



Prognozowanie mikrotwardości powłok PVD na podstawie symulowanych odkształceń plastycznych

R. Dziwis^a, W. Kwaśny^b

^a Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny
e-mail: dziwis@gmail.com

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

Streszczenie: W pracy przedstawiono możliwość zastosowania Metody Elementów Skończonych do prognozowania mikrotwardości powłok Ti+TiN uzyskanych w magnetronowym procesie PVD na spiekanej stali szybko tnącej. Porównano wyniki symulacji komputerowej z wynikami eksperymentalnymi mikrotwardości powłok Ti+TiN. Symulację komputerową odkształceń plastycznych na podstawie, których wyznaczono mikrotwardość przeprowadzono w środowisku ANSYS, przy wykorzystaniu Metody Elementów Skończonych.

Abstract: The paper presents the possibility of applying the finite elements method for microhardness forecasting of Ti+Tin coatings obtained in magnetron PVD process on high-speed steel. The computer simulation results were compared with experimental results of microhardness in Ti+TiN coatings. Computer simulation of plastic strain, on the grounds of which the microhardness was determined, was carried out in ANSYS programme, using the finite elements method.

Słowa kluczowe: Metoda Elementów Skończonych, symulacja komputerowa, powłoki PVD, mikrotwardość

1. WSTĘP

Szybki rozwój współczesnej nauki i techniki stawia stale rosnące wymagania wykorzystywanym materiałom. Zastosowanie nowych materiałów wiąże się bezpośrednio z ich własnościami, a bardzo często z własnościami ich warstw powierzchniowych. Jedną z ważniejszych i najczęściej stosowanych metod kształtowania własności warstw powierzchniowych jest nakładanie powłok w procesie PVD. Zmiana parametrów procesu nanoszenia umożliwia regulowanie struktury powłok, ich twardości i przyczepności do podłoża, a w wyniku tego własności eksploatacyjnych. W pracy wykorzystano metodę elementów skończonych (MES), obecnie szeroko stosowaną w rozwiązywaniu problemów inżynierskich, z wykorzystaniem programu ANSYS do prognozowania mikrotwardości powłok Ti+TiN uzyskanych w procesie

PVD na podłożu ze spiekanej stali szybko tnącej [1-4]. Systemy MES można zaliczyć do programów grupy CAD – wspomagających konstruowanie. Do najbardziej znanych systemów MES można zaliczyć: Abaqus, Mechanica, ANSYS, Nastran, Nisa, Cosmos, Adina, Algor. Spośród wielu systemów MES – ANSYS jest programem zaliczanym do wiodących.

Celem pracy jest prognozowanie mikrotwardości powłok PVD na podstawie symulowanych odkształceń plastycznych.

2. PODSTAWOWE POJĘCIA MES

Podstawową cechą Metody Elementów Skończonych jest podzielenie badanego obiektu (lub obszaru pola) na skończoną liczbę podobszarów, zwanych elementami skończonymi, które połączone są w punktach zwanych węzłami. Rozmiar elementów zależy od wymagań narzucanych przez kształty i zmienność opisywanych pól wektorowych i postulowanej dokładności. Rozmiary i liczba elementów limitowane są możliwościami obliczeniowymi, gdyż liczba równań jest proporcjonalna do liczby węzłów i stopni swobody istniejących w każdym z nich. MES jest metodą numeryczną – sprowadzającą rozwiązywanie równań różniczkowych do działań na macierzach, a obszar jego zastosowań poszerza się wraz z rozwojem programów komputerowych.

3. 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.

4. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Badania wykonano na próbkach ze spiekanej stali szybkotnącej, zawierającej 1,28%C, 4,2%Cr, 5,0%Mo, 6,4%W, 3,1%V i 8,5%Co. Przed naniesieniem powłok próbki polerowano mechanicznie. Następnie wprowadzono je do jednokomorowego pieca próżniowego z wbudowanym magnetronem do rozpylania jonowego w odległości 95 mm od tarczy magnetronu. Tarczę magnetronu wykonano ze stopy tytanu zawierającego 90%Ti, 5,7% Al, 1,4%Cr i 2,0%Mo. Proces nanoszenia powłok realizowano w 460, 500 i 540°C.

Skład chemiczny powłok określono wykorzystując optyczną spektroskopię wyładowania jarzeniowego GDOS, natomiast ich grubość wyznaczono metodą „kalotestu”.

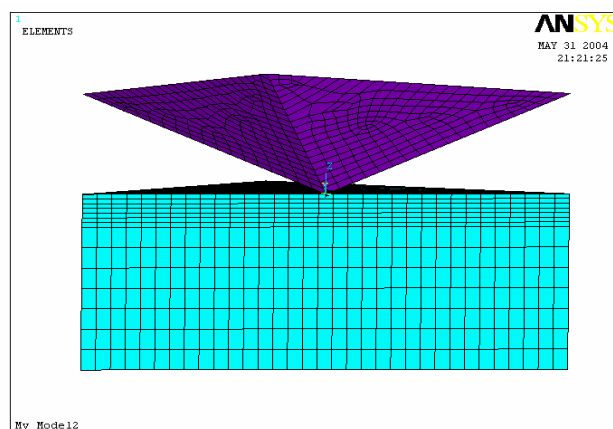
Badania mikrotwardości powłok przeprowadzono na ultramikrotwardościomierzu DUH 202 firmy SHIMADZU. Warunki badania dobrano tak, aby osiągnąć zamierzone i porównywalne rezultaty dla wszystkich analizowanych powłok. Pomiarów dokonano przy obciążeniu 0,05 N, wykonując 6 odcisków dla każdej badanej próbki, tak, by głębokość odcisków była mniejsza niż 1/10 grubości naniesionych powłok, eliminując w dużym stopniu wpływ podłoża na otrzymane wyniki pomiarów. Próba pozwala na obserwację zmian odkształcenia plastycznego i sprężystego materiału próbki odpowiednio w czasie obciążenia i odciążenia. Precyzyjny układ pomiarowy pozwala zarejestrować głębokość tworzonego odcisku podczas obciążenia, jak również podczas obciążenia wgłębnika.

Symulację komputerową odkształceń plastycznych na podstawie której wyznaczono mikrotwardości analizowanych powłok przeprowadzono w środowisku ANSYS 12, przy zastosowaniu Metody Elementów Skończonych, na podstawie danych eksperymentalnych zestawionych w tablicy 1. W programie ANSYS 12 utworzono model, który jest 1/2 rzeczywistej próbki podczas próby mikrotwardości, aby uprościć pracochłonność obliczeniową symulacji. Ze względu na symetrię próbki takie uproszczenie jest zgodne z rzeczywistością. Model obliczeniowy składa się z nieodkształcalnych płaszczyzn, które reprezentują piramidę diamentową, powierzchni kontaktu, (reprezentującą wzajemne oddziaływanie powierzchni penetratora i powłoki) oraz powłoki z azotku tytanu i materiału podłoża. Tak sformułowany model obliczeniowy podzielono na siatkę elementów skończonych składającą się z 5691 węzłów i 17073 elementów. Podczas symulacji zostały użyte elementy SOLID 185 dla powłoki i podłoża, (elementy trójwymiarowe 8-węzłowe), oraz elementy typu CONTA 174 dla penetratora. Na rysunku 1 przedstawiono analizowany model geometryczny z nałożoną siatką elementów skończonych.

Tablica 1. Zestawienie wyników analizy składu chemicznego, pomiaru grubości oraz własności mechanicznych analizowanych powłok

Table 1. The summary data of the substrate, interface, and outer coating material used for computer simulation of microhardness in the Ti+TiN coatings

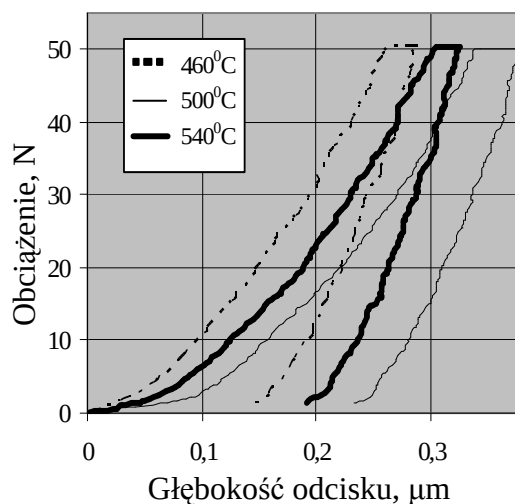
Temperatura procesu, °C	Grubość powłoki, μm	Stężenie atomowe pierwiastków, %			Moduł sprężystości wzdłużnej, GPa	HV _{0,05N}
		Ti	N	Al		
460	6,7	48,1	35,9	12,8	450	2700
500	3,7	48,1	46,9	2,4	380	1600
540	3,8	47,9	44,7	7,3	400	2400



Rysunek 1. Model geometryczny z nałożoną siatką elementów skończonych
 Figure 1. Analysed geometrical model with the overlaid finite elements mesh

5. WYNIKI BADAŃ

Na podstawie przeprowadzonych badań metaloznawczych stwierdzono, że największą grubość i mikrotwardość wykazują powłoki uzyskane w 460°C charakteryzujące się najwyższym stężeniem atomowym Al. Wpływ warunków nanoszenia na skład chemiczny oraz własności mechaniczne analizowanych powłok przedstawiono w tablicy 1 natomiast na rysunku 2 przedstawiono zarejestrowaną zależność obciążenia i odciążenia w funkcji zagłębienia penetratora w badany materiał podczas pomiaru mikrotwardości analizowanych powłok, na podstawie którego wyznaczono moduł sprężystości wzdłużnej.



Rysunek 2. Zależność obciążenia i odciążenia w funkcji zagłębienia się penetratora zarejestrowana w czasie pomiaru mikrotwardości
 Figure 2. Dependence of load and unload during penetration observed by hardness measurements

Wykorzystując dane eksperymentalne oraz tablicowe zaprognozowano mikrotwardość na podstawie zamodelowanych odkształceń plastycznych w analizowanych powłokach w środowisku ANSYS, przy wykorzystaniu Metody Elementów Skończonych. W wyniku

analizę konstrukcji w warunkach wirtualnych, co pozwala na skrócenie czasu oraz zmniejszenie kosztów projektu.

W pracy przedstawiono model odkształceń plastycznych umożliwiający prognozowanie mikrotwardości powłok PVD z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych (MES). Na podstawie danych dotyczących powłoki, materiału podłoża oraz penetratora (moduł sprężystości wzdłużnej, współczynnik Poissona, współczynnik rozszerzalności cieplnej) można prognozować mikrotwardość powłok uzyskanych w procesie PVD. Wyniki symulacji komputerowej spełniają założone kryteria, co pozwala sądzić o przydatności proponowanego modelu.

ANSYS jest wiodącym na świecie pakietem do obliczeń MES umożliwiającym kompleksową symulację w każdej niemal dziedzinie nauki i przemysłu. Program ten oferuje bardzo duży zakres analiz, od statyki do pola elektromagnetycznego poprzez zjawiska zmienne w czasie i możliwość symulacji zjawisk liniowych i bardzo wyszukanych nieliniowości [5-7].

Program posiada wszystkie narzędzia potrzebne do postawienia zadania, rozwiązania i weryfikacji wyników bez potrzeby korzystania z dodatkowego zewnętrznego oprogramowania. Łatwość obsługi programu i komfortowy interfejs graficzny umożliwia nawet niedoświadczonemu użytkownikowi dokonywanie pierwszych analiz po krótkim wprowadzeniu. ANSYS składa się z wielu narzędzi, co umożliwia optymalne dobieranie wymaganych opcji do własnych potrzeb. Stosowanie Metody Elementów Skończonych (MES) przynosi już po krótkim czasie korzyści znacznie przewyższające poniesione koszty. Możliwe staje się projektowanie optymalnych pod wieloma względami konstrukcji (np. o minimalnym ciężarze, energooszczędnych) drastycznie maleje liczba kosztownych prototypów, skrócony jest znacznie czas wprowadzania produktu na rynek.

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

LITERATURA

1. A. Śliwa, J. Mikuła, L.A. Dobrzański, FEM application for modelling of PVD coatings properties, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 41/1-2 (2010) 164-171.
2. A. Śliwa, J. Mikuła, K. Gołombek, L.A. Dobrzański, FEM modelling of internal stresses in PVD coated FGM, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 36/1 (2009) 71-78.
3. A. Śliwa, L.A. Dobrzański, W. Kwaśny, W. Sitek, The computer simulation of internal stresses on the PVD coatings, *Archives of Computational Materials Science and Surface Engineering* 1/3 (2009) 183-188.
4. L.A. Dobrzański, A. Śliwa, W. Kwaśny, The computer simulation of internal stresses in coatings obtained by the PVD process, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 20/1-2 (2007) 355-358.
5. L.A. Dobrzański, A. Śliwa, T. Tański, Numerical simulation model for the determination of hardness for casting the magnesium alloys MCMgAl6Zn1, *Archives of Materials Science* 29/3 (2008) 118-124.
6. L.A. Dobrzański, A. Śliwa, T. Tański, Finite Element Method application for modelling of mechanical properties, *Archives of Computational Materials Science and Surface Engineering* 1/1 (2009) 25-28.
7. A. Śliwa, M. Matula, L.A. Dobrzański, Finite element method application for determining feedstock distribution during powder injection moulding, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 37/2 (2009) 584-591.