

Tadeusz OTKO¹, Wojciech ZĘBALA¹
Łukasz ŚLUSARCZYK¹

BADANIA WPLYWU DOKŁADNOŚCI UKŁADÓW POMIAROWYCH DROGI W OBRABIARKACH CNC NA DOKŁADNOŚĆ OBRÓBK

W obrabiarkach CNC układy przeniesienia napędu posuwów w poszczególnych osiach konstruowane są głównie na bazie przekładni śrubowych tocznych i enkoderów. Wartości przemieszczeń suportów wyznacza się w takich przypadkach w oparciu o przemieszczenie kątowne śruby i wartość jej skoku. Rozwiązanie to nie obejmuje błędów powstałych np.: na skutek odkształceń cieplnych śruby, zależnych m.in. od wartości sił skrawania, sił bezwładności, napięcia wstępnego i innych czynników. Aby wykazać, że odkształcenia cieplne śruby tocznej są istotne w zestawieniu z polami tolerancji, wymaganymi w obróbce dokładnej, wykonano testy sprawdzające, które potwierdziły istotność tych odkształceń w powstawaniu błędów przedmiotu obrabianego. Wskazano rozwiązanie zamkniętego układu regulacji (Closed Loop), kompensującego wpływ tych błędów na dokładność obróbki.

1. WSTĘP

Produktywność i wysoka dokładność obróbki decydują o konkurencyjności na rynku obrabiarek. W obróbce zgrubnej wymagana jest wysoka wydajność, podczas gdy w obróbce wykańczającej oczekuje się bardzo wysokiej dokładności. Przy frezowaniu np. kosztownych form, podczas obróbki zgrubnej stosowana jest obróbka wydajnościowa z wysokimi parametrami skrawania, a w efekcie obróbki wykańczającej oczekiwana jest m. in. bezbłędna powierzchnia przedmiotu obrobionego. Jednocześnie stosowane są małe odległości między sąsiednimi ścieżkami przejścia narzędzia, przy akceptowanych czasach obróbki [8].

Przy uwzględnieniu silnie zmieniających się parametrów skrawania w procesach obróbki, coraz większe znaczenie ma zagadnienie dokładności cieplnej. Szczególnie przy małych seriach, krótkich czasach obróbki, dużej zmienności parametrów skrawania trudno jest zapewnić wymaganą cieplną stabilność obrabiarki. Ciągła zmiana obróbki zgrubnej i wykańczającej, zwiększa wahania obciążenia i stanu cieplnego maszyny. Podczas obróbki zgrubnej moc skrawania np. przy frezowaniu wzrasta nawet powyżej 80% wartości mocy nominalnej, natomiast w obróbce wykańczającej wykorzystuje się zazwyczaj mniej niż 10% tej wartości.

¹ Politechnika Krakowska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji

Stale wzrastające prędkości posuwów, a tym samym sił podczas hamowań i przyspieszeń są odpowiedzialne za nagrzewanie się tocznych śrub pociągowych w liniowych napędach posuwów [5, 6]. Dlatego układ pomiaru rzeczywistego położenia suportu w zespołach napędu posuwu odgrywa ważną rolę przy stabilizacji cieplnej charakterystyki obrabiarek.

Dokładność obrabiarki zależy od założeń konstrukcyjnych, a zatem także w znacznej mierze zależy od zdolności kompensowania błędów spowodowanych zmiennymi warunkami realizowanych procesów obróbki. W układzie konstrukcyjnym obrabiarki powstają istotne zmiany obciążeń i temperatury spowodowane ciepłem generowanym w wyniku strat mocy, w układach przeniesienia napędu i na prowadnicach.

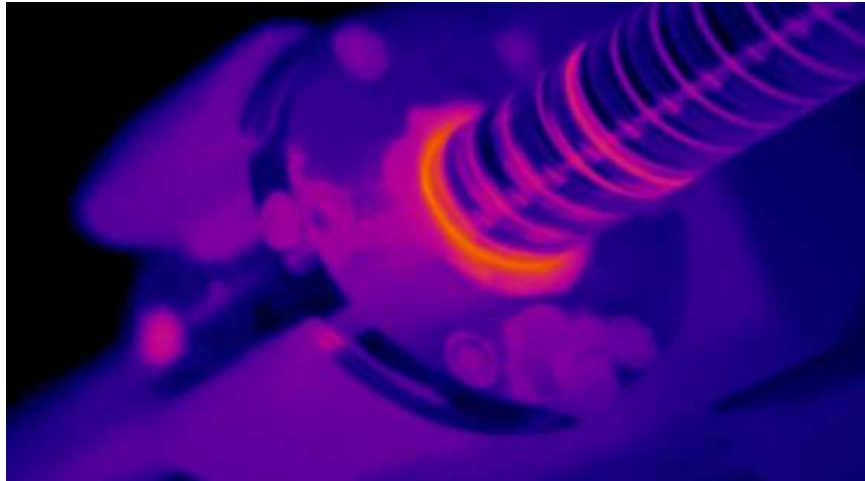
Na podstawie wstępnej analizy należy założyć, że znaczny udział w powstawaniu błędów cieplnych ma przetwarzanie energii elektrycznej na mechaniczną i straty tarcia w przeniesieniach napędu, które w trakcie realizacji dużych prędkości posuwów, dużych przyspieszeń, w warunkach wysokich wartości obciążeń od sił skrawania i bezwładności są silnie obciążane. Bez właściwie zaprojektowanych układów pomiaru położenia, odkształcenia cieplne powodują w krótkim czasie błędy pozycjonowania rzędu $100\mu\text{m}$, a więc porównywalne z polem tolerancji ze średnich zakresów wymiarów, dla typowych przedmiotów stosowanych w budowie maszyn [9].

Dokładność maszyny jest pojęciem ogólnym i aby je uszczegółowić, należy posługiwać się precyzyjniejszymi terminami, takimi jak: prostoliniowość posuwów, prostopadłość osi, błąd skoku śruby, luz zwrotny, prostopadłość wrzeciona, rozdzielczość pozycjonowania, rozdzielczość interpolatora, powtarzalność pozycjonowania, sztywność.

Na całkowity błąd ustalania położenia w obrabiarence CNC składa się suma wszystkich wymienionych błędów. Dodatkowo na niedokładność wpływa rozszerzalność cieplna materiałów. Dla stali wynosi ona około $0,01\text{ mm/m}$ na $^{\circ}\text{C}$; oznacza to, iż przy wzroście temperatury o 10°C , śruba posuwu wydłuży się o ok. $0,1\text{ mm/m}$. Ma to znaczenie przy obróbce przedmiotów wykonanych ze stali, pomimo, że stal ma podobną rozszerzalność do śruby, to ze względu na różnicę temperatur śruby tocznej i materiału obrabianego ich odkształcenia cieplne będą różne.

Zainteresowania konstruktorów obrabiarek, bardziej niż kiedykolwiek ogniskują się na rozwiązaniach zmierzających do zmniejszenia wpływu błędów cieplnych na dokładność wymiarowo-kształtową przedmiotu obrabianego. Współcześnie stosowane są takie rozwiązania jak: aktywne chłodzenie, symetryczna budowa struktury maszyny i systemy pomiaru temperatury w celu prognozowania przemieszczeń cieplnych [2].

Znaczące źródło odkształceń cieplnych stanowi m.in. napęd osi sterowanej numerycznie, skonstruowanej na bazie napędu śrubowo tocznego (śruby tocznej). W zależności od stosowanych prędkości posuwów, sił bezwładności i sił skrawania rozkłady temperaturowe w śrubach tocznych napędów posuwów mogą się szybko zmieniać. Powstające przy tym zmiany długości (typowe $100\mu\text{m/m}$ w przedziale czasowym ok. 20 minut) mogą mieć istotny wpływ na dokładność kształtowania przedmiotu obrabianego na obrabiarkach bez układów z kompensacją cieplnych zmian długości [4]. Na rys. 1 przedstawiono przykładowy wzrost temperatury śruby tocznej podczas wykorzystania napędu z prędkością $4,5\text{ m/min}$.



Rys. 1. Wzrost temperatury śruby tocznej podczas intensywnego wykorzystania napędu z prędkością 4,5 m/min. Obraz termograficzny ilustruje temperatury w zakresie (20– 40)°C (badania własne)

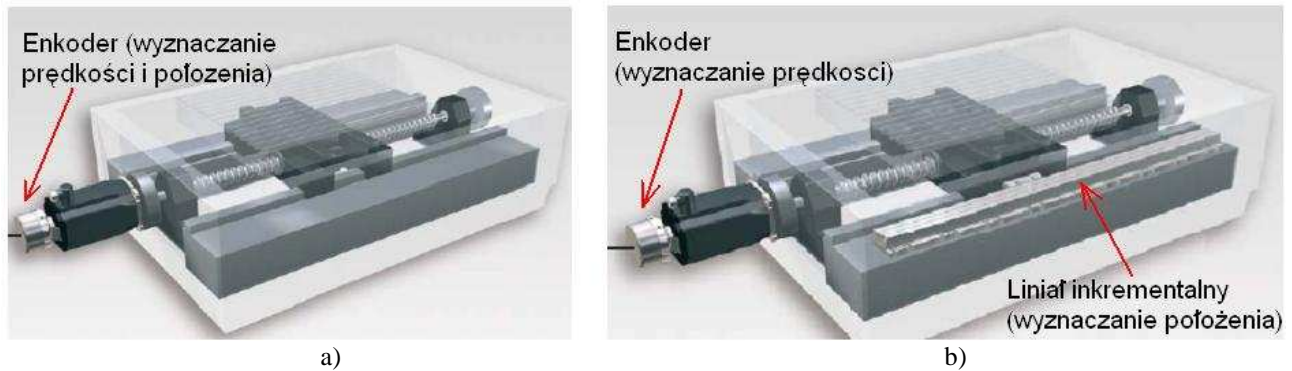
Fig. 1. Increase of ball screw temperature during intensive usage of drive with the speed 4,5 m/min. Thermographic image illustrates temperature in the range of (20– 40)°C (own researches)

2. WYZNACZANIE POŁOŻENIA SUPORTU W OSI STEROWANEJ NUMERYCZNIE

We współczesnych rozwiązaniach położenie suportu w osi sterowanej numerycznie, napędzanej śrubą toczną i połączonej z inkrementalnym czujnikiem położenia kąтового wyznacza się dwójako: a) z czujnika położenia kąтового po uwzględnieniu skoku śruby tocznej, b) z dodatkowego liniału inkrementalnego, zabudowanego w osi sterowanej numerycznie, zintegrowanego z systemem sterowania obrabiarki.

Jeśli położenie rzeczywiste wyznaczone jest przy uwzględnieniu skoku śruby tocznej na podstawie informacji uzyskanej z inkrementalnego czujnika położenia kąтового, to śruba toczna pełni tu dwie funkcje: jako element przeniesienia napędu musi przenosić znaczne siły, natomiast jako wzorzec długości układu pomiaru położenia powinna zapewniać wysoką dokładność i powtarzalność pozycjonowania. W pętli sprzężenia zwrotnego regulacji położenia w osi CNC zintegrowany jest czujnik położenia kąтового. W tym układzie zarówno zużycie śruby tocznej, jak i jej odkształcenia cieplne oraz sprężyste, pochodzące od zmiennych sił poosiowych w procesie przeniesienia napędu nie są na ogół uwzględniane i kompensowane. W takim przypadku będzie to quasi zamknięty obwód regulacji (*Semi-Closed Loop*) [4]. Błędy pozycjonowania są trudne do skompensowania i będą miały znaczący wpływ na dokładność wymiarowo-kształtową przedmiotu obrabianego.

W innym rozwiązaniu konstrukcyjnym zastosowany jest dodatkowo liniał inkrementalny, przeznaczony do pomiaru rzeczywistego położenia suportu w osi sterowanej numerycznie, rys. 2. Pomiar położenia w pętli regulacji obejmuje wszystkie czynniki wpływające na błąd pozycjonowania, pochodzące od zespołu mechanicznego w osi sterowanej numerycznie. Można wówczas mówić o pracy w całkowicie zamkniętej pętli regulacji położenia suportu (*Closed Loop*) [4].



Rys. 2. Oś sterowana numerycznie [4]: a) z inkrementalnym czujnikiem położenia kąowego. Czujnik wykorzystywany jest do wyznaczania pozycji suportu oraz sterowania prędkością posuwową, b) z inkrementalnym czujnikiem położenia kąowego oraz z liniałem inkrementalnym. Czujnik wykorzystywany jest do sterowania prędkością posuwową, a wyznaczanie pozycji suportu odbywa się na podstawie sygnału uzyskanego z liniału inkrementalnego

Fig. 2. CNC control axle [4]: a) with incremental indicator of angle position. The indicator is used to slide carriage position determination and feed speed control, b) with incremental indicator of angle position and incremental rule. The indicator is used to feed speed control and slide carriage position determination takes place with the help of a signal from incremental rule

Luzy, odkształcenia cieplne i odkształcenia w zakresie sprężystego oraz inne błędy w elementach przeniesienia napędów w obrabiarence nie mają tu istotnego wpływu na dokładność wyznaczania rzeczywistego położenia suportu. Dokładność pomiaru położenia suportu, w tym przypadku, zależy wyłącznie od dokładności liniału oraz od sposobu i miejsca jego zabudowy.

To samo podejście odnosi się również do zagadnienia określania dokładności pomiaru położenia osi obrotowych sterowanych numerycznie. Położenie kąowe zespołu obrotowego można wyznaczać pośrednio, przez przekładnię mechaniczną w połączeniu z inkrementalnym czujnikiem położenia kąowego lub przez zastosowanie dokładnego czujnika położenia kąowego, bezpośrednio zamontowanego na osi obrotowej sterowanej numerycznie, co znacznie zmniejsza błędy [2].

3. DODATKOWE ŚRODKI ZARADCZE STOSOWANE W SEMI CLOSED LOOP

W konstrukcji obrabiarki CNC stosowane są różnego typu zespoły i układy, będące źródłami ciepła. W procesach projektowania obrabiarek podejmuje się próby wyeliminowania oddziaływania ujemnych skutków lokalnych ośrodków podwyższonej temperatury na dokładność obróbki przez np. stosowanie układów chłodzących, czy też specjalnych silników napędowych [9]. Występowanie dużych gradientów temperatury w korpusie i układach przeniesienia napędu powoduje zmiany geometrii struktury obrabiarki. Aby zminimalizować ten niekorzystny fakt, projektanci poszukują takich rozwiązań konstrukcyjnych, które charakteryzowałyby się małym wpływem temperatury na dokładność obrabiarki. Na przykład śruby toczne w układach napędowych posuwów są w pewnych przypadkach drażone wzdłuż osi i chłodzone od środka, aby przeciwdziałać

rozgrzewaniu się śrub i współpracujących z nimi elementami korpusów. W układach z quasi zamkniętymi obwodami regulacji, dokładność pozycjonowania zależna od zmian cieplnych jest uwarunkowana zdolnością przewodzenia ciepła przez medium chłodzące. Przy żądaniu stawianemu układowi chłodzenia, zapewnienia wahań temperaturowych mniejszych niż 1K, tradycyjne układy chłodzenia szybko wykazują znamiona przeciążenia [2].

W niektórych rozwiązaniach z quasi zamkniętymi układami regulacji tworzony jest model odkształceń cieplnych śruby tocznej i poprzez wprowadzenie go do układu sterowania czynione są próby kompensacji błędu cieplnego.

W celu usztywnienia układu przeniesienia napędu posuwu zespół śruby tocznej jest niekiedy na sztywno łożyskowany na obu końcach (bez kompensacji luzu poosiowego). Rozszerzalności cieplnej nie da się jednak mimo tego uniknąć. Powstające w takim rozwiązaniu siły przyjmują znaczne wartości i powodują odkształcenia nawet najbardziej przesztynionego zespołu łożyskowania, mogąc powyginać elementy korpusu. W wyniku mechanicznych naprężeń zmienia się dodatkowo współczynnik tarcia w układzie przeniesienia napędu, co w konsekwencji ma duży wpływ na dokładność realizacji ścieżki narzędzia przez obrabiarkę CNC [2].

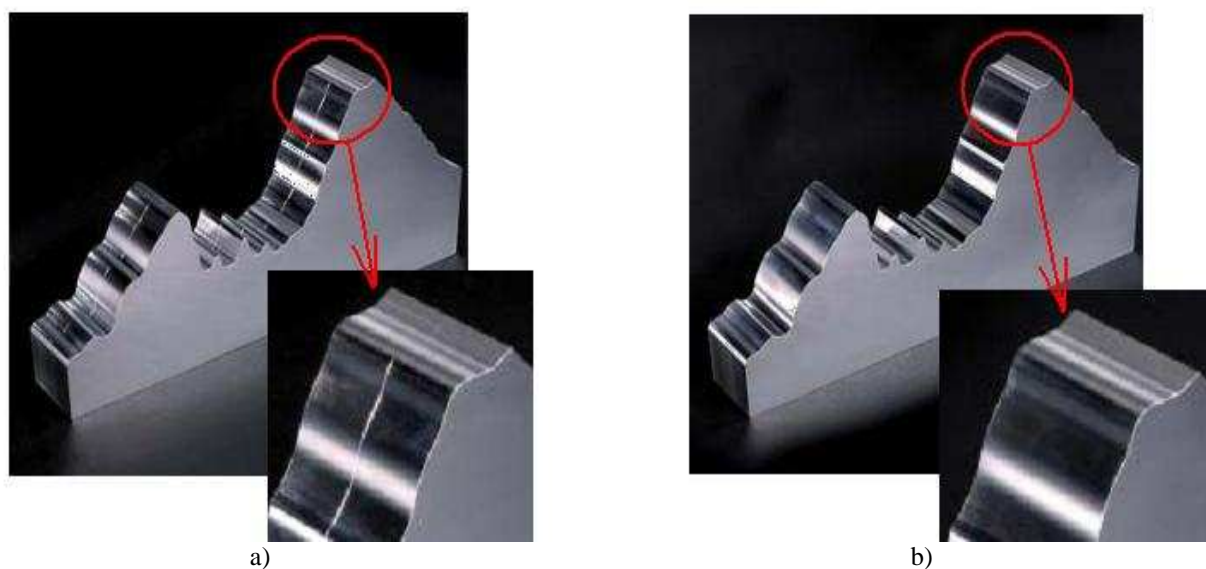
Na podstawie przytoczonych ograniczeń, przedstawione środki zaradcze stosowane w rozwiązaniach z quasi zamkniętymi układami regulacji i realizowane dokładności nie da się porównać z dokładnościami osiąganymi w napędach z zamkniętymi układami regulacji, z liniami inkrementalnymi. Wpływów pochodzących od zmian zużyciowych, od odkształceń cieplnych, sprężystych i niekiedy plastycznych elementów podzespołów mechanicznych nie da się całkowicie skompensować.

Rozgrzewanie śrub tocznych napędów posuwów w poszczególnych osiach maszynowych w znacznej mierze zależy od wartości posuwów zadanych w programie obróbkowym. Mogą przy tym powstawać zmiany długości śruby tocznej dochodzące do 150 $\mu\text{m}/\text{m}$. W warunkach quasi zamkniętego obwodu regulacji dokładność kształtu obrabianych form nie może być zapewniona. Podczas obróbki formy o długości ok. 150mm na skutek typowego odkształcenia cieplnego śruby, błędy cieplne mogą być większe niż 20 μm . Matryca o złożonym kształcie, wykonana w warunkach wydłużonej śruby tocznej będzie za duża i takiego błędu w ogóle nie da się już skorygować.

Na rys. 3. przedstawiono przykładowy przedmiot o skomplikowanej geometrii [2]. Przedmiot o długości 500mm był obrabiany strategią wierszowania, frezowany współbieżnie i przeciwbieżnie w osi X frezem trzpieniowym kulowym o średnicy 12mm i maksymalnym posuwem 4,5 m/min. Czas obróbki wynosił 60 minut przy dosuwach w osi Y i Z 0,2mm. Wysoka prędkość posuwowa oraz częste manewry przyspieszania i hamowania rozgrzały śrubę toczną, powodując jej wydłużenie, które w układzie quasi zamkniętego obwodu regulacji wyniosło 130 μm , rys. 3a. Aby sprostać wymogom wysokiej dokładności należy skompensować rozszerzalność cieplną śruby tocznej, stosując dokładny, zamknięty system pomiaru długości. Rys. 3b prezentuje przedmiot obrobiony z zastosowaniem zamkniętego układu regulacji (po prawej) w porównaniu do wariantu zamieszczonego obok, wykonanego w układzie regulacji quasi zamkniętego (po lewej stronie).

Źródła ciepła w obrabiarence są związane z węzłami strat mocy m.in. w silnikach napędu głównego i posuwów, układach hydraulicznych, sprzęgłach, łożyskach i przekładniach oraz z realizowanym procesem skrawania. Na obrabiarkę oddziałują również zewnętrzne

czynniki, generujące zmiany temperatury, do których zalicza się zmiany temperatury otoczenia, warstwowy rozkład temperatury w hali produkcyjnej, ciągi powietrzne oraz promieniowanie słoneczne. Wymuszone tymi czynnikami nagrzewanie obrabiarki zmienia przestrzenne pole izoterm struktury układu konstrukcyjnego i może w trakcie eksploatacji wywoływać znaczne jego odkształcenia, które w rezultacie prowadzą do zwiększenia względnych przemieszczeń między narzędziem i przedmiotem obrabianym. Przemieszczenia bezpośrednio powodują błędy obróbki, których udział w całkowitej odchyłce wymiaru obrabianego może sięgać nawet ponad 50% [1].



Rys. 3. Wyniki obróbki złożonego zarysu geometrycznego w dwóch układach regulacji: a) *Semi Closed Loop*. Widoczny błąd powierzchni spowodowany odkształceniem termicznym śruby tocznej, b) *Closed Loop*, powierzchnia pozbawiona błędów [2]

Fig. 3. The imitation of geometrical complicated outline in two control systems: a) *Semi Closed Loop*. Visible surface deviations, caused by thermal deformation of the ball screw, b) *Closed Loop*. Surface without deviations [2]

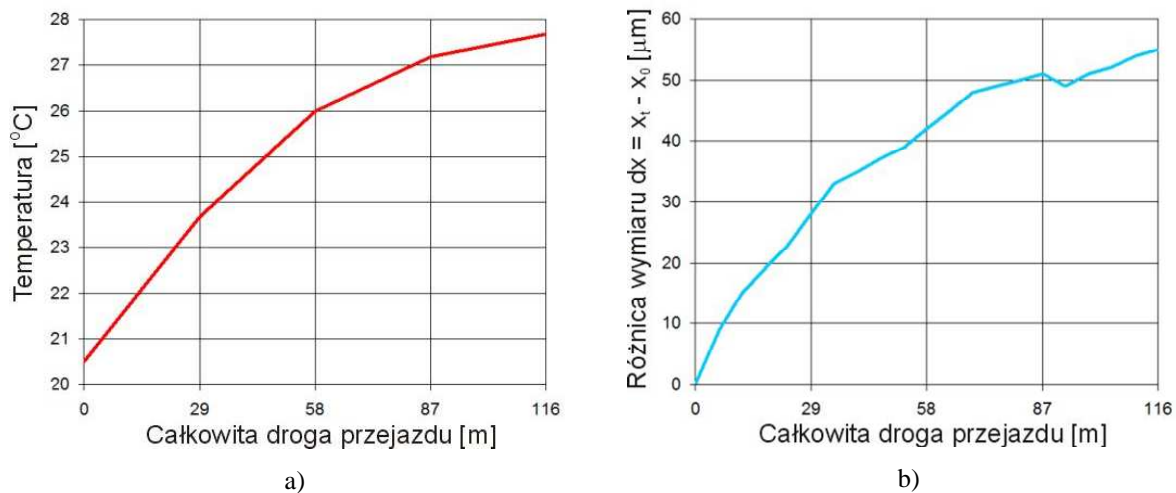
Własności cieplne układu konstrukcyjnego określa się zazwyczaj na biegu jałowym [5], [10], z uwzględnieniem oddziaływania jedynie źródeł wewnętrznych. Na odkształcenia cieplne obrabiarki w warunkach eksploatacyjnych wpływają dodatkowo parametry procesu technologicznego, zależne od stawianych jej zadań obróbkowych. O nagrzewaniu i związanych z tym odkształceniach układu konstrukcyjnego decydują przede wszystkim prędkości obrotowe zespołów oraz wartości występujących obciążeń siłami skrawania, siłami bezwładności i momentami napędowymi.

Odkształcenia cieplne obrabiarek sterowanych numerycznie, mogą być też określane pośrednio na podstawie pomiarów dokładności obróbki przedmiotów próbnych [14] podczas prób pracą wykonanych w pewnym odstępie czasu. Wyniki tych pomiarów mogą być wykorzystane do wyprowadzenia empirycznych funkcji kompensacji, opracowania zasad symulacji numerycznej lub modeli uogólnionych służących do korygowania odkształceń cieplnych obrabiarki.

Obciążenia obrabiarki mogą być realizowane rzeczywistymi siłami skrawania w warunkach ruchowych poszczególnych zespołów. Testy obróbkowe są odmianą badań pośrednich, w których obrabiarka jest oceniana ze względu na odporność na utratę stabilności i osiąganą dokładność obróbki. Badania pracą obejmują obróbkę próbek zgodnie z podstawowym zakresem prac i przeznaczeniem obrabiarki, dla wstępnie ustalonych ograniczeń i tolerancji [12,13,14]. Przeprowadza się je z użyciem przedmiotów próbnych dostarczonych przez użytkownika, których wymiary i wymagania dotyczące dokładności obróbki są określone często przez normy dotyczące badań określonych typów obrabiarek.

4. BADANIA DOKŁADNOŚCI POZYCJONOWANIA NARZĘDZIA

Wstępny test pomiaru stabilności cieplnej pozycjonowania przeprowadzono na tokarce sterowanej numerycznie Haas typ TL 1, stosując czujnik mikrometryczny do pomiaru dryftu cieplnego, zadając ruch szybki (4,5 m/min) bez obciążenia na 10 drogach przejazdu z 20-krotną ilością powtórzeń symulacji na drodze 560 mm. Wyniki pomiaru temperatury oraz dryftu temperaturowego na drogach przejazdu przedstawiono na wykresie rys. 4. Zmierzona wartość sumaryczna błędu pozycjonowania wyniosła 55 μm .



Rys. 4. Wpływ całkowitej drogi przejazdu na: a) maksymalną temperaturę układu przesuwu osi Z, b) różnicę wymiaru wzdłużnego przedmiotu $dx = x_i - x_0$

Fig. 4. Influence of the whole path on: a) maximum temperature of travel system of Z axle, b) difference of the workpiece longitudinal dimension $dx = x_i - x_0$

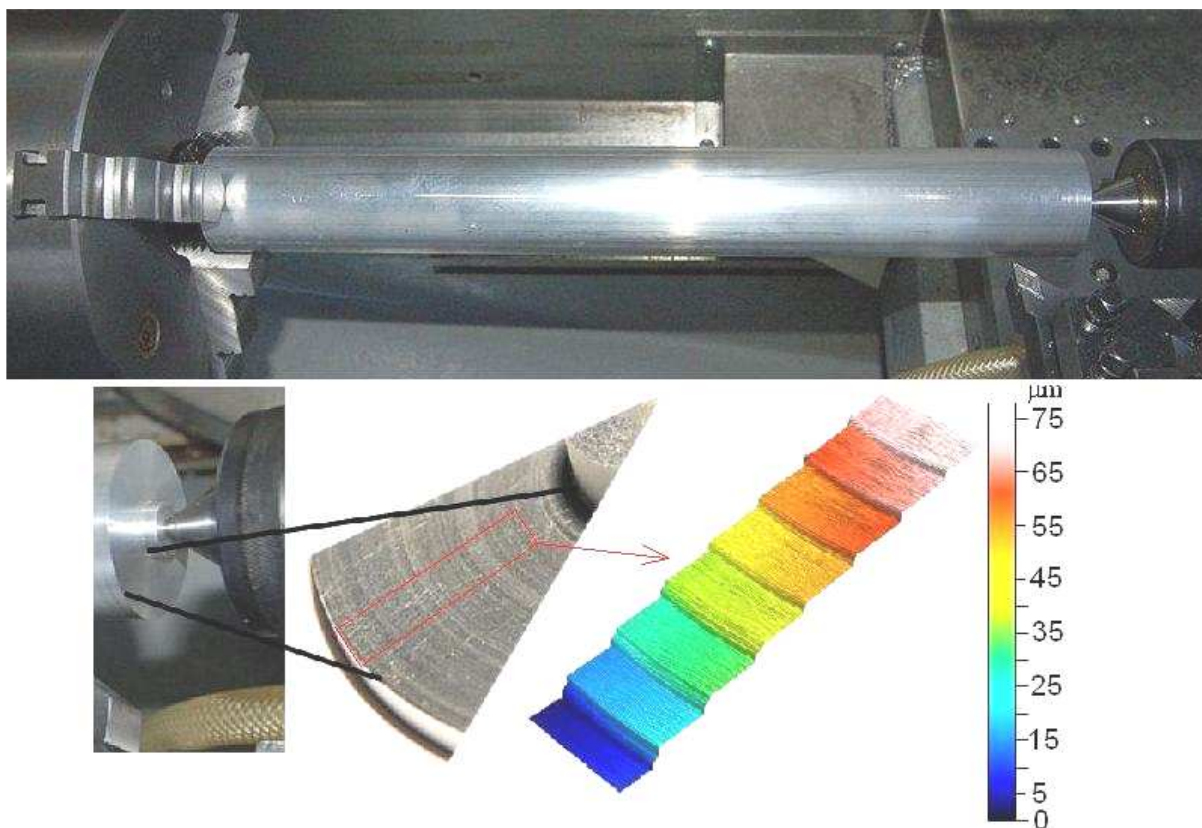
Następnie, wykonano test 2-gi, na przedmiocie obrabianym (o prostej strukturze geometrycznej) tj. wałku o średnicy $\Phi 50$ mm, z obrabianą powierzchnią czołową. W wyniku testu wykazano i wizualnie przedstawiono błędy w osi Z, sterowanej numerycznie. Zarys powierzchni czołowej odzwierciedla błędy uwarunkowane zmianami

temperatury w quasi zamkniętym obwodzie regulacji osi CNC na pojedynczych fragmentach schodkowych i wizualnie obrazuje fazy rozgrzewania śruby tocznej.

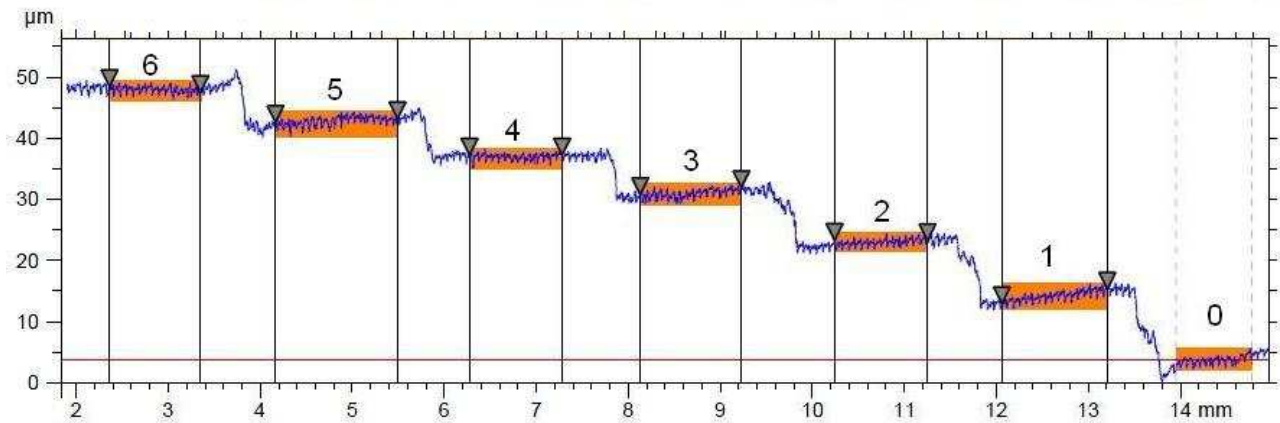
W pierwszym kroku obrabiano powierzchnię czołową nr 0 przy temperaturze śruby tocznej $20,5^{\circ}\text{C}$ (temperatura otoczenia). Następnie symulowano obróbkę 20 powierzchni walcowych (bez zagłębienia ostrza w materiał) na długości 380 mm. Po zakończeniu tej symulacji obrabiano ponownie, na niezmiennych nastawach w osi Z, powierzchnię czołową, ze zmianą promienia (w głąb materiału) o wartość 2 mm (X-2). Po czym realizowano odjazd narzędzia w osi Z i X do pozycji wyjściowej i ponownie symulowano obróbkę 20 powierzchni walcowych. Po kolejnym jej zakończeniu obrabiano wgłębie powierzchnię czołową z wcięciem promieniowym o kolejne 2 mm (X-4) itd. Całą obróbkę zakończono na 8 powierzchniach toczonych wgłębie (X-16) i 160 symulacjach po ok. 35 minutach, rys. 5. Wytworzone, na wskutek tarcia tocznego, ciepło spowodowało błąd cieplny, który można zaobserwować w formie schodkowej na powierzchni czołowej.

Zarys powierzchni czołowej przedmiotu obrobionego zmierzono na profilografometrze Intra firmy Taylor Hobson [7], rys. 6. Wyniki pomiaru różnicy położenia poszczególnych fragmentów powierzchni schodkowej zamieszczono w tabeli 1.

Ciepłny dryft zmierzony na najdalej oddalonym od łożyska pozycjonującego śruby tocznej fragmencie powierzchni czołowej wyniósł $44\mu\text{m}$.



Rys. 5. Stanowisko do badania wpływu błędu cieplnego na dokładność wykonania przedmiotu obrabianego
Fig. 5. Research setup for thermal error influence on the machining accuracy of the workpiece

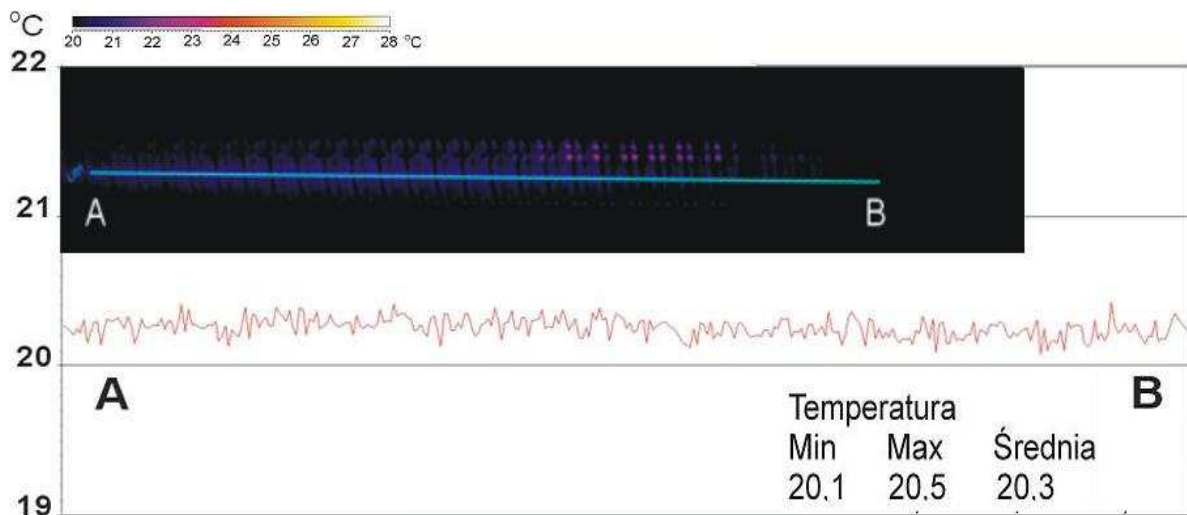


Rys. 6. Zmiana wymiarów przedmiotu obrabianego w wyniku odkształceń cieplnych śruby toczonej
 Fig. 6. Change of workpiece dimensions as a result of thermal strain of ball screw

Tabela 1. Wyniki pomiarów powierzchni obrabianej po kolejnych cyklach obróbki. Numery obszarów zgodnie z rys. 6
 Table 1. Results of machined surface measurements after individual cutting cycles. Region numbers according to Fig. 6

Numer obszaru	0	1	2	3	4	5	6
Różnica wymiaru wysokości [mm]	0	0,0105	0,0193	0,0273	0,0333	0,0390	0,0440

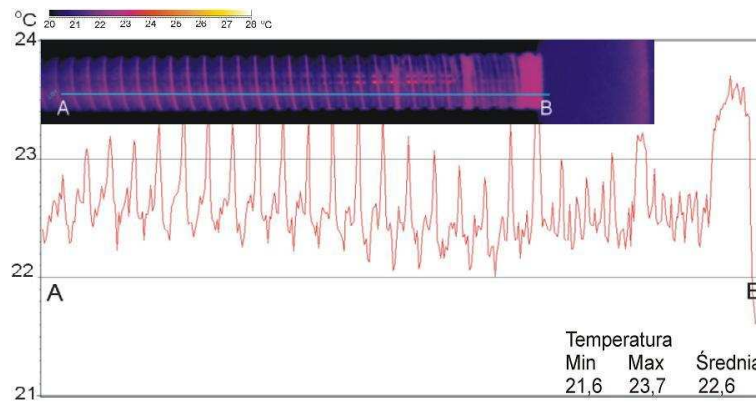
Rozkład pola temperatur na śrubie toczonej mierzono kamerą termowizyjną typ SC 620 firmy Flir, co dla początkowej fazy przedstawiono na rys. 7.



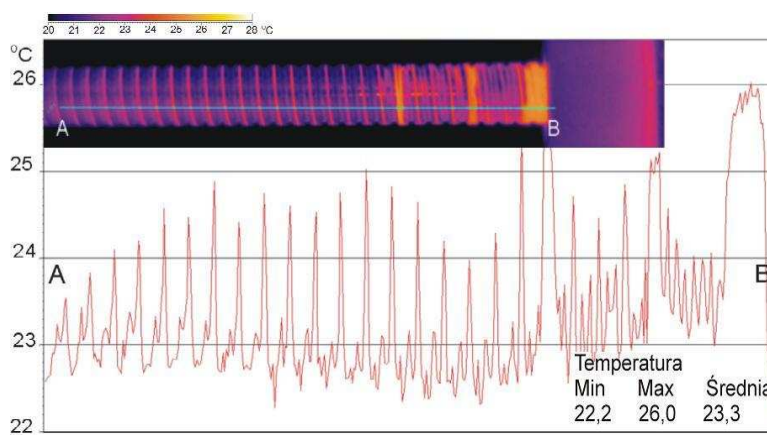
Rys. 7. Rozkład temperatury wzdłuż osi śruby napędowej obrabiarki dla układu początkowego, czas t_0 (dla obszaru 0-go z rys. 6)

Fig. 7. Temperature distribution along driving axle for initial system, time t_0 (for 0th region from Fig. 6)

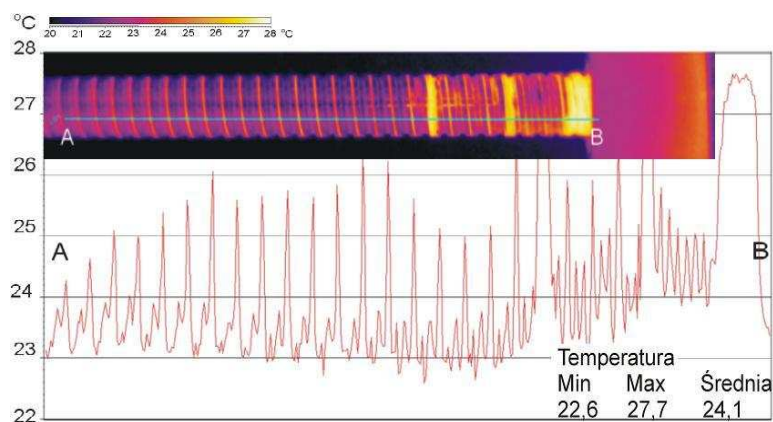
W miarę prowadzenia obróbki i symulacji temperatura śruby toczonej wzrastała, co sukcesywnie rejestrowano kamerą termowizyjną. Wyniki po czasie t_2 , t_3 i t_4 zamieszczono na rys. 8-10.



Rys. 8. Rozkład temperatury wzdłuż osi napędowej obrabiarki po czasie t_2 (dla obszaru 2-go z rys. 6)
Fig. 8. Temperature distribution along driving axle after time t_2 (for 2nd region from Fig. 6)



Rys. 9. Rozkład temperatury wzdłuż osi napędowej obrabiarki po czasie t_4 (dla obszaru 4-go z rys. 6)
Fig. 9. Temperature distribution along driving axle after time t_4 (for 4th region from Fig. 6)



Rys. 10. Rozkład temperatury wzdłuż osi napędowej obrabiarki po czasie t_6 (dla obszaru 6-go z rys. 6)
Fig. 10. Temperature distribution along driving axle after time t_6 (for 6th region from Fig. 6)

Wykonane badania pozwalają stwierdzić, że generowane ciepło wpływa w istotny sposób na rozszerzalność cieplną śruby tocznej napędu CNC w osi Z, a tym samym na niedokładność realizacji trajektorii ruchu narzędzia względem przedmiotu obrabianego przez suport maszyny. Wraz ze zwiększającą się odległością nakrętki tocznej od łożyska stałego napędu dryft błędu pozycjonowania wzrastał zgodnie z prawem rozszerzalności cieplnej ciał stałych. Odkształcenia cieplne mogą być dobrze skompensowane przez zastosowanie precyzyjnego liniału inkrementalnego w zamkniętym obwodzie regulacji położenia suportu [2].

5. PODSUMOWANIE

Osie sterowane numerycznie powinny utrzymywać pożądaną dokładność i powtarzalność pozycjonowania w całym zakresie pracy, nawet podczas silnie zmieniających się prędkości posuwowych i sił skrawania. Zakłócająco działają tu, zależne od prędkości i obciążeń, odkształcenia cieplne śrub tocznych w układach przeniesienia napędów posuwowych. Zaobserwowano, że podczas obróbki mogą w okresie 30 minut wystąpić błędy pozycjonowania o wartości do $44\mu\text{m}$ w przypadkach, gdy położenie suportu zależy tylko od wartości wyznaczanych z inkrementalnego czujnika położenia kąowego i skoku śruby tocznej, jako wzorca długości. Przez zastosowanie liniału inkrementalnego błąd ten można znacznie zmniejszyć. Stosując napędy z liniałem, pracujące w zamkniętym obwodzie regulacji, błędy spowodowane cieplnym odkształceniem napędowej śruby tocznej są nieistotne, ponieważ śledzenie położenia odbywa się względem liniału.

Podobne zalety wykazuje stosowanie tego rozwiązania w czujnikach położenia kąowego osi obrotowych sterowanych numerycznie, ponieważ odkształcenia cieplne mogą występować również w mechanicznych elementach przeniesienia ruchu obrotowego. Liniały inkrementalne i enkodery zapewniają obrabiarkom, nawet w warunkach pracy z dużymi obciążeniami, wysoką dokładność wymiarowo-kształtową obrabianych przedmiotów. W zamkniętych układach regulacji zostają skompensowane takie źródła błędów jak np.: cieplne odkształcenie śruby tocznej, nawrotu, odkształceń sprężystych (siły skrawania), kinematyczny (błąd skoku gwintu śruby tocznej) [4]. Kompensacji jednak nie podlega błąd wynikający z przemieszczenia się liniału wraz z cieplnym przemieszczeniem punktu jego zamocowania względem łoża/korpusu obrabiarki.

LITERATURA

- [1] ATTIA M.H., FRASER S., OSMAN M.O.M., 1999, *On-Line Estimation of Time-Variant Thermal Load Applied to Machine Tool Structures using a S-domain Inverse Solution*, Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 39, 985-1000.
- [2] *Bearbeitungsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen*, Technische Informationen, Heidenhain, September, 2007.
- [3] KURTOGLU A., *The Accuracy Improvement of Machine Tools*, 1990, Annals of the CIRP, 39/1, 417-419.
- [4] *Längenmessgeräte verbessern die Bearbeitungsgenauigkeit*, Technische Informationen. Heidenhain, März, 2008.
- [5] MARCHELEK K., 1991, *Dynamika obrabiarek*, WNT, Warszawa.

- [6] WECK M., 1992, *Werkzeugmaschinen - Fertigungssysteme*, B. 4., *Meßtechnische Untersuchung und Beurteilung*, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- [7] *Operators Handbook*. Form Talysurf Intra 50. Taylor Hobson Ltd., Leicester 2003.
- [8] OSANNA P.H., TOTWEA P., 1992, *Workpiece Accuracy - The Critical Path to Economical Production*, Int. Journal of Machine Tools and Manufacture, 32/1-2, 45-49.
- [9] SKOCZYŃSKI W., 2001, *Ocena własności obrabiarek na podstawie dokładności obróbki przedmiotów próbnych*, Prace Naukowe ITMiA Politechniki Wrocławskiej, Monografie, 81/25, Wrocław.
- [10] PN-ISO 230-1: 1998 *Przepisy badania obrabiarek. Dokładność geometryczna obrabiarek pracujących bez obciążenia lub w warunkach obróbki wykańczającej*.
- [11] PN-ISO 230-2: 1999 *Przepisy badania obrabiarek. Wyznaczanie dokładności i powtarzalności pozycjonowania osi sterowanych numerycznie*.
- [12] ISO 230 - 2: 1988 (E) *Acceptance code for machine tools - Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled machine tools*.
- [13] ISO 230/1: 1986 (E) *Acceptance code for machine tools - Part 1: Geometric accuracy of machine operating under no - load or finishing conditions*.
- [14] VDI - Richtlinien 2851, 1986, B. 2, *Numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen. Beurteilung von NC-Drehmaschinen durch Einfachprüfwerkstücke*.

RESEARCHES OF INFLUENCE OF DISTANCE MEASUREMENT STRUCTURES IN CNC MACHINE TOOLS ON MACHINING ACCURACY

In the CNC machine tools the feed drive systems in individual axles are mainly constructed on the base of ball screws-nuts and encoders. The value of slide carriage dislocations are marked in these cases basis on angular screw dislocation and the value of its pitch. This solution does not embrace deviations formed e.g. on result of thermal deformations of screw, dependent among other things from cutting forces values, inertia, primary stress and other factors. To show, that thermal ball screws deformation are essential in composition with the tolerance range, required in precision machining, verification tests were executed, which confirmed the significance of ball screw thermal deformations in formation of the workpiece errors. The solution of Closed Loop control system was indicated, compensating the influence of these errors on the machining accuracy.