

Monika MADEJ*

ZWIĘKSZENIE TRWAŁOŚCI EKSPLOATACYJNEJ WĘZŁÓW TARCIA PRZEZ ZASTOSOWANIE POWŁOK DLC TYPU A:C:H ORAZ A:C:H:W

INCREASING THE SERVICEABILITY OF FRICTION PAIRS BY APPLYING A:C:H AND A:C:H:W DLC COATINGS

Słowa kluczowe:

powłoki CVD, powłoki DLC, SEM, struktura geometryczna powierzchni SGP, tarcie, zużycie tribologiczne

Key words:

CVD coatings, DLC coatings, SEM, friction, tribological wear

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań struktury oraz testów triologicznych powłok DLC typu a:C:H oraz a:C:H:W. Powłoki otrzymywano techniką PACVD na elementach ze stopu Co-Cr-Mo. Analizę struktury powierzchni i jej elementarnego składu oceniano z użyciem mikroskopu

* Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Zakład Tribologii i Materiałów Eksploatacyjnych, al. 1000-Lecia PP 7; 25-314 Kielce; e-mail: mmadej@tu.kielce.pl.

skaningowego SEM. Twardość elementów bez powłoki oraz z powłokami a:C:H i a:C:H:W zmierzono z użyciem miktwardościomierza Matsuzawa, stosując obciążenie 10 G (HV0,01). Badania odporności materiałów testowych na zużycie tribologiczne przeprowadzono na mikrotribometrze T-23 oraz na aparatach T-01M typu ball-on-disc, w układzie kulka z Al_2O_3 – tarcza ze stopu Co-Cr-Mo z powłokami DLC, w warunkach tarcia technicznie suchego oraz smarowania roztworem Ringera. Badania tarciove realizowano również na maszynie T-17, pracującej w skojarzeniu: trzpień–płytką w warunkach tarcia ze smarowaniem roztworem Ringera. Wyniki otrzymane podczas zrealizowanych badań wykazały, że zastosowanie powłok DLC zdecydowanie zwiększa trwałość eksploatacyjną pokrytych powierzchni, przy czym najbardziej stabilnymi parametrami charakteryzują się powłoki typu a:C:H.

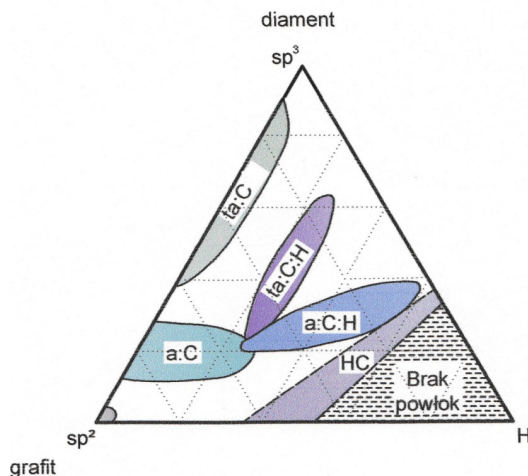
WPROWADZENIE

Ogromnym zainteresowaniem w pracach badawczych i aplikacyjnych w ciągu ostatnich lat cieszą się powłoki diamentopodobne – DLC [L. 1–3, 6, 8–10]. Wynika to bezpośrednio z ich właściwości: wysokiej twardości, odporności na zużycie tribologiczne i korozyjne. Znajdują one bardzo szerokie zastosowanie między innymi na narzędzia skrawające, twarde dyski, łożyska oraz sztuczne protezy. Struktura i właściwości powłok DLC w dużym stopniu zależą od metody ich osadzania oraz wkomponowania dodatkowych pierwiastków, takich jak wodór, azot, krzem oraz wybranych metali. Dodatkowo również należy podkreślić, że nie mniej ważnym czynnikiem jest stosunek wiązań kowalencyjnych, zhybrydowanych typu sp^3/sp^2 .

Na **Rysunku 1** przedstawiono schematyczny podział materiałów węglowych w zależności od udziału wiązań sp^3 i sp^2 oraz wodoru [L. 9]. Wykres fazowy składa się z trzech głównych obszarów, odpowiadających diamentowi, grafitowi oraz węglowodorom. Wzdłuż lewej osi w ogóle nie ma wodoru. Natomiast w prawej części wykresu, gdzie zawartość H jest bardzo duża, występują jedynie cząsteczki gazu i nie ma powłok. Zakres występowania powłok określa linia graniczna – powyżej zakresu występowania węglowodorów z osią sp^2 -H oraz z osią sp^3 -H. Powłoki a:C:H występujące w tym obszarze uzyskiwane są techniką CVD wspomaganą plazmą – PACVD. Według przedstawionego schematu powłoki DLC można sklasyfikować jako:

- > ta-C – tetraedyczny amorficzny węgiel nie zawiera wodoru i ma maksymalną zawartość wiązań sp^3 , która wpływa przede wszystkim na właściwości sprężyste. Jest to najtwardsza, najbardziej stabilna i gładka forma spośród powłok.
- > ta-C:H – mają ~70% wiązań sp^3 oraz 25÷35% wodoru. Liczba wiązań sp^3 wzrasta ze wzrostem związanego wodoru;
- > a:C – nie zawierają wodoru, a udział wiązań sp^3 wynosi do 30%.
- > a:C:H – mają 20–40% wodoru.

Ponadto powłoki a:C mogą być modyfikowane metalami i wówczas są oznaczane a:C:Me, natomiast powłoki a:C:H modyfikuje się metalami – a:C:H:Me (W, Ti, Nb, Cr, V, Co, Mo) oraz niemetalami – a:C:H:X (H, Si, F, N, O, P, B).

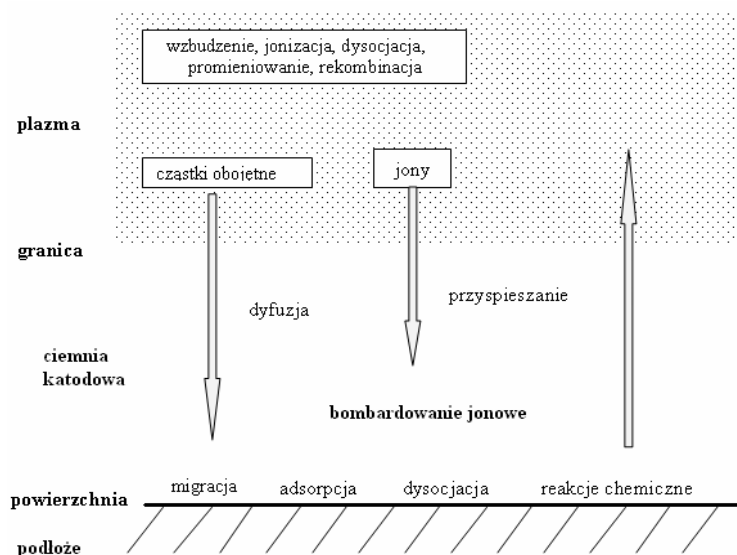


Rys. 1. Diagram fazowy różnych powłok DLC z uwzględnieniem koncentracji wiązań sp^2 , sp^3 i wodoru

Fig. 1. Phase diagram for various DLC coatings with respect to their sp^2 , sp^3 and hydrogen contents

Jedną z najczęściej stosowanych metod otrzymywania powłok DLC jest chemiczne osadzanie z fazy gazowej – *Chemical Vapour Deposition*, *CVD*. W procesach CVD materiał powłoki doprowadzony jest do podłoża w postaci lotnych związków chemicznych, a zachodzące na nim reakcje chemiczne prowadzą do utworzenia powłoki [L. 5–6, 8–10]. Na **Rysunku 2** zostały przedstawione reakcje towarzyszące procesowi chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganie plazmą PACVD. Zimna plazma powstająca podczas wyładowania jarzeniowego w technikach

PACVD dostarcza jednolity strumień cząstek aktywnych chemicznie – dodatnich jonów, neutralnych cząstek, metastabilnych cząstek, elektronów i fotonów. Energia elektronów w plazmie aktywuje reakcję między gazami w wyładowaniu jarzeniowym przy relatywnie niskich temperaturach podłoża poniżej 300° C [L. 5].



Rys. 2. Schemat zachodzących reakcji w procesie PACVD [L. 5]

Fig. 2. Diagram of reactions involved in the PACVD process, according to [L. 5]

Na właściwości wytworzonej warstwy można wpływać poprzez parametry prądowo-napięciowe wyładowania jarzeniowego, temperaturę substratów, rodzaj i ciśnienie gazu, szybkość jego przepływu, wlot (położenie) substratów względem elektrod i strumienia gazu oraz przez odpowiednie przygotowanie powierzchni obrabianej. Parametry wyładowania jarzeniowego używanego w technice PACVD są zależne głównie od rodzaju gazu – prekursora, a także od jego ciśnienia i częstotliwości pola elektrycznego. Natomiast ważnym czynnikiem jest także rozmiar i rodzaj komory wyładowania.

Celem niniejszej pracy było przeprowadzenie analizy porównawczej struktury, mikrotwardości oraz właściwości tribologicznych powłok DLC typu a:C:H oraz a:C:H:W. Niezawodność i efektywność funkcjonowania układu tribologicznego zależy od odtwarzalności przeciwwzyciowej warstwy wierzchniej. Pełni ona fundamentalną rolę w pracy węzła tarcia,

począwszy od jej pierwotnych – technologicznych właściwości, poprzez zmiany w toku procesu eksploatacyjnego, aż po uzyskanie parametrów eksploatacyjnych [L. 7].

APARATURA I METODYKA BADAŃ

Mikroskop sił atomowych AFM

Pomiary wykonano na mikroskopie sił atomowych firmy NT-MDT z głowicą typu Smena (NT-MDT w trybie oscylacyjnym – tapping mode. Zwiualizowano topografie powierzchni próbek o wymiarach $50 \times 50 \mu\text{m}$. Beleczka pomiarowa – cantilever – NSG 11 firmy NT-MDT miała następujące parametry:

- $k = 5,5\text{--}22,5 \text{ N/m}$,
- częstotliwość rezonansowa = 223,2 kHz.

Mikroskopia skaningowa SEM

Do obserwacji próbek: stopu Co-Cr-Mo, stopu Co-Cr-Mo z naniesionymi powłokami DLC oraz obszarów zużycia użyto skaningowej mikroskopii elektronowej. W badaniach posłużono się mikroskopem FEI E-SEM XL30 wyposażonym w spektrometr dyspersji energii promieni X EDAX GEMINI 4000, z możliwością badań w niskiej próżni. Wyposażony jest on w detektor Si(Li) z okienkiem SUTW o zdolności rozdzielczej ≤ 133 . System EDAX kontroluje wiązkę elektronową w mikroskopie E-SEM XL30 celem akwizycji obrazów i map poprzez własny generator skanowania.

Mikrotwardość

Pomiary mikrotwardości wykonano z użyciem mikrotwardościomierza MATSUZAWA z wgłębnikami Vickersa oraz Knoopa. Zastosowanie tego drugiego pozwala przy stosowaniu małych obciążeń eliminować twardość materiału podkładowego. Badania realizowano przy obciążeniu siłą 98,07 mN.

Testy tribologiczne

Mikrotribometr T-23

Testy tribologiczne na mikrotribometrze T-23 wykonano dla stopu Co-Cr-Mo, stopu Co-Cr-Mo z naniesionymi powłokami a:C:H oraz a:C:H:W przy następujących parametrach:

- przeciwpróbka: kulka stalowa ($\varphi = 5$ mm), kulka $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ ($\varphi = 5$ mm)
- prędkość: 25 mm/min,
- droga: 5 mm,
- zakres obciążeń: 30–80 mN
- przyrost obciążenia – 10 mN,
- wilgotność względna: $55 \pm 5\%$, temperatura: $22^\circ C \pm 1$.

Tester T-01M

Badania tribologiczne z użyciem testera T-01M, prowadzono przy następujących parametrach:

- skojarzenie trące: kulka $\alpha-Al_2O_3$ – stop Co-Cr-Mo oraz powłoki a:C:H, a:CH:W,
- obciążenie $P = 10$ N,
- prędkość ślizgania $v = 0,1$ m/s,
- droga tarcia $s = 1000$ m,
- warunki wilgotności względnej $55 \pm 5\%$,
- temperatura otoczenia $T_0 = 22 \pm 1^\circ C$.

Tester T-17

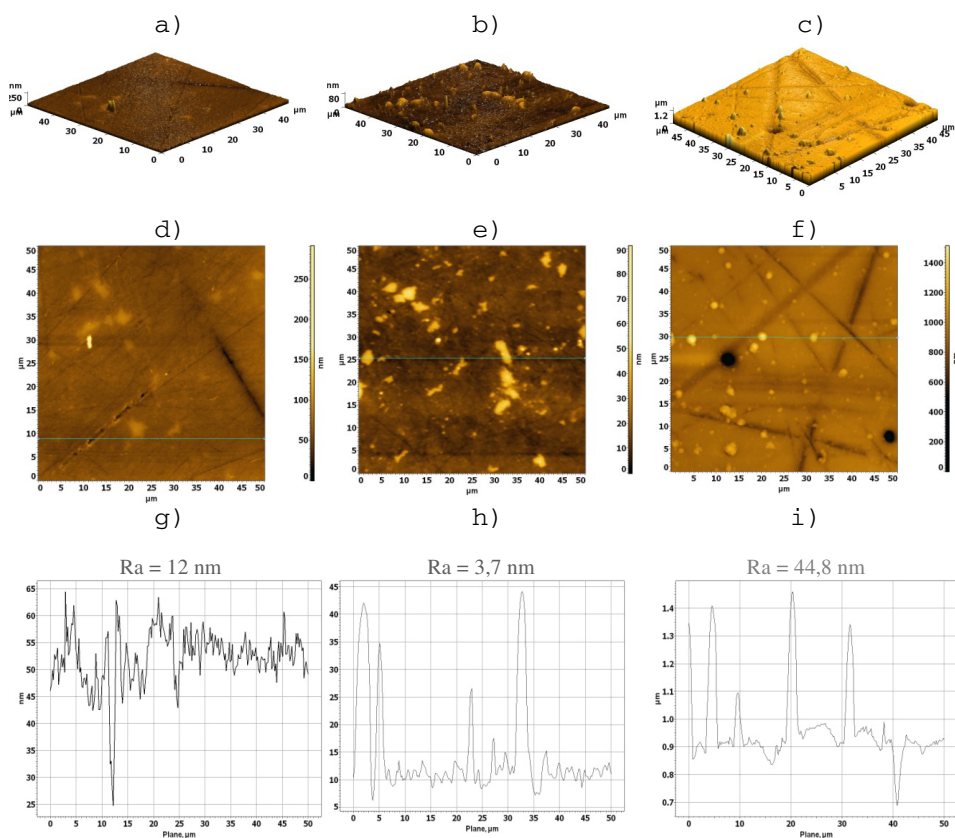
Badania tribologiczne na aparacie T-17 umożliwiły ocenę charakteru współczynnika tarcia i zużycia w funkcji ilości cykli. Informacje dotyczące aparatury i metodyki pomiarowej szczegółowo opisali autorzy [L. 4]. Badania skojarzeń materiałów testowych zrealizowano zgodnie z normą ASTM 732-82 przy następujących parametrach:

- układ trący: trzpień z UHMWPE – płytką ze stopu Co-Cr-Mo oraz ze stopu Co-Cr-Mo z naniesionymi powłokami a:C:H oraz a:C:H:W;
- czas testu / liczba cykli – 1.000.000 s / 1.000.000;
- amplituda – 12,7 mm;
- częstotliwość – 1 Hz;
- średnia prędkość poślizgu – 50 mm/s;
- obciążenie – 225 N;
- ciecz smarująca – odczynnik RINGERA;
- temperatura płynu podczas badań – $37 \pm 1^\circ C$.

WYNIKI BADAŃ I Dyskusja

Mikroskopia AFM

Badaniom poddano płytki wykonane ze stopu Co-Cr-Mo oraz płytki ze stopu Co-Cr-Mo z naniesioną powłoką TiN. Wykonano z użyciem mikroskopii sił atomowych AFM widoki topografii powierzchni próbek ze stopu Co-Cr-Mo oraz ze stopu Co-Cr-Mo z powłoką a:C:H i powłoką a:C:H:W, wykonano pomiary topografii w przekroju poprzecznym i zmierzono parametr R_a (Rys. 3).



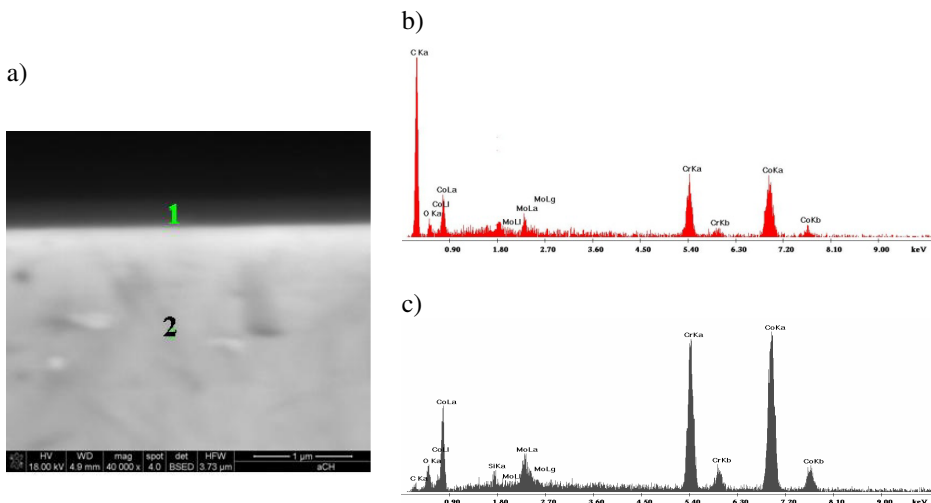
Rys. 3. AFM – topografia powierzchni z przekrojami poprzecznymi, profilami chropowatości oraz parametrem R_a badanych materiałów: a), d), g) stopu Co-Cr-Mo; b), e), h) powłoki a:C:H, c), f), i) powłoki a:C:H:W

Fig. 3. AFM surface topography images with cross sections, roughness profiles and the parameter R_a of: a), d), g) the Co-Cr-Mo alloy substrate; b), e), h) the a:C:H coating; c), f), i) the the a:C:H:W coating

Spośród przedstawionych na **Rysunku 5** materiałów największą gładkością powierzchni charakteryzuje się powłoka a:C:H. W wyniku naniesienia na stop Co-Cr-Mo powłoki a:C:H:W chropowatość powierzchni znacznie wzrosła, parametr chropowatości R_a dla stopu w wyniku nałożenia powłoki wzrósł prawie 4-krotnie.

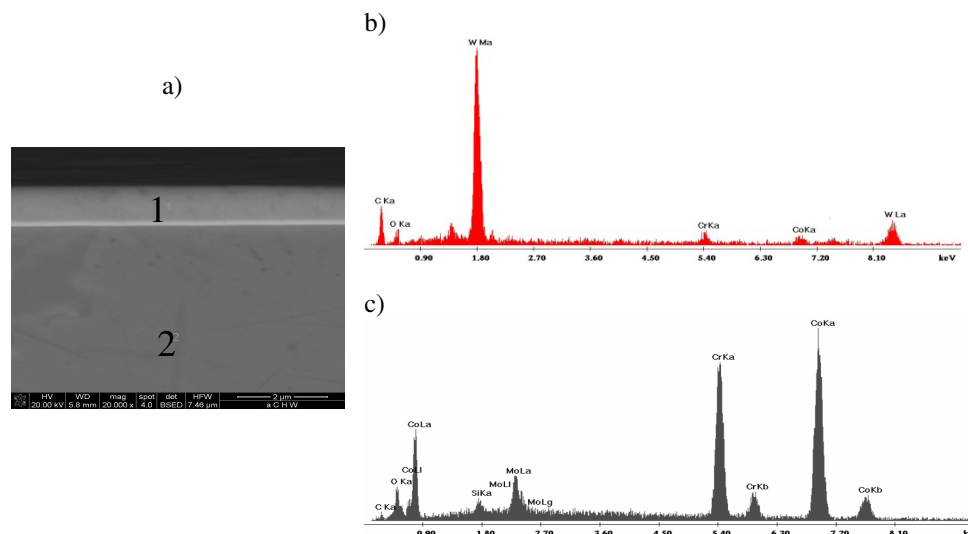
Mikroskopia SEM

Badania struktury obejmowały obserwacje topografii powierzchni i przekrojów poprzecznych powłok kompozytowych. Analizowano skład chemiczny pierwiastków z obszarów próbki oraz obszarów śladu zużycia. Mikroanalizę punktową wykorzystano do zbadania składu pierwiastkowego w formule ilościowej. Mikroanalizę powierzchniową zastosowano do jakościowego wyznaczenia rozkładu pierwiastków na badanej powierzchni śladu zużycia. Uzyskano rozkłady powierzchniowe wybranych pierwiastków w analizowanym obszarze w postaci punktów, których zagęszczenie i jasność wzrasta ze wzrostem zawartości pierwiastka. Na **Rysunkach 4 i 5**, przedstawiono przekroje poprzeczne powłok DLC typu a:C:H i a:C:H:W wraz z analizami punktowymi elementarnego składu z obszaru powłoki – 1 oraz podłoża – 2.



Rys. 4. SEM – mikrostruktura w przekroju poprzecznym powłoki a:C:H: a) widok SEM i analiza punktowa elementarnego składu, b) powłoki; c) podłoża

Fig. 4. SEM cross-sectional microstructure of the a:C:H coating: a) a SEM view and point analysis of the elementary composition of: b) the coating; c) the substrate



Rys. 5. SEM – mikrostruktura w przekroju poprzecznym powłoki a:C:H:W: a) widok SEM i analiza punktowa elementarnego składu, b) powłoki; c) podłoża

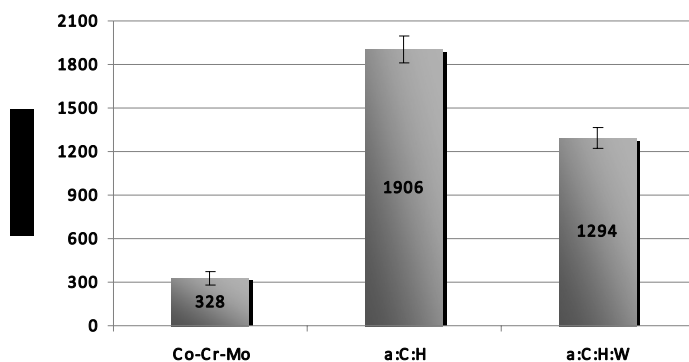
Fig. 5. SEM cross-sectional microstructure of the a:C:H:W coatings: a) a SEM view and point analysis of the elementary composition of: b) the coating; c) the substrate

Na podstawie przeprowadzonych analiz składu chemicznego powłok stwierdzono w powłoce a:C:H obecność atomów węgla i niewielkie piki dla pierwiastków wchodzących w skład materiału podłoża: Co, Cr i Mo. Natomiast w powłoce a:C:H:W widać udział dodatkowo atomów wolframu, będącego komponentem powłoki. Analizy materiału podłoża w obu przypadkach wykazały obecność jedynie składników stopu Co-Cr-Mo.

Mikrotwardość

Na **Rysunku 6** zestawiono uśrednione wyniki z 10 pomiarów mikrotwardości materiałów powłokowych.

Największą twardością charakteryzuje się powłoka DLC typu a:C:H. Jednak zarówno wspomniana powłoka, jak i powłoka typu a:C:H:W mają zdecydowanie większą twardość w odniesieniu do materiału podłoża – stopu Co-Cr-Mo.



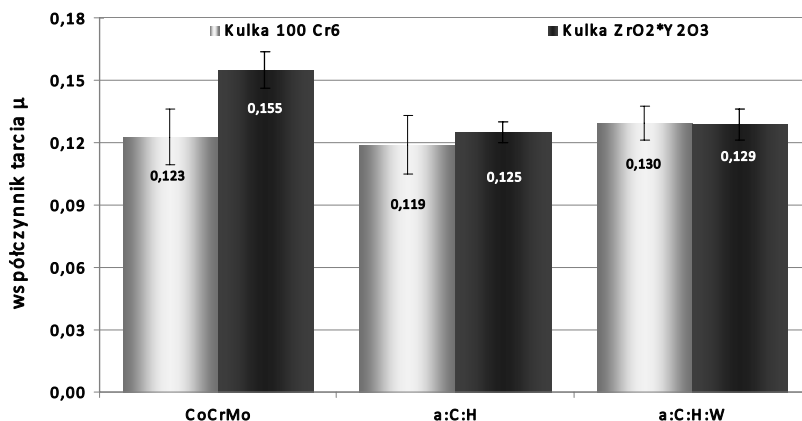
Rys. 6. Mikrotwardość badanych materiałów powłokowych i podłoża
 Fig. 6. Microhardness of the coatings and the substrate

Testy tribologiczne

Mikrotribometr

Na **Rysunku 7** zestawiono wyniki pomiarów współczynników tarcia uzyskanych na mikrotribometrze. Badania zrealizowano w warunkach tarcia technicznie suchego materiałów testowych w skojarzeniu:

- z kulką stalową ze stali 100Cr6;
- z kulką z tlenku cyrkonu stabilizowanego tlenkiem itru.



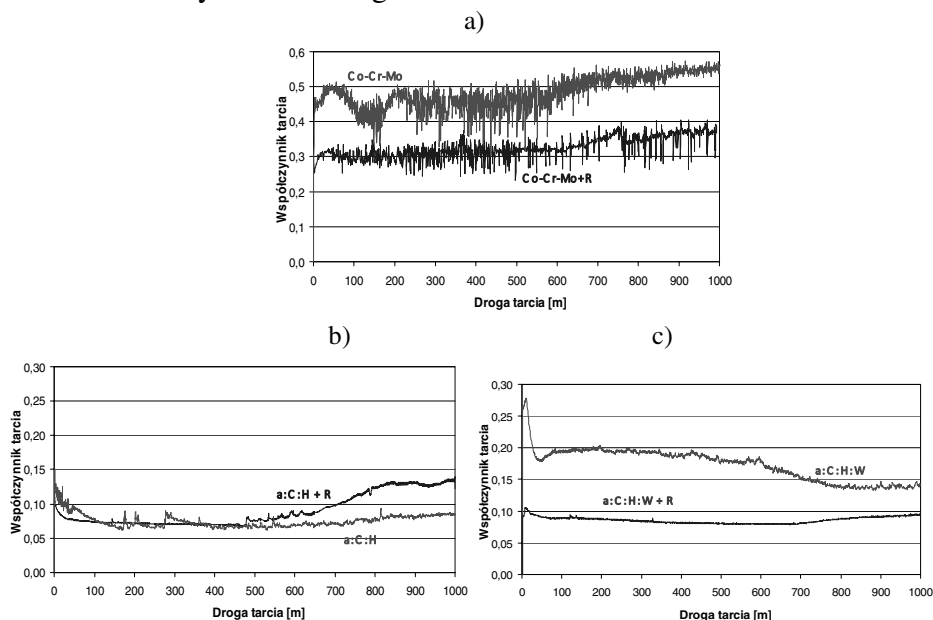
Rys. 7. Wartości współczynników tarcia w zależności od materiału kulki dla badanych styków tarciovych

Fig. 7. Coefficient of friction at the friction interface for ball specimens coated with different materials

Z przedstawionego zestawienia wynika, że dla badanych materiałów: stopu Co-Cr-Mo oraz stopu Co-Cr-Mo z powłoką a:C:H w skojarzeniu z kulką stalową zarejestrowano mniejsze współczynniki tarcia niż w skojarzeniu z kulką ceramiczną. Natomiast dla powłoki a:C:H:W wystąpiła sytuacja odwrotna, tzn. mniejsze współczynniki tarcia uzyskano dla skojarzenia z kulką $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$. Również różnice w wielkości współczynników tarcia są najmniejsze dla tej powłoki. Dla obu badanych powłok a:C:H i a:C:H:W zarejestrowano mniejsze wartości współczynników tarcia w odniesieniu do materiału podłoża.

Tester T-01M

Wyniki uzyskanych badań przedstawiono w formie wykresów zmian współczynnika tarcia w funkcji drogi (**Rys. 8**) oraz zestawienia współczynnika intensywności zużycia elementów testowych (**Tab. 1**). Testy przeprowadzono w warunkach tarcia technicznie suchego oraz ze smarowaniem odczynnikami Ringera.



Rys. 8. Zmiany współczynnika tarcia w warunkach technicznie suchego i smarowania odczynnikami Ringera – +R w funkcji drogi dla: a) stopu Co-Cr-Mo, b) powłoki a:C:H, c) powłoki a:C:H:W

Fig. 8. Coefficient of friction versus the sliding distance during technically dry friction and boundary lubricated friction using Ringer's solution: a) the Co-Cr-Mo alloy; b) the a:C:H coating; c) a:C:H:W coating

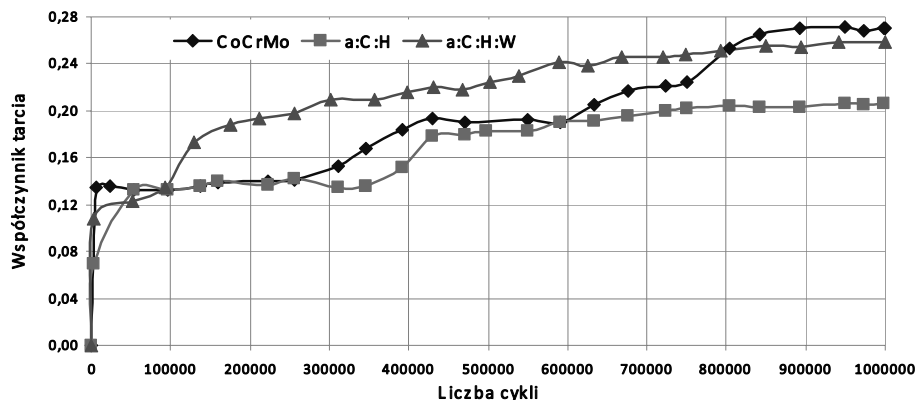
Tabela 1. Zmiany współczynnika intensywności zużywania w zależności od materiału
 Table 1. Wear rates for the different coating materials

MATERIAŁ	WSPÓŁCZYNNIK INTENSYWNOŚCI ZUŻYWANIA, μM/1000M	
	Smarowanie	
	BRAK	ODCZYNNIK RINGERA
Co-Cr-Mo	14	6
a:C:H	2	4,5
a:C:H:W	2,2	4,5

W wyniku przeprowadzonych testów na aparacie T-01M stwierdzono, że najmniejszy współczynnik tarcia zarejestrowano dla powłoki a:C:H w warunkach tarcia technicznie suchego, jego wartość w czasie całego testu oscyluje w zakresie $0,07 \div 0,09$. Jest również bardzo stabilny w warunkach smarowania odczynnikiem Ringera do około połowy testu i uzyskuje wartość $\sim 0,075$. Następnie wzrasta i po 1000 m drogi tarcia osiąga wartość 0,13. W przypadku analizowanego stopu Co-Cr-Mo wartości współczynnika tarcia są zdecydowanie większe w odniesieniu do obu powłok i kształtują się na poziomie $0,30 \div 0,38$ w warunkach smarowania oraz $0,48 \div 0,55$ podczas tarcia technicznie suchego, a ich przebieg nacechowany jest dużymi zmianami wartości. Najbardziej stabilną krzywą współczynnika tarcia uzyskano dla powłoki a:C:H:W w warunkach tarcia ze smarowaniem odczynnikiem Ringera. W czasie całego biegu badawczego utrzymuje się on na poziomie 0,09. Zestawienie wartości współczynnika intensywności zużywania w **Tabeli 1** pokazuje, że dla obu powłok DLC jest on bardzo zbliżony i zdecydowanie mniejszy – 7-krotnie dla tarcia technicznie suchego i o 25% w warunkach smarowania niż dla stopu Co-Cr-Mo.

Tester T-17

Podczas badań na testerze T-17, pracującym w ruchu posuwisto-zwrotnym, parę trącą stanowił nieruchomy trzpień wykonany z wielko-cząsteczkowego polietylenu UHMWPE i ruchoma płytką ze stopu Co-Cr-Mo lub stopu Co-Cr-Mo z powłokami DLC. Wyniki badań przedstawiono w formie zestawień zmian współczynnika tarcia μ oraz współczynnika intensywności zużywania materiałów badanych w funkcji liczby cykli przedstawiono na **Rysunkach 9 i 10**.

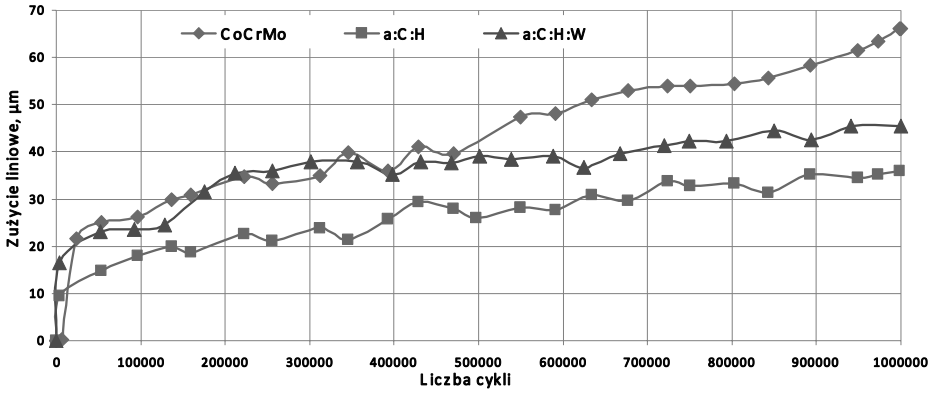


Rys. 9. Wykresy zmian współczynnika tarcia w funkcji liczby cykli dla skojarzeń: UHMWPE – stop Co-Cr-Mo; UHMWPE – powłoka a:C:H i UHMWPE – powłoka a:C:H:W

Fig. 9. Relationships between the coefficient of friction and the number of cycle for: UHMWPE-the Co-Cr-Mo alloy; UHMWP-the a:C:H coating; UHMWP- the a:C:H:W coating

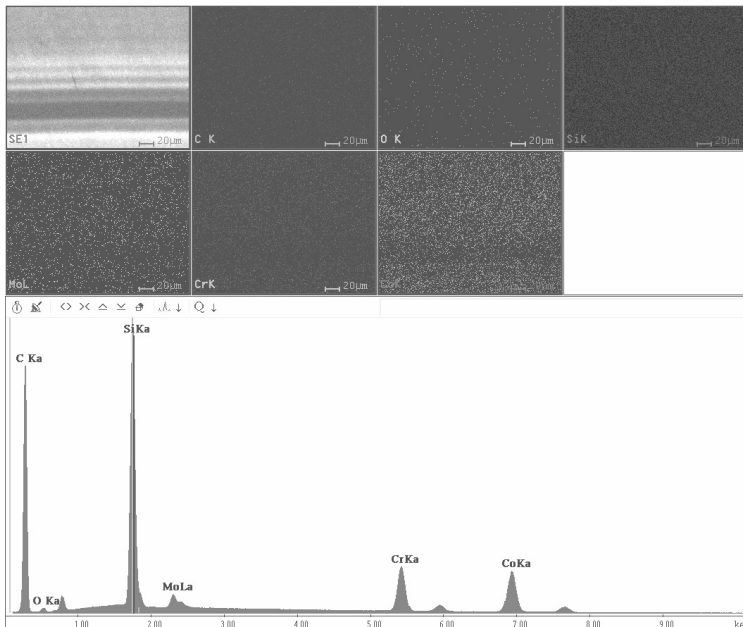
W początkowym okresie testu zarejestrowano mniejszy współczynnik tarcia dla stopu Co-Cr-Mo oraz dla powłoki a:C:H niż dla powłoki a:C:H:W i stan taki utrzymywał się do 800000 cykli, wówczas największe wartości współczynnika tarcia zarejestrowano dla stopu Co-Cr-Mo. Najbardziej stabilnym skojarzeniem testowym była powłoka a:C:H – UHMWPE, dla której jego przebieg był ustalony i najmniejszy. Obliczono również średnie współczynniki tarcia w okresie pomiędzy 100000 a 900000 cykli, które wynosiły odpowiednio dla skojarzenia Co-Cr-Mo – polietylen UHMWPE $\mu = 0,190$, natomiast dla skojarzenia powłoka a:C:H – polietylen UHMWPE $\mu = 0,184$, a:C:H:W – polietylen UHMWPE $\mu = 0,224$.

Z przedstawionych na **Rysunku 10** zmian zużycia liniowego wynika, że dla wszystkich badanych materiałów na początku następuje najbardziej intensywne zużywanie w okresie do około 150000 cykli, a następnie jego przyrost jest systematyczny i dość ustabilizowany do końca trwania testu, przy czym jest on najmniejszy dla powłoki a:C:H, a największy dla materiału podkładowego – stopu Co-Cr-Mo. Widoki powierzchni na granicy strefy tarcia powłok a:C:H (**Rys. 11**) oraz a:C:H:W (**Rys. 12**), mapy rozkładu poszczególnych pierwiastków oraz analizy punktowe z obszarów zużycia po testach tarciovych wykonano na aparacie T-17.



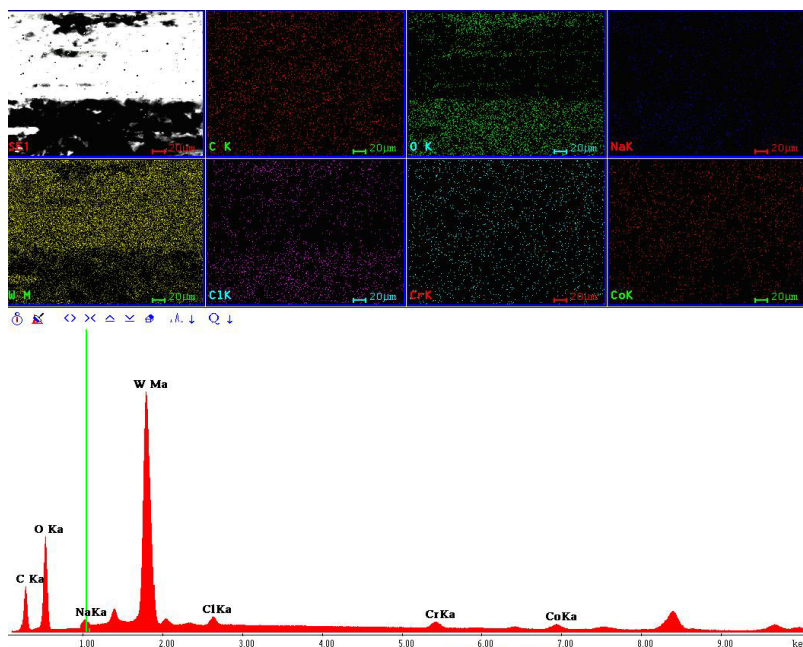
Rys. 10. Wykresy zmian zużycia liniowego metalowo-polimerowego węzła tarcia w funkcji liczby cykli dla stopu Co-Cr-Mo, powłoki a:C:H i powłoki a:C:H:W w skojarzeniu z politylenem UHMWPE

Fig. 10. Relationships between the linear wear and the number of cycles for: UHMWPE-the Co-Cr-Mo alloy; UHMWP-the a:C:H coating; UHMWP- the a:C:H :W coating



Rys. 11. Obszar śladu zużycia tribologicznego wraz z mapami pierwiastków i analizą punktową dla powłoki a:C:H

Fig. 11. Area of wear track after tribological tests with the distribution of elements and EDXS analysis for the a:C:H coating



Rys. 12. Obszar śladu zużycia tribologicznego wraz z mapami pierwiastków i analizą punktową dla powłoki a:C:H:W

Fig. 12. Area of wear track after tribological tests with the distribution of elements and EDXS analysis for the a:C:H:W coating

Z przedstawionych analiz wynika, że w obu przypadkach elementarny skład powłok po testach tarciovych został zachowany. Zasadniczymi różnicami jest fakt obecności krzemu w powłoce a:C:H, wynikający najprawdopodobniej z obróbki materiału podkładowego przed nakładaniem powłoki, a mającej na celu poprawę jej adhezji do podłoża. Z kolei na powłoce a:C:H:W zaobserwowano odmienny skład i pierwiastki, takie jak sód i potas, które pojawiły się z cieczy smarującej – odczynnika Ringera, będącego roztworem wodnym między innymi związków nieorganicznych tych pierwiastków – podstawowych składników modelowej substancji smarującej o charakterze jonowym.

Analizując wszystkie przedstawione w opracowaniu wyniki badań, stwierdzam, że obie testowane powłoki DLC typu a:C:H oraz a:C:H:W wykazują lepsze właściwości tribologiczne niż materiał bazowy – stop Co-Cr-Mo. Jednakże największą twardość i najlepsze parametry tribologiczne uzyskano dla powłoki a:C:H.

WNIOSKI

Wyniki zrealizowanych badań pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Analiza właściwości materiału bazowego – stopu Co-Cr-Mo oraz powłok DLC typu a:C:H i a:C:H:W otrzymywanych metodą PACVD w różnych skojarzeniach testowych daje podstawę do prowadzenia badań z ukierunkowaniem na zastosowania ich jako elementy węzłów tarcia, w tym biołożyska.
2. Obserwacje struktury i analizy składu wykazały zgodność budowy powłok z zakładaną podczas procesów ich wytwarzania.
3. Analiza topografii powierzchni wykonana z użyciem mikroskopu AFM pokazała, że zastosowanie powłoki a:C:H pozwala znacznie zmniejszyć chropowatość powierzchni materiału podłoża.
4. Badane powłoki DLC znacznie zwiększają twardość w odniesieniu do stopu Co-Cr-Mo.
5. Poddane ocenie powłoki DLC wykazują mniejsze zużycie i w związku z tym zapewniają lepsze warunki pracy podczas tarcia niż elementy ze stopu Co-Cr-Mo.
6. Znaczące zmniejszenie sumarycznego zużycia liniowego elementów powłokowych i z polimeru UHMWPE uzyskano podczas testów na wszystkich tribotesterach w warunkach tarcia technicznie suchego.
7. Podczas badań tribologicznych na maszynie T-17 z zastosowaniem płynu Ringera zarejestrowano dla powłoki DLC typu a:C:H najmniejszy średni współczynnik tarcia, a jego przebieg w czasie całego cyklu badawczego był bardziej stabilny niż dla materiału bazowego Co-Cr-Mo i powłoki a:C:H:W.

LITERATURA

1. Kamiya M., Tanoue H., Takikawa H., Taki M., Hasegawa Y., Kumagai M., Preparation of various DLC films by T-shaped filtered arc deposition and the effect of heat treatment on film properties, *Vacuum* 83 (2009) 510–514.
2. Madej M., Ozimina D., Ocena właściwości powłok DLC stosowanych w układach biotribologicznych, *Tribologia* 3 (2009) 105–114.
3. Madej M., Ozimina D., Zdravecka E., Piekoszewski W., The characterization of diamond-like carbon coatings used for artificial joints, *Proc.Intern.Conf. TRIBOCHEMISTRY, Lanzhou – China 2009*, 28.

4. Michalczewski R., Piekoszewski W., Szczerek M., Metoda i urządzenie do badań tribologicznych materiałów na endoprotezy. *Tribologia* 5 (2002) 1491–1502.
5. Michalski A.J. Fizykochemiczne podstawy otrzymywania powłok z fazy gazowej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
6. Neuville S., Matthews A., A perspective on the optimisation of hard carbon and related coatings for engineering applications, *Thin Solid Films* 515 (2007) 6619–6653.
7. Ozimina D., Przeciwzużyciowe warstwy wierzchnie w układach tribologicznych, Monografia nr 33, Wyd. PŚk, Kielce 2002.
8. Trava-Airoldi V.J., Bonetti L.B., Capote G., Santos L.V., Corat E.J.: A comparison of DLC film properties obtained by r.f. PACVD, IBAD, and enhanced pulsed-DC PACVD, *Surface & Coatings Technology* 202 (2007) 549–554.
9. Robertson J., Diamond-like amorphous carbon, *Materials Science Engineering* 3 (2002) 129–281.
10. Vojs M., Zdravecká E., Marton M., Boháč P., Franta L., Veselý M., Properties of amorphous carbon layers for bio-tribological applications, *Microelectronics Journal* 40,3 (2009) 650–653.

Recenzent:
Marian W. SUŁEK

Summary

The paper discusses the results of structural and tribological tests conducted for a:C:H and a:C:H:W DLC coatings deposited on Co-Cr-Mo specimens using the PACVD process. The structure and morphology of the Co-Cr-Mo substrate and the DLC coating were assessed by means of a scanning electron microscope (SEM). The hardness of specimens with and without a:C:H and a:C:H:W coatings were measured under a load of 10 G applying a Matsuzawa tester (HV 0.01). The resistance of the material to tribological wear was determined by means of a T-23 microscratch tester and a T-01M ball-on-disc tester (the Al₂O₃ ball and the Co-Cr-Mo disc with DLC coatings) under dry friction conditions and using Ringer's solution.

The friction tests were conducted by employing a T-23 microtribometer under dry friction conditions and a T-17 pin-on-plate tester under lubricated friction conditions and using Ringer's solution. The results show that the DLC coatings increase the serviceability of the surfaces, with the a:C:H coating characterised by more stable parameters.