



DOI: 10.5604/20830157.1166560

ZAPEWNIENIE STABILNOŚCI POMIARÓW KONTAKTOWYCH W SYSTEMIE AUTOMATYCZNEGO STEROWANIA PRECYZYJNYM SZLIFOWANIEM

Pavlo Sholom

Lucki Narodowy Uniwersytet Techniczny, Katedra Konstrukcji Przyrządów

Streszczenie. Kontrola rozmiarów przedmiotów podczas ich obróbki na szlifierkach odbywa się za pomocą głowic pomiarowych ze specjalnym osprzętem, który znajduje się w mechanicznym kontakcie z kontrolowaną powierzchnią. Pomiar jest wykonywany w trybie automatycznym, dlatego ważne wyzwanie techniczne polega na tym, aby zapewnić wysoką dokładność śledzenia aktualnej wartości parametru kontrolnego. Rozpatrzono przyczyny występowania błędów pomiarowych. W artykule zostały przeanalizowane praktyczne układy kontroli przy szlifowaniu kształtów cylindrycznych oraz sytuacje, które mogą prowadzić do błędów temperaturowych lub jakości pozycjonowania osprzętu na powierzchni kontrolnej.

Słowa kluczowe: pomiar, mechanizm przemieszczenia, odkształcenie, przemieszczenie, dokładność

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ КОНТАКТНИХ ВИМІРЮВАНЬ У АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ ТОЧНІСТЮ ШЛІФУВАННЯ

Анотація. Контроль розмірів деталей в процесі їх оброблення на шліфувальному верстаті виконується за допомогою вимірювальних головок з спеціальною оснасткою, що механічно контактує з поверхнею контролю. Вимірювання виконуються в автоматичному режимі, тому важливим технічним завданням є забезпечення високої точності відслідковування поточного значення контрольного параметра. Розглядаються причини виникнення похибок вимірювання. В статті аналізуються практичні схеми контролю на операціях круглого шліфування та ситуації, які можуть привести до виникнення похибок від дії температури або якості позиціонування вимірювальної оснастки на контрольній поверхні.

Ключові слова: вимірювання, передача переміщення, деформація, зміщення, точність

ENSURING THE STABILITY OF CONTACT MEASUREMENTS IN AUTOMATED CONTROL SYSTEMS FOR PRECISION GRINDING

Abstract. Control the size of the parts in the process of their processing on the grinding machine is performed using the measuring heads with a special equipment that mechanically is in contact with the surface of the control. The measurement is performed in the automatic mode that is why an important technical task is to ensure the high precision tracking of the current value of the control parameter. The causes of errors of measurement are analysed in the article. The article analyses the practical schemes of control on operations of round grinding, and situations that may lead to the occurrence of errors from the effects of temperature and the quality of the positioning of the measuring equipment on the control surface.

Keywords: measurement, transfer shift, deformation, displacement, accuracy

Wstęp

Przy precyzyjnej obróbce komponentów mechanizmów, takich jak łożyska toczne, w końcowym etapie obróbki używane są szlifierki automatyczne. Wysoką dokładność obróbki można osiągnąć tylko w przypadku stosowania specjalnych układów automatycznego sterowania szlifierki. Takie środki powinny zapewnić automatyczną zmianę trybu obróbki komponentów – sterowanie maszyną oraz, co jest bardzo ważne, ciągle monitorowanie bieżących rozmiarów obrabianej powierzchni.

W nowoczesnych systemach aktywnej kontroli, które służą do zwiększenia dokładności obróbki detali w operacjach szlifowania, jako podstawowe narzędzia pomiarowe są szeroko stosowane mechaniczno-elektryczne czujniki oraz przetworniki indukcyjne. Liniowy wymiar parametru kontrolnego najpierw przekształca się w informacyjny sygnał elektryczny, wygodny dla zdalnych pomiarów i komunikacji z systemem sterowania automatycznego cyklem technologicznym.

W ten sposób, wydajność pracy systemów technologicznych w środowisku przemysłowym będzie w dużej mierze zależeć od stabilności eksploatacyjnych i metrologicznych charakterystyk pomiarowych elementów systemu sterowania automatycznego.

Вступ

Для високоточного оброблення деталей механізмів, наприклад, підшипників кочення, на операціях кінцевого розмірного оброблення використовуються шліфувальні верстати, які працюють в автоматичному режимі. Високу розмірну точність оброблення можна досягти лише у випадку застосування спеціальних засобів автоматичного управління циклом роботи шліфувального верстата. Такі засоби повинні забезпечувати як автоматичну зміну режимів оброблення деталі – управління верстатом, так і, що надзвичайно важливо, постійний контроль поточного розміру поверхні оброблення.

У сучасних системах активного контролю, що служать для підвищення розмірної точності оброблення деталей на шліфувальних операціях, у якості первинних вимірювальних засобів широко використовуються механоелектричні давачі з індуктивними перетворювачами. Лінійний розмір контрольного параметра попередньо перетворюються у електричний інформаційний сигнал, зручний як для дистанційних вимірювань, так і для зв'язку з системою автоматичного управління технологічним циклом.

Таким чином, ефективність роботи технологічної системи у виробних умовах буде значною мірою залежати від стабільності експлуатаційних та метрологічних характеристики вимірювальної ланки автоматизованої системи управління.

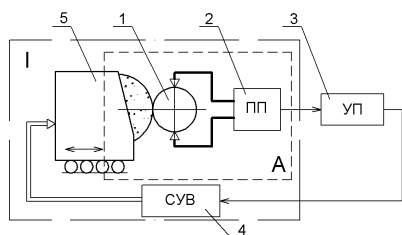
1. Przegląd praktycznych układów sterowania

Kontrola rozmiarów w trakcie procesu obróbki może być wykonywana według dwóch schematów: pomiar bezpośredni – gdy w obszarze pomiarowym narzędzi pomiarowych znajduje się tylko kontrolowany rozmiar, i pomiar pośredni – w przypadku gdy w obszarze pomiarowym narzędzia zawarte są również elementy mocujące detal, elementy konstrukcyjne szlifierki lub urządzenia szlifierskie. Oczywiście, jeśli warunki procesu technologicznego sprzyjają, korzystniejszy jest pomiar bezpośredni. Na przykład, w produkcji łożysk tocznych do sterowania procesem szlifowania zarówno zewnętrznej powierzchni pierścieni, jak i wewnętrznej powierzchni otworów, stosuje się dwupunktową metodę kontaktowych pomiarów średnic [1].

Główne zalety pomiarów kontrolnych, w których wykorzystuje się bezpośrednią metodę pomiaru, to:

- kontrola dynamiki procesu obróbki detali;
- możliwość tworzenia poleceń sterowania na każdym etapie procesu obróbki;
- szybkie reagowanie na wpływ przypadkowych czynników zewnętrznych.

Podstawowy przetwornik pomiarowy 1 (rys. 1) jest zainstalowany w obszarze obróbki komponentu i służy do przetworzenia liniowego rozmiaru komponentu (w tym przypadku – średnica zewnętrzna) w sygnał pośredni. Sygnał jest przetwarzany w urządzeniu sterującym 2, na wyjściu którego wytwarzane są grupy poleceń sterujących szlifierką. Polecenia są przekazywane do sterownika urządzenia i są realizowane przez elementy wykonawcze maszyny, która następnie przemieszcza narzędzie skrawające.



Rys. 1. System automatycznego sterowania obróbką precyzyjną: 1 – obrabiarka, 1 – detal poddany obróbce; 2 – przetwornik podstawowy; 3 – urządzenie kontrolujące; 4 – układ sterowania obrabiarką; 5 – roboczy element obrabiarki; A – obszar pracy obrabiarki

Rys. 1. Система автоматизованого управління точністю оброблення: 1 – верстат, 1 – деталь, що оброблюється; 2 – первинний перетворювач; 3 – управляючий прилад; 4 – схема управління верстатом; 5 – виконавчий елемент верстата; A – робоча зона оброблення

Schemat automatycznego sterowania procesem szlifowania można podzielić na dwie części: pomiarową, do której należą wszystkie elementy i węzły przetwornika pomiarowego ПП oraz pomiarowa część urządzenia sterującego УП; regulacyjną – blok wyjściowych poleceń urządzenia sterującego УП, układ sterowania obrabiarką СУВ oraz napęd koła głównego szlifierki.

Należy zauważyć, że obiektem regulacji w tym układzie jest kontrolny rozmiar detalu 1. W tym samym czasie bieżąca wartość tego rozmiaru jest też obiektem kontroli – stan, parametry i charakterystyki którego konieczne należy uwzględnić podczas badania i analizy narzędzi pomiarowych.

Ze schematu wynika, że sygnał z podstawowego przetwornika pomiarowego ПП, który umieszczono w obszarze roboczym obrabiarki (A), jest przekazywany zdalnie do systemu sterowania. Wymóg zdalnego pomiaru wynika z tego, że automatyczne sterowanie rozmiaru detali w czasie ich obróbki wymaga użycia małych gabarytowych podstawowych przetworników rozmiaru, które mogą być zainstalowane w obszarze obróbki w niedostępnym miejscu. Tą część mechanizmu przekazywania mikroprzemieszczeń, która bezpośrednio współpracuje z kontrolowanym detalem, przyjęto nazywać przystawką pomiarową.

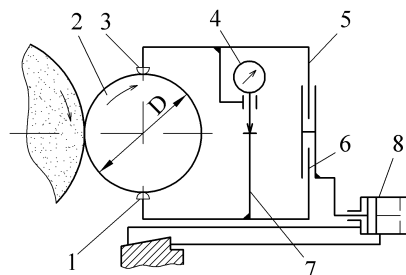
1. Огляд практичних схем контролю

Контроль розміру в процесі оброблення практично може виконуватись за двома схемами: прямим вимірюванням – коли контрольний розмір входить у вимірювальне коло засобу вимірювання, і непрямим або опосередкованим, – коли у вимірювальне коло входять розміри елементів пристроїв базування деталі, конструктивних елементів верстату чи верстатних пристроїв. Звичайно, якщо дозволяють умови технологічного процесу, перевага надається прямим вимірюванням. Наприклад, у виробництві підшипників кочення, для управління процесом шліфування як зовнішніх поверхонь кілець, так і внутрішніх поверхонь отворів застосовується двохточкова схема діаметральних контактних вимірювань [1].

Основні переваги операційного контролю, у якій застосовується прямий метод вимірювань:

- контролюється динаміка протікання процесу оброблення деталі;
- є можливість формувати команди управління на будь-якій фазі процесу оброблення;
- забезпечується швидке реагування на дію випадкових сторонніх чинників.

Первинний вимірювальний перетворювач 1 (рис. 1) встановлюється у зоні оброблення деталі і служить для перетворення лінійного розміру деталі (у даному випадку – зовнішнього діаметра) у проміжний сигнал. Сигнал обробляється в управляючому приладі 2, на виході якого формуються команди управління верстатом. Команди управління поступають у схему верстата і реалізуються виконавчими органами верстата, які, в свою чергу, переміщують різальний інструмент.



Rys. 2. Контроль зовнішнього діаметра методом двохточковою

Rys. 2. Контроль зовнішнього діаметра за двохконтактною схемою

Схема автоматизованого управління процесом шліфування можна виділити дві частини: вимірювальну, до якої входять всі елементи і вузли вимірювального перетворювача ПП і вимірювальна частина управляючого приладу УП, та регульовальну – блок вихідних команд управляючого приладу УП, схема управління верстатом СУВ та приводи шліфувальної бабки верстата.

Слід відмітити, що об'єктом регулювання у цій схемі виступає контрольний розмір деталі 1. Одночасно, поточне значення цього розміру є і об'єктом контролю, стан, параметри і характеристики якого обов'язково необхідно врахувати під час дослідження та аналізу вимірювальних засобів.

Зі схеми видно, що сигнал з первинного вимірювального перетворювача ПП, який встановлено в робочій зоні (A) верстату, на управляючий прилад передається дистанційно. Вимога дистанціонування вимірювання виникає через те, що автоматичний контроль розмірів деталей в процесі їх оброблення потребує застосування малогабаритних первинних елементів перетворення розміру, які можуть бути встановлені в робочій зоні оброблення у важкодоступному місці. Ту частину механізму передачі мікропереміщення, яка безпосередньо взаємодіє з деталлю контролю прийнято називати вимірювальною оснасткою.

1.1. Osprzęt pomiarowy oraz mechanizm przekazywania mikroprzemieszczeń

Osprzęt pomiarowy – to ważny i odpowiedzialny węzeł układu aktywnego sterowania, który znajduje się w kontakcie mechanicznym z obrabianą powierzchnią, od dokładności i niezawodności, którego najbardziej zależy wyniki pomiaru oraz, odpowiednio, precyzja obróbki. W nowoczesnych systemach aktywnego sterowania jest głównie używany osprzęt pomiarowy, którego działanie oparte jest na bezpośrednim kontakcie mechanicznym elementów czułych z powierzchnią, której rozmiary są kontrolowane.

Wyróżniającą cechą narzędzi do aktywnej kontroli operacyjnej jest ich zdolność do pracy bezpośrednio na szlifierce; adaptacja do zmian rozmiaru powierzchni (w niektórych przypadkach skokowa), które szybko przemieszcza się względem kontaktowego czujnika oraz ciągłe przebywanie pod działaniem cieczy chłodzącej, wiórów i innych czynników zewnętrznych występujących w obszarze roboczym urządzenia.

W urządzeniach pracujących w oparciu o metodę dwupunktową (rys. 2), kontaktowe końcówki 1 i 3 są przymocowane do wózka (wahaczy) 5 i 6, co umożliwia końcówkom nadążanie za zmianami rozmiaru D detalu 2. Jeden z wózków jest związany z miernikiem 4 lub przetwornikiem pomiarowym, a drugi – z elementem odniesienia („oporowym”) 7.

W praktyce, w większości przypadków stosuje się metodę pomiaru stykowego (rys. 3), to znaczy, gdy element czuły przetwornika znajduje się w kontakcie mechanicznym z obrabianą powierzchnią detalu. Dlatego pomiędzy kontrolowanym parametrem a przetwornikiem pomiarowym stosowane są specjalne mechanizmy transferujące mikroprzemieszczenia, jakie wynikają ze zmian kontrolowanego rozmiaru detalu podczas szlifowania jego powierzchni.



Rys. 3. Obszar roboczy maszyny SIW-3B z zainstalowaną głowicą pomiarową
Rис. 3. Рабочая зона верстака SIW-3B с установленной измерительной головкой

Osprzęt pomiarowy urządzenia do aktywnej kontroli jest zwykle zakończony ustandaryzowanymi regulowanymi uchwytami i końcówkami pomiarowymi.

Uchwyty są zainstalowane na końcu dźwigni za pomocą pomiarowych łapek lub głowicy, a na drugim końcu uchwytu znajduje się końcówka pomiarowa. Typowy uchwyt dobierany jest dla każdego układu sterowania w zależności od kształtu i rozmieszczenia powierzchni. Zgodnie z eksploatacyjnymi wymaganiami uchwyty powinny być lekkie i mocne. Dlatego, są często wykonywane z pustych cienkościennych rurek. Głównym wymogiem dla końcówek jest wysoka odporność na ścieranie. Dlatego wykonywane są one z twardych stopów lub wykończone są sztucznymi lub naturalnymi diamentami.

Rys. 4 przedstawia zestaw uchwytów i końcówek do kontroli średnicy wałów w szlifierkach do wałków.

Do zawieszenia mechanizmów ruchomych do przekazywania mikroprzemieszczeń najczęściej stosowane są elastyczne zawiasy. Spowodowane jest to ich niezawodnością, odpornością na wysoką

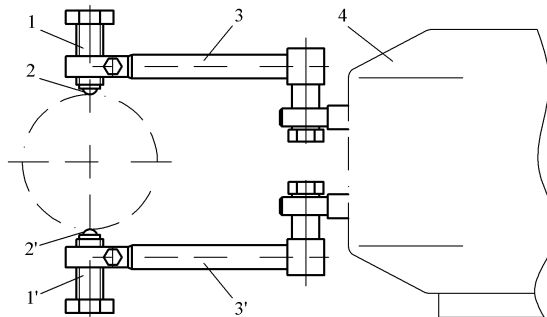
1.1. Вимірювальна оснастка та механізми передачі мікропереміщень

Вимірювальна оснастка – важливий і відповідальний вузол приладу активного контролю, який контактує з поверхнею оброблення і від точності й надійності якого найбільше залежить результат вимірювання і, відповідно, точність оброблення. У сучасних системах активного контролю переважно використовуються вимірювальна оснастка, для якої ґрунтується на безпосередньому механічному контакті чутливих елементів з поверхнею деталі, розмір якої контролюється.

Відмінною особливістю оснастки для активного операційного контролю є її здатність працювати безпосередньо на шліфувальному верстаті, сприймати зміну розміру поверхні (у деяких випадках переривисту), яка швидко перемищується відносно чутливого контактного елемента та постійно перебувати під дією охолоджувальної емульсії, стружки та інших зовнішніх чинників, присутніх в робочій зоні верстаку.

У пристроях, що працюють по двох контактній схемі (рис. 2), контактні наконечники 1 і 3 закріплені на каретках (важелях) 5 і 6, що дозволяють наконечникам слідувати за зміною розміру D деталі 2. З однією з кареток зв'язаний відліковий пристрій 4 або вимірювальний перетворювач, а з другою – упор 7.

На практиці, у абсолютній більшості випадків, застосовується контактний метод вимірювання (рис. 3), тобто, коли чутливий елемент перетворювача механічно контактує з поверхнею оброблення деталі. Тому, у якості проміжної ланки вимірювального кола між контрольним параметром і вимірювальним перетворювачем використовуються спеціальні механізми передачі мікропереміщення, яке виникає від зміни розмірного параметра під час шліфування поверхні оброблення (контролю).



Rys. 4. Zestaw narzędzi pomiarowych do pomiaru średnicy zewnętrznej: 1 – uchwyt; 2 – zacisk z twardej stali; 3 – dźwignia; 4 – głowica pomiarowa

Рис. 4. Комплект вимірювальної оснастки для вимірювання зовнішнього діаметра: 1 – утримувач; 2 – твердосплавний наконечник; 3 – важіль; 4 – головка вимірювальна

Вимірювальна оснастка приладів активного контролю комплектується, як правило, уніфікованими змінними утримувачами та вимірювальними наконечниками.

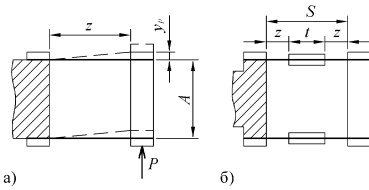
Утримувачі закріплюються на кінці важеля, що виступає з вимірювальної скоби чи головки, а на іншому кінці утримувача встановлюється вимірювальний наконечник. Типові утримувачі розробляються для кожної схеми контролю і залежно від форми та розташування поверхонь. Згідно до експлуатаційних вимог утримувачі повинні бути легкими і міцними. Для цього їх часто виготовляють пустотілими з тонкостінних трубок. Основна вимога до наконечників – висока зносостійкість. Тому наконечники виготовляються з твердих сплавів або їх оснащують штучними чи природними алмазами.

На рис. 4 показано комплект утримувачів і наконечників для контролю діаметра валів на круглшліфувальних верстаках.

Для підвіски кінематичних ланок механізмів передачі мікропереміщення найчастіше застосовуються пружні

wilgotność i zanieczyszczenia, brak zewnętrznego tarcia, luzów oraz zużywania.

Elastyczne prowadnice postępowego ruchu wózka pomiarowego wykonywane są w postaci równoległoboku z dwóch lub więcej równoległych w stanie nieobciążonym płaskich sprężyn bez okładzin (rys. 5a) i z okładzinami (rys. 5b).



Rys. 5. Równoległoboki z płaskimi sprężynami
Рис. 5. Плоскопружинні паралелограми

Szywność płaskich sprężyn C_p i maksymalne dopuszczalne przesunięcie y_p ustalone dla tych mechanizmów ruchomych wynosi [3]:

a) dla równoległoboku z płaskimi sprężynami bez okładzin (rys. 5a):

$$C_p = E \cdot b_z (h / z)^3, \text{ N/mm} \parallel \text{H/mm} \quad (1)$$

gdzie: E – moduł sprężystości materiału sprężyny, MPa; b_z – całkowita szerokość sprężyny zawiasu, mm; h – grubość sprężyn, mm; z – wolna długość sprężyny, mm.

$$y_p \leq (z^2 / 3h) \cdot [\sigma_3] / E, \text{ mm} \parallel \text{mm} \quad (2)$$

gdzie $[\sigma_3]$ – naprężenie dopuszczalne na zginanie, MPa.

b) dla równoległoboku z płaskimi sprężynami ze okładzinami (rys. 5b), oznaczenie $t/S=k_1$:

$$C_p = E \cdot b_z (h / S)^3 / (1 - k_1^3), \text{ N/mm} \parallel \text{H/mm} \quad (3)$$

$$y_p \leq S^2 (1 - k_1^3) \cdot [\sigma_3] / 3h \cdot E, \text{ mm} \parallel \text{mm} \quad (4)$$

W celu przekazywania ruch obrotowego dźwigni stosowanych jest kilka rodzajów elastycznych mechanizmów zawiasowych z płaskimi sprężynami. W precyzyjnych mechanizmach dźwigniowych często jest wykorzystywany wielowarstwowy krzyż albo zawias w kształcie litery T (rys. 6), który składa się z dwóch płaskich, sprężystych elementów, które łączą elementy zawiasu na pojedynczej płaskiej sprężynie i zawiasu z wyśrodkowanym punktem centralnym.

Parametry C_p i y_p dla zawiasu w kształcie litery T, który składa się z dwóch płaskich sprężyn A i B , pod warunkiem, że $h_A \neq h_B$, $b_A \neq b_B$ i $z_A \neq z_B$ można wyznaczyć z zależności:

$$C_p = (Eb_A h_A^3 / 12l^2 z_A) \cdot (1 + 12n^2 / z_A^2) + Eb_B h_B^3 / 12l^2 z_B; \quad (5)$$

$$y_{pA} \leq 2lz_A [\sigma_3] / h_A (1 + 6n / z_A) E; \quad (6)$$

$$y_{pB} \leq 2lz_B [\sigma_3] / h_B E. \quad (7)$$

1.2. Kontaktowe siły pomiarowe

Jednym z warunków zapewnienia dokładności pomiaru liniowego w sygnale informacyjnym jest stabilizowanie pomiaru wielkości – siły, z którą czule elementy są przyciśnięte do kontrolowanej powierzchni.

W rzeczywistych konstrukcjach głowic pomiarowych siła pomiaru wynosi 70 – 150 cN, w niektórych konstrukcjach (z dużą liczbą elementów) wartość ta może wynosić do 400 cN.

Istotny wpływ na dokładność pomiaru ma zmiana siły pomiarowej z zakresem pomiarowym. Spadek siły pomiarowej wynika z spadku siły na wszystkich elementach wchodzących w skład łańcucha pomiarowego, jak i sił tarcia powstających w łożyskach i prowadnicach. Dlatego w układzie łańcucha pomiarowego obowiązkowo są wprowadzane elementy regulacji i stabilizowania siły pomiarowej [4].

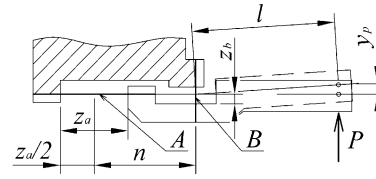
Spadek siły pomiarowej cylindrycznej sprężyny wyznacza się ze wzoru:

$$\Delta P = \Delta E d^4 / 8D^3 n \quad (8)$$

gdzie Δl – zmiana długości sprężyny w zakresie pomiarowym; E – moduł sprężystości; d – średnica drutu; D – średnia średnica

szarniérni elementy. Це зумовлено їх надійністю, стійкістю до підвищеної вологості і забрудненості, відсутністю зовнішнього тертя, люфтів та зношування.

Пружні напрямні поступального руху вимірвальної каретки виконуються у вигляді паралелограма з двох або більше паралельних у ненавантаженому стані плоских пружин без накладок (рис. 5a) або з накладками (рис. 5b).



Rys. 6. Zawias w kształcie litery T z dwóch płaskich, sprężystych elementów
Рис. 6. Т-подібний шарнір з двох плоскопружинних ланок

Silowa sztywność C_p płaskich prужin i гранично допустиме переміщення y_p закріпленої на цих напрямних кінематичної ланки буде становити [3]:

a) для плоскопружинного паралелограма без накладок (рис. 5a):

де E – модуль пружності матеріалу пружин, МПа; b_z – сумарна ширина всіх пружин шарніра, мм; h – товщина пружин, мм; z – вільна довжина пружини, мм.

де $[\sigma_3]$ – допустиме напруження згинання, МПа.

b) для плоскопружинного паралелограма з накладками (рис. 5b), позначивши $t/S=k_1$:

Для передачі обертального руху важеля застосовується декілька конструктивних різновидів пружних шарнірів з плоских пружин. У прецизійних важільних механізмах часто використовуються пластинчатий хрест або Т-подібний шарнір (рис. 6), який складається з двох плоскопружинних ланок, що поєднують елементи шарніра на одиничній плоскій пружині і шарніра з винесеним центром.

Для Т-подібного шарніру з двох плоскопружинних елементів A і B параметри C_p і y_p , за умови, що $h_A \neq h_B$, $b_A \neq b_B$ і $z_A \neq z_B$ будуть визначатись з відношень:

1.2. Контактне вимірвальне зусилля

Однією з умов забезпечення точності відтворення лінійного розміру в інформаційному сигналі є стабілізація вимірвального зусилля – сили, з якою чутливі елементи притискаються до поверхні контролю.

У реальних конструкціях вимірвальних головок вимірвальне зусилля складає 70 – 150 cN, у деяких конструкціях (з великими масами елементів) це зусилля може становити до 400 cN.

Важливий вплив на точність вимірвання справляє перепад вимірвального зусилля у діапазоні вимірвання. Перепад вимірвального зусилля складається з перепадів зусиль на всіх елементах, що входять у вимірвальний ланцюг, а також із сил тертя, що виникають в опорах і напрямних. Тому в схему вимірвального ланцюга обов'язково вводяться елементи для регулювання та стабілізації вимірвального зусилля [4].

Перепад вимірвального зусилля від циліндричної пружини визначається за формулою:

де Δl – хід пружини на діапазоні вимірвання; E – модуль пружності; d – діаметр дроту; D – середній діаметр пружини;

sprężyny; n – liczba zwojów.

Spadek siły pomiarowej dla płaskich sprężyny jest opisany wzorem:

$$\Delta P = 3 \cdot 10^{-3} \Delta E j n / l^3 \quad (9)$$

gdzie j – moment bezwładności; n – liczba sprężyn; l – długość sprężyny od linii siły do momentu zagłuszania sprężynę.

2. Badania przyczyn występowania błędów pomiaru

Skuteczna praca automatycznego systemu sterowania w zakresie stabilności pomiaru zależy od wielu czynników, które można podzielić ze względu na charakter wystąpienia błędu.

Błędy metodologiczne występują w zależności od przyjętego schematu kontroli: niestabilność pozycjonowania komponentów w czasie obróbki (pomiaru); niedoskonałość układów przywodzenia i odwodzenia osprzętu pomiarowego w trybie automatycznym i inne.

Błędy technologiczne spowodowane odchyleniami w trybie obróbki i metrologicznymi charakterystykami szlifierki, a także dynamiką procesu obróbki.

Błędy występujące ze względu na odstępstwa *parametrów obiektu szlifowania*, właściwości narzędzi ściernych oraz dodatkowych materiałów.

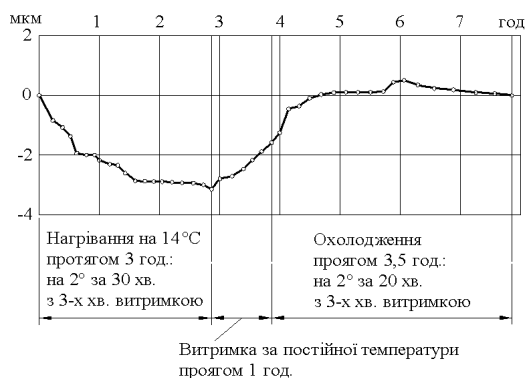
Błędy instrumentalne spowodowane przez niedoskonałość narzędzi pomiarowych: przetwornika podstawowego z osprzętu pomiarowego oraz mechanizmów transferu urządzenia sterującego.

2.1. Błędy temperaturowe

Duży wpływ na dokładność systemu pomiarowego wykazuje błąd temperatury δ_T wynikający z wahań temperatury powietrza otoczenia oraz temperatury cieczy chłodzącej, która chłapie na osprzęt pomiarowy, od nadmuchu strumienia powietrza od tarczy szlifierskiej oraz od nagranych końcówek w wyniku tarcia o powierzchnie obrabianego przedmiotu.

Błąd temperatury ma składową systematyczną δ_{Tc} i przypadkową δ_{Tv} . Wkrótce po rozpoczęciu pracy na szlifierce, temperatura osprzętu pomiarowego (i głowicy pomiarowej) stabilizuje się i zmiana poziomu regulacji urządzenia charakteryzuje systematyczną składową błędów temperatury, która może być skompensowana przez zmianę regulacji. Przypadkowa składowa błędów powstaje pod wpływem krótkich impulsów ciepła, na przykład na etapie korekty tarczy szlifierskiej, podczas ustalonego zatrzymania obrabiarki.

Rysunek 7 przedstawia wykres zmiany błędów temperatury jednopunktowej głowicy pomiarowej z przetwornikiem indukcyjnym, który znajduje się w hermetycznej obudowie.



Rys. 7. Wykres zmiany błędów temperatury głowicy pomiarowej
Rys. 7. Wykres zmiany błędów temperatury głowicy pomiarowej

n – число рабочих витков.

Перепад вимірювального зусилля від пластинчатих пружин визначається за формулою:

де j – момент інерції; n – число пластинчатих пружин; l – довжина пружини від лінії дії сили до защемлення пружини.

2. Дослідження причин виникнення похибок контролю

Ефективна робота автоматизованої системи управління в частині забезпечення стабільності вимірювання залежить від багатьох чинників, які можна розділити за природою виникнення похибок.

Методичні похибки виникають залежно від прийнятої схеми контролю: нестабільність позиціонування деталей під час оброблення (вимірювання), недосконалість схем підведення і відведення вимірювальної оснастки у автоматичному режимі роботи та інше.

Технологічні похибки, спричинені відхиленнями у режимах оброблення та метрологічними характеристиками шліфувального верстату, а також динамікою процесу оброблення.

Похибки, що виникають через відхилення *параметрів заготовки*, властивостей абразивного інструменту та допоміжних матеріалів.

Інструментальні похибки спричинені недосконалістю власне засобів вимірювання: первинного перетворювача з вимірювальною оснасткою та механізмами передачі, управляючого приладу.

2.1. Температурні похибки

Великий вплив на точність вимірювальної системи проявляє температурна похибка δ_T , що виникає від коливань температури оточуючого повітря, змащувально-охолоджувальної рідини, що потрапляє на вимірювальну оснастку, від обдування її потоком повітря, що поступає від шліфувального круга та від нагрівання контактних наконечників від тертя їх об поверхню деталі.

Температурна похибка має систематичну δ_{Tc} й випадкову δ_{Tv} складові. Через деякий час після початку роботи на верстаті температура вимірювальної оснастки (і вимірювальної головки) стабілізується і зміна рівня налагодження приладу характеризує систематичну складову температурної похибки, яка може бути компенсована його підналагодженням. Випадкова складова похибки виникає під дією короточасних теплових імпульсів, наприклад, на етапі правки шліфувального круга, в час зупинки встановленого режиму роботи верстата.

На рис. 7 показано графік зміни температурної похибки одноточкової вимірювальної головки з індуктивним перетворювачем, розташованим у герметичному корпусі.

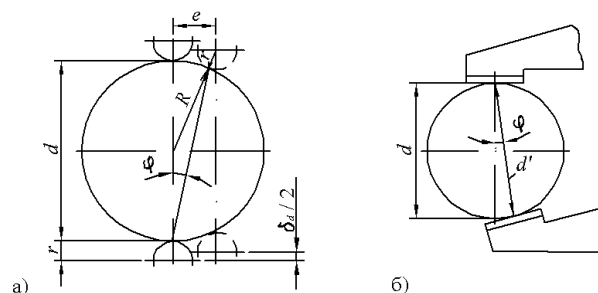


Рис. 8. Бłęды wynikające z przesunięcia zacisku pomiarowego na powierzchni cylindrycznej: a) spowodowane przez pochylenie zacisków pomiarowych; b) spowodowane przez pochylenie i przesunięcie zacisków pomiarowych
Рис. 8. Похибки, що виникають від зміщення наконечників на контрольному перерізі: а) сферичні наконечники; б) ножові наконечники

Badania doświadczalne zostały przeprowadzone w następujący sposób:

- indukcyjne urządzenie, przymocowane do płyty inwarowej i ustawione na zerową wartość skali jednostki sterującej, umieszczone w komorze cieplnej;
- blok sterujący został zainstalowany na zewnątrz komory cieplnej;
- w komorze zwiększano temperaturę od 25°C do 39°C w ciągu 3 godzin, a następnie głowica pomiarowa była utrzymywana w tej temperaturze przez 1 godzinę;
- następnie urządzenie było ochładzane przez 3,5 godziny do uzyskania poprzedniej temperatury.

Wyniki badań doświadczalnych przedstawiono na wykresie (rys. 7). Wykres pokazuje, że zmiana poziomu regulacji pod wpływem nagrzewania w ciągu 3 godzin wynosi 3,0 μm . Stanowi to 1 $\mu\text{m}/\text{h}$.

Po ochłodzeniu tworzy się małe odkształcenie szczątkowe, które wynosi około 1,0 μm . Jak wynika z otrzymanych rezultatów, urządzenie ma małe deformacje termiczne, które praktycznie mogą być kompensowane regulacją urządzenia.

2.2. Błędy pomiarów kontaktowych

Błędy pomiaru osprzętu mogą wystąpić ze względu na niestabilność położenia końcówek kontaktowych na powierzchni kontrolnej. Błędy te mogą mieć składowe systematyczne i przypadkowe. Składowa systematyczna jest związana z nieprawidłową pozycją wyjściową osprzętu pomiarowego względem detalu – z niestabilnością jego przysuwania do powierzchni kontrolnej. Systematyczna składowa jest kompensowana podczas regulacji osprzętu do rozmiaru [2].

W rezultacie przesunięcia jednego sferycznego kontaktowego zacisku ze średnicy kontrolnej (rys. 8a) powstaje błąd:

$$\delta_d = d(1 - \cos \phi) = e^2 / 2(R + r) \quad (10)$$

Podobny błąd występuje od nierównoległości zacisków nożycowych (rys. 8b).

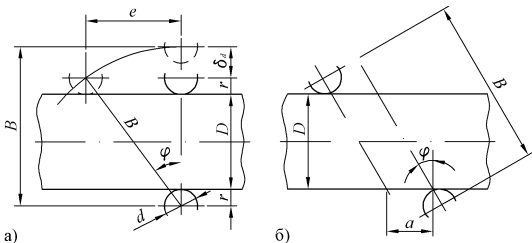
W przypadku przesunięcia dwóch zacisków z linii pomiaru – przypadek „ciąciwa” (rys. 7a):

$$\delta_d = e^2 / (R + r) \quad (11)$$

Z (10) wynika, że dla niestabilności ustawiania osprzętu mniejszej niż 10 μm błąd ten można zignorować.

W przypadku nachylenia przaszczyny kontroli – pochylenie zacisków pomiarowych (rys. 9a), powstaje błąd zdefiniowany jako:

$$\delta_d = D(1 - \cos \phi) / \cos \phi = e^2 / 2(D + d) \quad (12)$$



Rys. 9. Błąd pozycjonowania zacisków pomiarowych na powierzchni cylindrycznej: a) spowodowany przez pochylenie zacisków kontaktowych; b) przez pochylenie i przesunięcie zacisków kontaktowych

Rys. 9. Похибки позиціонування вимірвальних наконечників на циліндричній поверхні: а) від нахилу контактних наконечників; б) від нахилу і зміщення контактних наконечників

W porównaniu większość błędów powstaje w przypadku jednoczesnego pochylenia zacisków pomiarowych oraz przemieszczenia jednego z nich (rys. 9b):

$$\delta_d = a\phi + D(1 - \cos \phi) / \cos \phi \quad (13)$$

W przypadku kontroli powierzchni otworów występują błędy (podobne do opisanych powyżej) powstałe przez przesunięcie zacisków z linii średnicy lub w wyniku ich pochylenia.

Експериментальні дослідження виконувались у такій послідовності:

- індуктивний пристрій, закріплений на інваровій плиті і налаштований на нульове значення шкали блока управління, помістили у термокамеру;
- блок управління був встановлений поза термокамерою;
- у камері підвищувалась температура з 25°C до 39°C протягом 3 год., потім головка була витримана за такої температури протягом 1 год;
- далі пристрій охолоджувався протягом 3,5 год до попередньої температури.

За результатами даних експериментальних досліджень побудовано графік (рис. 7). З графіка видно, що зміна рівня налагодження від нагрівання протягом 3 годин склала 3,0 μm . Це становить 1 $\mu\text{m}/\text{год}$.

Після охолодження утворюється невелика залишкова деформація близько 1,0 μm . Як впливає з отриманих результату, пристрій має невеликі температурні деформації, які практично можуть бути компенсовані підналагодженням приладу.

2.2. Похибки контактних вимірювань

Похибки у вимірвальній оснастці можуть виникнути через нестабільність положення контактних наконечників на контрольній поверхні. Ці похибки можуть мати систематичну та випадкову складові. Систематична складова пов'язана з початковим неправильним положенням вимірвальної оснастки відносно деталі, а випадкова – з нестабільністю її підводу до поверхні контролю. Систематична складова компенсується під час налагодження оснастки на розмір [2].

В результаті зміщення одного сферичного контактного наконечника з контрольного діаметра (рис. 8a) виникне похибка:

$$\delta_d = d(1 - \cos \phi) = e^2 / 2(R + r) \quad (10)$$

Аналогічна похибка виникне і від непаралельності ножових наконечників (рис. 8b).

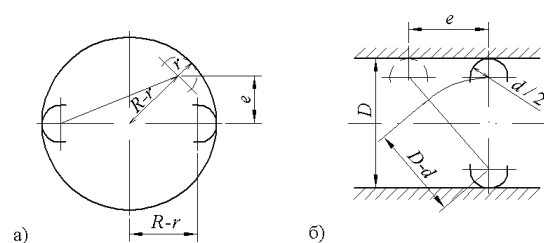
У випадку зміщення двох наконечників з лінії вимірювання – установка «по хорді» (рис. 7a):

$$\delta_d = e^2 / (R + r) \quad (11)$$

З (10) видно, що за нестабільності підводу оснастки у робоче положення менше 10 μm цією похибкою можна знехтувати.

У випадку нахилу площини контролю – перекосу вимірвальних наконечників (рис. 9a), виникає похибка, що визначається відношенням:

$$\delta_d = D(1 - \cos \phi) / \cos \phi = e^2 / 2(D + d) \quad (12)$$



Rys. 10. Бłęды позичонування зацисків поміарових під час процесу контролю отворів: а) бłąды пресунієня на обводзі отвору; б) бłąды пресунієня вздуз лінії поміару

Rys. 10. Похибки позиціонування вимірвальних наконечників в процесі контролю отворів: а) похибки зміщення по периметру отвору; б) похибки зміщення по лінії вимірювання

Porівняно більші похибки виникають якщо виникає одночасний нахил обох вимірвальних наконечників і зміщення одного з них (рис. 9b):

$$\delta_d = a\phi + D(1 - \cos \phi) / \cos \phi \quad (13)$$

У випадку контролю поверхонь отворів від зміщення наконечників з діаметральної площини або їх нахилі виникають похибки, аналогічні наведеним вище.

W wyniku przesunięcia jednego zacisku z linii pomiaru (rys. 10) powstaje błąd:

$$\delta_d = e^2 / 2(R-r) \quad (14)$$

W wyniku przesunięcia dwóch zacisków:

$$\delta_d = e^2 / (R-r) \quad (15)$$

W wyniku pochylenia płaszczyzny lokalizacji zacisków względem płaszczyzny pionowej (rys. 10b) powstaje błąd:

$$\delta_d = e^2 / 2(D-d) \quad (16)$$

Jak wynika z powyższych wyrażen, w większości przypadków błędy mają wartości drugiego rzędu istotności, ale należy je brać pod uwagę na etapie projektowania urządzeń służących do przystawiania i orientacji osprzętu pomiarowego w położeniu roboczym.

3. Wnioski

Charakterystyki metrologiczne systemu aktywnej kontroli w dużym stopniu zależą od metody śledzenia parametru informacyjnego oraz cech konstrukcyjnych urządzenia przenoszącego ten parametr do przetwornika pierwotnego głowicy pomiarowej.

Znaczący wpływ na efektywność pracy systemu automatycznego może mieć działanie temperatury, która jest zmienna i nieprzewidywalna. W związku z tym na etapie projektowania narzędzia pomiarowego należy przewidzieć możliwość ochrony lub kompensowania błędów, które powstają pod wpływem zmian temperatury.

Dokładność pozycjonowania końcówek pomiarowych na powierzchni zależy nie tylko od systemu kontroli i wykonania osprzętu pomiarowego, ale również od wielu czynników zewnętrznych, w tym od technologicznych trybów obróbki oraz stopnia automatyzacji operacji, co wymaga obowiązkowo sterowania kilkoma nastawami procesu technologicznego w czasie zachodzących zmian.

Podziękowania

Praca powstała w ramach projektu *PL-NTU Transgraniczna wymiana doświadczeń* PBU.03.01.00-06-386/11-00 współfinansowanego w ramach Programu Współpracy Transgranicznej Polska–Białoruś–Ukraina 2007–2013 finansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Instrumentu Sąsiedztwa i Partnerstwa.

Niniejsza publikacja została stworzona przy pomocy Unii Europejskiej. Wyłączną odpowiedzialność za zawartość niniejszej publikacji ponosi Pawło Szolom oraz w żaden sposób nie może być ona postrzegana jako odzwierciedlenie poglądów Unii Europejskiej.

Literatura || Література

- [1] Marchuk V.I., Mykhalevych V.T.: *Avtomatyzovane upravlinnya tochnisty obroblyennya detaley*. Monohrafiya, Luts'k: RVV Luts'koho NTU, 2013 (in Ukrainian).
- [2] Mykhalevych V.T., Klepats'kyi H.V.: *Dynamični pokhybky rozmirnoho kontrolyu v systemakh upravlinnya tochnisty obrobky detaley pidshyynykiv*.

Так, від зміщення одного наконечника з лінії вимірювання (рис. 10) виникає похибка:

$$\delta_d = e^2 / 2(R-r) \quad (14)$$

Від зміщення двох наконечників:

$$\delta_d = e^2 / (R-r) \quad (15)$$

Від нахилу площини розташування наконечників відносно вертикальної площини (рис. 10б) виникає похибка:

$$\delta_d = e^2 / 2(D-d) \quad (16)$$

Як видно з наведених відношень, у більшості випадків вказані похибки є величинами 2-го порядку малості, але їх необхідно враховувати на етапах проектування пристроїв для підведення та орієнтації виміральної оснастки у робочому положенні.

3. Висновки

Метрологічні характеристики системи активного контролю значною мірою залежать від принципу відслідковування інформативного параметру та конструктивних особливостей пристрою передачі цього параметру на первинний перетворювач виміральної головки.

Значний вплив на ефективність роботи автоматичної системи може спричинити дія температури, яка є нестійною і яку важко враховувати. Тому на етапі розроблення засобів вимірювання слід передбачити можливість захисту або компенсації похибок, що вносяться під дією зміни температури.

Точність позиціонування вимірвальних наконечників на поверхні залежить не тільки від схеми контролю і виконання виміральної оснастки, але й від цілого ряду зовнішніх чинників, включно з технологічними режимами оброблення та ступенем автоматизації операції, що вимагає обов'язкового регламентування кількості підналагоджень технологічної системи протягом зміни.

Завдяки

Робота створена в рамках проекту *PL-NTU Прикордонного обміну досвідом* PBU.03.01.00-06-386/11-00, фінансованих в рамках Програми Транскордонного Співробітництва Польща–Білорусь–Україна 2007–2013 фінансується Європейським Союзом в рамках Європейського Інструменту Сусідства та Партнерства.

Ця публікація була створена за допомогою Європейського Союзу. Відповідальність за зміст цієї публікації лежить на Павлові Шолом, і жодним чином не може розглядатися як відображення поглядів Європейського Союзу.

Naukovi notatky: mizhvuziv's'kyi zbirnyk, Luts'k: LDTU. Vypusk 20(2), 2007, 114-117 (in Ukrainian).

- [3] Sobolev M.P., Etingof M.I.: *Avtomaticheskiy razmernyy kontrol' na metallozhushchikh stankakh*. Smolensk, „Oykumena”, 2005 (in Russian).
- [4] Sorochkin B.M.: *Avtomatizatsiya izmereniy i kontrolya razmerov detaley*. Mashinostroyeniye. Leningr. otd-niye, 1990 (in Russian).

Mgr inż. Pawło Szolom
e-mail: Sholom_Pavlo@mail.ru



Магістр інж. Павло Шолом
e-mail: Sholom_Pavlo@mail.ru

Ukończył studia na Wydziale Informatyki i Technologii Informatycznej na Narodowym Uniwersytecie Technicznym w Łucku, specjalność „Systemy i Sieci Komputerowe”. Od 2012 roku asystent Katedry Inżynierii Komputerowej oraz absolwent studiów doktoranckich Katedry Konstrukcji Przyrządów na Narodowym Uniwersytecie Technicznym w Łucku. Naukowa działalność koncentruje się w obszarach takich jak: automatyzacja procesów, narzędzia i metody pomiaru wielkości mechanicznych, inżynieria oprogramowania.

Zakінчив факультет комп'ютерних наук та інформаційних технологій Луцького НТУ за спеціальністю «Комп'ютерні системи та мережі». З 2012 року асистент кафедри комп'ютерної інженерії та аспірант кафедри приладобудування Луцького НТУ. Наукова діяльність зосереджена в таких галузях, як автоматизація виробничих процесів, прилади та методи вимірювання механічних величин, інженерія програмного забезпечення.