

Krzysztof DRUET*

**BADANIA USZKODZEŃ POWŁOK
CERAMICZNYCH WSKUTEK TARCIA
ŚLIZGOWEGO W RUCHU
POSTĘPOWO-ZWROTNYM**

**WEAR PATTERN TESTING OF CERAMIC COATINGS
UNDER RECIPROCATING SLIDING**

Słowa kluczowe:

powłoki ceramiczne, zużycie, metody badań

Key-words:

ceramic coating, wear, testing method

Streszczenie

Badano (wykorzystując mikroskop optyczny oraz skaningowy) morfologię uszkodzeń wybranych powłok ceramicznych (między innymi DLC z dodatkiem wolframu) nakładanych na podłoże stalowe, będących skutkiem tarcia ślizgowego w ruchu postępowo-zwrotnym skojarzenia kula–powierzchnia płaska. Ślady zużycia na kulach, czyli obszary wygładzo-

* Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk, tel. (0-58) 347-26-93, 698-924-029; fax (0-58) 347-26-93; e-mail: kdruet@pg.gda.pl

nych plateau, mają kształt zbliżony do elipsy. Praca, przy zmiennym zwrocie sił stycznych działających na powierzchnię próbek, powodowała pojawianie się uszkodzeń – rys, wyrw, odwarstwień, „przetarc”, pęknięć – również o charakterze zmęczeniowym. Biorąc pod uwagę różnorodność morfologiczną uszkodzeń, proponuje się (w przypadku uszkodzeń powłoki będących skutkiem propagacji pęknięć), klasyfikować je z uwagi na czynniki takie, jak: przyczyna naprężeń wywołujących pęknięcie, charakter pęknięcia, miejsce inicjacji, kierunek propagacji początkowej i dalszej, skutek propagacji pęknięcia itd.

WPROWADZENIE

Trwałość elementów tworzących parę tarciovą w systemie tribologicznym jest uzależniona zarówno od struktury systemu, obejmującej jego wszystkie elementy, ich właściwości i relacje pomiędzy nimi, jak też działających na system wymuszeń i zakłóceń. W przypadku tarcia powierzchni pokrytych powłoką ceramiczną, złożoność zagadnienia odpowiednio pogłębia się; szerszy jest też wachlarz możliwych form uszkodzeń. Zwykle trwałość elementu będzie ograniczona zbyt dużym pocienieniem powłoki lub przerwaniem jej ciągłości. Uszkodzenie powłoki ceramicznej, podobnie jak każdy inny przypadek uszkodzenia powierzchni elementów tworzących parę tarciovą, może być wynikiem procesów o charakterze doraźnym, jak też procesów o charakterze przygotowanym. Udział tych ostatnich wydaje się istotny, biorąc pod uwagę choćby zmęczenie materiału wywoływane zmiennym obciążeniem działającym na powierzchnię stykających się elementów pary tarciovej – wynikającym wprost ze zmienności wektora obciążenia stycznego w strefie styku, czy też z okresowego wchodzenia w styk i wychodzenia ze styku poszczególnych obszarów współpracujących powierzchni.

Ogólnie rzecz biorąc, prowadzone od kilku dziesięcioleci, w wielu ośrodkach badawczych, eksperymenty wskazują na występowanie w procesie tarcia materiałów ceramicznych zjawisk podobnych, jak przy tarcu materiałów konwencjonalnych – utleniania, mikroskrawania, bruzdowania, adhezji, odkształceń plastycznych, zmęczenia materiału, złuszczenia się warstw naniesionych na powierzchnię tarcia, tworzenia się szczepień skutkujących zablokowaniem ruchu względnego oraz innych podobnych procesów [L. 4, 6, 7]. Różnice w przebiegu zjawisk, w porównaniu na przykład ze stopami metali, wynikają przede wszystkim ze znacząco od-



miennego przebiegu reakcji tribochemicznych. Specyfika procesu zużywania powierzchni materiałów ceramicznych wynika także z takich właściwości tych materiałów, jak: wysoka twardość, duża wartość modułu sprężystości, mały wpływ podwyższonej temperatury na właściwości mechaniczne, wysoka stabilność chemiczna i niska reaktywność, mniejsza niż w przypadku metali skłonność do tworzenia szepień adhezyjnych, wysoka temperatura topnienia, kruchość w temperaturze otoczenia, niska wytrzymałość zmęczeniowa, anizotropia właściwości mechanicznych, różnorodne wady struktury – na przykład pory, wtrącenia, pęknięcia, fazy szkliste na granicach ziaren, karby strukturalne na granicach spiekanych ziaren. W przypadku procesu zużywania się powłoki ceramicznej złożoność zagadnienia ulega pogłębieniu, pojawiają się nowe problemy – wpływ różnych właściwości materiału podłoża i powłoki, odporność powłoki na oddzielanie się od podłoża, szczelność powłoki itd.

Przebieg procesu zużywania materiału powłoki ceramicznej może mieć charakter „łagodny” (produkty zużycia mają wtedy postać bardzo drobnego proszku, a czasem są w formie gazowej), występować wtedy będzie powiększanie się luzu w skojarzeniu, a w końcu nastąpi przerwanie ciągłości powłoki. Możliwe jest także występowanie uszkodzeń, zwykle zainicjowanych w miejscu nieciągłości materiału (na przykład mikropęknięcia), w postaci wyrw, rozległych pęknięć, czy też odwarstwień powłoki. Pojawienie się takich form uszkodzenia powłoki ceramicznej zwykle oznacza natychmiastową niezdatność elementu skojarzenia tarcowego.

Przedmiotem opisywanych badań było zużywanie się powłok ceramicznych w niekonforemnym skojarzeniu ślizgowym (kula–powierzchnia płaska) podczas ruchu postępowo-zwrotnego [L. 1, 5]. Oznacza to pojawienie się procesów związanych ze zmęczeniem materiału, wynikającym ze specyficznej zmienności obciążenia działającego na elementy w ruchu postępowo-zwrotnym. Generalnie rzecz ujmując, można oczekiwać, że w takim przypadku uszkodzenia powłoki często będą wynikiem pojawienia się pęknięć materiału i następnie ich propagacji.

PRZEDMIOT I METODA BADAŃ

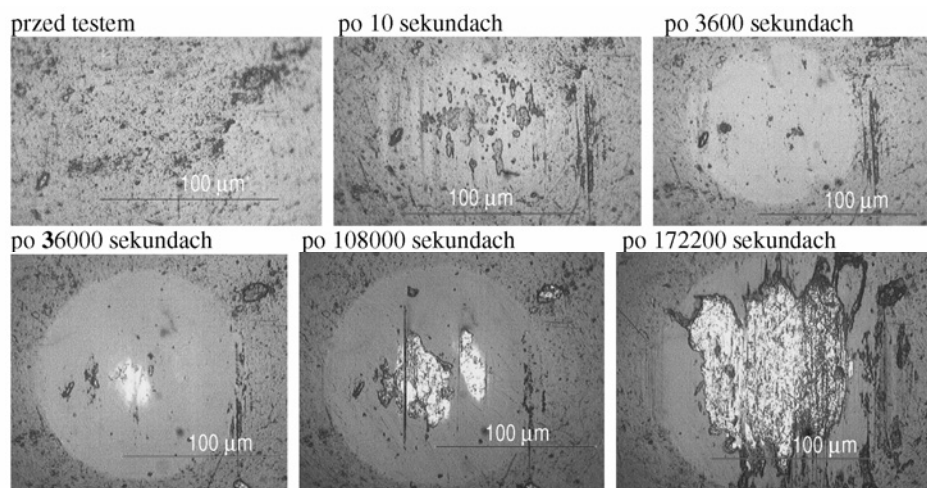
Badano uszkodzenia powłok ceramicznych – DLC z dodatkiem wolframu, nakładanych w postaci cienkich warstw (grubość rzędu kilku μm) na

powierzchnię kulek \varnothing 5 mm ze stali nierdzewnej AISI 316 oraz próbek płaskich ze stali nierdzewnej 3H13. Próbki płaskie miały postać prostopadłościanów o wymiarach 60×10×5 mm; ścieżka tarcia tworzyła się na boku 60×10 mm. Eksperymenty prowadzono w warunkach tarcia ślizgowego w ruchu postępowo-zwrotnym skojarzenia badawczego kula–powierzchnia płaska, wykorzystując stanowisko TPZ-1 [L. 1–3], stosując smarowanie wodą destylowaną albo 0,9% roztworem NaCl w wodzie. Próbki poddawano obciążeniu skutkującemu nominalnym naciskiem wg Herta 1,155 GPa, prędkość ślizgania wynosiła $0,08 \pm 0,02$ m/s (skok ruchu postępowo-zwrotnego 40 mm), temperatura substancji smarowej wynosiła $30 \pm 3^\circ\text{C}$.

Morfologia uszkodzeń powłoki ceramicznej była przedmiotem badań z wykorzystaniem obserwacji na mikroskopie optycznym oraz na mikroskopie skaningowym.

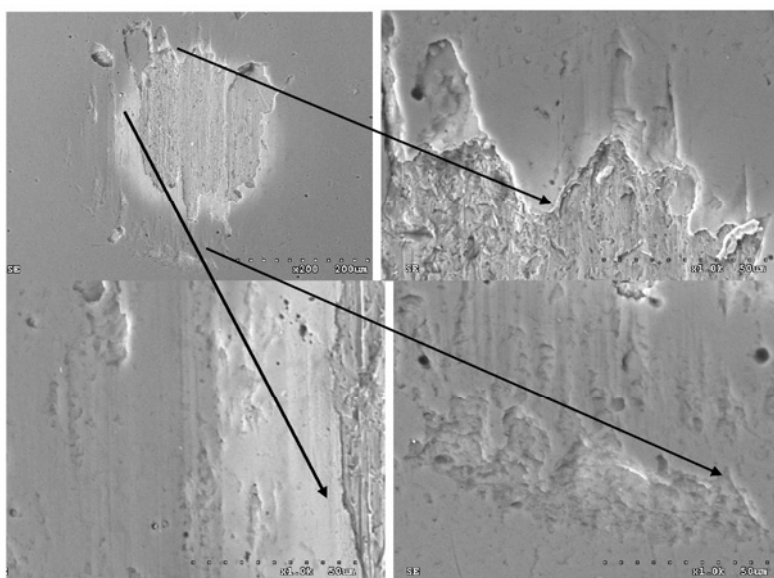
WYNIKI BADAŃ – POSTAĆ USZKODZEŃ PRÓBEK

Ślady zużycia powłok na kulkach, czyli obszary wygładzonych plateau, mają kształt zbliżony do elipsy, przy czym najczęściej dłuższa jest średnica elipsy prostopadła do kierunku ruchu względnego. Stosunkowo rzadko uzyskiwano ślady zużycia o kołowym kształcie. Na powierzchni śladów występowały różnego rodzaju uszkodzenia powłoki, w tym uszkodzenia wynikające z niedoskonałości procesu nakładania powłok. Praca w warunkach tarcia ślizgowego powodowała pojawianie się na powierzchni powłok uszkodzeń – rys, wyrw, pęknięć, odwarstwień, „przetarcie” itp. Niekiedy uszkodzenia rozwijały się z wcześniejszych wad powierzchni powłoki, z kolei niewielkie wyrwy lub rysy, niesięgające materiału podłoża, mogły zniknąć wskutek usuwania materiału z wygładzanej powierzchni, zanim doszło do odsłonięcia podłoża. Zmienność zwrotu sił stycznych działających na powierzchnię próbek, wynikająca z ruchu postępowo-zwrotnego, skutkowała pojawieniem się pęknięć o charakterze zmęczeniowym. Zawartość NaCl w wodzie przyspieszała niszczenie powłoki. Na **Rys. 1** przedstawiono przykładowy przebieg rozwoju uszkodzenia powłoki DLC z dodatkiem wolframu (na kuli) w teście ze smarowaniem wodą destylowaną – aż do odsłonięcia rozległego obszaru podłoża. Szczegóły uszkodzenia próbki pokazane są na zdjęciach uzyskanych za pomocą mikroskopu skaningowego – **Rys. 2**.



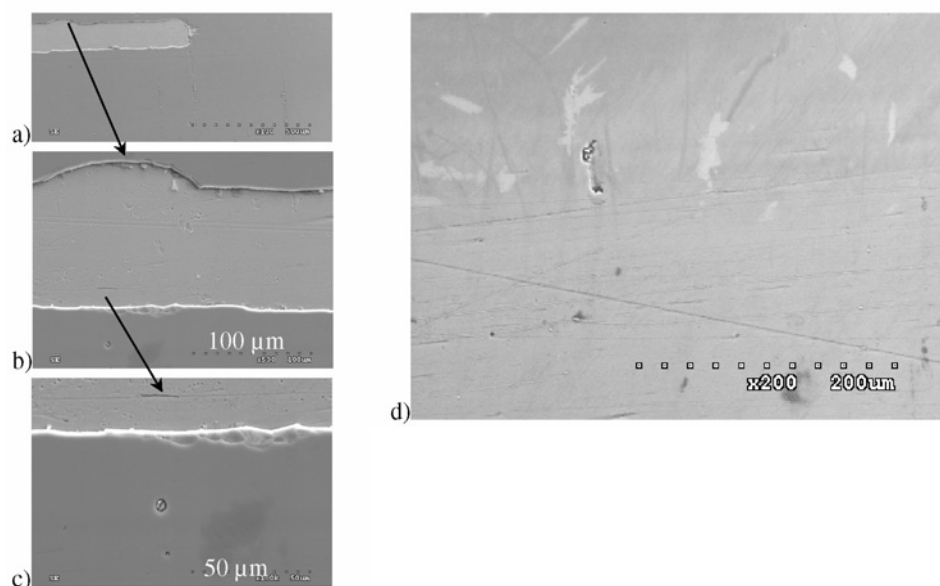
Rys. 1. Rozwój uszkodzenia powłoki DLC z wolframem przy smarowaniu wodą destylowaną

Fig. 1. Development of damage in tungsten modified DLC coating lubricated with distilled water



Rys. 2. Obraz uszkodzeń próbki z Rys. 1 uzyskany na mikroskopie skaningowym

Fig. 2. SEM images of wear marks on specimen shown in Fig. 1 in optical photography images



Rys. 3. Obraz uszkodzeń próbki płaskiej (współpracującej z próbką kulistą z Rys. 1) uzyskany na mikroskopie skaningowym: a, b, c – ślad współpracy w pobliżu punktu zwrotnego i jego szczegóły, d – uszkodzenia na powierzchni śladu

Fig. 3. SEM images of wear pattern on flat counterbody surface (counter specimen to ball specimen shown in Fig. 1): a, b, c – wear path near reversible point and its details, d – damages on sliding path

Badaniom na mikroskopie skaningowym poddawano także uszkodzone próbki płaskie, przykładowy obraz uszkodzenia przedstawia **Rys. 3**.

PODSUMOWANIE

Biorąc pod uwagę różnorodność morfologiczną uszkodzeń powłoki ceramicznej, proponuje się (w przypadku uszkodzeń-wyrw będących skutkiem propagacji pęknięć), dla usystematyzowania zagadnienia, klasyfikować uszkodzenia rozpatrując takie czynniki, jak: przyczyna naprężeń wywołujących pęknięcie, charakter pęknięcia z uwagi na przyczynę jego powstania (doraźne, zmęczeniowe), charakter przełomu, miejsce inicjacji, kierunek propagacji początkowej i dalszej, skutek propagacji pęknięcia itd. **Tabela 1** ilustruje próbę takiej systematyzacji w odniesieniu do powłoki ceramicznej jednowarstwowej. Tabelę utworzono zarówno w oparciu o ogólnie dostępną wiedzę z zakresu mechaniki niszczenia ciał

stałych, jak też wyniki własnych badań. Konkretny przypadek uszkodzenia powłoki ceramicznej oznacza zatem wystąpienie odpowiedniej kombinacji przypadków wyszczególnionych w odpowiednich kolumnach tabeli, na przykład:

Tabela 1. Pękanie materiału powłoki jednowarstwowej

Table 1. Cracking of single layer coating

Przyczyna naprężeń	Charakter pęknięcia z uwagi na inicjację	Charakter pęknięcia z uwagi na przełom	Miejsce inicjacji	Kierunek propagacji początkowej	Kierunek propagacji dalszej	Skutek propagacji	Techniczna postać uszkodzenia
obciążenia robocze mech.	doraźne	kruche	powierzchnia powłoki	równoległy (do pow.)	równoległy (do pow.)	pęknięcie wewnętrzne	wygładzenie powierzchni
termiczne	zmęczeniowe	plastyczne	wewnątrz powłoki	w głąb	w głąb	pęknięcie powierzchniowe	schropwienie powierzchni
oddziaływania chemiczne			granica powłoka-podłoże	na zewnątrz	na zewnątrz	wyrwa w obrębie materiału powłoki	odstłonięte podłoże
naprężenia własne			wewnątrz materiału rodzimego		zmienny	odwarstwienie powłoki	wielka wyrwa w obrębie powłoki
						wyrwa obejmująca materiał rodzimy	wielka wyrwa obejmująca podłoże powłoki
						ubytek materiału powłoki niebędący wyrwą	przełom objętościowy

obciążenia robocze mechaniczne – pęknięcie zmęczeniowe – przełom kruchy – pęknięcie zainicjowane na granicy powłoka-podłoże – równoległy kierunek propagacji początkowej – równoległy kierunek dalszej propagacji – odwarstwienie powłoki – odstłonięte podłoże.

Możliwe też są oczywiście bardziej złożone kombinacje przypadków wymienionych w tabeli. Podobny schemat można też zastosować do analizy uszkodzeń powłok wielowarstwowych, odpowiednio pogłębi się wtedy złożoność zagadnienia.

Część przypadków wyszczególnionych w tabeli jest udokumentowana na zamieszczonych rysunkach – na przykład wygładzenie powierzchni (plateau widoczne na **Rys. 1**), wyrwy w obrębie materiału powłoki (**Rys. 1**), odsłonięte podłoże (**Rys. 1 i 2**) i inne.

Zaznaczyć należy, że przytoczona próba usystematyzowania pęknięć i ich skutków nie wyczerpuje zagadnienia uszkodzeń powłok ceramicznych. Nie wszystkie bowiem uszkodzenia są następstwem propagacji pęknięć materiału powłoki lub podłoża, pamiętać należy na przykład o możliwości wydzielania się produktów zużycia w formie drobnoproszkowej lub gazowej w przypadku niektórych materiałów ceramicznych itp. Pęknięcia powłoki ceramicznej można też klasyfikować, biorąc pod uwagę, czy pojawiły się w procesie eksploatacji obiektu – w szczególności w czasie jego użytkowania, czy też wywołane zostały procesem technologicznym i doprowadziły na przykład do niezdatności początkowej obiektu. Ogólnie rzecz biorąc, zagadnienie wymaga dalszych studiów, a przytoczone rozważania odnośnie do uszkodzeń będących skutkiem pęknięć powinny ułatwić zakreślenie obszaru przyszłych prac badawczych.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego – nr 4799/B/T02/2008/34.

LITERATURA

1. Druet K.: Metoda badania powłok ceramicznych w ruchu postępowo-zwrotnym. *Tribologia* nr 2/2008 (218), s. 167–177.
2. Druet K., Łubiński J.I., Grymek S.: Stanowisko do badania tarcia ślizgowego w ruchu posuwisto-zwrotnym. *J. of KONES* 2002, vol. 9 nr 1–2, s. 72–79.
3. Druet K.: Urządzenie do badania tarcia ślizgowego w ruchu prostoliniowym. *XXIII Jesienna Szkoła Tribologiczna*. Zielona Góra – Lubiatów, wrzesień 1999, s. 29–34.
4. Kano M., Tanimoto I.: Wear mechanisms of high wear-resistant materials for automotive valve trains. *Wear* 151 (1991), s. 229–243.



5. Poszukiwanie niskotarciowych skojarzeń, z cienkimi powłokami ceramicznymi, przeznaczonych na węzły ślizgowe. Neyman A. i inni. Proj. bad. nr 4 T07B 044 27. Gdańsk: Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny 2007.
6. Stachowiak G.W., Stachowiak G.B.: Unlubricated wear and friction of toughened zirconia ceramics at elevated temperatures. *Wear* 136 (1990), s. 373–381.
7. Yin-Qian C., Xiang-Dong D. i inni: On wear mechanisms of Sialon and metal in dry sliding. *Wear* 137 (1990), s. 175–186.

Recenzent:
Bogdan WENDLER

Summary

A ball-on-plate system was used for the investigation of the wear of ceramic coatings. Coated stainless steel balls (\varnothing 5 mm) were sliding under constant load at a nominal surface pressure of 1,155 GPa on a ceramic coated face of stainless bar moving in a rectilinear reciprocating motion (sliding velocity 0.08 ± 0.02 m/s, stroke 40 mm).

Ultra thin coatings were tested, particularly DLC modified with a tungsten additive. Sliding contacts were lubricated either with distilled water or with aqueous solution of NaCl.

The course of wear of the ceramic coating deposited on the specimen was evaluated by means of optical and scanning electron microscope observations. Prime objects for wear testing were the coated surfaces of stainless steel balls. The reciprocating flat counterface was examined as an auxiliary data source.

Wear marks on the balls were elliptical in shape with the longer axis perpendicular to the direction of sliding. In rare cases, circular wear marks were observed.

A variety of wear forms were observed: scratches, cracks, delamination, pits and steel substrate exposure. Some of the observed wear forms could be put down to imperfections in the coating.

It is proposed that numerous forms of wear encountered should be classified into wear types in a systematic approach, e.g. based on such factors (in the case of crack propagation involving cases) as cause of crack initiation or crack type (instantaneous or fatigue).

