z поступальний для вимірювань у наступному перерізі.

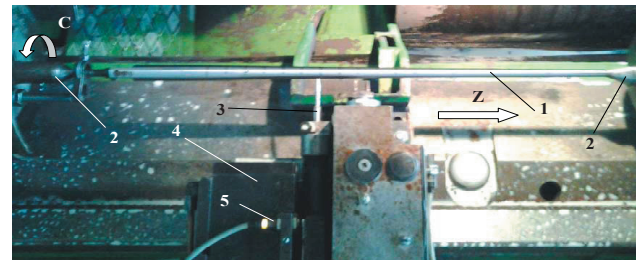


Рис. 3. Вимірювання точності оправки стану ХПТ на шліфувальному верстаті з ЧПК

«Нуль» вимірної системи налаштовується так, щоб він співпадав з віссю оправки, тобто з лінією центрів верстата. Таким чином, за такою схемою вимірюється радіус поверхні оправки за перерізами відносно вісі центрів і формується відповідний файл, який обробляється спеціальною обчислювальною процедурою з метою визначення необхідних параметрів точності.

Діаметр D оправки в перерізі за номером j визначається як середнє арифметичне за результатами вимірювань радіуса в перерізі:

$$D[j] = \frac{2 \sum_{i=1}^n R[j,i]}{n}, \quad (1)$$

де $R[j,i]$ – радіус відносно лінії центрів, n – кількість вимірювань у перерізі.

Після зняття оправки з верстата виконуються контрольні вимірювання діаметрів тих самих перерізів цифровим мікрометром з точністю вимірювань $\pm 1\mu\text{км}$.

Для аналізу результатів вимірювань за створеним в стійці верстату файлом і даними вимірювань мікрометром була розроблена прикладна програма, інтерфейс якої показаний на рис. 4. Інтерфейс показаний в стані

після виконання процедур за результатами вимірювань оправки ХПТ 6-20.

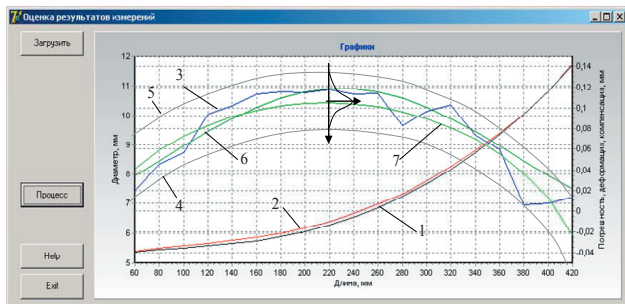


Рис. 4. Интерфейс прикладной программы

Лініями 1 і 2 показані графіки зміни діаметрів оправки за довжиною, вимірюваною системою вимірювань верстату ($D[j]$) і мікрометром ($D_m[j]$) відповідно (ліва шкала графіку), лінія 3 – графік різниці $\delta[j] = D_m[j] - D[j]$ (права шкала графіку). Такі вимірювання проводились декілька разів для отримання необхідних даних статистичного аналізу. В результаті було виявлено як випадкову, так і детерміновану складову різниці $\delta[j]$. Випадкова складова, при застосуванні гіпотези нормального закону розподілу, обмежується зоною між двома лініями 4 і 5 на інтерфейсі рис. 4, а емпірична дисперсія складає $S^2 \approx 6$ мкм. Щодо детермінованої складової, то тут виникає потреба перевірки причини її походження.

3. Вирішення задачі

При взаємодії контактної датчика з деталлю утворюється певна сила взаємодії з деталлю (дивись рис. 2), внаслідок чого виникає деформація системи вимірювання, що спотворює результати в частині детермінованої складової. Для перевірки цього припущення можна скористатися схемою пружної системи при вимірюваннях (рис. 5). Як бачимо, що така пружна система матиме різну жорсткість в залежності від місця вимірювань, тобто місця прикладання зусилля F контактної щупа.

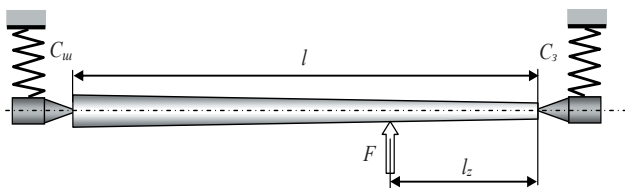


Рис. 5. Схема для визначення жорсткості системи в точці вимірювання

Якщо вважати деталь абсолютно жорсткою, то жорсткість C такої системи в функції координати l_z визначатиметься за залежністю [10, 11]:

$$C = \frac{C_{ш} C_3 l^2}{C_{ш} (1-l_z)^2 + C_3 l_z^2}, \tag{2}$$

де $C_{ш}$, C_3 – жорсткості шпинделя і задньої бабки відповідно, l – довжина оправки.

Податливість системи з урахуванням жорсткості деталі, як стержня з середнім діаметром d_{cp} , можна визначити як суму податливостей системи і деталі:

$$j = \frac{C_{ш} (1-l_z)^2 + C_3 l_z^2}{C_{ш} C_3 l^2} + \frac{l_z^2 (1-l_z)^2}{3EJ}, \tag{3}$$

де E – модуль пружності матеріалу деталі; $J = \pi d_c^4 / 64$ – момент інерції деталі.

Звідки жорсткість у функції координати вимірювання:

$$C = \frac{C_{ш} C_3 3EJ l^2}{3EJ C_{ш} (1-l_z)^2 + 3EJ C_3 l_z^2 + C_{ш} C_3 l^2 (1-l_z)^2}. \tag{4}$$

З використанням залежності (4) були виконані розрахунки деформації оправки і побудований відповідний графік в графічному вікні інтерфейсу прикладної програми (лінія 6 на рис. 4 - права шкала графіку). Порівняння цього графіка з зоною розташування різниці $\delta[j]$ свідчить про вірність припущення залежності детермінованої складової від пружних деформацій вимірювальної системи верстата з ЧПК. Таким чином, з'являється можливість урахування такої складової для корекції результатів вимірювань.

Корекцію результатів вирішено проводити за залежністю, що представляє середню лінію розподілу різниці $\delta[j]$ за довжиною (лінія 7 на рис. 4 - права шкала графіку):

$$\delta_k[j] = \frac{\sqrt{D_1^2 - (D_1 - l_z[j])^2}}{k} - A, \tag{5}$$

де емпіричні параметри D_1 і k в свою чергу визначаються за наступними залежностями:

$$D_1 = 1 - B + 5d_{cp}, \quad k = (d_{max} - d_{min})^2 (d_{max} + d_{min})^2 / k_1. \tag{6}$$

Остаточно емпіричні параметри A , B і k_1 визначаються за результатами статистичної обробки експериментальних вимірювань з використанням прикладної програми, інтерфейс якої показаний на рис. 4.

Такі експерименти були виконані для оправки ХПТ 6-20 і підібрані наступні значення параметрів залежностей (5) і (6) для розрахунку корекції: $A=0,1$ мм, $B=245$ мм, $k_1=10,5$. Визначені таким чином залежності були закладені в стійку ЧПК верстату для виконання автоматичної корекції з метою усунення детермінованої складової похибки вимірювань в автоматичному режимі.

Оцінка адекватності запропонованої корекції була проведена при вимірюванні трьох прошліфаних оправок ХПТ 6-20. Результати вимірювань були оброблені за допомогою прикладної програми, інтерфейс якої представлений на рис. 6. Завантаження утворених при вимірюваннях цифрових масивів виконується за допомогою кнопок, розташованих зліва інтерфейсу у діалоговому режимі. Призначення кнопок впливає з відповідних написів поряд з ними.

В ході експериментів були виконані вимірювання трьох оправок (A , B і C) з виконанням автоматичної корекції, вимірювання без корекції, та контрольні вимірювання за допомогою мікрометра. В графічному вікні інтерфейсу показані графіки, що побу-

довані за результатами таких вимірювань: лінії 1 – діаметри оправок, виміряні з виконанням корекції (оправки А, В і С), лінія 2 – діаметри оправки, виміряної без корекції, лінія 3 – діаметри оправки, виміряної мікрометром. Всі ці графіки побудовані в графічному вікні інтерфейсу за правую шкалою. Крім того представлені графіки похибок для трьох оправок – різниці $\delta[j]=D_m[j]-D_k[j]$, де $D_k[j]$ - діаметри оправок з корекцією результатів вимірювань (ліва шкала графіку – лінії 4), а також графік різниці $\delta[j]=D_m[j]-D[j]$ (ліва шкала графіку – лінія 5) і графік автоматичної корекції вимірювань у відповідності до залежностей (5) і (6) (ліва шкала графіку – лінія 6). Графічне вікно інтерфейсу створеної прикладної програми дозволяє виконувати збільшення масштабу представлення графіків будь-якої ділянки. На рис. 6 показана ділянка графіків у збільшеному масштабі, позначені тими ж позиціями, що і на основному графіку: лінії 1 - діаметри оправок, виміряні з виконанням корекції (оправки А, В і С), лінія 2 – діаметри оправки, виміряної без корекції, лінія 3 – діаметри оправки, виміряної мікрометром.

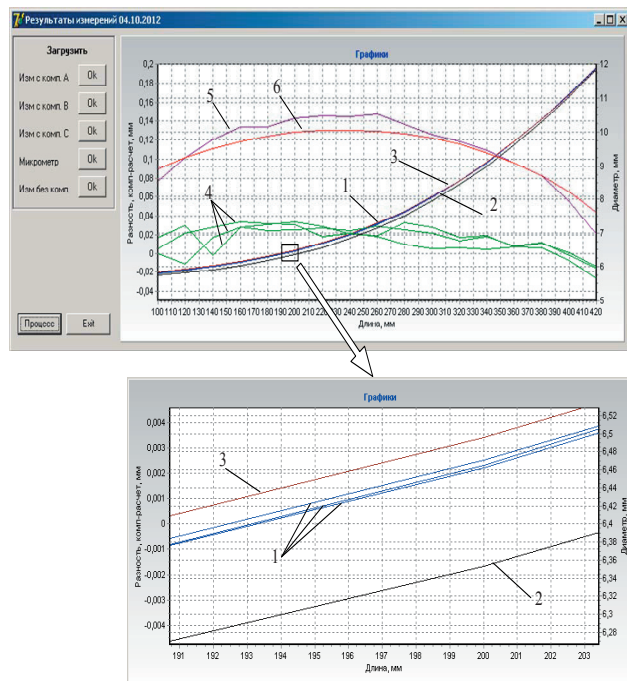


Рис. 6. Інтерфейс прикладної програми

Аналіз результатів експериментів свідчить про усунення детермінованої складової, яка виникає внаслідок пружних деформацій оправки при вимірюванні. Графік залежності корекції (лінія 6) розташовується по середній лінії поля розсіювання різниці між даними, що отримані при вимірюванні мікрометром і даними вимірювальної системи без використання корекції. Похибка вимірювань, яка визначається як різниця між даними вимірювальної системи, скорегованими з використанням залежностей (6) і (5), не перевищує поля допуску на виготовлення $\pm 0,03\text{мм}$ (дивись лінії 4 на рис. 6).

Крім того, в математичні залежності корекції результатів вимірювань введені основні геометричні розміри оправок, що робить їх більш універсальними

при виконанні контролю різних типорозмірів оправок станів ХПТ.

4. Висновки

1. Вимірювання точності шліфування нежорстких деталей круглого перерізу, але з криволінійною утворюючою, необхідно виконувати безпосередньо на верстаті з ЧПК з використанням запропонованої вимірювальної системи в автоматичному режимі.

2. Експериментально доведено, що при вимірюваннях нежорстких деталей контактним методом внаслідок сили взаємодії вимірювального щупа з деталлю виникає похибка вимірювань, яка є детермінованою і визначається деформацією технологічної системи під дією цієї сили.

3. Теоретично обґрунтовано і практично доведено, що детермінована складова похибки вимірювань може бути усунена при обробленні результатів вимірювань за допомогою розробленого алгоритму з використанням запропонованих залежностей корекції.

Література

1. Taranenko, W. Technologia kształtowania części maszyn o małej sztywności [Текст] : монографія. / W. Taranenko, A. Świć; Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005.- 282 p.
2. Dracow, O. Technologia modułowa wytwarzania osiowosymetrycznych wałów długowymiarowych [Текст] / O. Dracow, W. Taranenko// ZESZYTY NAUKOWE Politechniki Rzeszowskiej NR 230 MECHANIKA, z. 67 - MODUŁOWE TECHNOLOGIE I KONSTRUKCJE W BUDOWIE MASZYN, Rzeszow 2006. – p. 47 – 50.
3. Taranenko, W. Urządzenia sterujące dokładnością obróbki części maszyn o małej sztywności [Текст] : монографія. / W. Taranenko, A. Świć; Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006.- 186 p.
4. ГОСТ 30987-2003. Назначение размеров и допусков для нежестких деталей. [Текст] . - Введ. 2005-01-01. - М. : Издво стандартов, 2005. – 8 с.
5. ISO 10579:2010. Geometrical product specification (GPS). Dimensioning and tolerancing. Non-rigid parts [Текст] . - Введ. 2011-01-01. - International Organization for Standardization, 2011. – 7 p.
6. Strehlau, O. Introducing cold pilger mill technology [Текст] / O. Strehlau // The Tube and Pipe Journal, July 2006.
7. Stapleton, G. Cold Pilger Technology [Текст] / G Stapleton. Fma Store, 2011.
8. Incremental test leads firms HEIDENHAIN [Электронный ресурс] / HEIDENHAIN. – Режим доступа : \WWW/ URL: / - www.heidenhain.de.
9. Catalog HEIDENHAIN LENGTH GAUGES, 2013.
10. Петраков, Ю.В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням [Текст] / Ю.В Петраков. – УкрНДІАТ, Київ, 2004.-383 с.
11. Петраков, Ю.В. Теорія автоматичного управління у металообробці [Текст] / Ю.В Петраков.– К., ІЗМН, 1988.- 212 с.