



Przykłady zastosowania MES do analizy wybranych zagadnień w inżynierii materiałowej

B. Mańka^a, A. Śliwa^b

^a Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny
e-mail: bmanka@o2.pl

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny,
Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Technologii Procesów
Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie
e-mail: agata.sliwa@polsl.pl

Streszczenie: W opracowaniu przedstawiono wybrane zagadnienia, dotyczące wykorzystania Metody Elementów Skończonych na przykładzie programu ANSYS w celu doskonalenia nauczania na Uczelni Technicznej. Omówiono wykorzystanie MES oraz zwrócono uwagę na korzyści wynikające z faktu jej stosowania.

Abstract: In the paper were presented selected problems which concern with applying of Finite Element Method on the example of ANSYS programme in order to perfect the engineering education system. It was discussed the usage of MES and it was highlighted benefits from its application.

Słowa kluczowe: metoda elementów skończonych, symulacja komputerowa, element skończony

1. WSTĘP

Obecny rozwój techniczny pozwala na projektowanie prawie dowolnych zasobów zaspakajających wymagania konsumentów oraz pozwalających na zapewnienie zdrowia i bezpieczeństwa człowieka. Jednak dopiero badania eksperymentalne i ich wyniki dające materiały o zupełnie nowych własnościach oraz nowe technologie ich wytwarzania pozwalają na generowanie przełomowych odkryć w dziedzinie techniki, medycyny i wielu innych. To właśnie na bazie nowych materiałów, takich jak powłoki PVD, możliwe jest sterowanie własnościami cech użytkowych nowo projektowanych elementów i uzyskiwanie zupełnie nowych możliwości ich zastosowania niedostępnych do tej pory.

W wielu dziedzinach techniki dalszy rozwój uwarunkowany jest koniecznością pozyskania nowych materiałów. Przykładem jest tu przemysł samochodowy, który długo borykał się z problemem opracowania takich materiałów na pary cierne tłok-cylinder, aby nowe opracowania teoretyczne pozwalające na uzyskiwanie znacznie większych sprawności silników spalinowych mogły być wdrożone.

Obecny poziom wiedzy pozwala na świadome projektowanie własności materiałów przy uwzględnieniu indywidualnych wymagań stawianych konstrukcji. Projektowanie to możliwe jest dzięki wykorzystaniu zaawansowanych technik modelowania i analizy numerycznej w tym metody MES zaimplementowanych w takie programy jak: ANSYS, NASTRAN PATRAN, ABAQUS, COSMOS, MSC MARC, ALGOR, ADINA i inne. Na znaczne przyspieszenie rozwoju inżynierii materiałowej ma także wpływ dynamiczny wzrost mocy obliczeniowej maszyn liczących, co z jednej strony umożliwia analizowanie zjawisk i modeli, które wcześniej były niepoliczalne, a z drugiej strony pozwala na skrócenie czasu obliczeń i zwiększenie ich dokładności.

Dlatego też problem analizy i projektowania własności mechanicznych i termicznych powłok PVD jest szczególnie ważny i aktualny z punktu widzenia nauki oraz zastosowań w przemyśle i był przedmiotem wielu wcześniejszych prac podejmowanych w Instytucie Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Politechniki Śląskiej, które stanowiły podstawę merytoryczną do realizacji tej pracy.

W pracy tej podjęto się odwzorowania zjawisk termicznych i mechanicznych zachodzących podczas badań eksperymentalnych próbki z naniesionymi powłokami PVD, wykorzystano do tego celu metodę elementów skończonych.

2. ETAPY ROZWIĄZYWANIA ZADAŃ ZA POMOCĄ MES

Podczas modelowania i analizy konstrukcji z wykorzystaniem metody elementów skończonych przyjmuje się następujące etapy:

1. Obszar dzieli się na skończoną liczbę geometrycznie prostych elementów, tzw. elementów skończonych;
2. Zakłada się, że elementy skończone połączone są ze sobą w skończonej liczbie punktów (węzły), umieszczonych na obwodach. Przeważnie są umieszczone w narożach;
3. Wybiera się pewne funkcje (funkcje kształtu) oraz określa rozkład analizowanej wielkości fizycznej wewnątrz tych elementów, w zależności od ich wartości;
4. Korzystając z funkcji wagowych przekształca się równania różniczkowe opisujące badane zjawisko do równań metod elementów skończonych;
5. Wykorzystując równania elementów skończonych przeprowadza się asemblację równań stojących przy niewiadomych oraz odpowiadające im wartości prawych stron. Wykorzystuje się dodatkowo warunki początkowe w przypadku, kiedy rozwiązanie zadania jest niestacjonarne. Liczba równań w układzie jest równa liczbie niewiadomych występujących w pojedynczym węźle;
6. Do układu równań wprowadza się warunki brzegowe, następnie modyfikuje się macierze współczynników układu równań oraz wektora prawych stron;
7. Na podstawie obliczeń układu równań otrzymuje się wartości poszukiwanych wielkości fizycznych w węzłach;

8. W przypadku zadania niestacjonarnego, to obliczenia z pkt. 5, 6, 7 prowadzi się do momentu spełnienia warunku, jakim może być np. czas przebiegu zjawiska, określona wartość wielkości fizycznej w węzłach, lub inny parametr.

Dokładność metody wynika z poniższych warunków:

- założone funkcje dokładniej opisują rzeczywisty rozkład pola elementu;
- podział na elementy jest bardziej gęsty, czego skutkiem jest wydłużony czas obliczeń.

Dokładność metody jest tym większa im spełnienie tylko drugiego warunku nie jest wystarczające do uzyskania satysfakcjonujących wyników. Kluczowy jest dobór funkcji interpolacyjnych opisujących stan odkształcenia elementu w zależności od wartości przemieszczeń węzłowych [1-3].

3. PROGRAM ANSYS

Aktualnie program ANSYS jest jednym z najobszerniejszych pakietów programów dla obliczeń MES, jeśli chodzi o ilość zagadnień można go zastosować. W dzisiejszej postaci program ANSYS stosuje elementy skończone zawierające opis fizycznych zjawisk takich jak: wytrzymałość, elektryczność, magnetyzm, przepływ ciepła, przepływ cieczy i gazów i akustyka. W programie można dokonywać obliczeń zagadnień stacjonarnych jak i zmieniających się w czasie. W pracach badawczych jak i w obliczeniach inżynierskich bardzo dużą rolę przywiązuje się do dokładności i powtarzalności wyników. W swojej klasie, tak rozbudowanych pakietów MES, ANSYS posiada odpowiednie certyfikaty łącznie z normą ISO 9001. Według zapewnień Firma ANSYS dopuszczając do użytku nową wersję, poddaje ją minimum 20 tys. testów, porównując wyniki obliczeń z wynikami analitycznymi, bądź z pomiarami rzeczywistego zjawiska [4-6].

4. PRZYKŁADOWE ZASTOSOWANIE MES

Zastosowanie metody elementów skończonych obejmuje wiele dziedzin współczesnego przemysłu oraz najnowsze technologie wspomagane komputerowo. Należy tutaj wymienić przemysł lotniczy, raketowy, samochodowy, stoczniowy, maszynowy, elektrotechniczny oraz takie działy jak biomechanika, medycyna, mechatronika oraz inżynieria materiałowa. Rozwój technik komputerowych pozwala rozwiązać numerycznie wiele ważnych i złożonych obliczeniowo zagadnień technicznych [7-8]. Technologiczny i ekonomiczny nacisk w inżynierii produkcji wymaga optymalizacji istniejących procesów produkcyjnych. Metoda elementów skończonych jest właściwym narzędziem do uzyskania koniecznej wiedzy na temat tych procesów. Metoda elementów skończonych znalazła zastosowanie do projektowania i prognozowania własności narzędzi skrawających. Skomplikowane kształty narzędzi przysparzają wiele trudności przy tradycyjnych obliczeniach wytrzymałościowych. Dotyczy to przykładowo wiertel krętych. Aby zapewnić wysoką dokładność otworów w różnych obrabiarkach dobiera się odpowiednią geometrię wiertła [9]. Narzędzie powinno się charakteryzować odpowiednią sztywnością, aby mogło pracować przy zalecanych parametrach skrawania. Dzięki zastosowaniu metody elementów skończonych możliwe było określenie naprężeń i odkształceń w przekrojach wiertel, co pozwoliło na optymalizację

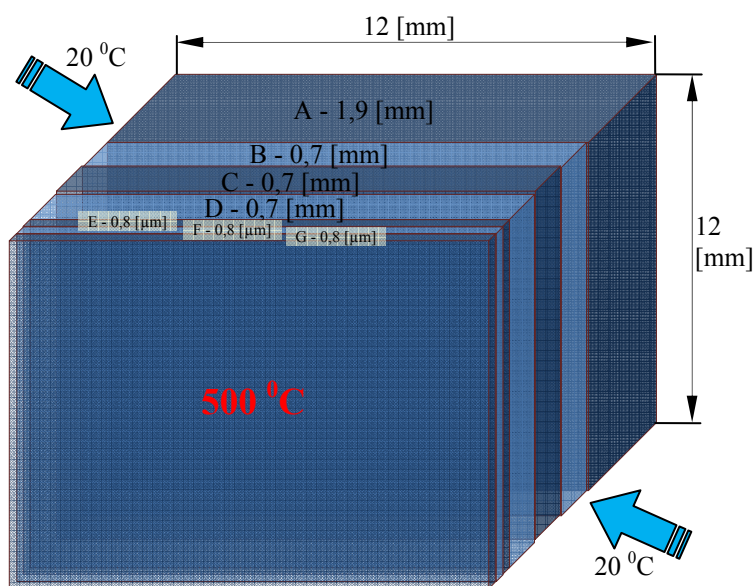
kształtu wiertła [10]. Metoda elementów skończonych znalazła również swoje zastosowanie do analizy rozkładu temperatury w blokach tłokowych silników spalinowych, co szczegółowo przedstawiono w dalszej części pracy.

5. MODELOWANIE

Przedmiotem pracy jest numeryczne odwzorowanie warunków przebiegu badań doświadczalnych próbek z naniesionymi powłokami PVD w celu uzyskania rozkładu naprężeń, przemieszczeń oraz pól temperatur w modelowanych elementach.

Aby zrealizować tak postawiony cel pracy niezbędne było wstępne określenie metody modelowania numerycznego pozwalającego na odwzorowywanie własności termicznych i mechanicznych różnych kombinacji i wariantów stosowania powłok PVD przy jednoczesnym ograniczeniu możliwości obliczeniowych komputera z 32 bitowym systemem operacyjnym. Wybrany sposób odwzorowywania i opracowany model pozwolił na analizę rozkładu naprężeń i przemieszczeń oraz pól temperatur z jednoczesnym znacznym zredukowaniem czasu obliczeń. Oprócz symulacji procesu chłodzenia próbki z jednoczesnym określeniem rozkładu naprężeń i przemieszczeń w funkcji czasu, przeanalizowano również wpływ poszczególnych konfiguracji powłok PVD oraz powłok nakładanych technologią metalurgii proszków na rozkład i wartości maksymalne naprężeń i przemieszczeń oraz gradienty temperatur.

W celu określenia możliwości modelowania zjawisk termicznych i mechanicznych zachodzących w układzie elementu rodzimego (rdzenia) z naniesionymi na nim wielowarstwowymi powłokami PVD oraz powłokami wykonanymi metodą metalurgii proszków przeanalizowano możliwości wykorzystania do tego celu metody elementów skończonych MES. W tym celu podjęto się zamodelowania układu przedstawionego na rys. 1.



Rys. 1. Modelowany obiekt składający się z siedmiu stref

W pracy analizowano cztery warianty konfiguracji powłok naniesionych na rdzeń ze stali narzędziowej HS 6-5-2 zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 2. Kolejne trzy warstwy zawierały coraz większą domieszkę TiC lub WC. Pozostałe trzy warstwy to powłoki PVD o grubości osiem dziesiątych mikrometra.

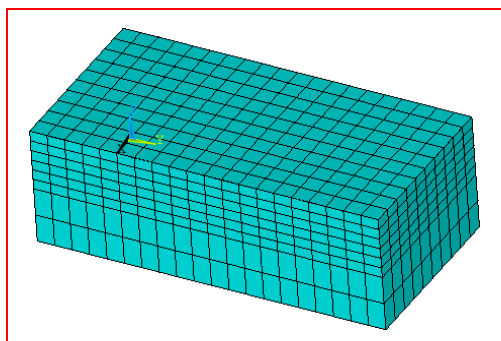
Podczas modelowania zjawisk termicznych i mechanicznych zachodzących w próbce z naniesionymi powłokami, poddanej działaniu temperatury 500⁰C zastosowano następujące założenia upraszczające:

- zamodelowano połowę geometrii modelowanej próbki wprowadzając w płaszczyźnie podziału warunki symetrii;
- wprowadzono liniowe własności materiałów modelowanych struktur bez uwzględnienia zmian ich wartości w funkcji temperatury;
- podczas symulacji chłodzenia modelowanej próbki w funkcji czasu niezbędne było wprowadzenie gęstości oraz ciepła właściwego materiałów badanych powłok. Ze względu na pomijalnie małe znaczenie tych własności na wartości przemieszczeń i naprężeń modelu oraz brak informacji literaturowych dotyczących tych wielkości wprowadzono jednakowe wartości dla wszystkich warstw;
- odwzorowywane powłoki zamodelowano z wprowadzeniem wyraźnych granic pomiędzy nimi bez uwzględnienia gradientowych stref przejściowych;
- przyjęto jednakową, na wszystkich powierzchniach zewnętrznych, wartość współczynnika konwekcji, podczas gdy w trakcie badań doświadczalnych wartość współczynnika konwekcji w górnych strefach pionowych ścian próbki, była większa niż na powierzchniach poziomych (konwekcja swobodna). Na podstawie analizy kilku wariantów obliczeń dla różnych wartości tego współczynnika (w zakresie $\pm 30\%$ wartości średniej tj. 15 W/m²K) stwierdzono, że przyjęcie stałych wartości współczynnika oddawania ciepła do otoczenia nie ma istotnego znaczenia dla uzyskiwanych wartości przemieszczeń i naprężeń a jedynie wpływa na czas chłodzenia.

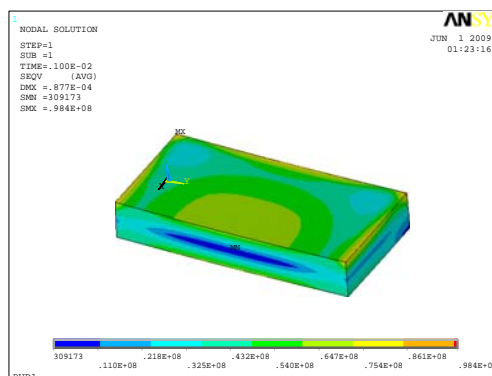
Strefa 1	HS 6-5-2			
Strefa 2	WS 6-5-2+4%WC		WS 6-5-2+4%TiC	
Strefa 3	WS 6-5-2+8%WC		WS 6-5-2+8%TiC	
Strefa 4	WS 6-5-2+12%WC		WS 6-5-2WS 6-5-2+12%TiC	
Strefa 5	TiN	TiN	TiN	TiN
Strefa 6	Ti(C,N)	(0.7Ti, 0.3Al)N	Ti(C,N)	(0.7Ti, 0.3Al)N
Strefa 7	TiC	(0.3Ti, 0.7Al)N	TiC	(0.3Ti, 0.7Al)N
	Wariant I	Wariant II	Wariant III	Wariant IV

Rys. 2. Różne warianty podlegające analizie wytrzymałościowej powłok PVD poddanych obciążeniom termicznym i mechanicznym

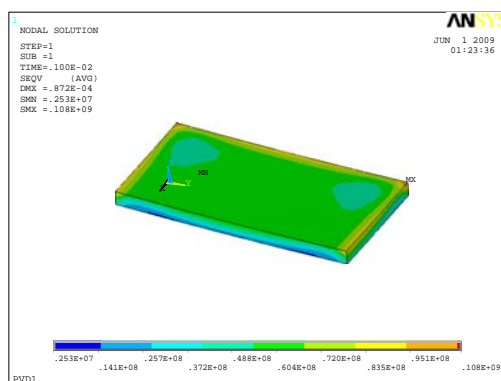
Rysunek 3 przedstawia model dyskretny, na rysunkach 4-10 przedstawiono rozkłady naprężeń, otrzymanych dla I wariantu, zgodnie z założeniami zawartymi na rys. 2.



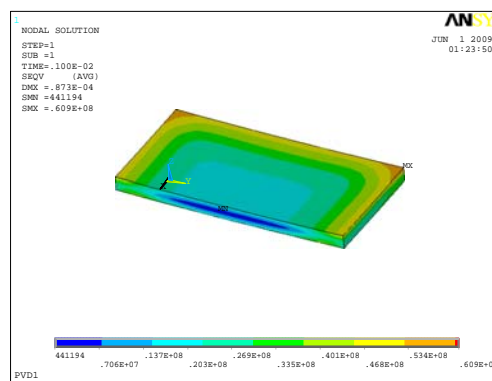
Rys. 3. Dyskretyzacja modelu elementami objętościowymi typu solid 226 w programie ANSYS



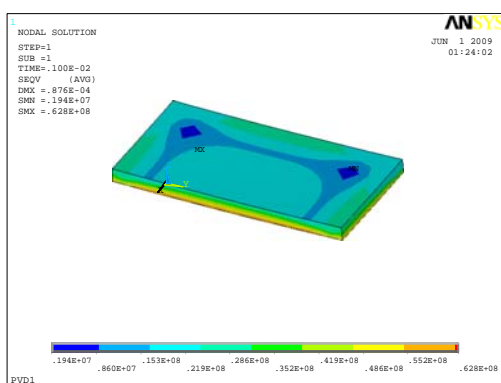
Rys. 4. Rozkład naprężeń według hipotezy HMM dla warstwy 1, wariantu I modelu numerycznego próbki podgrzanej do temperatury 500 °C w czasie t=0 s



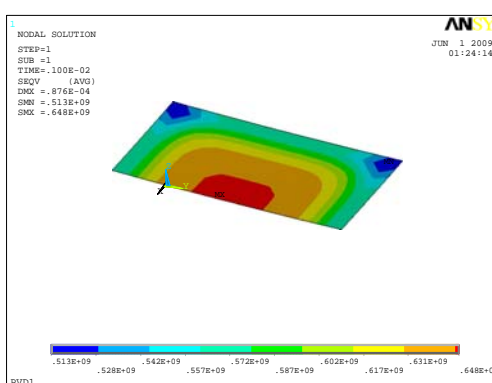
Rys. 5. Rozkład naprężeń według hipotezy HMM dla warstwy 2, wariantu I modelu numerycznego próbki podgrzanej do temperatury 500 °C w czasie t=0 s



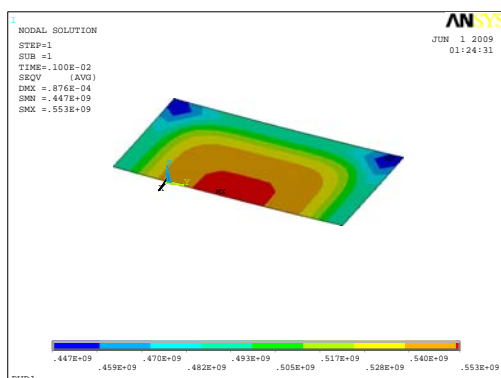
Rys. 6. Rozkład naprężeń według hipotezy HMM dla warstwy 3, wariantu I modelu numerycznego próbki podgrzanej do temperatury 500 °C w czasie t=0 s



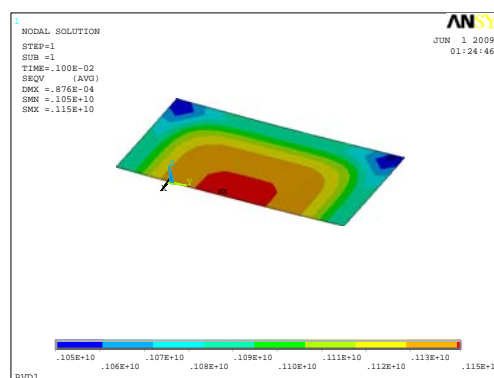
Rys. 7. Rozkład naprężeń według hipotezy HMM dla warstwy 4, wariantu I modelu numerycznego próbki podgrzanej do temperatury 500 °C w czasie t=0 s



Rys. 8. Rozkład naprężeń według hipotezy HMM dla warstwy 5, wariantu I modelu numerycznego próbki podgrzanej do temperatury 500 °C w czasie t=0 s



Rys. 9. Rozkład naprężeń według hipotezy HMH dla warstwy 6, wariantu I modelu numerycznego próbki podgrzanej do temperatury 500°C w czasie $t=0$ s



Rys. 10. Rozkład naprężeń według hipotezy HMH dla warstwy 7, wariantu I modelu numerycznego próbki podgrzanej do temperatury 500°C w czasie $t=0$ s

5. PODSUMOWANIE

Zastosowanie komputerowego wspomaganie ukierunkowane jest na rozwoju otwartego i uniwersalnego oprogramowania, pozwalającego użytkownikowi na szybką i wiarygodną analizę konstrukcji w warunkach wirtualnych, co pozwala na skrócenie czasu oraz zmniejszenie kosztów projektu.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej oraz po zamodelowaniu i przeprowadzeniu obliczeń numerycznych powłok PVD poddanych obciążeniom termicznym i mechanicznym określono następujące wnioski i kierunki dalszych prac:

- analiza literaturowa wskazała na celowość zastosowania modelowania z wykorzystaniem MES do określenia własności wytrzymałościowych próbki z naniesionymi strefami;
- w ramach pracy przeanalizowano różne możliwości opracowania modeli MES w programie ANSYS w celu odwzorowania zjawisk termicznych i mechanicznych. Analiza ta wykazała celowość zastosowania modelu bryłowego z wprowadzoną symetrią podziału, co zredukowało czas obliczeń i umożliwiło przeprowadzenie analizy na komputerze z 32 bitowym systemem operacyjnym (ograniczenie przydzielanej pamięci RAM do 2GB);
- analiza sposobu odebrania stopni swobody modelu wykazała, że stosowany wcześniej w literaturze sposób utwierdzenia wprowadza dodatkowo znaczne naprężenia a uzyskiwane rozkłady naprężeń i odkształceń nie są adekwatne do analizowanego zjawiska;
- na podstawie przeprowadzonej analizy MES stwierdzono, że największe naprężenia występują w czasie $t=0$ s dla temperatury początkowej 500°C . Dlatego też, dla analizy wytrzymałościowej, w której istnieje mała prędkość chłodzenia odpowiadająca konwekcji swobodnej, wystarczające jest przeprowadzanie analizy wyłącznie dla czasu początkowego w najwyższej temperaturze próbki;
- zmiana wartości współczynnika konwekcji w zakresie $\pm 30\%$ nie ma wpływu na naprężenia maksymalne rejestrowane w próbce a jedynie na czas jej chłodzenia;
- największe wartości naprężeń zredukowanych HMH uzyskano w strefach PVD, a uzyskana wartość maksymalna wynosiła dla strefy nr 7, wariantu nr II (1290 MPa).

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej oraz badań modelowych można stwierdzić, że przedstawiony sposób odwzorowania rozkładu naprężeń i przemieszczeń daje szerokie możliwości do jego wykorzystania na etapie projektowania własności wytrzymałościowych i termicznych nowych powłok stosowanych konstrukcji maszyn.

Autor pracy ma jednak świadomość szeregu założeń upraszczających przyjętych zarówno na etapie wyznaczania własności materiałowych jak i samego modelowania, co może stanowić kierunki dalszego rozwoju tej dziedziny badań.

Istnieje zatem bardzo szeroki wachlarz zastosowań, dla których pakiet ANSYS może zostać wykorzystany w procesie kształcenia inżynierów.

PODZIĘKOWANIA

Badania zostały częściowo zrealizowane w ramach projektu N N519 384136 kierowanego przez Dr Agatę Śliwę.

LITERATURA

1. S. Łączek, Wprowadzenie do systemów elementów skończonych ANSYS (ver. 5.0 i 5-ED), Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej, Kraków, 1999.
2. E. Rusiński, Metoda elementów skończonych, system COSMOS, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1994.
3. www.mecso.com.pl
4. K. Lawrence, Ansys Tutorial-release 6.1, SDC Schroff Development Corporation, 2002.
5. J. Baker, Ansys exercise – Ansys Tutorial.
6. www.ansys.com
7. M.R. Hatch, Vibration using MATLAB and ANSYS, Chapman & Hall/CRC, 2001.
8. G. Rakowski, Z. Kacprzyk, Metoda Elementów Skończonych w mechanice konstrukcji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005.
9. M. Łodygowski, W. Kąkol, Metoda elementów skończonych w wybranych zagadnieniach mechaniki konstrukcji inżynierskich, skrypt nr 1779, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1994.
10. J. Wodecki, Badania modelowe narzędzi skrawających za pomocą metody elementów skończonych, Materiały XI Konferencji „Informatyka w Technologii Metali” KomPlastTech 2004, Zakopane, 2004.