

Marcin KOT*, **Wiesław RAKOWSKI***, **Łukasz MAJOR****,
Paulina INDYKA**

MODELOWANIE I BADANIA EKSPERYMENTALNE PĘKANIA CIENKICH POWŁOK CERAMICZNYCH I WĘGLOWYCH

ANALYSIS OF FRACTURE OF THIN CERAMIC AND CARBON COATINGS BY MODELING AND INDENTATION EXPERIMENTS

Słowa kluczowe:

powłoki, pękanie, modelowanie, indentacja

Key words:

coatings, fracture, modeling, indentation

Streszczenie

Praca zawiera analizę deformacji i naprężeń prowadzących do niszczenia układów powłoka–podłoże przez odkształcenia plastyczne podłoża i pękanie twardych powłok. Do analizy wykorzystano obliczenia numeryczne metodą elementów skończonych oraz wyniki testów indentacyjnych. Badano powłoki ceramiczne TiN oraz węglowe a-C:H nałożone na stalowe

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: kotmarc@imir.agh.edu.pl.

** Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN, Kraków 30-059, ul. Reymonta 25.

podłoża. Określono obciążenia prowadzące do powstawania charakterystycznych form niszczenia oraz towarzyszący im stan naprężeń. Wpływ mikrostruktury powłok na powstawanie i propagację pęknięć badano z użyciem mikroskopii SEM i TEM.

WPROWADZENIE

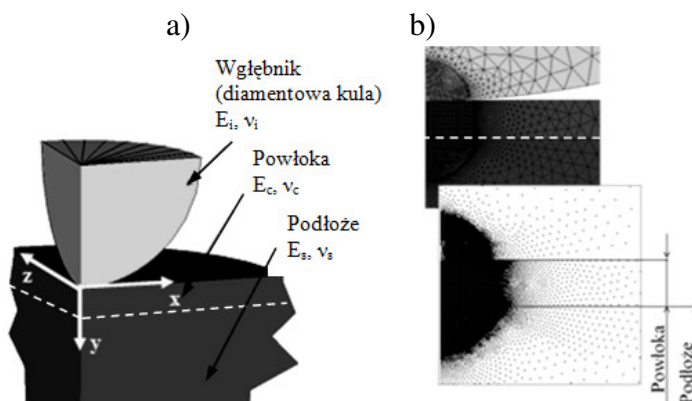
Wielu elementom maszyn, narzędziom, implantom stawiane są coraz wyższe wymagania dotyczące przenoszenia coraz większych obciążeń oraz ograniczania tarcia i zużycia. Najczęściej stosowanym zabiegiem mającym spełnić te wymagania jest odpowiednie smarowanie węzłów tarcia. Stosowanie środków smarnych jest jednak w wielu wypadkach niemożliwe lub np. groźne dla środowiska, stąd widoczna staje się tendencja do ograniczania ich używania. To jest obszar, w którym powłoki znajdują coraz więcej zastosowań. Jedną z grup są twarde powłoki, które umożliwiają znaczące ograniczenie zużycia, a niskie wartości współczynnika tarcia z wieloma metalami powodują, że mogą one być stosowane na węzły tarcia pracujące bez smarowania [L. 1, 2]. Pomimo pojawiających się powłok z coraz nowszych materiałów i o złożonej budowie, brak jest opracowanych metod badawczych i zależności umożliwiających określenie dopuszczalnych nacisków, przy jakich mogą pracować układy powłoka–podłoże. Duże możliwości analiz z zakresu mechaniki kontaktu takich złożonych układów daje metoda instrumentalnej indentacji i modelowanie z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Możliwe jest dzięki temu powiązanie siły i głębokości penetracji mierzonych w trakcie testu z rzeczywistym stanem naprężenia i odkształcenia w powłoce i podłożu [L. 3–5].

W pracy przedstawiono wyniki takich analiz dla powłok ceramicznych TiN oraz węglowych a-C:H nałożonych na stalowe podłoża, co pozwoliło wyznaczyć wartości maksymalnych obciążeń/naprężeń prowadzących do niszczenia tych powłok.

MODELOWANIE MES I METODYKA BADAWCZA

Modelowanie oraz testy mechaniczne prowadzono dla powłok TiN i a-C:H o grubości odpowiednio 1,4 i 3,5 μm . Powłoki nałożono na podłoża ze stali austenitycznej X10CrNi 18-8 metodą PLD (Pulsed Laser Deposition) [L. 6].

Modelowanie prowadzono z użyciem programu ANSYS 9. Ze względu na osiową symetrię rozpatrywanego modelu obliczenia prowadzono na $\frac{1}{4}$ rzeczywistego modelu (**Rys. 1a**). Przy dyskretyzacji (podział na elementy skończone) wzięto pod uwagę obszary, gdzie spodziewano



Rys. 1. Modelowany układ powłoka–podłoże wraz z wgłębnikiem: a) widok $\frac{1}{4}$ modelu, b) podział na elementy skończone

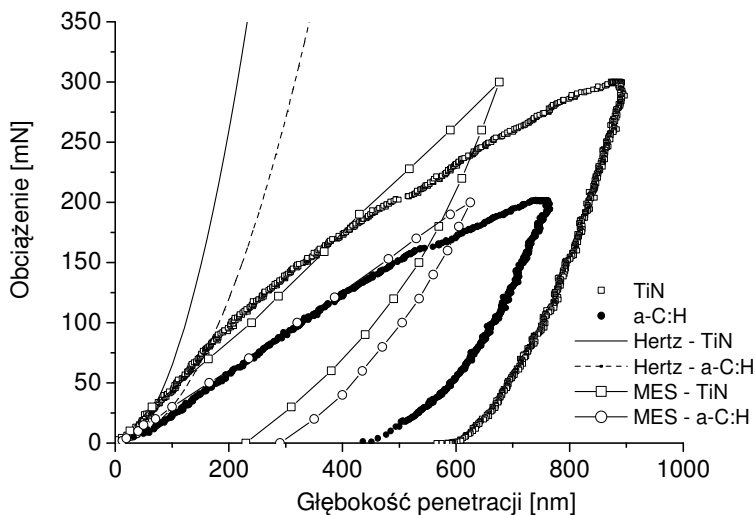
Fig. 1. Modeled coating-substrate system: a) view $\frac{1}{4}$ of the model, b) finite elements mesh

się znacznej koncentracji naprężeń, czyli w obszarze przyległym do pola kontaktu (**Rys. 1b**) [L. 5]. Wartości modułu sprężystości, liczby Poissona i granicy plastyczności materiałów powłoki, podłoża i wgłębnika przyjęto na podstawie wyników testów indentacyjnych oraz z danych literaturowych. Do badań wykorzystano urządzenie MCT-CSM Instruments oraz sferyczny wgłębnik o promieniu zaokrąglenia $R_i = 20 \mu\text{m}$.

WYNIKI BADAŃ

Na **Rysunku 2** przedstawiono krzywe indentacyjne dla obydwu układów powłoka–podłoże wykonane odpowiednio z maksymalną siłą 200 i 300 mN dla powłoki a-C:H i TiN. Na wykresie dołączono także krzywe indentacyjne otrzymane z modelowania (oznaczenie MES-powłoka) i krzywe wynikające z teorii Hertza dla indentacji nieskończenie grubej powłoki (oznaczenie Hertz-powłoka). Porównując krzywe opisane z zależności Hertza i krzywe indentacyjne, widoczny jest wpływ podłoża na deformacje, które zaczyna odgrywać istotną rolę przy obciążeniu około 20 mN i głębokości penetracji 100 nm. Wartości te odpowiadają wynikom mo-

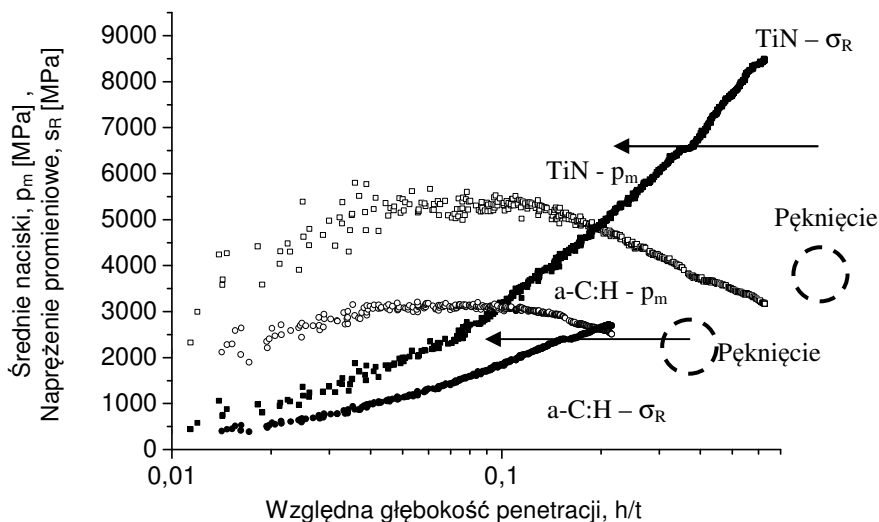
delowania MES, przy których dochodziło do pierwszego uplastycznienia podłoża. Krzywe siła–głębokość penetracji otrzymane z modelowania dobrze odpowiadają rzeczywistym krzywom do momentu powstawania pęknięć w powłokach. Dla badanych układów powłoka–podłoże obserwowano powstawanie współśrodkowych pęknięć wokół odcisków. Obciążenie prowadzące do powstawania pierwszego pęknięcia wynosiło 160 ± 20 i 205 ± 15 mN odpowiednio dla powłoki a-C:H i TiN.



Rys. 2. Krzywe siła–głębokość penetracji otrzymane z testów indentacyjnych modelowania i zależności Hertza

Fig. 2. Load-penetration depth curves obtained from spherical indentation tests, FEM-modeling and Hertz equations

Analiza numeryczna umożliwiła powiązanie deformacji rozpatrywanych układów z rozkładem naprężeń i ich koncentracją w charakterystycznych miejscach. Zmiany średnich nacisków na powierzchni styku p_m oraz maksymalne naprężenia promieniowe na powierzchni przedstawiono na **Rysunku 3**. Średnie naciski osiągają swe maksima przy względnej głębokości penetracji $h/t = 0,06-0,08$. Przy większych deformacjach naciski spadają ze względu na duże deformacje plastyczne podłoża powodujące znaczny wzrost pola kontaktu z wgłębkiem. Natomiast to uplastycznienie podłoża prowadzi do znacznej koncentracji promieniowych naprężeń rozciągających na powierzchni powłoki wynikającej z jej zginania tuż poza strefą kontaktu. Obliczone z modelu MES naprężenia prowadzące do powstawania pęknięć na powierzchni wynoszą $\sigma_R = 6,5$ i $2,4$ GPa



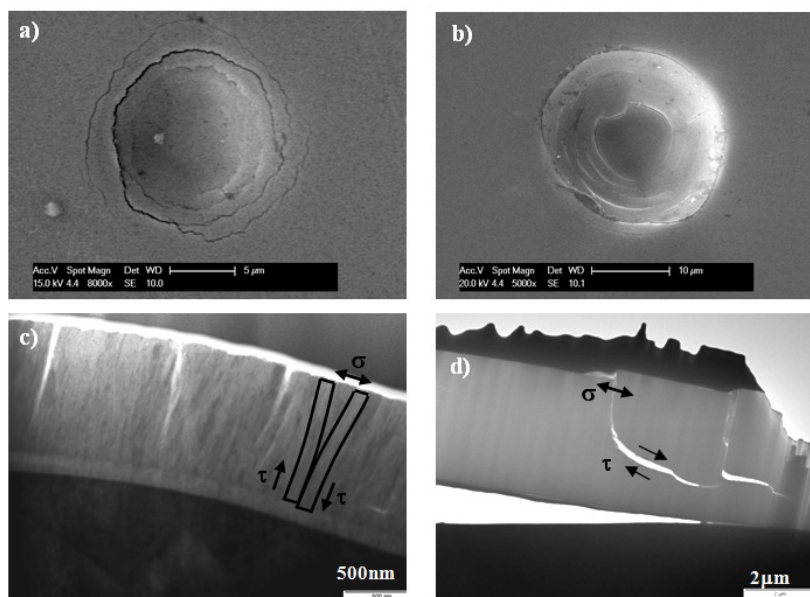
Rys. 3. Zmiany średnich nacisków w strefie styku i maksymalnych naprężeń promieniowych w funkcji względnej głębokości penetracji

Fig. 3. Changes of mean pressure in contact area and maximum tensile stress as a function of relative penetration depth

odpowiednio dla powłok TiN i a-C:H. W rzeczywistości naprężenia te są znacznie niższe ze względu na ściskające naprężenia własne, które mierzone metodą XRD wynoszą ~4GPa w powłoce TiN. Obrazy SEM powierzchni powłok z odciskami i pęknięciami wokół nich oraz obrazy TEM z przekrojów poprzecznych umożliwiającą obserwację propagacji pęknięć przez powłokę przedstawiono na **Rysunku 4**. Dla powłok TiN i a-C:H widoczny jest inny charakter pęknięć. Dla powłoki ceramicznej pęknięcia propagują po granicach kolumn, które są obszarami o najmniejszej wytrzymałości [L. 7]. Początkowo pęknięcie powstaje na skutek przekroczenia wytrzymałości na naprężenia rozciągające powłoki na powierzchni, a następnie przy wzroście obciążenia kolumny zostają przesunięte względem siebie, prowadząc do zapadania się powłoki w kształcie cylindra o promieniu równym promieniowi powstającego obwodowego pęknięcia (**Rys. 4c**).

Tak więc wartość siły niezbędnej do powstania takich pęknięć jest w znacznym stopniu miarą wytrzymałości połączeń między kolumnami na naprężenia styczne prowadzące do ich ścinania. Dla powłoki węglowej o amorficznej budowie widoczne jest pęknięcie o kierunku początkowo prostopadłym do powierzchni powłoki. Pęknięcie to, osiągając

głębokość około 0,5 grubości powłoki, jest zakrzywiane na zewnątrz od osi kontaktu (**Rys. 4d**). Jak wykazuje analiza MES, taki właśnie kierunek propagacji pęknięcia wymuszany jest przez maksymalne naprężenia styczne w powłoce.



Rys. 4. Obrazy SEM (a, c) powierzchni z odciskami i TEM (b, d) z przekrojów poprzecznych po indentacji powłok: a, c) TiN; b, d) a-C:H

Fig. 4. SEM surface images and TEM cross-section images after indentation of: a, c) TiN; b, d) a-C:H coatings

PODSUMOWANIE

Dla złożonych układów powłoka–podłoże, pomimo kilkudziesięciu już lat ich stosowania, wciąż brak jest pełnych analiz i metod wyznaczania nośności powierzchni. Rozwiązanie tego ważnego problemu, tak dla projektantów, jak i naukowców poszukujących nowych materiałów na powłoki, jest możliwe dzięki połączeniu wyników badań wykonanych z użyciem instrumentalnej indentacji z wynikami modelowania MES. Możliwa jest dzięki temu analiza deformacji i pękania układów powłoka–podłoże, a co za tym idzie przewidywania maksymalnych obciążeń, przy jakich mogą one pracować, aby dominującym był mechanizm zużycia

ściernego bez pęknięcia i delaminacji powłok. Przedstawioną metodykę zastosowano dla powszechnie stosowanych powłok TiN i a-C:H, dla których obliczono, że naprężenia promieniowe prowadzące do ich pęknięcia są dużo większe dla powłoki ceramicznej niż węglowej. Obrazy TEM z przekrojów poprzecznych po testach wykazały duży wpływ mikrostruktury powłok na kierunek propagacji pęknięć.

LITERATURA

1. Holmberg K., Matthews A.: Coatings tribology – Properties, mechanisms, techniques and application in surface engineering. Tribology and Interface Engineering Series 56, Elsevier, Oxford 2009.
2. Holmberg K., Ronkainen H., Matthews A.: Tribology of thin coatings. Ceramics International, 26 (2000), p. 787–795.
3. Michler J., Blank E.: Analysis of coating fracture and substrate plasticity induced by spherical indentors: diamond and diamond-like carbon layers on steel substrates. Thin Solid Films, vol. 381 (2001), p. 119–134.
4. Kot M., Rakowski W., Morgiel J., Major Ł.: Metoda wyznaczania nacisku dopuszczalnego w styku skoncentrowanym dla układów powłoka–podłoże. Tribologia, 218 (2/2008), s. 285–295.
5. Kot M.: Deformacje i pęknięcie układów powłoka–podłoże przy obciążeniach działających w styku skoncentrowanym. Tribologia, vol. 231 (3/2010), s. 125–134.
6. Lackner J.M., Industrially-scaled hybrid pulsed laser deposition at room temperature. Orekop sc., Kraków 2005.
7. Tilbrook M.T., Paton D.J., Xie Z., Hoffman M.: Microstructural effects on indentation failure mechanisms in TiN coatings: Finite element simulations. Acta Materialia, vol. 55 (2007), p. 2489–2501.

Recenzent:
Dariusz BOROŃSKI

Summary

In article consideration about deformations and failure of coating-substrate system by plastic deformation of substrate and coatings fracture were presented. Analysis were based on FEM modelling and spherical microindentation results. Such complex analysis allow to determine critical loads and corresponding stress distribution leading to coatings fracture. Ceramic TiN and carbon

a-C:H coatings deposited on X10CrNi 18-8 steel substrates were under consideration. It was found that tensile stress on the coatings surfaces, caused formation of first annular cracks, is $\sigma_R = 6.5$ i 2.4 GPa for TiN and a-C:H coatings respectively. SEM and TEM microscopic investigations have shown great impact of coating microstructure on trough thickness crack propagation.