



Analiza zjawisk termicznych we współrzędnościowych maszynach pomiarowych z użyciem systemów CAD

Analysis of thermal phenomena occurring in the structure of coordinate measuring machines with use of CAD systems

JACEK GOGÓL
JANUSZ FRAN CZAK
MARIUSZ KOPEĆ*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.607

Opisano kontynuację badań elementów oraz podzespołów maszyn pomiarowych przedstawionych w *Mechaniku* nr 3/2012 i nr 11/2015 [1, 2]. Tym razem zajęto się bardziej złożonymi elementami i podzespołami. Przeprowadzono analizę komputerową konstrukcji maszyny pomiarowej. Badania wykonano na ręcznej maszynie pomiarowej produkcji IZTW Kraków typu NMP 5.5.4 (o zakresach ruchu w osiach $X \times Y \times Z$: $500 \times 500 \times 400$ mm). W różnych konfiguracjach rozmieszczono zestawy czujników temperatury i przemieszczeń, które rejestrowały warunki panujące w maszynie. Rozpatrzono kilka przypadków zjawisk termicznych i porównano je z wirtualnym modelem komputerowym.

SŁOWA KLUCZOWE: WMP, zjawiska termiczne, CAD

Presented in the paper is how the research and analysis work is continued on the more sophisticated details and subassemblies of measuring machines referred to in Mechanik issues [1–2]. In present stage the work is concentrated on examination and computer analysis of the entire measuring machine structure. Submitted to the examination was hand operated NMP 5.5.4 measuring machine produced in the Institute of Advanced Manufacturing Technology (IZTW), Cracow (displacement range: 500 mm in X axis, 500mm in Y axis, 400 mm in Z axis). Complete sets of temperature and displacement sensors to register conditions prevailing on the machine were installed in several different configurations. Several examples of thermal issues were reviewed and confronted with the computer generated model.

KEYWORDS: CMM, thermal issues, CAD

Aby ocenić zjawiska termiczne w konstrukcji współrzędnościowej maszyny pomiarowej, konieczne jest równoczesne prowadzenie badań i analizy komputerowej całej konstrukcji maszyny. Podstawowymi czynnościami są stworzenie wiarygodnego modelu maszyny pomiarowej i poddanie go cyklowi symulacji sprzężonych z badaniami rzeczywistej konstrukcji w celu sprawdzenia poprawności pracy wirtualnej maszyny oraz określenie wielkości różnicy pomiędzy zachowaniem rzeczywistej maszyny i jej wirtualnego odpowiednika.

Zgromadzone dane pozwolą ocenić przydatność projektowanych w przyszłości rozwiązań i zastosowanych materiałów pod kątem ograniczenia wpływu zmiennych warunków termicznych na parametry pracy maszyn pomiarowych. Badania modelowe umożliwią przeprowadzenie symulacji tych rozwiązań i porównanie parametrów różnorodnych materiałów bez ponoszenia kosztów produkcji prototypów oraz wy-

branie tych najbardziej obiecujących. Analiza takiego modelu pozwoli na minimalizację lub kompensację odkształceń wywołanych zmiennymi warunkami termicznymi.

Opracowany w programach typu MES (Pro Mechanica, Ansys) model maszyny pomiarowej (bazujący na produkowanej przez IZTW maszynie NMP 5.5.4), obrazujący zmiany geometryczne (a co za tym idzie – błędy geometryczne maszyny) wywołane przez podstawowe procesy termiczne (przewodnictwo cieplne, konwekcję, radiację), może ponadto stanowić bazę do kompensacji błędów geometrii w trakcie procesu pomiarowego maszyny lub sygnalizowania sytuacji termicznej prowadzącej do spadku dokładności maszyny, przekraczającej deklarowany przez producenta poziom lub parametry założone dla danego procesu pomiarowego. W efekcie możliwe będzie uzyskanie poprawy dokładności i wiarygodności pracy maszyny w poszerzonym obszarze temperaturowym.

Budowa modelu maszyny

Kluczowym zadaniem było zbudowanie wirtualnego modelu maszyny pomiarowej, który wystarczająco dokładnie odwzorowywałby zmiany geometryczne wywołane zjawiskami termicznymi zachodzącymi w prawdziwej maszynie.

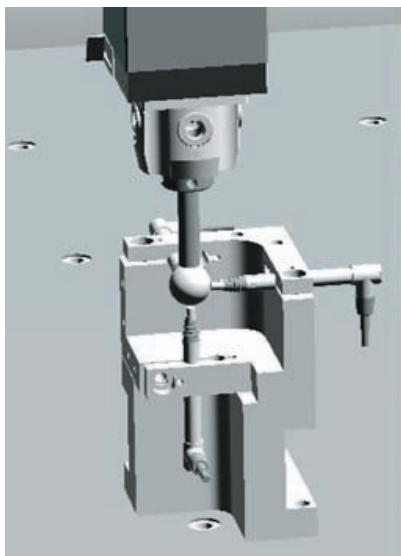
■ **Prace badawcze.** Aby stworzyć taki model, przeprowadzono kilkanaście cykli badawczych, w trakcie których rejestrowano temperaturę w różnych punktach konstrukcji oraz przemieszczenia w trzech osiach układu kartezjańskiego maszyny (X , Y , Z), w punkcie odpowiadającym pracy końcówki pomiarowej (na końcu pinoli osi Z maszyny). Do rejestracji danych temperaturowych użyto zestawu 20 czujników (termistorów typu Beta Therm NTC 10K3A1 o dokładności $\pm 0,1^\circ\text{C}$) podpiętych do karty systemu TEC (*thermal effect compensation*) zainstalowanej w sterowniku firmy Renishaw. Temperaturę rejestrowano w oprogramowaniu do sterownika UCC2, UCCassist. Podczas badań dane rejestrowano za pomocą oprogramowania Link Traffic Monitor, przesyłającego wszystkie parametry pracy maszyny pomiarowej. Przemieszczenia rejestrowano czujnikami indukcyjnymi GT 22 firmy TESA, dodatkowo skalibrowanymi i skompensowanymi z użyciem stanowiska na bazie interferometru laserowego. Zapis odbywał się w specjalnym oprogramowaniu do śledzenia pracy czterech czujników.

Badania przeprowadzono na ręcznej maszynie pomiarowej produkcji IZTW Kraków typu NMP 5.5.4 (o zakresach ruchu w osiach $X \times Y \times Z$: $500 \times 500 \times 400$ mm). Na granitowej płycie bazowej maszyny zainstalowano gniazdo pomiarowe z zamocowanymi trzema czujnikami przemieszczeń, ustawionymi zgodnie z głównymi kierunkami kinematycznymi

* Mgr inż. Jacek Gogól, mgr inż. Janusz Franczak, mgr inż. Mariusz Kopeć (ios@ios.krakow.pl) – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania

maszyny (rys. 1). Czujniki mierzyły przemieszczenia środka kuli wzorcowej zamocowanej na sztywno do uchwyty sond (główek pomiarowych) na końcu osi Z maszyny (pinoli).

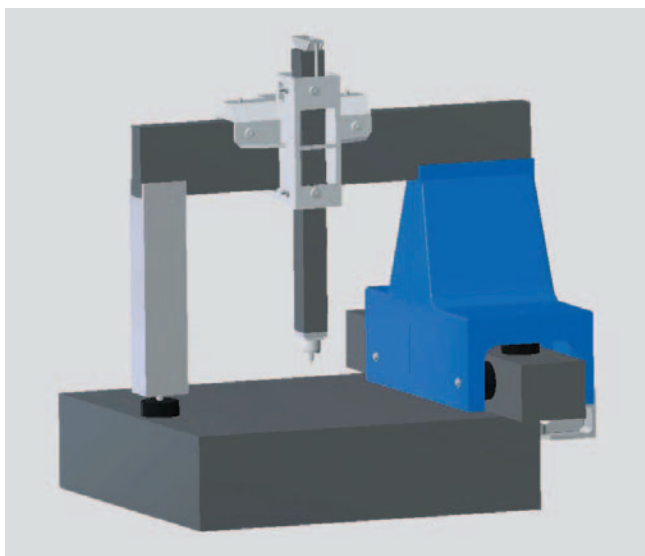
Aby zapewnić stabilność pomiarów, na początkowym etapie badań zablokowano ruch w osi Z. W zależności od potrzeb włączano lub wyłączało zasilane powietrzem prowadnice aerostatyczne osi X i Y, powodując pojawienie się szczeliny powietrznej i eliminując tarcie. Zebrane dane pomiarowe stanowiły podstawę do zdefiniowania modelu wirtualnego.



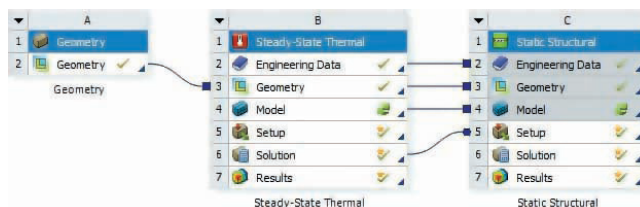
Rys. 1. Gniazdo pomiarowe

■ **Prace projektowe.** Równoległe z pracami badawczymi tworzony był model 3D maszyny. Jego bazę stanowiły modele konstrukcji zaprojektowanej w programie Pro/ENGINEER.

W celu uzyskania poprawnego modelu obliczeniowego, który by wiarygodnie i dokładnie odwzorowywał warunki panujące w maszynie, a jednocześnie zapewniał akceptowalnie krótki czas obliczeniowy, dokonano szeregu uproszczeń. Z modelu usunięto osłony (badania przeprowadzono również bez osłon). Ponieważ oryginalny projekt maszyny zawierał kilkaset elementów o różnym stopniu złożoności, w tym setki tzw. normaliek (śrub, nakrętek itp.), które nie mają znaczenia w modelu obliczeniowym, a drastycznie wydłużają i komplikują proces obliczeniowy, co powoduje trudne do zdiagnozowania błędy, dlatego większość takich elementów została usunięta. Pominęto również podzespoły, które nie brały udziału w analizowanych zjawiskach. Proces był na bieżąco konfrontowany z pracami badawczymi, aby uniknąć wyeliminowania jakiegoś znaczącego podzespołu bądź elementu,



Rys. 2. Model maszyny przygotowany w programie Pro/ENGINEER



Rys. 3. Schemat obliczeniowy w programie Ansys 16.2

który mógłby spowodować wystąpienie błędów w analizach i rozbieżności z faktycznym zachowaniem się maszyny.

W ten sposób opracowano bazowy model maszyny przedstawiony na rys. 2.

Stworzony w programie Pro/ENGINEER model został zaimplementowany do programu Ansys 16.2. Proces obliczeniowy przebiegał według schematu przedstawionego na rys. 3.

Blok A zdefiniował geometrię modelu – w tym wypadku w połączeniu z programem Pro/ENGINEER.

Blok A był połączony z blokiem B, który obrazował analizę termiczną w stanie termicznie ustalonym. Wyniki tej analizy zostały przekierowane do analizy strukturalno-statycznej (bloku C) i stanowiły dla niej jeden z warunków brzegowych.

Model zaimportowany z innego programu CAD został opracowany w docelowym programie obliczeniowym. Do elementów konstrukcji dodano elementy mechanizmu, zwłaszcza w miejscu osadzenia prowadnic aerostatycznych, gdzie realnie występowało połączenie typu kula–stożek. Zdefiniowano parametry materiałowe poszczególnych elementów i obszary ich styku nazywane kontaktami. Zdefiniowano siatkę elementów skończonych według wybranych kryteriów. Aby usprawnić proces obliczeniowy, w pierwszym przybliżeniu ograniczono interwencję w parametry siatki, przyjmując wartości standardowe (preferencje fizyczne na poziomie „Mechanical”).

Tak przygotowany model został obciążony termicznymi warunkami brzegowymi (w tym wypadku wartościami temperatury uzyskanymi z badań w miejscach odpowiadających rozmieszczeniu czujników temperatury) i przeprowadzono analizę termiczną, której najważniejszym wynikiem był rozkład temperatury w całej konstrukcji.

Kolejnym etapem była analiza statyczna. Model został zablozowany, obciążony siłami (np. grawitacji), zdefiniowano parametry tarcia itp. Dodatkowym parametrem wejściowym był uzyskany podczas poprzedniej analizy termicznej rozkład temperatury, który generował odpowiednio dla danego elementu i jego własności materiałowych odkształcenie termiczne. Interesującym wynikiem analizy było odkształcenie całej konstrukcji, a zwłaszcza przemieszczenie środka kuli wzorcowej na końcu osi Z w trzech głównych kierunkach X, Y, Z, co odpowiadało wynikom uzyskanym z pomiaru czujnikami przemieszczeń w trakcie badań maszyny. Różnica między wynikami analizy a wskazaniami czujników zobrazowała poziom zgodności modelu ze zjawiskami występującymi w maszynie.

Wielkość przemieszczeń w badaniach określano przyrostowo pomiędzy dwoma wybranymi punktami czasowymi (początkiem i końcem cyklu pomiarowego) i porównywano je z odpowiadającymi im wielkościami uzyskanymi podczas analizy.

Opracowany model w trakcie pierwszych sprzężonych prac analityczno-badawczych sprawdzono w kilku wybranych sytuacjach ogrzewania konstrukcji. Przypadki te przedstawiono dalej.

Analiza maszyny pomiarowej w trybie jednorodnej zmiany temperatury obiektu

Wykorzystano model stworzony w trakcie poprzedniego cyklu badawczo-obliczeniowego, uwzględniający tylko zmiany wynikające z warunków brzegowych, np. wartości temperatury wprowadzane z czujników oraz występowania tarcia

lub jego braku w przypadku zasilania osi kinematycznych powietrzem. Poza tym nie wprowadzono żadnych zmian w konstrukcji, parametrach materiałowych czy definicjach, np. mechanizmów. Pozwoliło to na ocenę modelu w różnych warunkach środowiskowych.

W pierwszym przypadku przeanalizowano najprostszy wariant, czyli jednorodną zmianę wartości temperatury całej konstrukcji. Zrealizowano to poprzez powolne ochładzanie pomieszczenia laboratoryjnego. Badania przeprowadzono w warunkach tarcia w osiach kinematycznych, bez zasilania sprężonym powietrzem. Procedura prac badawczych przebiegała według schematu przedstawionego w poprzednim rozdziale. W tabl. I zestawiono wyniki pomiarów i analiz komputerowych. W pierwszej linii znajdują się przyrosty przemieszczeń zarejestrowane w poszczególnych osiach maszyny, a w drugiej linii – wartości skompensowane, uwzględniające rozszerzalność uchwytu czujników. Kompensacji podlegał tylko czujnik osi Z, ponieważ układ czujników osi X i Y – z uwagi na jednorodny materiał uchwytu i czujników – powodował samokompensację. W kolejnych liniach przedstawiono wyniki analiz komputerowych na początku i na końcu cyklu, ich przyrost pomiędzy tymi stanami czasowymi, a w ostatniej linii – różnicę między wynikami badań i wynikami numerycznymi.

TABLICA I. Zestawienie wyników

Parametr \ Oś	X	Y	Z
Badania doświadczalne			
Zarejestrowane przyrosty przemieszczeń, μm	-3,3	-3,1	-6,5
Skompensowane przyrosty przemieszczeń, μm	-3,3	-3,1	-7,2
Analizy numeryczne			
Wartość przemieszczenia na początku analizy, μm	-2,7	21,3	11,4
Wartość przemieszczenia na końcu analizy, μm	-0,7	25,5	-19,9
Przyrost przemieszczenia, μm	-2,0	-4,2	-8,5
Różnica między wynikami doświadczalnymi i numerycznymi, μm	1,3	1,1	1,3

Analiza maszyny pomiarowej w przypadku jednostronnego ogrzewania wspornika prawego bramy w warunkach tarcia w osiach kinematycznych i bez tarcia

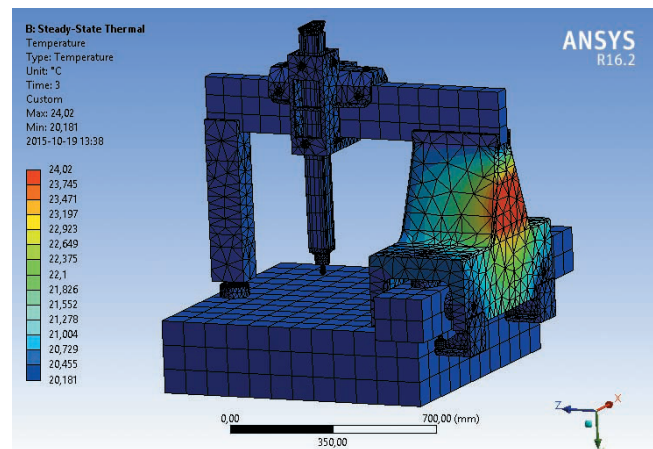
Przeanalizowano sytuację, w której zewnętrzna strona prawego (dużego) wspornika bramy maszyny pomiarowej była intensywnie ogrzewana. Na zewnętrznej powierzchni wspornika zamocowano elektryczną matę grzewczą. Badania przeprowadzono w warunkach tarcia w osiach kinematycznych, bez zasilania sprężonym powietrzem. Procedura prac badawczych nie uległa zmianie. Wyniki obliczeń dla pozycji końcowej przedstawiono na rys. 4 i 5. W tabl. II zestawiono wyniki pomiarów i analiz komputerowych.

TABLICA II. Zestawienie wyników

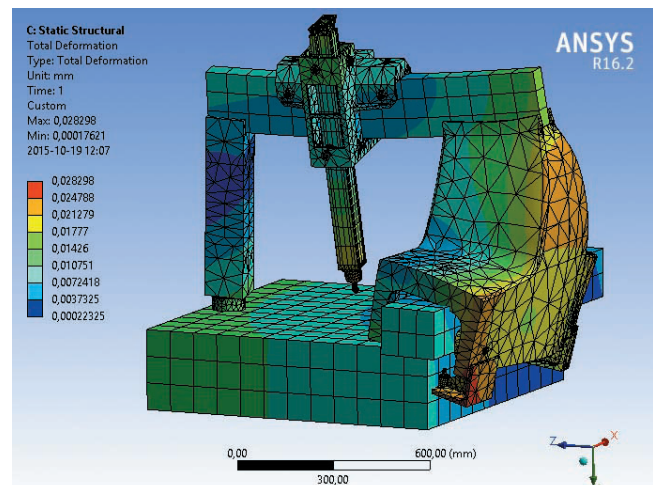
Parametr \ Oś	X	Y	Z
Badania doświadczalne			
Zarejestrowane przyrosty przemieszczeń, μm	10,3	0,4	5,1
Analizy numeryczne			
Wartość przemieszczenia na początku analizy, μm	-2,5	18,8	-9,6
Wartość przemieszczenia na końcu analizy, μm	9,9	20,5	-5,3
Przyrost przemieszczenia, μm	12,4	1,7	4,3
Różnica między wynikami doświadczalnymi i numerycznymi, μm	2,1	1,3	0,8

TABLICA III. Zestawienie wyników

Parametr \ Oś	X	Y	Z
Badania doświadczalne			
Zarejestrowane przyrosty przemieszczeń, μm	13,7	1,0	4,6
Analizy numeryczne			
Wartość przemieszczenia na początku analizy, μm	-3,7	20,5	-11,5
Wartość przemieszczenia na końcu analizy, μm	12,6	22,2	-6,6
Przyrost przemieszczenia, μm	16,3	1,7	4,9
Różnica między wynikami doświadczalnymi i numerycznymi, μm	2,6	0,7	0,3



Rys. 4. Rozkład temperatury w pozycji końcowej



Rys. 5. Widok odkształcenia maszyny w pozycji końcowej

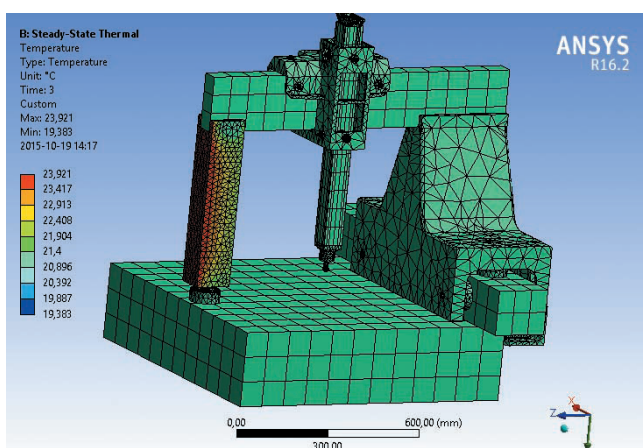
W trzecim przypadku (tabl. III) w opisanej sytuacji wyeliminowano tarcie w osiach kinematycznych X i Y zasilonych powietrzem sprężonym, co spowodowało pojawienie się szczeliny powietrznej.

Analiza maszyny pomiarowej w przypadku jednostronnego ogrzewania wspornika lewego bramy

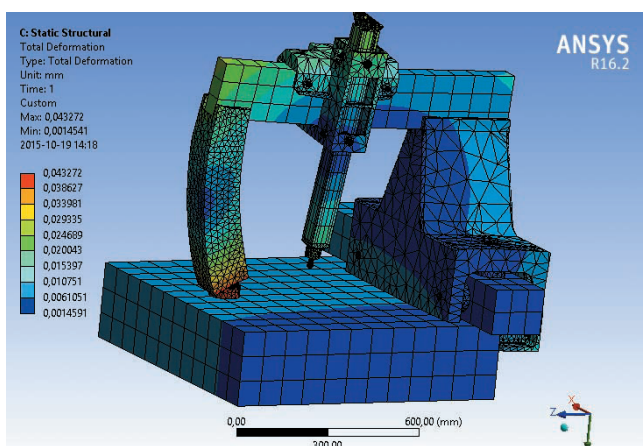
Przeanalizowano sytuację intensywnego ogrzewania zewnętrznej strony lewego (małego) wspornika bramy maszyny pomiarowej. Na zewnętrznej powierzchni wspornika zamocowano elektryczną matę grzewczą. Procedura prac badawczych nie uległa zmianie. Wyniki obliczeń dla pozycji końcowej przedstawiono na rys. 6 i 7. W tabl. IV zestawiono wyniki pomiarów i analiz komputerowych.

TABLICA IV. Zestawienie wyników

Parametr	Oś		
	X	Y	Z
Badania doświadczalne			
Zarejestrowane przyrosty przemieszczeń, μm	-4,5	-0,4	10,2
Analizy numeryczne			
Wartość przemieszczenia na początku analizy, μm	-3,3	21,4	-13,4
Wartość przemieszczenia na końcu analizy, μm	-10,4	21,5	-1,5
Przyrost przemieszczenia, μm	-7,1	0,1	11,9
Różnica między wynikami doświadczalnymi i numerycznymi, μm	2,6	0,5	1,7



Rys. 6. Rozkład temperatury w pozycji końcowej



Rys. 7. Widok odkształcenia maszyny w pozycji końcowej

Wnioski

Wyniki badań i analiz wykazały, że bardzo złożony model całej konstrukcji maszyny pomiarowej może z zadowalającą dokładnością odwzorowywać zjawiska zachodzące na realnej maszynie w różnorodnych warunkach termicznych.

Otwarta została zatem droga dla różnych metod i systemów bądź to kompensacji, bądź sygnalizowania błędów geometrycznych wywołanych zjawiskami termicznymi w konstrukcjach nie tylko maszyn pomiarowych, ale wszelkich urządzeń, w których takie błędy mają znaczący wpływ na jakość pracy. Kontynuacja tych badań pozwoli na dalsze poprawianie stworzonego modelu poprzez bardziej szczegółowe zamodelowanie kilku węzłów konstrukcyjnych (np. charakterystycznej dla maszyn pomiarowych szczeliny powietrznej).

LITERATURA

- Gogól J. „Konceptcja kompensacji termicznej pomiarów na współrzędnościowych maszynach pomiarowych przy użyciu analizy numerycznej”. *Mechanik*. R. 85. Nr 3 (2012): s. 222+225.
- Gogól J. „Zagadnienia termiczne w obrabiarkach i współrzędnościowych maszynach pomiarowych – różnice i podobieństwa”. *Mechanik*. R 87. Nr 11 (2014): s. 892+895. ■