

**Kinga CHRONOWSKA-PRZYWARA<sup>\*</sup>, Marcin KOT<sup>\*</sup>**

**MODELOWANIE METODĄ ELEMENTÓW  
SKOŃCZONYCH DEFORMACJI I NAPRĘŻEŃ  
UKŁADÓW POWŁOKA–PODŁOŻE  
W TEŚCIE ZARYSOWANIA**

**FINITE ELEMENT MODELLING OF DEFORMATION  
AND STRESS IN THE COATING-SUBSTRATE SYSTEMS  
DURING SCRATCH TESTS**

**Słowa kluczowe:**

test zarysowania, powłoka, modelowanie, MES

**Key words:**

scratch test, coating, modelling, FEM

**Streszczenie**

W pracy przedstawiono wpływ obciążeń zewnętrznych przenoszonych w styku skoncentrowanym wywoływanych przez wgłębnik diamentowy podczas testu zarysowania na rozkład naprężeń w układzie powłoka–podłoże. Analizowano

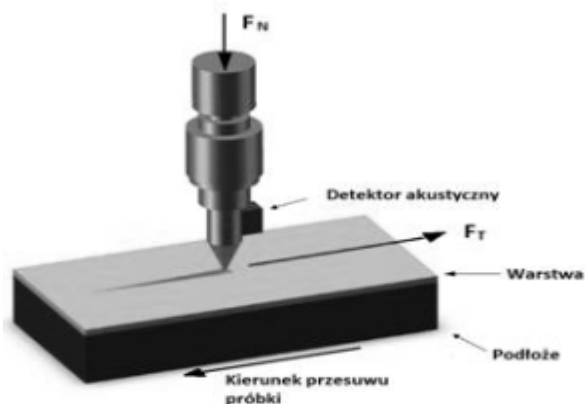
---

<sup>\*</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, al. A. Mickiewicza 30, 30-065 Kraków, Polska, e-mail: chronows@agh.edu.pl.

miejsca maksymalnej koncentracji naprężeń rozciągających prowadzących do pęknięcia powłoki oraz naprężeń zredukowanych decydujących o uplastycznieniu podłoża. Analizy oparto o eksperymenty numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Analizie poddano układy o różnych właściwościach materiałowych powłoki i podłoża oraz o różnej geometrii kontaktujących się elementów. W wyniku przeprowadzonych badań zauważono decydujący wpływ granicy plastyczności podłoża oraz grubości powłoki na rozkład naprężeń i deformacje całego systemu. Analizy numeryczne porównano z wynikami badań eksperymentalnych przeprowadzonych dla niepokrytych podłoży ze stali austenitycznej X5CrNi18-10 i ferrytycznej X20Cr13 oraz z powłokami ZrN o grubości 1 i 2  $\mu\text{m}$ . W wyniku połączonej analizy MES i badań eksperymentalnych określono poziom naprężeń prowadzących do zniszczenia powłoki.

## WPROWADZENIE

Powłoki nakładane na elementy przenoszące obciążenia w styku skoncentrowanym mogą spełniać swoją funkcję pod warunkiem, że będą odpowiednio silnie połączone z podłożem. Najpopularniejszą metodą badania wytrzymałości połączenia powłoki z podłożem jest test zarysowania (ang. *scratch test*) [L. 1–10]. Test ten polega na wykonaniu rysy na powierzchni próbki diamentowym wgłębnikiem (**Rys. 1**) przy obciążeniu siłą normalną  $F_N$  zwiększającą się stopniowo lub w sposób ciągły. Wartość siły normalnej, przy której dochodzi do pierwszego charakterystycznego uszkodzenia powłoki nazywamy siłą krytyczną [L. 10]. Jeżeli uszkodzenie ma charakter pęknięć kohezyjnych, to obciążenie oznaczamy  $L_{c1}$ , ale jeżeli prowadzi do usuwania powłoki z podłoża, to uważane jest za miarę adhezji powłoki do podłoża –  $L_{c2}$ . Wystąpienie uszkodzenia



**Rys. 1.** Schemat testu zarysowania

Fig. 1. Scheme of scratch test

powłoki jest monitorowane w trakcie testu za pomocą pomiaru emisji akustycznej (AE) oraz po teście poprzez obserwację za pomocą mikroskopii optycznej [L. 1]. Adhezyjne uszkodzenie powłoki jest bezpośrednio związane z nagłym wzrostem siły tarcia, jeżeli współczynnik tarcia powłoki z wgłębnikiem i podłoża z wgłębnikiem jest znacząco różny [L. 2, 3]. *Scratch test* jest powszechnie stosowany w inżynierii dla powłok o grubości w zakresie od 0,1 do 20  $\mu\text{m}$  [L. 11].

Ze względu na złożony stan naprężeń będący wynikiem oddziaływania wgłębника, tarcia między wgłębnikiem a powłoką, jak również sprężysto-plastycznego odkształcenia powłoki i podłoża praktycznie nie jest możliwa budowa modeli analitycznych pozwalających opisać deformacje powierzchni z powłokami. Według wiedzy autorów nie został jak dotąd opracowany model teoretyczny umożliwiający przewidywanie naprężeń generowanych przez poruszający się wgłębnik przy znajomości obciążenia i geometrii kontaktu. Zadanie to można praktycznie rozwiązać, stosując eksperymenty numeryczne, choć takich opracowań przedstawianych w literaturze także nie jest zbyt wiele [L. 12–15]. Ze względu na złożoność problemu modele numeryczne dla układów powłoka–podłoże są zwykle ograniczone do modeli nieuwzględniających tarcia, tylko dla materiałów idealnie sprężystych lub idealnie plastycznych. Bucaille [L. 16] jako jeden z pierwszych przeprowadził symulacje testu zarysowania, stosując trójwymiarowe modele rozwiązywane z użyciem metody elementów skończonych (MES). Poszukiwano, jaki wpływ ma tzw. współczynnik reologiczny  $E/R_e$  (moduł Younga/granica plastyczności) na deformacje całego systemu. Określono właściwości materiałowe, przy których dochodziło tylko do odkształceń sprężystych oraz takie, gdzie obserwowano duże uplastycznienie podłoża i powstawanie wypływek na bokach toru zarysowania. Jiang i inni [L. 17, 18] analizowali styk tarciový przy teście zarysowania pomiędzy ślizgającym się diamentowym wgłębnikiem i układem cienka powłoka–podłoże. Analizowano wartości naprężeń ściskających w powłoce przed poruszającym się wgłębnikiem i rozciągających za wgłębnikiem. Analizy potwierdziły także występowanie wysokich naprężeń ścinających na granicy faz pomiędzy powłoką i podłożem. W ostatnich latach wiele prac z modelowania testu zarysowania przedstawia Holmberg [L. 11]. Rozważa on stan naprężeń w układzie powłoka–podłoże jako superpozycję trzech głównych stanów. Pierwszy z nich to statyczne obciążania kuli siłą normalną, następnie wprowadzany jest ruch wgłębника po powierzchni i pojawiające się w ich wyniku naprężenia styczne. W trzecim etapie umożliwiano powstawanie odkształceń plastycznych podłoża i silne bruzdowanie układu.

W niniejszej pracy test zarysowania modelowano z użyciem metody elementów skończonych MES i programu Ansys Multiphysic wersja 15. Porównywano modele, w których nie było powłoki na podłożu oraz z powłokami, których właściwości odpowiadały badanym eksperymentalnie powłokom ZrN. Grubości powłok wynosiły 1 i 2  $\mu\text{m}$ . Założono coulombowski model tarcia

pomiędzy wgłębnikiem a powierzchnią powłoki. W przeprowadzonych symulacjach były stosowane jednocześnie obciążenia normalne, jak i styczne. Model ten lepiej odpowiadał rzeczywistym warunkom obciążenia podczas testu zarysowania niż w pozostałych, cytowanych wcześniej pracach. Przeprowadzono także badania eksperymentalne powłok ZrN nałożonych na dwa stalowe podłoża.

## METODYKA BADAŃ

Test zarysowania wykonano z zastosowaniem urządzenia MCT produkowanego przez szwajcarską firmę CSM Instruments. Badania polegały na wykonaniu rysy diamentowym wgłębnikiem Rockwella C o promieniu zaokrąglenia 200  $\mu\text{m}$ . Badaniom poddano próbki:

- próbka bez powłoki: stal ferrytyczna X20Cr13,
- próbka bez powłoki: stal austenityczna X5CrNi18-10,
- próbki w układzie powłoka–podłoże: X20Cr13/ZrN o grubości 1 i 2  $\mu\text{m}$
- próbki w układzie powłoka–podłoże: X5CrNi18-10/ZrN o grubości 1 i 2  $\mu\text{m}$ .

Wszystkie próbki badano przy liniowo wzrastającym obciążeniu od 0 do 10 N. Parametry materiałowe użyte do modelowania MES podano w **Tabeli 1**.

**Tabela 1. Właściwości mechaniczne materiałów założone w modelach MES**

Table 1. Materials properties used in FEM modelling

	Moduł Younga E [GPa]	Granica plastyczności Re[MPa]	Liczba Poissona $\nu$
Podłoże X5CrNi18-10	170	667	0,3*
Podłoże X20Cr13	210	1500	0,3*
Powłoka ZrN	420	8000**	0,25*
Wgłębnik diamentowy	1141	–	0,07

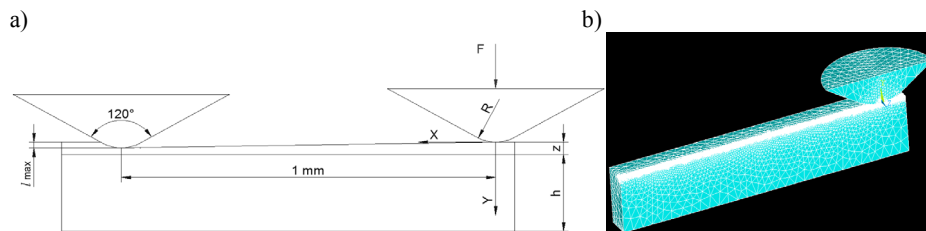
\* wartości przyjęte z literatury

\*\* przyjęto 1/3 wartości twardości

Modele stosowane w analizach MES stanowił wgłębnik w kształcie stożka zakończony częścią sferyczną o promieniu zaokrąglenia  $R = 0,2$  mm, który był obciążany siłą normalną i przesuwany wzdłuż powierzchni powłoki nałożonej na podłożu (**Rys. 1a**). Długość tego przesunięcia wynosiła 1 mm. Próbkę stanowiło podłoże o grubości  $h = 0,2$  mm oraz powłoka o grubości  $z = 0, 1$  lub  $2$   $\mu\text{m}$ . Rozpatrywany przypadek potraktowano jako zagadnienie symetryczne (**Rys. 1b**), co ograniczyło liczbę elementów skończonych.

Obciążenie normalne  $F_N$  przykładane było w osi stożka i narastało liniowo od 0 do 10 N, osiągając maksymalną wartość w odległości 1 mm. Elementami skończonymi w modelu były ostrosłupy o 10 węzłach. Całkowita liczba węzłów wynosiła dla modeli z powłoką o grubości 1  $\mu\text{m}$  156475, a dla modeli 2  $\mu\text{m}$  224 136. W obszarze przyległym do styku stożka i powłoki dodatkowo zagęsz-

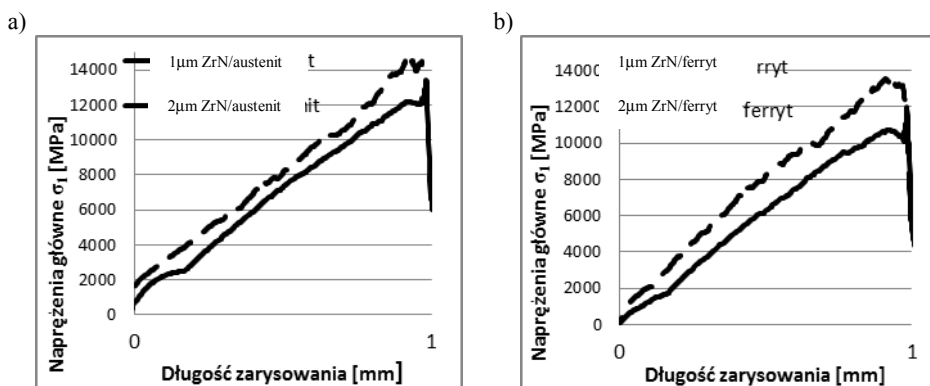
czono siatkę do średniej odległości między węzłami równej 25 nm. Założono również, że wartość współczynnika tarcia  $\mu$  pomiędzy wgłębniakiem i powłoką wynosi 0,2, co wyznaczono z rzeczywistych testów zarysowania.



**Rys. 2. Model MES stosowany do eksperymentów numerycznych: a) geometria, b) wygenerowana siatka**

Fig. 2. FEM model used in numerical experiments: a) geometry, b) generated meshes

W modelach założono sprężyste odkształcenia wgłębniaka i powłoki oraz sprężysto-plastyczne odkształcenia podłoża. Uwagę skupiono przede wszystkim na rozkładach naprężeń głównych  $\sigma_1$  w powłoce prowadzących do jej pęknięcia i naprężeń zredukowanych liczonych wg hipotezy Hubera  $\sigma_{VM}$  jako kryterium uplastycznienia podłoża.

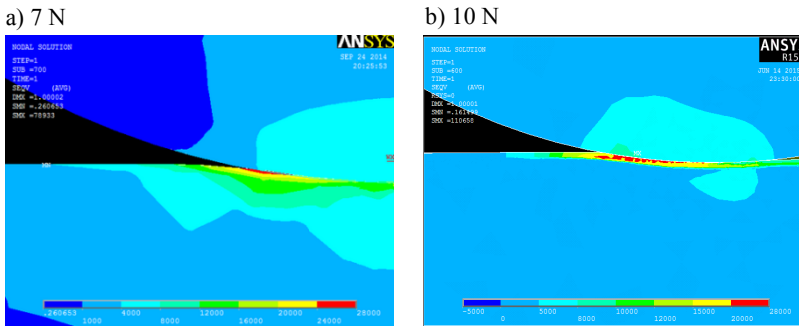


**Rys. 3. Rozkład naprężeń głównych  $\sigma_1$  na powierzchni próbek na długości zarysowania dla podłoży ze stali: a) X5CrNi18-10, b) X20Cr13**

Fig. 3. First principal stress  $\sigma_1$  distribution on coatings surface along scratch length for steel substrates: a) X5CrNi18-10, b) X20Cr13

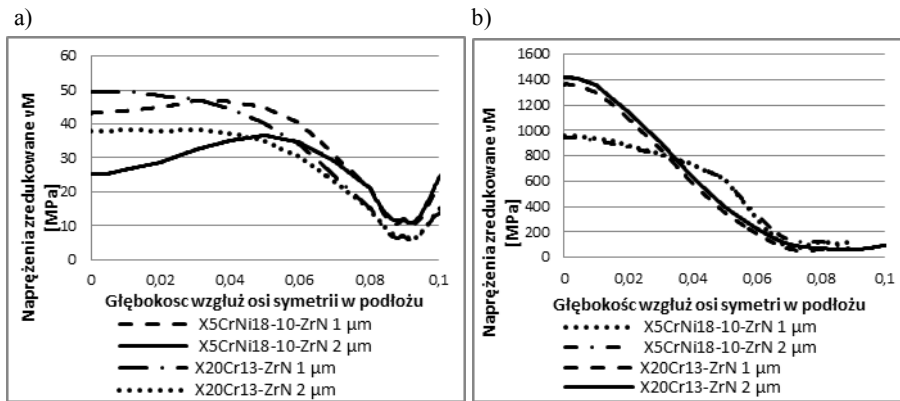
Rosnące wartości naprężeń głównych  $\sigma_1$  wraz ze wzrostem obciążenia odczytywane wzdłuż drogi zarysowania na powierzchniach powłok o grubości 1  $\mu\text{m}$  i 2  $\mu\text{m}$  dla podłoży ze stali austenitycznej i ferrytycznej przedstawiono odpowiednio na **Rysunkach 3a** i **3b**. Największe naprężenia główne widoczne są dla powłok o grubości 1  $\mu\text{m}$  niezależnie od podłoża. Jest to wynikiem znacząco więk-

szych głębokości penetracji całego systemu niż w przypadku grubszej powłoki. Na **Rysunku 4** przedstawiono rozkład naprężeń głównych  $\sigma_1$  dla analizowanych modeli z powłoką o grubości 2  $\mu\text{m}$  dla obydwu podłoży, przy obciążeniu 7 N (**Rys. 4a**) i 10 N (**Rys. 4b**), przy których, jak wykazały badania eksperymentalne, powstawały pierwsze pęknięcia kohezyjne powłok. Obszar przed wgłębniakiem, gdzie powłoka jest w stanie naprężeń rozciągających jest znacznie większy dla miększego podłoża, pomimo mniejszego obciążenia (**Rys. 4a**).



**Rys. 4** Rozkłady naprężeń głównych  $\sigma_1$  dla powłok o grubości 2  $\mu\text{m}$  na podłożu: a) X5CrNi18-10, b) X20Cr13

Fig. 4. First principal stress  $\sigma_1$  distribution for 2 $\mu\text{m}$  thick coatings deposited on: a) X5CrNi18-10, b) X20Cr13 substrates



**Rys. 5.** Rozkład naprężeń zredukowanych  $\sigma_{VM}$  w podłożu w kierunku prostopadłym do powierzchni podłoża przy obciążeniu: a) 1 N, b) 10 N

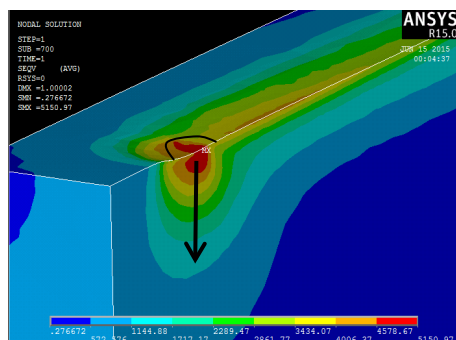
Fig. 5. Von Mises  $\sigma_{VM}$  stress distribution in substrates in perpendicular to surface direction at: a) 1 N, b) 10 N

Jest to wynikiem większej strefy odkształceń plastycznych w podłożu X5CrNi18-10, a co za tym idzie większej wypłytki i większego zginania po-

włoki. Powłoki są także rozciągane za wgłębnikiem na skutek występujących siła tarcia, czego efektem są poprzeczne pęknięcia widoczne podczas obserwacji mikroskopowej toru zarysowania badanych powłok. Zmiany zredukowanych wg hipotezy Hubera  $\sigma_{VM}$  naprężeń w obydwu podłożach, na których naniesiono powłoki w kierunku prostopadłym do powierzchni z powłokami (**Rys. 6** – strzałka) przedstawiono na **Rys. 5**. Wartości ich są oczywiście większe w przypadku podłoża o większej granicy plastyczności. Natomiast grubość powłoki ma znaczenie przy mniejszym obciążeniu, kiedy podłoże nie jest odkształcone plastycznie. Przy 1 N (**Rys. 5a**) grubsza powłoka przenosi praktycznie całe obciążenie, stąd naprężenia w podłożu są mniejsze niż dla cieńszej powłoki. Natomiast dla obciążenia 10 N (**Rys. 5b**) podłoże, niezależnie od grubości powłoki, jest znacząco odkształcone plastycznie, stąd różnice w rozkładzie naprężeń są coraz mniejsze. Naprężenia  $\sigma_{VM}$  w podłożu pozostają za wgłębnikiem na wysokim poziomie, co jest widoczne jako „ogon” ciągnący się daleko poza strefę kontaktu (**Rys. 6**). Naprężenia te pozostają nawet po odciążeniu wgłębника jako naprężenia własne, będące efektem odkształceń plastycznych podłoża i różnych właściwości sprężystych powłoki i podłoża.

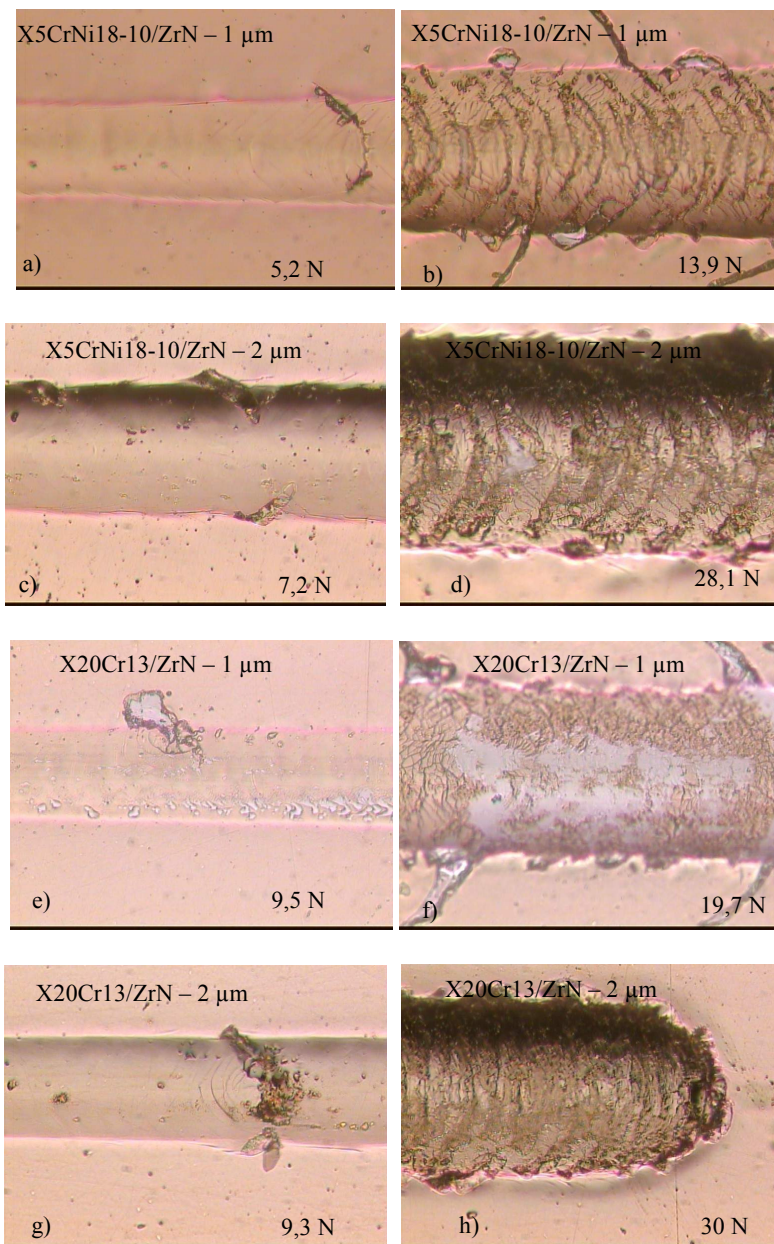
## ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Na podstawie mikroskopowej obserwacji toru zarysowania obserwowano, że pierwsze pęknięcia kohezyjne dla powłoki ZrN o grubości 1  $\mu\text{m}$  nałożonej na stali X5CrNi18-10 i X20Cr13 powstawały odpowiednio przy obciążeniach 5,2 i 9,5 N (**Rys. 7a i e**). Natomiast wzrost grubości powłoki do 2  $\mu\text{m}$  powodował tylko nieznaczny wzrost parametru  $L_{C1}$  do 7,2 N dla stali austenitycznej (**Rys. 7c**). Natomiast dla powłoki na twardszej stali parametr ten był taki sam jak dla cieńszej powłoki (**Rys. 7g**).



**Rys. 6** Rozkład naprężeń zredukowanych w podłożu X5CrNi18-10 dla modelu z powłoką o grubości 2  $\mu\text{m}$

Fig. 6. Von Mises  $\sigma_{VM}$  stress distribution in X5CrNi18-10 substrate for model with 2  $\mu\text{m}$  thick coating



**Rys. 7. Obraz torów zarysowania powłok ZrN na stali X5CrNi18-10: a) 1  $\mu\text{m}$  (grubość powłoki) - $L_{C1}$ , b) 1  $\mu\text{m}$  - $L_{C2}$ , c) 2  $\mu\text{m}$  - $L_{C1}$ , d) 2  $\mu\text{m}$   $L_{C2}$  i na stali X20Cr13, e) 1  $\mu\text{m}$ - $L_{C1}$ , f) 1  $\mu\text{m}$ -  $L_{C2}$ , g) 2  $\mu\text{m}$ - $L_{C1}$ , h) 2  $\mu\text{m}$ - $L_{C2}$**

**Fig. 7. Images of scratch tracks of ZrN coatings on X5CrNi18-10 substrate: a) 1  $\mu\text{m}$  (coating thickness) -  $L_{C1}$ , b) 1  $\mu\text{m}$  - $L_{C2}$ , c) 2  $\mu\text{m}$  - $L_{C1}$ , d) 2  $\mu\text{m}$   $L_{C2}$  and on X20Cr13 substrate, e) 1  $\mu\text{m}$ - $L_{C1}$ , f) 1  $\mu\text{m}$ -  $L_{C2}$ , g) 2  $\mu\text{m}$ - $L_{C1}$ , h) 2  $\mu\text{m}$ - $L_{C2}$**



Wzrost obciążeń powyżej 14 N, w przypadku powłoki osadzonej na stali austenitycznej o grubości 1  $\mu\text{m}$  doprowadził do przekroczenia wytrzymałości połączenia powłoki z podłożem, czego skutkiem były pęknięcia adhezyjne ( $L_{C2}$ ) oraz usuwanie powłoki z podłoża (**Rys. 7b**). Dla 1  $\mu\text{m}$  powłoki na stali ferrytycznej odspojenie powłoki od podłoża wystąpiło przy dużo większej sile wywołującej prawie 20 N (**Rys. 9f**). Większe wartości  $L_{C2}$  wykazały powłoki o grubości 2  $\mu\text{m}$ . Dla powłoki na X5CrNi18-10 jej wykuszanie na niewielkich obszarach rysy pojawiały się przy sile 28 N (**Rys. 7d**). Natomiast dla powłoki osadzonej na stali X20Cr13 przy maksymalnym obciążeniu 30 N nie obserwowano pęknięć o charakterze adhezyjnym (**Rys. 9h**).

Porównując poziomy naprężeń z modeli numerycznych odpowiadające wartościom sił  $L_{C1}$  wyznaczonych z badań eksperymentalnych, określono towarzyszące im wartości naprężeń głównych  $\sigma_1$ , które dla badanych systemów powłoka–podłoże zestawiono w **Tabeli 2**. Wartości tych naprężeń mieszczą się w zakresie 8–13 GPa. Należy jednak podkreślić, że w modelowaniu nie wzięto pod uwagę naprężeń własnych powstających po procesie osadzania powłok, które w przypadku powłok ceramicznych mogą sięgać nawet kilku GPa. Stąd od przedstawionych w **Tabeli 2** wartości  $\sigma_1$  należałoby odjąć ścisiskające naprężenia własne, aby otrzymać parametr wskazujący na poziom naprężeń prowadzących do pęknięcia powłoki. Badania z użyciem metody dyfrakcji rentgenowskiej XRD wykazały, że dla badanych powłok ZrN wynoszą one 5 i 4 GPa, odpowiednio dla powłoki o grubości 1 i 2  $\mu\text{m}$  nałożonych na stali ferrytycznej. Odejmując te wartości, widać, że powłoki ZrN pękają przy poziomie naprężeń rozciągających 6–8 GPa. Niższe wartości naprężeń dla stali austenitycznej są prawdopodobnie efektem mniejszych naprężeń własnych, co obserwowano dla innych, badanych wcześniej powłok.

**Tabela 2. Zestawienie wartości obciążeń krytycznych  $L_{C1}$  oraz naprężeń głównych  $\sigma_1$ , przy których dochodziło do powstawania pęknięć w powłokach**

Table 2. Summary of critical load  $L_{C1}$  and principal stress  $\sigma_1$  values corresponding to first crack formation

Próbka podłoże/powłoka – grubość	$L_{C1}$ [N]	Naprężenia $\sigma_1$ [MPa]
X5CrNi18-10/ZrN – 1 $\mu\text{m}$	5,2	7965
X5CrNi18-10/ZrN – 2 $\mu\text{m}$	7,2	9789
X20Cr13/ZrN – 1 $\mu\text{m}$	9,5	12913
X20Cr13/ZrN – 2 $\mu\text{m}$	9,3	10702

## PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy analizę deformacji i naprężeń w układach powłoka–podłoże powstających w teście zarysowania oparto na wynikach eksperymentalnych powłok ZrN nałożonych na stalowych podłożach oraz wynikach modelowania 3D MES. Wskazują one na wyraźny wpływ właściwości podłoża na wartości

sił prowadzących do pęknięcia powłok. Natomiast dla rozważanych grubości powłok 1 i 2  $\mu\text{m}$  różnice nie były już tak duże. Widoczne zatem jest, że decydujące o możliwości przenoszenia obciążeń w silnie obciążonym styku skoncentrowanym jest odpowiednie podparcie powłoki przez podłoże. Niezależnie od modelu powstające w podłożu odkształcenia plastyczne prowadzą do dużej koncentracji naprężeń rozciągających w powłokach przed i za wgłębniakiem i ich pęknięcia. Wartości tych naprężeń wyznaczone z połączonej analizy wyników badań eksperymentalnych i numerycznych są dla powłok ZrN na poziomie 8–13 GPa, a po odjęciu naprężeń własnych na poziomie 6–8 GPa. Należy jednak podkreślić, że naprężenia własne mogą w powłokach być częściowo relaksowane lub też wzmacniane na skutek odkształceń plastycznych podłoża. Aspekt ten będzie analizowany w kolejnych pracach.

Podejście do analizy wyników testu zarysowania zaprezentowane w pracy może posłużyć do uwolnienia się od wpływu grubości powłoki i właściwości podłoża, dając możliwość określenia poziomu naprężeń w powłoce prowadzącego do jej pęknięcia. Jest to niezwykle istotny parametr dla projektantów mających dobrać odpowiednią powłokę i jej grubość do konkretnego zastosowania.

*Autorzy dziękują dr. hab. Jurgenowi Lacknerowi z Joanneum Research; Laserzentrum Leoben, Austria za nałożenie powłok.*

## LITERATURA

1. Hedenqvist P., Hogmark S.: Experiences from scratch testing of tribological PVD coatings, *Tribol. Int.* 30, 1997, 507–516.
2. Valli J., Makela U. A: Applications of the scratch test method for coating adhesion assessment, *Wear* 115, 1987, 215–221.
3. Sekler J., Steinmann P.A., Hintermann H.E.: The scratch test: different critical load determination techniques, *Surf. Coat. Technol.* 36, 1988, 519–529.
4. Holmberg K., Matthwest A., Ronkainen H.: Coatings tribology – contact mechanisms and surface design, *Tribol. Int.* 31, 1998, 107–120.
5. Holmberg K.: The basic material parameters that control friction and wear of coated surfaces under sliding, *Tribologia – Fin. J. Tribol.* 19, 2000, 3–18.
6. Steinmann P.A., Taedy Y., Hintermann H.E.: Adhesion testing by the scratch test method: the influence of intrinsic and extrinsic parameters on the critical load, *Thin Solid Films* 154, 1987, 333–349.
7. Burnett P.J., Rickerby D.S.: The relationship between hardness and scratch adhesion, *Thin Solid Films* 154, 1987, 403–416.
8. Bull S.J.: Failure modes in scratch adhesion testing, *Surf. Coat. Technol.* 50, 1991, 25–32.
9. Bull S.J.: Spallation failure maps from scratch testing, *Mater. High Temp.* 13, 1995, 169–174.

10. Bull S.J.: Failure mode maps in the thin film scratch adhesion test, *Tribol. Int.* 30, 1997, 491–498.
11. Holmberg K., Laukkanen A., Ronkainen H., Wallin K., Varjus S.: A model for stresses, crack generation and fracture toughness calculation in scratched TiN-coated steel surfaces, *Wear* 254, 2003, 278–291.
12. Rabinovich V.L., Sarin V.K.: Modeling of interfacial fracture, *Mater. Sci. Eng. A209*, 1996, 82–90.
13. Zherng L., Ramalingam S.: Stresses in a coated solid due to shear and normal boundary tractions, *J. Vacuum Sci. Technol. A13*, 1995, 2390–2398.
14. Ramalingam S., Zheng L.: Film-substrate interface stresses and their role in the tribological performance of surface coatings, *Tribol. Int.* 28, 1995, 145–161.
15. Mao K., Sun Y., Bell T.: A numerical model for the dry sliding contact of layered elastic bodies with rough surfaces, *Tribol. Trans.* 39, 1996, 416–424.
16. Bucaille J.L., Felger E., Hochstetter G.: Mechanical analysis of the scratch test on elastic and perfectly plastic materials with the threedimensional finite element modeling, *Wear* 249, 2001, 422–432.
17. Jiang X.Y., Lauke B., Berckert W., Schuller T.: Numerical simulation of micro-scratch tests for coating/substrate composites, *Compos. Interfaces* 8, 2001, 19–40.
18. Jiang X.Y., Lauke B., Schuller T.: Frictional contact analysis of scratch test for elastic and elastic-plastic thin-coating/substrate materials, *Thin Solid Films* 414, 2002, 63–71.

## Summary

**The paper presents the influence of external loads carried in contact load conditions caused by a diamond indenter during scratch testing on stress distribution in a coating-substrate. The maximum tensile stress concentrations that lead to coating fracture and the stresses that cause substrate yield were analysed. Analyses were based on numerical experiments using the finite element method. The analyses were carried out for systems with different material properties of coatings and substrates and with different geometries of contacting elements. The studies allowed the determination of the significant impact of substrate yield strength and coating thickness on stress distribution and deformations of the whole system. The results of numerical analysis were compared with the results of experimental tests for uncoated substrates – X5CrNi18-10 austenitic and X20Cr13 ferritic steels and with 1 and 2  $\mu\text{m}$  thick ZrN coatings. As a result of this complex analysis, the level of stress that leads to coating fracture was determined.**