MODELOWANIE INŻYNIERSKIE ISNN 1896-771X
32, s. 339-344, Gliwice 2006

MODELOWANIE ODKSZTAŁCEŃ CIEPLNYCH OSI POSUWÓW SZYBKICH METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

KRZYSZTOF LEHRICH
JAN KOSMOL

Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska

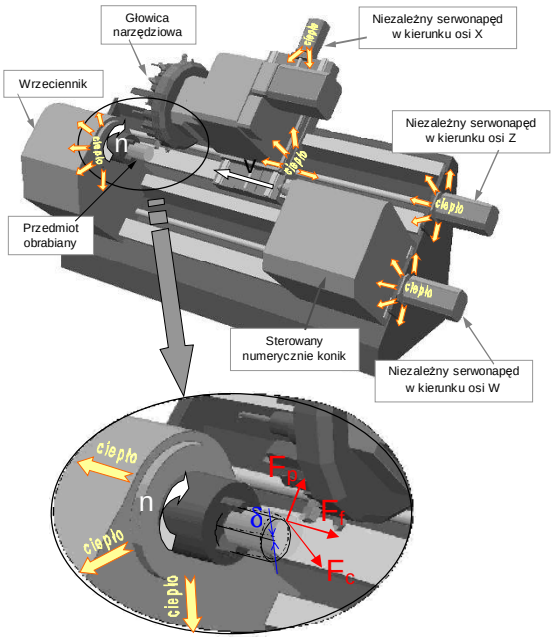
Streszczenie. Odkształcenia cieple osi CNC mają duże znaczenie dla dokładności obróbki. Analizy modelowe pozwalają określić wydłużenie śruby tocznej jeszcze na etapie projektu wstępnego. Niniejszy artykuł prezentuje zaproponowane podejście do modelowania i analizy tego typu układów z wykorzystaniem metody elementów skończonych. W artykule przedstawiono metodykę modelowania oraz przykładowe wyniki badań modelowych w zestawieniu z wynikami badań eksperymentalnych dla pojedynczej osi CNC. Zaprezentowano również praktyczne wykorzystanie zaproponowanej metodyki podczas badań frezarki bramowej HSM-180 produkowanej przez firmę Rafamet S.A.

1. WSTĘP

Ciągłe poszukiwanie możliwości zwiększania wydajności produkcji wymaga wprowadzania nowych technologii obróbki. Jedną z technologii rozwijanych w ostatnich latach jest obróbka z dużymi prędkościami skrawania (High Speed Machining). Obrabiarki przeznaczone do obróbki HSM charakteryzują się wysokimi parametrami kinematycznymi, tj. prędkością ruchu głównego oraz prędkościami posuwu. Wzrost parametrów kinematycznych powoduje zwiększenie niekorzystnych, ze względu na dokładność obróbki, zjawisk. Należą do nich m.in. odkształcenia cieplne oraz poziom drgań. Z tego względu obrabiarki HSM wymagają innego podejścia do projektowania. Zastosowanie metody elementów skończonych powinno umożliwić określenie jeszcze na etapie projektu wstępnego niektórych właściwości użytkowych obrabiarki oraz dokładność obróbki. Takie podejście do projektowania ma szczególnie duże znaczenie w przypadku obrabiarek ciężkich, produkowanych w małych seriach lub pojedynczych egzemplarzach, w których dodatkowym wymaganiem jest bardzo często krótki czas na realizację zamówienia, a tym samym brak możliwości budowy i badań prototypu.

W obrabiarkach HSM odkształcenia cieplne związane są nie ze strefą obróbki, a bardziej z realizacją założonych parametrów pracy w zespołach realizujących ruch główny i posuwowy. Wzrost parametrów obróbki oraz skrócenie czasów pomocniczych wymusza konieczność zastosowania znacznie większych prędkości obrotowych oraz prędkości posuwu. Badania eksperymentalne wykazały, iż znaczny wzrost temperatury podzespołów realizujących ruch posuwowy widoczny jest już podczas pracy na biegu jałowym. Wiąże się

to z realizowanymi prędkościami obrotowymi takich podzespołów jak śruba toczna lub nakrętka toczna oraz z wymogiem bezluzowej pracy elementów serwonapędu realizowanym poprzez ich napięcie wstępne. Na rysunku 1 przedstawiono w sposób poglądowy podstawowe podzespoły tokarki HSM oraz potencjalne źródła błędów obróbki.



Rys. 1. Model strukturalny przykładowej tokarki HSM z zaznaczeniem potencjalnych źródeł błędów

2. PRZEDMIOT BADAŃ

Analizę odkształceń przeprowadzono na modelu pojedynczej osi sterowanej numerycznie, której rzeczywista konstrukcja opracowana została w Katedrze Budowy Maszyn Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

Rys. 2. Stanowisko laboratoryjne do badań cieplnych – pojedyncza oś sterowana numerycznie

Konstrukcja osi posuwów szybkich zawiera następujące podzespoły:

- mechanizm śrubowo-toczny przenoszący napęd z silnika na stół obrabiarki 3VNBK4 - FOP AVIA o wymiarach 40*10*6,35-3 (opcjonalnie 40*20*6,35-3) i napięciu wstępnym 10% nośności dynamicznej (d_0*P*D_w-i, gdzie d_0- średnica, P- skok, D_w- średnica kulki, i-liczba obiegów)

- dwa węzły łożyskowe, z których jeden jest ustalony natomiast drugi ma możliwość przesuwu
  - łożyska skośne typu 7306 BEGBP-SKF
  - łożysko poprzeczne typu 6306-SKF
- łożyska skośne nakrętki tocznej typu 7215 ACDGB/P4A-SKF, wykorzystywane do realizacji ruchu nakrętki tocznej w konfiguracji z napędzaną nakrętką
- dwie prowadnice szynowe kulkowe z czterema wózkami prowadzącymi KUVE 20 - INA
- silniki SIGMA SMGH 13 DA - Yasakawa, napędzające śrubę toczną lub nakrętkę toczną w zależności od konfiguracji napędu
- łoże

3. METODYKA BADAŃ

Do głównych problemów związanych z modelowaniem odkształceń cieplnych osi CNC należą: obliczenie mocy źródeł ciepła oraz określenie współczynników wymiany ciepła dla powierzchni konwekcyjnych. Jako potencjalne źródła ciepła w strukturze osi CNC można wskazać: silnik napędowy, zespół śrubowo-toczny oraz łożyska. Badania eksperymentalne wykazały, iż ilość ciepła powstająca w układach prowadnicowych jest nieznaczna i z tego względu podzespoły te mogą zostać pominięte jako źródła ciepła. W przypadku zespołu śrubowo-tocznego oraz łożysk informacje dotyczące momentów tarcia, wynikających z napięcia wstępnego, uzyskać można na podstawie danych producenta. Często jednak informacji takich producent nie publikuje, co zmusza konstruktora do samodzielnego określenia tych wielkości. W dalszej kolejności uwzględniane są momenty tarcia pochodzące od masy stołu i przedmiotu obrabianego, napięcia wstępnego wózków prowadzących, siły bezwładności podczas hamowania bądź przyspieszania, uszczelnienia nakrętki tocznej, składowej posuwowej siły skrawania. Moc tarcia oblicza się na podstawie iloczynu obliczonego momentu tarcia i prędkości kątowej śruby tocznej.

Wartość strat mocy w silnikach napędowych zależy od ich sprawności mechanicznej i elektrycznej, która jest funkcją obciążenia silnika oporami ruchu w napędzanych parach kinematycznych i ewentualnie mocą skrawania. Dlatego też, w celu oszacowania mocy źródła ciepła jakim jest silnik napędowy, skorzystać należy z danych producenta, uwzględniając w obliczeniach moment napędowy, prędkość obrotową oraz odpowiadającą im sprawność silnika.

Pewnym problemem podczas modelowania może być określenie współczynników wymiany ciepła. Można tego dokonać np. na podstawie zależności przedstawionych w pozycji [1]. Najbardziej korzystne jest wprowadzenie do analizy zależności współczynników wymiany ciepła w funkcji zmian temperatury powierzchni konwekcyjnej.

W analizie osi posuwów szybkich problematyczna jest również symulacja ruchu nakrętki tocznej na zadanej długości śruby tocznej w określonym czasie. Wiąże się to z realizowanymi w rzeczywistości prędkościami posuwu, wynoszącymi od 10 m/min nawet do 200 m/min. Uproszczenie wymaga założenia źródeł ciepła na zadanym odcinku ruchu nakrętki tocznej i wprowadzenia elementów kontaktowych pomiędzy nakrętkę toczną i „roboczy” odcinek śruby tocznej.

Modelowa analiza odkształceń cieplnych osi posuwów szybkich jest podstawowym elementem zaproponowanej metodyki badań wpływu ciepła na dokładność obróbki na etapie projektu wstępnego. Poniżej przedstawiona została przyjętą metodyka badań modelowych:

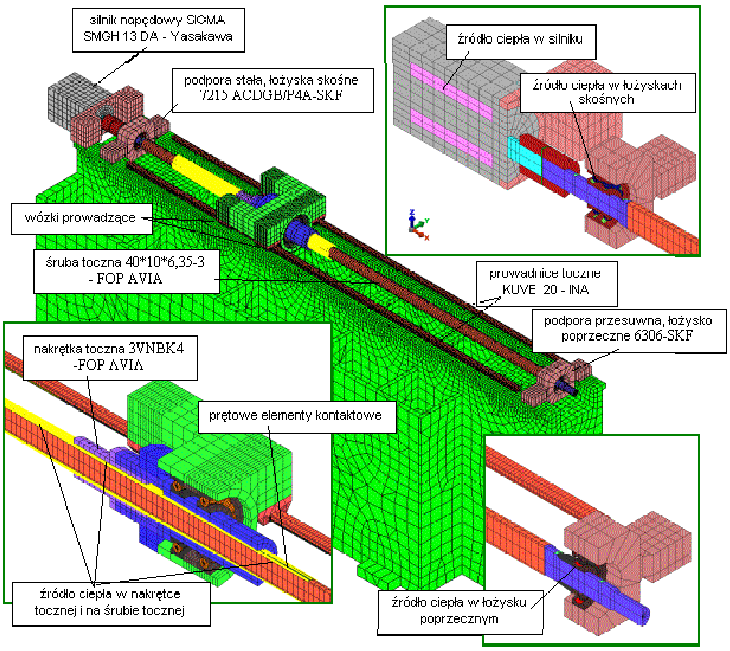
1. identyfikacja potencjalnych źródeł ciepła na podstawie dokumentacji konstrukcyjnej.
2. opracowanie modelu numerycznego do badań symulacyjnych metodą elementów skończonych.

3. obliczenie mocy źródeł ciepła.
4. zdefiniowanie warunków brzegowych w postaci współczynników wymiany ciepła.
5. badania symulacyjne MES wpływu ciepła i rozkładu temperatury w strukturze sterowanej numerycznie osi posuwów szybkich.
6. analiza uzyskanych wyników ze szczególnym uwzględnieniem rozkładu temperatur w miejscach usytuowania źródeł ciepła decydujących o bezpiecznej eksploatacji podzespołów.
7. badania symulacyjne odkształceń i naprężeń cieplnych osi posuwów szybkich.
8. analiza otrzymanych wyników, ze szczególnym uwzględnieniem przemieszczeń stołu w miejscu mocowania narzędzia.
9. wprowadzenie niezbędnych poprawek w konstrukcji (jeżeli jest to konieczne), na podstawie przeprowadzonych analiz, w celu zmiany własności eksploatacyjnych osi posuwów szybkich.
10. powtórzenie analiz MES z uwzględnieniem zmian konstrukcyjnych.
11. opracowanie dokumentacji konstrukcyjnej do wykonania prototypu sterowanej numerycznie osi posuwów szybkich, bądź serii właściwej.

4. MODEL STEROWANEJ NUMERYCZNIE OSI POSUWÓW SZYBKICH DO BADAŃ CIEPLNYCH METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Model dyskretny osi posuwów szybkich wykonano jako model bryłowo-prętowy, starając się wiernie oddać geometrię rzeczywistego układu. Ze względu na niesymetryczność geometrii korpusu do obliczeń przygotowano model odzwierciedlający całą konstrukcję (rys. 3). Elementy typu pręt wykorzystano dla zamodelowania kontaktu pomiędzy nakrętka a śrubą toczną na całej długości posuwu. W zależności od zadanej długości posuwu modele dyskretne zawierały od 162268 do 175364 elementów skończonych, a liczba węzłów wynosiła od 104852 do 107340. Własności materiałowe poszczególnych podzespołów przyjęto w taki sposób aby odpowiadały one własnościom rzeczywistym.

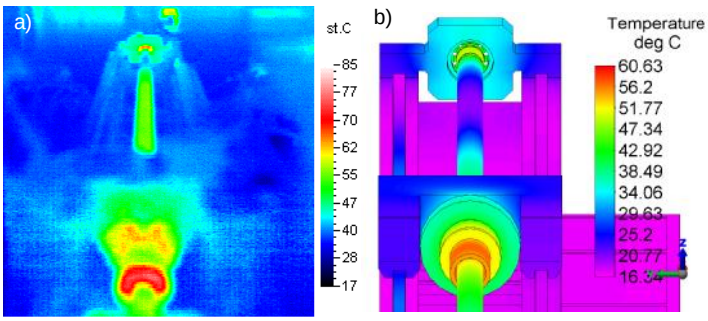
Do, badań cieplnych założono współczynniki wymiany ciepła zmieniające się w funkcji zmian temperatury powierzchni konwekcyjnej, zakładając równocześnie stałą temperaturę otoczenia wynoszącą 17 ºC.



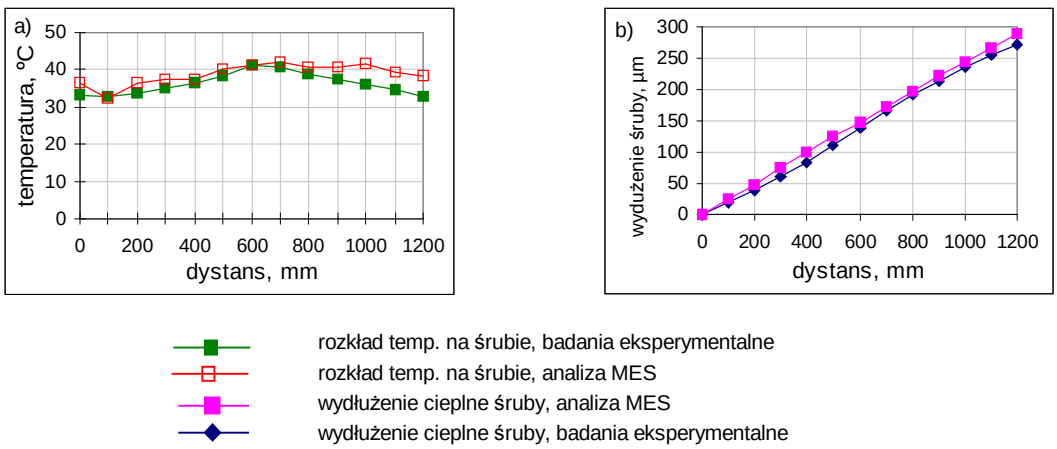
Rys. 3. Model dyskretny osi posuwów szybkich do badań cieplnych

5. WYNIKI BADAŃ CIEPLNYCH STEROWANEJ NUMERYCZNIE OSI POSUWÓW SZYBKICH

W wyniku przeprowadzonych badań modelowych uzyskano rozkład temperatury w całej strukturze badanego układu i w dalszej kolejności na tej podstawie przeprowadzono analizę wydłużenia cieplnego śruby tocznej. Wyniki badań modelowych odniesiono do wyników badań eksperymentalnych, uzyskując rozbieżności w granicach 5-20%. Wydłużenie cieplne śruby tocznej, jak wykazały badania eksperymentalne, wpływa w znaczący sposób na dokładność pozycjonowania stołu, a tym samym na dokładność obróbki. Przykładowe wyniki badań modelowych i weryfikacyjnych badań eksperymentalnych przedstawiono na rysunkach 4 i 5.



Rys. 4. Zestawienie wyników badań eksperymentalnych w postaci termogramu (a) oraz modelowych w postaci mapy rozkładu temperatury (b)

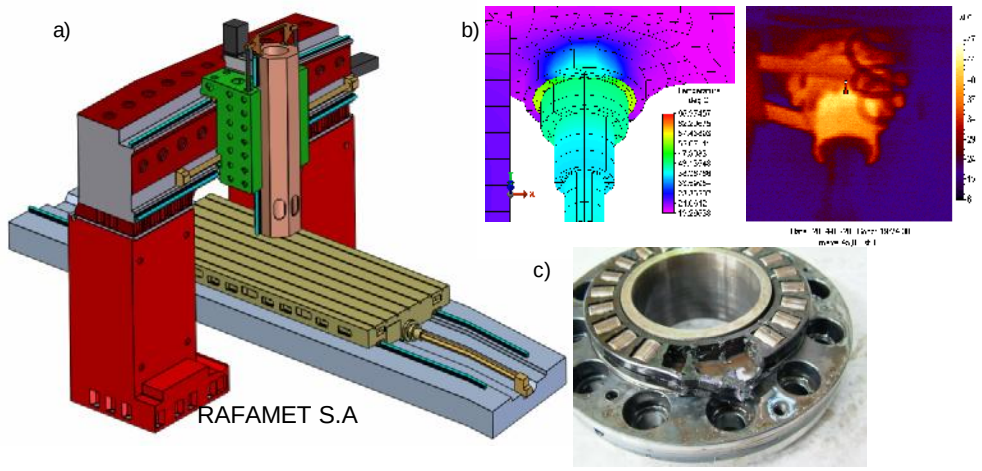


Rys. 5. Zestawienie wyników badań modelowych i eksperymentalnych dla ruchu stołu na całej długości śruby tocznej z posuwem 20m/min po czasie 60 min: a)rozkład temperatury na śrubie tocznej, b) wydłużenie cieplne śruby tocznej

6. PRZYKŁADY PRAKTYCZNEGO ZASTOSOWANIA PRZYJĘTEGO SPOSOBU MODELOWANIA

Zaproponowana metodyka ma charakter utylitarny i wykorzystana została podczas badań frezarki bramowej HSM-180. Obrabiarka ta charakteryzuje się wysokimi parametrami kinematycznymi, klasyfikującymi ją w grupie obrabiarek HSM, przy równoczesnej bardzo dużej masie przemieszczanych podzespołów. Analizie poddano serwonapęd posuwu suportu, suwaka oraz stołu. Wyniki przeprowadzonych badań modelowych zweryfikowano podczas badań eksperymentalnych, a przykładowe wyniki przedstawiono na rys. 6b. Ponadto

zaproponowany sposób modelowania wykorzystano podczas analizy przyczyn zniszczenia łożyska przedstawionego na rys. 6c, wykazując jako główną przyczynę siłę wynikającą z rozszerzalności cieplnej śruby tocznej i brak dostatecznej kompensacji jej wydłużenia.



Rys. 6. Przykład zastosowania zaproponowanej metodyki podczas analizy cieplnej frezarki bramowej HSM-180; a) frezarka bramowa HSM-180, b) przykładowe wyniki badań cieplnych, c) łożysko uszkodzone w wyniku wydłużenia cieplnego śruby tocznej

7. WNIOSKI

Przeprowadzone badania wykazały przydatność zaproponowanej metodyki bazującej na wykorzystaniu metody elementów skończonych do przewidywania odkształceń cieplnych osi posuwów szybkich. Wykazano równocześnie znaczący wpływ odkształceń cieplnych śruby tocznej na dokładność obróbki. Zadowalająca zbieżność wyników uzyskanych podczas badań modelowych i eksperymentalnych frezarki bramowej HSM-180 podkreśla utylitarny charakter zaproponowanego podejścia do modelowania osi CNC oraz zaproponowanej metodyki oceny wpływu ciepła na dokładność obróbki jeszcze na etapie projektu wstępnego.

LITERATURA

1. Buchman K., Jungnickel G.: Przekazywanie ciepła w urządzeniach wytwórczych, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1978.
2. Lehrich K.: Wpływ wybranych zespołów obrabiarek do skrawania z dużymi prędkościami na dokładność obróbki. Praca doktorska, Gliwice 2005.

MODELING OF HIGH SPEED FEED AXIS THERMAL DISPLACEMENTS USING FINITE ELEMENT ANALYSES

Summary**:** The thermal displacements of CNC feed axis have a great influence on machining accuracy. The modeling analyze allows to determine the ball screw extension on preliminary stage of design. This paper presents a proposition of methodology of modeling and analyses of CNC feed axis using the Finite Element Analyses. In this paper the methodology of CNC feed axis modeling and exemplary results of analyses in comparison with experimental results was presented. A practical applications of proposed methodology to the planer mill HSM 180 produced by Rafamet S.A was presented.