

Metody badań błędów ruchów technologicznych precyzyjnych centrów tokarskich CNC

Robert Jastrzębski*, Tadeusz Kowalski**, Paweł Osówniak*, Anna Szepeke*

*Centrum Badawczo-Konstrukcyjne Obrabiarek Sp. z o.o.

**Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji

Streszczenie: Artykuł prezentuje wyniki części prac, których celem była ocena dokładności technologicznej precyzyjnych tokarek i centrów tokarskich CNC. Przedstawiono przykłady metod badań dokładności nastawianych ruchów technologicznych (posuwowych, obrotowych, interpolowanych), na podstawie których można ocenić wpływ błędów tych ruchów na dokładność różnych rodzajów obróbki wykorzystujących złożenie ruchów posuwowych, posuwowych i obrotowych, synchronizacji ruchów. Omówiono metody, dzięki którym można diagnozować przyczyny powstawania błędów tego rodzaju obróbki, a mianowicie dokładność nastawionego ruchu. Dokładność ta nie zależy tylko od dokładności geometrycznej, pozycjonowania, ale także od możliwości i ustawionych parametrów działania układów regulacji. Opisano przykłady metod badań:

- dokładności i równomierności nastawionej prędkości obrotowej wrzecion
- błędów odzwierciedlenia zadanej trajektorii ruchów interpolowanych
- błędnych ruchów wirującego przedmiotu zamocowanego w uchwycie.

Przedstawiono przykłady diagnostyki błędów ruchów technologicznych i ich przyczyn na podstawie opisanych metod badań.

Słowa kluczowe: centrum tokarskie CNC, błędy ruchów technologicznych, metody badań, dokładność obróbki, diagnostyka obrabiarek

1. Wstęp

Współczesne centra tokarskie mają coraz więcej możliwości i pozwalają na wykonywanie wielu operacji obróbkowych wynikających ze złożenia różnych rodzajów zadanych ruchów technologicznych. Przykładowo są to: toczenie powierzchni krzywoliniowych (ruchy interpolowane osi posuwowych),

- frezowanie i wiercenie po obwodzie narzędziami obrotowymi (ruch złożony osi posuwowej i obrotowej),
- obróbka z przechwytem przez wrzeciono przechwytyjące (synchronizacja obrotów wrzecion),
- wysokowydajne „toczenie” wielokątów (synchronizacja stałego przełożenia obrotu wrzeciona i narzędzia obrotowego z jednoczesnym ruchem posuwowym narzędzia),
- obróbka gwintów falistych (synchronizacja obrotów wrzeciona z cyklicznym ruchem nawrotnym osi X i posuwem osi Z).

Operacje te wykorzystują złożenie różnych ruchów technologicznych posuwowych i obrotowych dla uzyskania żądanej trajektorii skrawania (styku narzędzia z przedmiotem obra-

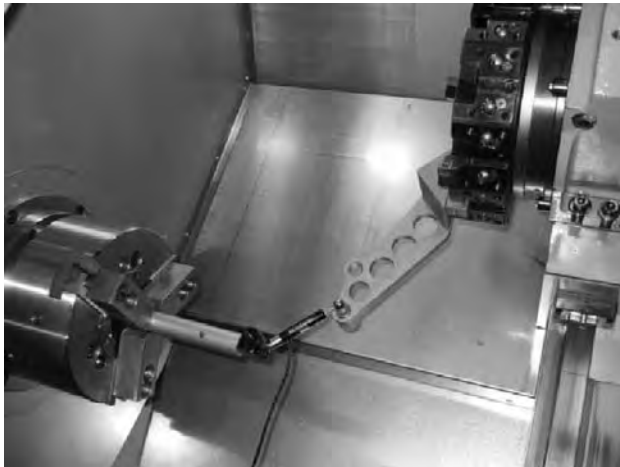
bianym). Dla tego typu rodzajów obróbki, nawet przy wysokiej dokładności geometrycznej i pozycjonowania maszyny, mogą powstać znaczne błędy obróbki, wynikające z dynamiki ruchu i działania układów regulacji. Nie ma jednoznacznej definicji precyzyjnych tokarek i centrów tokarskich. Polska norma PN-M-55651:1994 „Warunki odbioru tokarek kłowych – badanie dokładności” dzieli tokarki na precyzyjne i pozostałe, na podstawie ujętych w tej normie dopuszczalnych odchyłek dokładności geometrycznej. Poszczególne odchyłki dokładności geometrycznej dla tokarek precyzyjnych wg tej normy w większości przypadków nie przekraczają wartości od 0,01 mm do 0,02/300 mm. Współcześnie wytwarzane typowe tokarki CNC muszą co najmniej spełniać wymagania tej normy określone w klasie precyzyjne, aby sprostać wymaganiom klientów. Jednak wysoka dokładność geometryczna tokarek nie jest warunkiem wystarczającym dla zapewnienia dokładności obróbki, jest tylko jedną z właściwości obrabiarki wpływających na jej dokładność technologiczną. Nie mniej ważne są właściwości konstrukcyjne statyczne, kinematyczne, dynamiczne oraz cieplne obrabiarek. Wszystkie te właściwości wpływają wspólnie, w sposób złożony, na dokładność i precyzję obróbki. Wysoka dokładność i powtarzalność jednego rodzaju obróbki nie musi przekładać się na dokładność i powtarzalność innego rodzaju obróbki na tej samej tokarce, ponieważ w zależności od jej rodzaju różne czynniki mają decydujący wpływ na dokładność. Dla podanych na wstępie przykładowych rodzajów obróbki czynnikiem najczęściej decydującym o dokładności jest utrzymanie zadanych parametrów ruchów technologicznych, gdyż na podstawie błędów kształtu przedmiotu obrobionego wynikających z ruchów interpolowanych, synchronizowanych, nie jesteśmy w stanie ocenić, co jest główną przyczyną błędów – błędy obrotu przedmiotu, błędy obrotu narzędzia, czy błędy nastawionego posuwu osi X, Z lub ruchu interpolowanego.

Celem artykułu jest przedstawienie metod badań, którymi można zweryfikować dokładność realizacji nastawianych ruchów technologicznych, aby móc ocenić podstawowe przyczyny błędów złożonych ruchów technologicznych oraz mieć narzędzia do oceny przeprowadzanych regulacji.

2. Wybór metod badań

Tokarki wyróżniają się tym od innych obrabiarek, że z wrzecionem wiruje przedmiot obrabiany, a nie narzędzie, a ruchy posuwowe narzędzia realizowane są na płaszczyźnie XZ, nie w przestrzeni. Powoduje to różnice w podejściu do analizy błędów, w porównaniu z innymi obrabiarkami, a wyznaczane w metodach badań wskaźniki dokładności nie przekładają

się w ten sam sposób na błędy obróbki, jak np. w obrabiarkach typu frezarka. Przykładowo, wskaźnik kołowości w znanym teście interpolacji kołowej osi posuwowych w tokarkach dotyczy płaszczyzny XZ, a okrągłość toczonego np. wałka uzyskujemy w płaszczyźnie XY (rys. 1). Wskaźnik ten nie przekłada się wprost na błędy obróbki toczonych przedmiotów. Dodatkowo, w tokarkach ten sam błąd nastawionej pozycji na kierunku X (prostopadłym do osi wirowania przedmiotu) powoduje podwojony błąd dokładności wykonania (średnica). Niezależnie jednak od tego, z punktu widzenia diagnostyki i regulacji, test interpolacji kołowej jest tak samo przydatny dla tokarek, jak i dla innych obrabiarek.



Rys. 1. Płaszczyzna testu interpolacji kołowej XZ w tokarce prostopadła do płaszczyzny obrotu wrzeciona (toczenia) XY

Fig. 1. Circular interpolation plane XZ test in a lathe perpendicular to the spindle rotation (turning) XY plane

Analizy statystyczne, przeprowadzonych w CBKO w latach 2003–2011, testów interpolacji kołowej dla ok. 150 tokarek potwierdziły, że wskaźnik kołowości z tego testu jest średnio kilkukrotnie większy niż uzyskiwana dokładność średnic toczonych. Do oceny dokładności obróbki na tokarce na podstawie testu interpolacji kołowej powinny być wykorzystywane lub opracowane inne wskaźniki [3].

Do badań błędów ruchów technologicznych, tam gdzie błędy te mogą być podstawową przyczyną błędów obróbki, wybrano kilka metod badań.

Test interpolacji kołowej osi posuwowych tokarki

Metoda przydatna do oceny błędów trajektorii ruchu interpolowanego osi posuwowych (np. toczenia kształtowego, toczenia gwintów falistych) w zakresie błędów dynamiki ruchu (nadażania, nawrotu), błędów odwzorowania konturu (wynikających z nieprostoliniowości, nieprostokątności, różnicy skali, błędów cyklicznych), analizy wpływu stosowanych regulatorów i ich nastaw na błędy zadanej trajektorii ruchu interpolowanego.

Pomiar dokładności i równomierności zadanych prędkości osi obrotowych

Metoda przydatna do oceny błędów tych rodzajów obróbki, w których zachodzi synchronizacja: prędkości dwóch wrzecion (np. obróbka z przechwytem przedmiotu), stałego przełożenia prędkości wrzeciona i narzędzia (np. obróbka

wielokątów) lub prędkości wrzeciona i zadanej trajektorii osi posuwowej (np. obróbka gwintów falistych). Metodę można zastosować w zakresie oceny błędów prędkości i ich wpływu na uzyskiwane kształty [1].

Pomiar błędnych ruchów wirującego przedmiotu

Metoda stosowana do pomiaru ruchów promieniowych, kątowych i wzdłużnych zamocowanego przedmiotu i oceny błędów mimośrodowości mocowania przedmiotu względem osi obrotu wrzeciona, zmian położenia osi obrotu wrzeciona względem narzędzia w funkcji kąta obrotu, dryftów temperaturowych, przydatna do oceny np. błędów frezowania po obwodzie narzędziami obrotowymi, oceny błędów owalności przy toczeniu w płaszczyźnie toczenia, błędów mimośrodowości mocowania względem osi obrotu, wpływających na dokładność odwzorowanego kształtu w kierunku promieniowym, określenia możliwej do uzyskania chropowatości dla danej prędkości obrotów, błędów odkształceń cieplnych itd. [2].

Jednocześnie metoda umożliwia ocenę jakości montażu wrzecion, stanu i dokładności łożysk po zmontowaniu, stanu zużycia, wykrywania luzów [1].

Wybór, dokładność i parametry metod należy dostosować do wymagań dokładności wykonywanego zadania obróbkowego. Poniższy przykład przedstawia problem toczenia na tokarce kształtu kuli o promieniu 40 mm z odchyłką nie gorszą niż 30 μm . Pomiary wykazywały błędy kształtu 40–50 μm . Przy toczeniu kuli realizowane są ruchy technologiczne – interpolacji po okręgu osi posuwowych i ruch obrotowy zamocowanego w uchwycie przedmiotu. Okrągłość toczonych kul wynika tu głównie z dokładności realizacji zadanych ruchów technologicznych. Błędy w płaszczyźnie ruchów posuwowych XZ wynikają z sumy błędów powodujących błędy trajektorii – nadażania i geometrycznych wpływających na odwzorowanie konturu, a w płaszczyźnie toczenia XY z sumy błędnych ruchów wirującej osi wrzeciona i odwzorowania konturu. Wynika stąd, że aby oszacować błędy kształtu toczzonej kuli, należy zastosować dwie metody – test interpolacji kołowej i pomiar błędnych ruchów wirujących osi. Wskazane jest, aby test interpolacji kołowej przeprowadzić tak, by prędkość ruchu interpolowanego o zadanym promieniu odpowiadała prędkości przy obróbce kuli, wtedy dość wiarygodnie można oszacować spodziewane błędy kształtu toczzonej kuli w płaszczyźnie XZ. Błąd odwzorowania kształtu wynikający z błędów nadażania podanych w milisekundach można obliczyć dzieląc prędkość ruchu interpolowanego przez uzyskany czas błędu nadażania, a błędy odwzorowania konturu można oszacować na podstawie analizy poszczególnych błędów wyznaczanych testem interpolacji. Natomiast w płaszczyźnie toczenia na owalność toczzonej kuli wpływa dodatkowo wprost błąd synchroniczny ruchów promieniowych wirującej osi, dla zadanej prędkości obrotowej toczenia. Typowe błędy nastawienia prędkości obrotowej wrzeciona nie mają w tym przypadku większego znaczenia. Przeprowadzone pomiary wykazały następujące błędy ruchów:

- z testu interpolacji kołowej dla $r = 50$ mm i $V = 5000$ mm/min najbardziej istotne to: błąd nadażania 0,5 ms i błędy wpływające na odwzorowanie konturu: luz zwrotny 3 μm , nieprostokątności osi 80 $\mu\text{m}/\text{m}$, co daje owal 4 μm przy $\varphi = 100$ mm i różnicy skali 11 μm przy $\varphi = 100$ mm,

- z testu błędnych ruchów wirującej osi najbardziej istotny błąd to promieniowy błąd synchroniczny ok. 6 μm .

Obliczając wynikające stąd błędy trajektorii styku narzędzia z przedmiotem przekładające się na błędy kształtu kuli toczonej, otrzymujemy:

- z błędu nadążania maksymalny błąd trajektorii w płaszczyźnie XZ wynosi:

$$\Delta_{\text{nadążXZ}} = 5000 \text{ mm/min} \cdot 0,5 \text{ ms} / 60\,000 \text{ ms} = 41,7 \mu\text{m}$$

- z błędów odwzorowania konturu, składając je jako pierwiastek z sumy kwadratów, oraz przeliczając na kulę $\varnothing 80$, otrzymujemy:

$$\Delta_{\text{kontXZ i XY}} \approx 6 \mu\text{m}$$

- błąd synchroniczny ruchów promieniowych wirującej osi przekłada się bezpośrednio na błąd trajektorii, powodujący owal toczonej powierzchni w płaszczyźnie toczenia XY:

$$\Delta_{\text{synchronXY}} \approx 6 \mu\text{m}$$

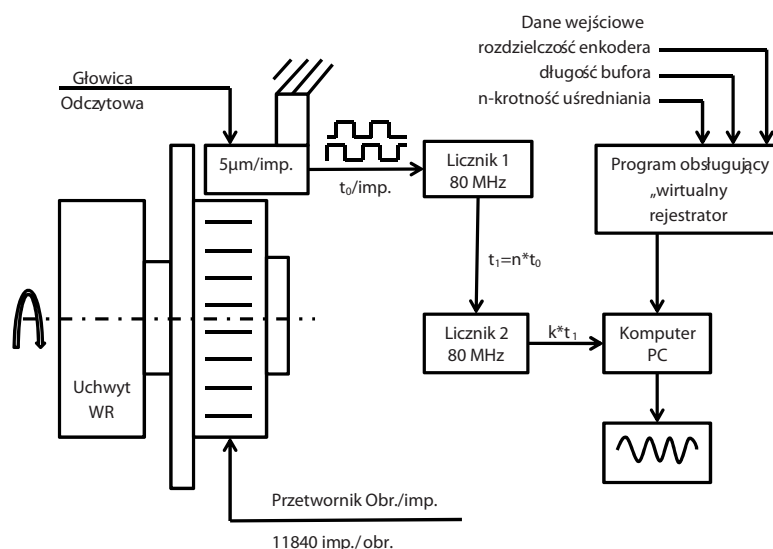
Z przeprowadzonej analizy wynika, że w płaszczyźnie toczenia XY postawione wymagania jest spełnione – błędy kształtu kuli nie przekraczają 0,01 mm, natomiast w płaszczyźnie XZ nie jest spełnione – kula wzdłuż osi Z jest w jednej połowie spłaszczone, w drugiej zbyt wypukła. Z analizy błędów ruchów technologicznych wynika, że problem tkwił w za dużym błędzie nadążania ruchu interpolowanego, przy zadanej prędkości 5000 mm/obr. Rozwiązaniem

jest zmniejszenie prędkości ruchu interpolowanego lub optymalizacja wzmocnień serwonapędów dla zadanej prędkości obróbki, jeśli ma być utrzymana wydajność obróbki. Napędy optymalizowano prawdopodobnie dla znacznie mniejszych prędkości, lub wcale, pozostawiając ustawienia standardowe. Ponieważ metoda testu interpolacji kołowej osi posuwowych jest stosunkowo dobrze znana, poza zamieszczonymi uwagami dotyczącymi specyfiki zastosowania na tokarkach, nie będzie dalej omawiana, natomiast szerzej omówione zostaną przykłady zastosowania pozostałych dwóch wymienionych metod.

3. Metoda pomiaru dokładności i równomierności nastawionej prędkości obrotowej

Dla potrzeb badań odchyłek chwilowych od zadanej prędkości obrotowej, pomiary prędkości w odstępach czasu wyższych od 1 ms są nieprzydatne, zbyt mocno uśrednione, dla zjawisk zachodzących przy obróbce. Natomiast dla dokładnego pomiaru chwilowej prędkości obrotowej na drodze kątowej ułamka obrotu przy prędkościach obrotowych stosowanych do obróbki skrawaniem na tokarce, pojawia się problem bar-

dzo dokładnego pomiaru drogi i bardzo krótkich odcinków czasu (rzędu nanometrów i nanosekund). Przykładowo: dla 1000 obr/min i tylko dla 60 pkt/obr, czas pomiaru 1/60 obrotu wynosi 1 ms. Dla zachowania dokładności 0,01 % (0,1 obr/min przy 1000 obr/min) czas 1/60 obrotu należy zmierzyć z dokładnością rzędu ns, a wymagana dokładność pomiaru prędkości będzie zachowana przy odmierzaniu czasu z bardzo dokładnych odcinków drogi. Rozwiązano to następująco: zastosowano enkoder z pomiarem optycznym bezstykowym o 11 840 imp/obr, o dokładności $7''/360^\circ$ i rozdzielczości impulsów co 5 μm . Dokładność pomiaru drogi dla pełnego obrotu wynosi 0,18 μm , a na impuls jest nie gorsza niż 0,001 μm (0,02 %/5 μm). Czas między impulsami mierzono metodą licznikową, wprowadzając standardowy sygnał



Rys. 2. Schemat pomiaru prędkości chwilowej wrzeciona WR

Fig. 2. Measurement of the instantaneous velocity diagram of the spindle

z enkodera na wejścia licznikowe stosowanej karty pomiarowej taktowane z częstotliwością 80 MHz. Daje to dokładność pomiaru czasu $\pm 6,25$ ns. Przy większych prędkościach nie uzyskano dostatecznie dokładnego pomiaru czasu. Problem rozwiązano stosując „kaskadowo” dwa dostępne liczniki karty w ten sposób, że na wejściowym liczniku zliczano deklarowaną liczbę n impulsów i tym samym wydłużono n-krotnie czas pomiaru, co przy zachowanej dokładności pomiaru czasu $\pm 6,25$ ns poprawia n-krotnie względną dokładność pomiaru. Czas z n impulsów wprowadzono jako 1 impuls na kolejny licznik 80 MHz. Wystarczyło to do zachowania wymaganej dokładności i liczby punktów/obr dla pomiaru prędkości chwilowej z rozdzielczością kątową pozwalającą na ocenę zjawisk przy obróbce na tokarkach z prędkościami do kilku tysięcy obr/min. Pomiary i obliczenia prędkości chwilowej obsługuje aplikację napisaną w środowisku LabVIEW. Metoda jest uniwersalna, pozwala wykorzystać każdy przetwornik obrotowo-impulsowy o standardowym sygnale TTL. Niepewność pomiaru prędkości zależy od dokładności i rozdzielczości zastosowanego przetwornika oraz podanej dokładności pomiaru czasu.

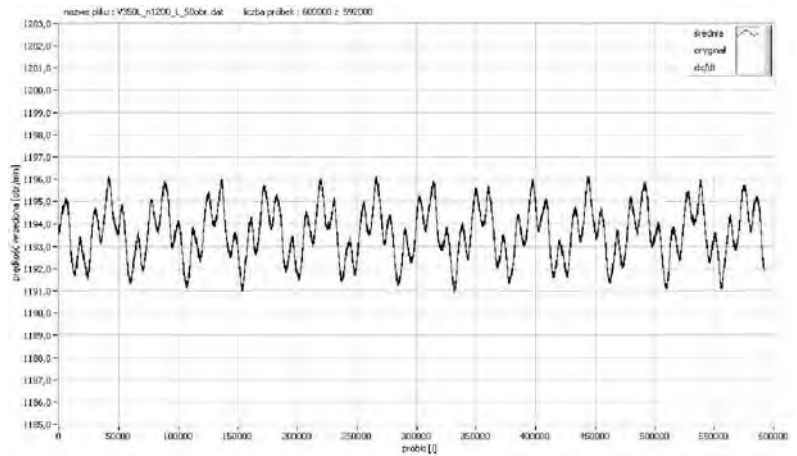
Rys. 2 przedstawia schemat zrealizowanego układu pomiarowego.

Przykład

Wpływ błędów chwilowej prędkości obrotowej wrzecion na dokładność położenia kąтового po przechwycie.

Obróbkę z przechwytem przedmiotu obrabianego przez drugie wrzeciono (tzw. przechwytyjące) stosuje się przy wysokowydajnej obróbce przedmiotów symetrycznych, obrabianych z obu stron. Przechwyt następuje bez zatrzymywania obrotów, przy jednoczesnej synchronizacji prędkości i położenia kąтового wirujących osi wrzecion. Jednym z istotnych czynników zachowania dokładności tej obróbki jest dokładność utrzymania położenia kąowego przedmiotu po przechwycie. Do oceny tej dokładności można zastosować przedstawioną metodę pomiaru dokładności i równomierności nastawionej prędkości obrotowej. Na rys. 3 przedstawiono wynik pomiaru prędkości obrotowej wrzeciona pracującego w trybie synchronizacji z wrzecionem przechwytyjącym dla nastawy 1200 obr/min (z 50 obrotów). Dla oceny mogących wystąpić błędów kątowych istotna jest równomierność prędkości, błąd wartości średniej w stosunku do nastawy nie ma tu znaczenia, gdyż wartości średnie prędkości dla obu wrzecion są w tym trybie pracy takie same. Natomiast w ciągłym procesie doregulowywania pozycji kątovej i prędkości występują chwilowe oscylacje wynikające z dynamiki ruchu i działania regulatorów prędkości. Wielkości tych zmian uwidocznił pomiar prędkości chwilowej.

Wpływ oscylacji w stanie synchronizacji na wzajemne kątove położenie wrzecion można oszacować przy założeniu, że prędkość jednego z wrzecion jest stała, a drugie przyspiesza jednostajnie na określonej drodze kątovej. Podstawa tych założeń wynika z analizy zarejestrowanych przebiegów prędkości obrotowej obu wrzecion w stanie synchronizacji, gdzie różnice między maksimum a minimum występowały w rozpa-



Rys. 3. Pomiar prędkości chwilowej wrzeciona pracującego w trybie synchronizacji obrotów z wrzecionem przechwytyjącym dla nastawy 1200 obr/min w czasie 2,5 s (50 obr/min)

Fig. 3. Measurement of the instantaneous speed spindle running in rotaries synchronization mode with counter spindle for setting 1200 rpm during 2,5 sec (50 rpm)

trywanym przypadku nie szybciej niż na drodze kątovej równej 1/2 obrotu. Zakładając prędkość początkową obu wrzecion jako zarejestrowaną minimalną $V_0=1191$ obr/min, po czym jedno z nich w ciągu 1/2 obrotu osiąga prędkość maksymalną $V_1=1196$ obr/min, można wyliczyć przyspieszenie:

$$a \left[\frac{\text{obr}}{\text{s}^2} \right] = \frac{V_1 - V_0}{t \cdot 60} = 3,32 \left[\frac{\text{obr}}{\text{s}^2} \right] \quad (1)$$

gdzie t to czas trwania 1/2 obrotu wrzeciona przy prędkości stałej V_0 , równej 1191 obr/min ($t=0,02519$ s).

Znając przyspieszenie i warunki początkowe, można wyliczyć drogę kątową, jaką przebędzie wrzeciono przyspieszające jednostajnie w czasie t :

Tab. 1. Wytyczne do diagnostyki wrzecion na podstawie opisanej metodyki

Tab. 1. Guidelines for diagnosis of spindles on the basis of the methodology described

Lp	Wyznaczane wskaźniki dokładności ruchu obrotowego wrzeciona	Powiązane błędy dokładności i jakości obróbki	Powiązane problemy źródłowe wynikające z konstrukcji wrzecion
1	Błąd średniej prędkości ruchu obrotowego wrzeciona pracującego w trybie nastawionych obrotów	Błędy kształtu obrabianych powierzchni metodami skojarzonego ruchu obrotowego przedmiotu i narzędzia	<ul style="list-style-type: none"> Błąd przełożenia przekładni wynikający z błędów rozstawu osi lub średnic kół Błąd nadążania wynikający ze złych nastaw regulatora prędkości
2	Błąd równomierności prędkości ruchu obrotowego wrzeciona pracującego w trybie nastawionych obrotów	Błędy kształtu obrabianych powierzchni metodami skojarzonego ruchu obrotowego przedmiotu i narzędzia Błędy podziału kątowego obrabianych przedmiotów przy stosowaniu obróbki z synchronizacją prędkości dwóch osi obrotowych	<ul style="list-style-type: none"> Błąd bicia promieniowego kół przekładniowych względem osi wrzeciona lub osi silnika napędowego Zbyt duże lub zbyt małe napięcie pasów przekładniowych Błąd współosiowości przetwornika obrotów i osi wrzeciona Zbyt mała prędkość działania układu regulacji prędkości
3	Błąd nastawionej prędkości ruchu obrotowego wrzeciona pracującego w trybie pozycjonowania kątowego	Błędy kształtu obrabianych powierzchni metodami skojarzonych ruchów osi posuwowej i obrotowej	<ul style="list-style-type: none"> Błąd przełożenia przekładni wynikający z błędów rozstawu osi lub średnic kół Błąd nadążania wynikający z za niskich wzmocnień regulatora prędkości lub za dużych oporów ruchu
4	Błąd równomierności prędkości ruchu obrotowego wrzeciona pracującego w trybie pozycjonowania kątowego	Błędy kształtu i falistość obrabianych powierzchni metodami skojarzonych ruchów osi posuwowych i obrotowej	<ul style="list-style-type: none"> Zbyt duże lub zbyt małe napięcie pasów przekładniowych Błąd bicia promieniowego kół przekładniowych względem osi wrzeciona lub osi silnika Błędy pozycjonowania przetwornika kąta obrotu Zmienne opory ruchu (wynikające np. z ustawionego zbyt dużego napięcia wstępnego łożysk)

$$s[^\circ] = \left(\frac{V_0}{60} \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2} \right) \cdot 360 = 180,379[^\circ] \quad (2)$$

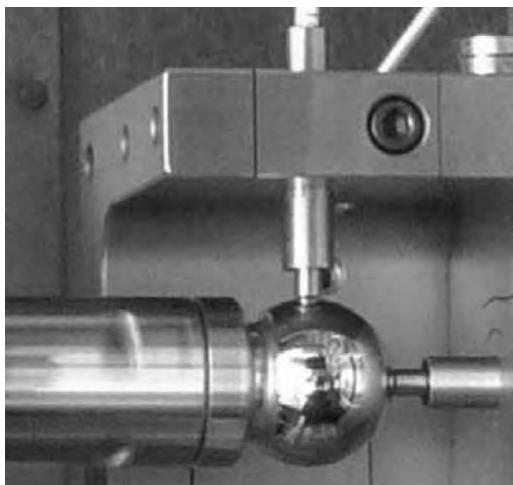
Różnica pozycji kątowej, jaka wytworzy się wtedy między dwoma wrzecionami, będzie równa 0,379°. Jeśli w tym momencie nastąpi zaciśnięcie się szczęk wrzeciona przechwytyjącego na przedmiocie pozostanie po przechwycie jako błąd. Różnicę tę można przyjąć dla 1200 obr/min, jako maksymalną składową błędu przechwytu od dokładności synchronizacji prędkości.

Wykorzystując przedstawioną metodę pomiaru prędkości chwilowych, oszacowano błędy obróbki od ruchów obrotowych dla wymienionych rodzajów obróbki (tab. 1):

- wysokowydajne „toczenie” wielokątów [5],
- obróbka gwintów falistych,
- opisana obróbka z przechwytem.

4. Pomiar błędnych ruchów wirującego przedmiotu

Wirująca oś jest pojęciem teoretycznym, w rzeczywistości możemy mówić o chwilowych położeniach kątowych osi, wyznaczanych przez powierzchnie walcowe elementów obrotowych, ustalających te położenia z dokładnością wynikającą z ich błędów geometrycznych. Dodatkowo, przy większych prędkościach obrotowych znaczący udział w chwilowych położeniach osi mają siły pochodzące od dynamiki ruchu. Teoretyczną oś idealną można określić jako uśrednione położenie ze wszystkich położenia chwilowych. Metoda polega na takim pomiarze całkowitych ruchów promieniowych i osiowych wirującej osi, który eliminuje błędy geometryczne kształtu powierzchni pomiarowej przez stosowanie bardzo dokładnych trzpieni wzorcowych oraz eliminuje obliczeniowo mimośród powierzchni pomiarowej względem osi idealnej [2]. Mierzone są całkowite przemieszczenia promieniowe i osiowe w wybranym punkcie wzdłuż osi obrotowej w trzech prostopadłych kierunkach. Pomiaru dokonuje się bezstykowymi czujnikami przemieszczeń o dużej szybkości działania, względem wirującego trzpienia wzorcowego reprezentującego zamocowany w uchwycie przedmiot (rys. 4).

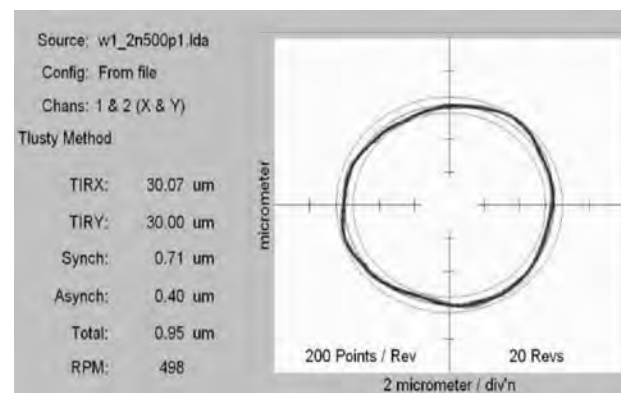


Rys. 4. Pomiar błędów ruchu wirującego przedmiotu
Fig. 4. Measurement rotating workpiece movement errors

Przy pomiarach błędów ruchu osi bezpośrednio mierzony jest parametr nazywany TIR (*Total Indicator Reading*), na podstawie którego wyznaczamy błędy ruchu. Pomocny jest on także do sumarycznej analizy dokładności i diagnostyki wrzecion. Reprezentuje maksymalne zarejestrowane przemieszczenia na kierunku ustawienia czujnika przemieszczeń. Wyznaczony parametr TIR zawiera:

- mimośród powierzchni pomiarowej względem uśrednionej osi obrotu,
- błędy geometryczne powierzchni pomiarowej,
- statyczne błędy ruchów osi, na kierunku pomiaru od zmian położenia kątowych,
- statyczne błędy ruchów osi, na kierunku pomiaru od zmian położenia kątowych,
- przemieszczenia dynamiczne osi wynikające z niewyważenia, sztywności, właściwości dynamicznych (np. częstotliwość drgań własnych), sumujące się ze statycznymi błędami przemieszczeń osi dla chwilowych położenia kątowych,
- szumy pomiarowe.

Aby wyznaczyć błędy ruchu samej osi, należy wyeliminować inne błędy. Szumy pomiarowe i błędy geometryczne powierzchni pomiarowej minimalizujemy poprzez dobór wyposażenia, odpowiednich zakresów pomiarowych i dokładność trzpieni wzorcowych. Dla wyznaczenia ruchów samej osi eliminujemy obliczeniowo mimośrodowość mocowania trzpienia wzorcowego względem uśrednionej osi obrotu, wynikający z błędów oprawek, uchwytów, błędów geometrycznych powierzchni mocujących.



Rys. 5. Błędy ruchu osi obrotu
Fig. 5. Axis motion errors

Uśrednione położenie osi reprezentowane jest przez środkowy okrąg (rys. 5). Przy bezbłędnym ruchu obrotowym wrzeciona (i braku błędów wynikających z techniki pomiarowej) wykres ruchów promieniowych osi pokrywałby się z wyliczonym okręgiem, reprezentującym mimośród powierzchni pomiarowej względem uśrednionej osi obrotu. Skalę wykresu dobiera się tak, aby uwidocznić odchyłki od tego okręgu (przy rzeczywistych pomiarach mimośród jest najczęściej znacznie większy od występujących błędów ruchów osi). Odchyłki te spowodowane są błędami ruchu osi. Błędy ruchu osi określane są poprzez błąd synchroniczny, asynchroniczny, całkowity, odchyłki kątowe i dryfty temperaturowe, w kierunkach promieniowym i osiowym. Metoda pozwala analizować wiele błędów obróbki wynikających z niechcia-



Rys. 6. Gwint falisty wykonany na tokarce uniwersalnej
Fig. 6. Rope thread made on the standard lathe

nych, poza realizowanym ruchem obrotowym, przemieszczeń zamocowanego we wrzecionie tokarki przedmiotu (tab. 2).

Jednym z najbardziej wymagających i charakterystycznych rodzajów obróbki na tokarce wymagających złożenia kilku ruchów technologicznych jest obróbka gwintów falistych. Aby otrzymać zarys gwintu falistego potrzebna jest synchronizacja trzech ruchów: stałego posuwu osi Z, stałych obrotów wrzeciona i ruchu posuwisto-zwrotnego osi poprzecznej X odwzorowującej zarys gwintu w każdym obrocie (rys. 6).

Problem utrzymania dokładności zarysu gwintu wynika tu głównie z dynamiki zadanych ruchów technologicznych i zmiennych obciążen ze względu na zmiany głębokości skra-

wania (typowo ok. 2 mm), cyklicznie dla każdego obrotu wrzeciona [4]. Aby wydajność tej obróbki była zadowalająca należy stosować prędkość co najmniej 8–10 obr/s. Największe wymagania dotyczą osi X, która musi odtworzyć w czasie każdego obrotu wrzeciona zarys składający się z 6 trwających po ok. 17–20 ms:

- interpolacja kołowa o promieniu zarysu głowy gwintu ze zmianą posuwu od „0” do „p”,
- interpolacja liniowa z osią Z, z posuwem zadany „p”,
- interpolacja kołowa o promieniu zarysu wrębu gwintu od „p” do „0”,
- interpolacja kołowa o promieniu zarysu wrębu gwintu od „0” do „-p”,
- interpolacja liniowa z osią Z, z prędkością „-p” (przeciwny kierunek),
- interpolacja kołowa o promieniu zarysu głowy gwintu od „-p” do „0”.

Jeśli błąd zarysu wykonanego gwintu przekracza wartości dopuszczalne, to trudno stwierdzić, które z błędów są najbardziej istotne: błąd nadążania ruchu nawrotnego osi X, błąd równomierności posuwu osi Z, błąd równomierności obrotów wrzeciona, błędy przemieszczeń promieniowych obracającego się przedmiotu (błąd synchroniczny osi i mimośród oprawki uchwytu, który może sięgać dla tulejek sprężystych do 50 μm). Przy opisanym rodzaju obróbki inne błędy tokarki, poza wymienionymi błędami ruchów technologicznych, są co najmniej o rząd wielkości mniejsze i nie mają istotnego znaczenia (błędy zarysu gwintu wynikające z wymienionych

Tab. 2. Wytyczne do oceny dokładności obróbki i pracy wrzecion wg opisanej metodyki [1]

Tab. 2. Guidelines to evaluate the accuracy of spindles machining and working by described methodology

Lp	Wyznaczane parametry ruchu wrzeciona wg opisanej metodyki	Powiązane błędy dokładności i jakości obróbki	Powiązane problemy źródłowe pracy wrzecion
1	Błąd synchroniczny promieniowy	Błąd okrągłości obrabianej powierzchni	Błąd okrągłości: – bieżni łożysk, – obsady łożysk Błąd ustawienia obsady łożysk
2	Błąd synchroniczny promieniowy – uskoki promieniowe na wykresach błędów osiowych lub promieniowych	Pogorszenie jakości obrabianej powierzchni	Prawdopodobne uszkodzenia bieżni łożysk
3	Błąd asynchroniczny promieniowy	Pogorszenie jakości obrabianej powierzchni przy niektórych prędkościach	Niedostateczna sztywność lub niewyważenie Częstotliwości rezonansowe maszyny Luzy promieniowe
4	Błąd synchroniczny osiowy	Błąd jakości obrabianej powierzchni	Niewłaściwe napięcie wstępne łożysk Błędy ustawienia obsady łożysk
5	Błąd asynchroniczny osiowy	Pogorszenie jakości obrabianej powierzchni przy niektórych prędkościach	Niedostateczna sztywność lub niewyważenie Częstotliwości rezonansowe maszyny Luzy osiowe
6	Całkowite mierzone przemieszczenie promieniowe lub osiowe (TIR)	Pogorszenie jakości obrabianej powierzchni Błędy dokładności obróbki ruchów interpolowanych	Znaczna mimośrodowość oprawek lub szczęk uchwytów względem osi obrotu wrzecion
7	Znaczne zmiany całkowitego mierzonego przemieszczenia promieniowego lub osiowego (TIR) w funkcji obrotów	Pogorszenie jakości obrabianej powierzchni Szybsze zużycie płytek skrawających Błędy dokładności obróbki	Luzy osiowe i promieniowe w obsadach łożysk
8	Zmiana w czasie pozycji przedmiotu obrabianego względem narzędzia – dryft temperaturowy	Błędy dokładności i powtarzalności obrabianej powierzchni	Wskutek: – zbyt dużego napięcia wstępnego łożysk, – za ciasnego pasowania łożysk, – zbyt małej efektywności chłodzenia elektrowrzecion, powstają odkształcenia cieplne

błędów ruchów technologicznych mogą sięgać tu wielkości 50–150 μm). Jak łatwo zauważyć, omówione metody badań pozwalają na oszacowanie wielkości błędów dla zadanych parametrów obróbki i ustalenie dalszego toku postępowania dla uzyskania poprawnej geometrii zarysu – regulacje wzmocnień napędów, geometrii oprawek lub zmian parametrów obróbki. Przy przeprowadzonych próbach toczenia tego zarysu na tokarce uniwersalnej okazało się, że barierą zwiększenia wydajności jest szybkość działania zastosowanego układu sterowania, jego możliwości zmian nastaw regulatora.

5. Podsumowanie

Przy obecnych możliwościach i dążeniu do zwiększania wydajności obróbki centrów tokarskich błędy obróbki wynikające z dokładności utrzymania nastawionych ruchów technologicznych są coraz większym problemem.

Przedstawione trzy metody badań w mniemaniu autorów są najbardziej efektywne przy ocenie omawianych błędów ruchów technologicznych, gdyż pozwalają na ocenę wynikających z nich błędów obróbki oraz sprawdzanie efektów przeprowadzanych regulacji lub stosowania nowych rozwiązań regulacyjnych, a także na poznanie przyczyn powstawania tych błędów.

Wydaje się, że przy obecnym rozwoju metod obróbki skrawaniem, kontynuowanie prac nad rozwojem i dostosowywaniem metod badań dynamiki ruchu w obrabiarkach jest niezbędne.

Bibliografia

1. Jastrzębski R., Kowalski T., Osówniak P., Szepke A.: *Wykrywanie błędów montażu precyzyjnych szybkoobrotowych wrzecion obrabiarek*. „Mechanika – Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej”, Nr 83, 119–129.
2. Jemieliński K.: *Analiza błędnych ruchów wrzecion szybkoobrotowych*. „Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji”, Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska, Vol. 24, Nr 2/2004.
3. Jastrzębski R., Kowalski T., Osówniak P., Szepke A.: *Wyznaczanie dokładności urządzeń technologicznych metodą interpolacji kołowej*. „Technologia i Automatyzacja Montażu”, Nr 2 (68)/2010, 14–21.
4. Marchelek K.: *Dynamika obrabiarek*. WNT, Warszawa 1997.
5. Jastrzębski R., Niedbała M.: *Wysokowydajna obróbka wielokątów na uniwersalnej tokarce CNC*. „Projektowanie i konstrukcje inżynierskie”, nr 4 (43)/2011, 25–30.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009–2011 jako projekt badawczy.

Methods of testing of technological motion errors on precision CNC turning centers

Abstract: This article presents part of research with the object of evaluation of technological accuracy of precision lathes and CNC turning centers. Presented are examples of methods of accuracy testing of set technological motions (linear, rotary, interpolated),

on the basis of which one can evaluate the influence of errors of these motions on accuracy of various types of machining that are utilizing synchronization of linear, rotary motions. Discussed are methods which make it possible to diagnosis the causes of occurring errors of this kind of machining in which main causes of errors can be the accuracy of set motion. This accuracy can originate not only from geometrical accuracy of positioning, but also from capabilities and set parameters of control systems.

Described are the examples of testing methods of:

- accuracy and steadiness of set rotational speed of spindles,
- errors of performing of set trajectory of interpolated motions,
- error motions of rotating workpiece clamped in chuck.

Presented are examples of diagnosis of technological motion errors and their causes as based on described testing methods.

Keywords: CNC turning center, technological motion errors, testing methods, machining accuracy, machine tool diagnostics

mgr inż. Robert Jastrzębski

Pracownik Centrum Badawczo-Konstrukcyjnego Obrabiarek Sp. z o.o. w Pruszkowie – akredytowane laboratorium badawcze, badania maszyn technologicznych, diagnostyka obrabiarek.

e-mail: jastrzebski@cbko.pl



dr inż. Tadeusz Kowalski

Pracownik Politechniki Warszawskiej, Wydział Inżynierii Produkcji, Instytut Techniki Wytwarzania – techniki montażu maszyn, automatyzacja wytwarzania, konstrukcja obrabiarek, bezpieczeństwo pracy.

e-mail: T.Kowalski@vip.pw.edu.pl



mgr inż. Paweł Osówniak

Pracownik Centrum Badawczo-Konstrukcyjnego Obrabiarek Sp. z o.o. w Pruszkowie – sterowanie numeryczne obrabiarek, automatyka przemysłowa, diagnostyka obrabiarek, akredytowane laboratorium badawcze.

e-mail: osowniak@cbko.pl



mgr inż. Anna Szepke

Pracownik Centrum Badawczo-Konstrukcyjnego Obrabiarek Sp. z o.o. w Pruszkowie – akredytowane laboratorium badawcze, badania maszyn technologicznych, diagnostyka obrabiarek.

e-mail: obic@cbko.pl

