

Dariusz OZIMINA*, **Monika MADEJ***

OCENA WŁAŚCIWOŚCI JEDNO- I WIELOWARSTWOWYCH POWŁOK DLC

ASSESSING THE PROPERTIES OF SINGLE AND MULTI-LAYER DLC COATINGS

Słowa kluczowe:

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

Key words:

CVD coatings, PVD coatings, SEM, friction, tribological wear

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań jednowarstwowych powłok DLC typu a:C:H:W oraz wielowarstwowych powłok typu TiN/a:C:H:W, CrN/a:C:H:W. Powłoki otrzymywano technikami: PVD oraz PACVD na elementach ze stopu Co-Cr-Mo, znanego pod nazwą handlową BIODUR CCM Plus. Topografię i analizę powierzchni oceniano z użyciem mikroskopu skaningowego SEM. Twardość elementów bez powłoki oraz z powłokami zmierzono z użyciem mikrotwardościomierza Matsuzawa,

* Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, e-mail:dozimina@tu.kielce.

stosując obciążenie 10 G (HV0,01). Charakterystyki struktury geometrycznej powierzchni uzyskano z użyciem profilometru Form Talysurf PGI 1230. Badania tribologiczne przeprowadzono na mikrotribometrze T-23 oraz aparatach T-01 M, pracujących w skojarzeniu: kula-tacza, w warunkach tarcia technicznie suchego i tarcia ze smarowaniem roztworem Ringera oraz maszynie T-17, pracującej w skojarzeniu: trzpień-płytką w warunkach tarcia ze smarowaniem roztworem Ringera. Badania wykazały, że mechanizmy zużycia elementów węzła tarcia zależą przede wszystkim od materiału powierzchni roboczych.

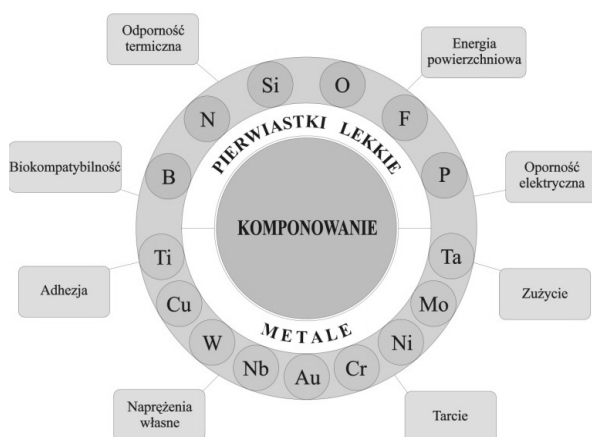
WPROWADZENIE

Materiały bazujące na węglu odgrywają znaczącą rolę w dzisiejszej nauce i technice. Tematyka badawcza i aplikacyjna skupia się wokół otrzymywania cienkich powłok diamentowych, diamentopodobnych DLC, powłok nanoszonych technikami PVD, CVD, fulerenów, nanorurek i grafenów [L. 1–5]. Bardzo dobre właściwości powłok DLC, jak wysoka twardość, niski współczynnik tarcia i małe zużycie tribologiczne, bierność chemiczna oraz biokompatybilność sprawiły, że znalazły one szerokie zastosowanie między innymi w przemyśle narzędziowym, motoryzacyjnym, spożywczym, medycznym. W zależności od parametrów osadzania otrzymuje się warstwy o różnych właściwościach optycznych, magnetycznych i elektrycznych.

Węgiel diamentopodobny jest mieszaniną amorficznego węgla, o przewodze wiązań sp^3 , właściwych dla struktury diamentu oraz współwystępujących wiązań sp^2 , właściwych dla grafitu. Skład diamentopodobnych warstw węglowych nie jest jednolity, mają one strukturę amorficzną z obszarami mikrokryształicznymi. Znaczący wpływ na właściwości powłok DLC ma rodzaj metody oraz parametrów ich osadzania. Badania Aisenberga i Chabota zapoczątkowały doskonalenie metod ich nanoszenia technikami PVD i CVD. Metody PVD – osadzanie fizyczne (ang. *physical vapour deposition*) i CVD – osadzanie chemiczne z fazy gazowej (ang. *chemical vapour deposition*) są metodami wykonywania powłok osadzanych z fazy gazowej, stosowanymi do otrzymywania nowoczesnych materiałów powłokowych. Stosuje się je do wytwarzania cienkich warstw powierzchniowych, w tym diamentopodobnych. W tradycyjnym procesie CVD jest on zazwyczaj ostatnim zabiegiem technologicznym i pomimo wysokiej temperatury nie wpływa destrukcyjnie na strukturę i właściwości mecha-

niczne materiału podłoża. W niniejszej pracy, aby tego uniknąć, powłoki DLC wytwarzano metodą PACVD – wspomaganą plazmą.

Nie mniej ważnym czynnikiem wpływającym na strukturę i właściwości powłok DLC jest stosunek wiązań sp^3/sp^2 oraz zawartość dodatkowych pierwiastków. Wprowadzenie do powłoki DLC nieznaczących ilości pierwiastków, takich jak H, Si, F, N, O, W, Nb, Cr, V, Co, Mo, Ti oraz ich kombinacji pozwala na zachowanie nadal jej amorficznego charakteru. Na **Rysunku 1** przedstawiono wpływ domieszkowania pierwiastków lekkich oraz metali na właściwości powłok DLC. Generalnie dodatek krzemu powoduje uzyskanie bardzo dobrych parametrów tribologicznych, zwiększonej trwałości, stabilności w środowiskach wodnych oraz w podwyższonej temperaturze pracy. Dodatki metali lub węglików metali gwarantują poprawę adhezji, stabilności termicznej oraz twardości. Powłoki DLC zawierające niob charakteryzują się małym współczynnikiem tarcia oraz odpornością tribologiczną podczas zużywania adhezyjnego. Na **Rysunku 1** przedstawiono schemat komponowania powłok DLC z metalami i niemetalami, według [L. 3].



Rys. 1. Wpływ pierwiastków domieszkowanych do powłok DLC na ich właściwości eksploatacyjne

Fig. 1. Effect of additive elements on the performance properties of DLC coatings.

Celem niniejszej pracy było przeprowadzenie analizy porównawczej wpływu rodzaju powłoki jedno- lub wielowarstwowej, elementarnego składu oraz struktury na właściwości tribologiczne w warunkach tarcia technicznie suchego i tarcia ze smarowaniem modelową substancją stosowaną jako odpowiednik cieczy synowialnej – odczynnikami Ringera.

APARATURA I METODYKA BADAŃ

Mikroskopia skaningowa SEM

Do obserwacji próbek stopu Co-Cr-Mo, stopu Co-Cr-Mo z naniesionymi powłokami oraz obszarów zużycia próbek polietylenowych UHMW PE 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, charakteryzującego się posiadaniem dwóch typów wgłębników – Vickersa oraz Knoopa. Pozwala to na dokładniejszą ocenę twardości twardych, cienkich materiałów powłokowych. Badania realizowano, stosując obciążenie 98,07 mN.

Testy tribologiczne

T-23

Testy tribologiczne na mikrotribometrze T-23 wykonano dla próbek: materiału podstawowego – stopu Co-Cr-Mo oraz stopu Co-Cr-Mo z naniesionymi powłokami a:C:H:W, TiN, TiN/ a:C:H:W, CrN, CrN/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°C \pm 1.

T-01M

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

- skojarzenie trące: kulka α -Al₂O₃ – stop Co-Cr-Mo oraz powłoki a:CH:W, TiN, TiN/a:C:H:W, CrN, CrN/a:C:H:W na stopie Co-Cr-Mo,
- obciążenie $P = 10$ N,
- prędkość ślizgania $v = 0,1$ m/s,
- droga tarcia $s = 1000$ m,
- warunki wilgotności względnej $55 \pm 5\%$,
- temperatura otoczenia $T_0 = 22 \pm 1$ °C.

T-17

Badania tribologiczne na aparacie T-17 umożliwiły ocenę charakteru współczynnika tarcia i zużycia w funkcji ilości cykli [L. 9]. Układ trący stanowił trzpień z UHMW PE, a płytką była wykonana ze stopu Co-Cr-Mo oraz ze stopu Co-Cr-Mo z naniesionymi powłokami a:CH:W, TiN, TiN/a:C:H:W, CrN, CrN/a:C:H:W. Długi czas biegu badawczego wynika z faktu, że materiały przeznaczone na elementy endoprotez charakteryzują się bardzo małą intensywnością zużywania. Badania skojarzeń materiałów testowych zrealizowano przy następujących parametrach:

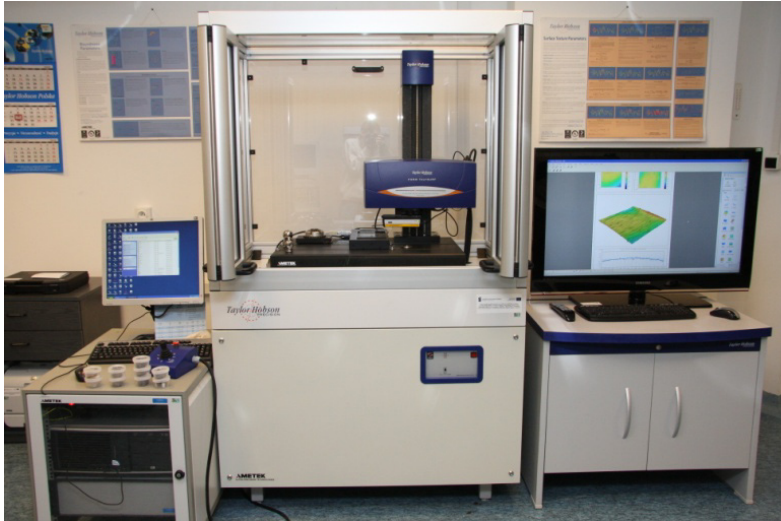
- czas testu/liczba cykli – 1.000.000 s/1.000.000;
- amplituda – 12,7 mm;
- częstotliwość – 1 Hz;
- średnia prędkość poślizgu – 50 mm/s;
- obciążenie – 225 N;
- ciecz smarująca – odczynnik RINGERA,
- temperatura płynu podczas badań – 37 ± 1 °C.

Wyniki badań przedstawiono w formie zestawień zmian współczynnika tarcia μ oraz współczynnika intensywności zużywania dla materiałów pracujących na testerze T-17. Wszystkie testy realizowano przy stałych parametrach mikroklimatu otoczenia bliskiego. Szczególna dbałość o zachowanie parametrów otoczenia bliskiego i dalekiego, zwłaszcza w warunkach tarcia technicznie suchego, związana jest z tym, że odkryta, pozbawiona spasywowanych warstw powierzchniowych powierzchnia elementów węzła tarcia wykazuje dużą aktywność adsorpcyjno-reakcyjną ze składnikami tego otoczenia. Zachowanie tych parametrów gwarantuje dużą powtarzalność uzyskiwanych wyników badań dla testów realizowanych zwłaszcza w warunkach tarcia technicznie suchego.

Pomiary struktury geometrycznej powierzchni

Do kompleksowych pomiarów struktury geometrycznej powierzchni posłużył profilograf Form Talysurf PGI 1230 firmy Taylor Hobson (**Rys. 2**). Badania na nim zrealizowane umożliwiły bardzo precyzyjne pomiary topografii powierzchni 2D i 3D [L. 7–8]. Uzyskano następujące parametry chropowatości:

- profile 2D i 3D,
- parametry amplitudy z profilu chropowatości: R_p , R_a , R_q ,
- parametry wysokości: S_p , S_v , S_z , S_a , S_q , S_{sk} ,
- ogólne parametry funkcyjne i parametry funkcyjne Sk ,
- parametry przestrzenne.



Rys. 2. Profilograf Form Talysurf PGI 1230

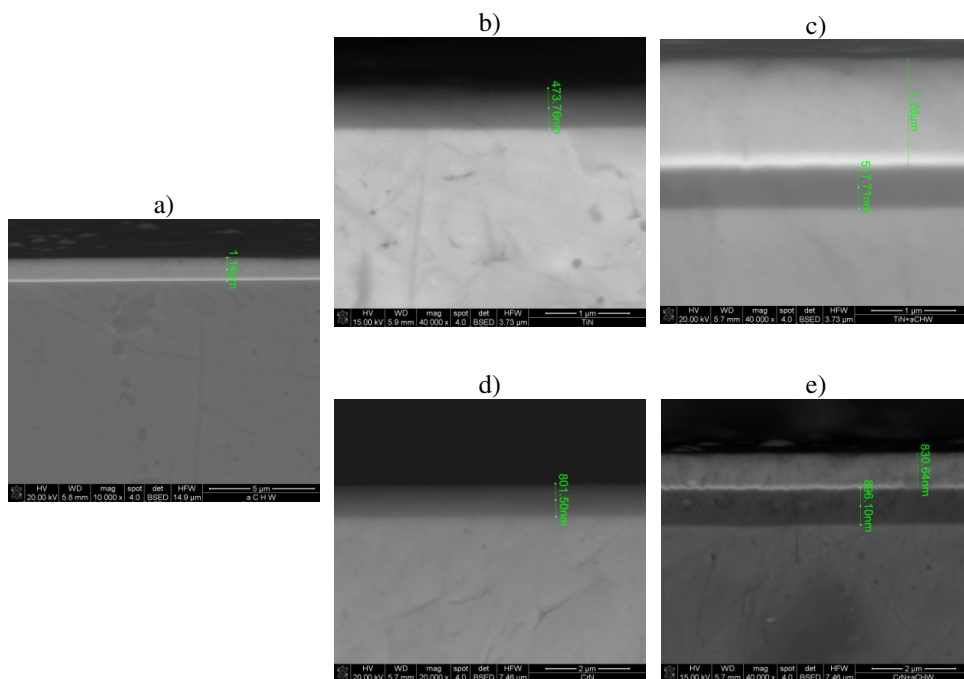
Fig. 2. Form Talysurf PGI 1230

WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Mikroskopia SEM

Na **Rysunku 3** przedstawiono przekroje poprzeczne materiału podstawowego – stopu Co-Cr-Mo z naniesionymi powłokami a:CH:W, TiN, TiN/a:C:H:W, CrN, CrN/a:C:H:W. Podczas obserwacji struktury z użyciem mikroskopu skaningowego zmierzono grubość otrzymanych powłok.

W badanej skali otrzymane powłoki charakteryzują się jednorodną strukturą. Nie stwierdzono również żadnych defektów oraz nieciągłości w warstwach powierzchniowych.

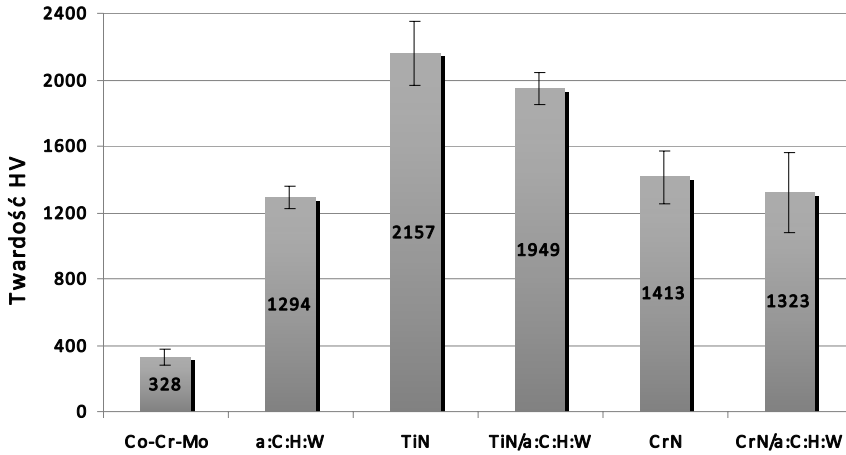


Rys. 3. SEM – mikrostruktura w przekroju poprzecznym powłoki: a) a:C:H:W; b) TiN; c) TiN/a:C:H:W; d) CrN; e) CrN/a:C:H:W na stopie Co-Cr-Mo

Fig. 3. SEM cross-sectional microstructure of: a) a:C:H:W; b) TiN; c) TiN/a:C:H:W; d) CrN; e) CrN/a:C:H:W coatings deposited on Co-Cr-Mo alloy substrate

Mikrotwardość

Na **Rysunku 4** zestawiono uśrednione wyniki z 10 pomiarów mikrotwardości materiałów powłokowych. Największą twardością charakteryzuje się powłoka TiN. Jednak wszystkie badane powłoki charakteryzują się zdecydowanie większą twardością w odniesieniu do materiału podstawowego – stopu Co-Cr-Mo.

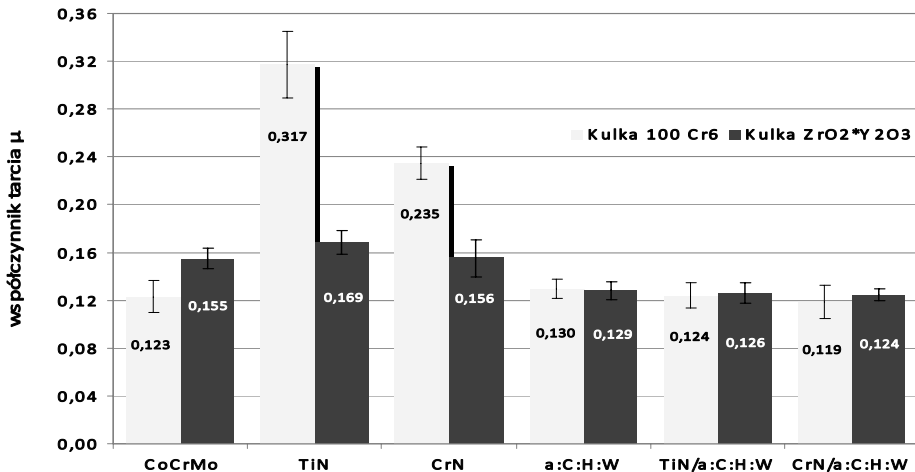


Rys. 4. Mikrotwardość jedno- i wielowarstwowych powłok DLC

Fig. 4. Microhardness of single and multi-layer DLC coatings

Testy tribologiczne

Na **Rysunku 5** zestawiono wyniki pomiarów współczynników tarcia uzyskanych na mikrotribometrze. Badania tribologiczne elementów z naniesionymi powłokami w skojarzeniu tarciovym z kulką ze stali 100Cr6 pokazały, że naj-

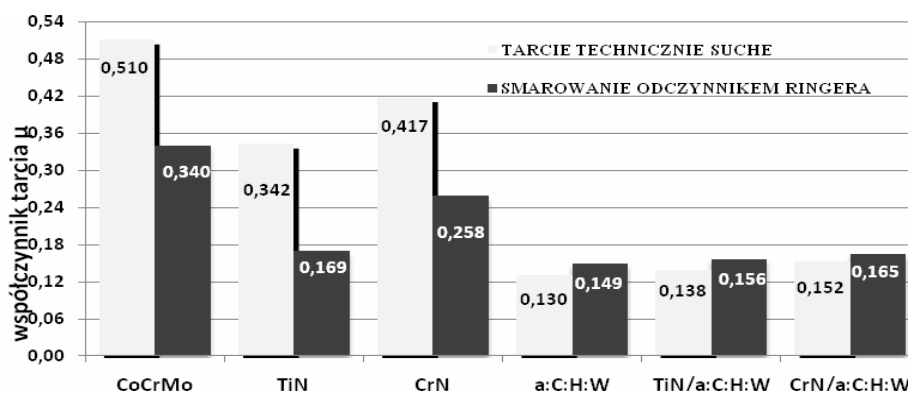


Rys. 5. Wartości współczynników tarcia dla styków tarciovych: badana powierzchnia – przeciwpróbka ze stali 100Cr6 lub $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$. Mikrotribometr

Fig. 5. Coefficients of friction for the friction at the interface between a DLC coating and a 100Cr6 steel countersample or $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$. Microtribometer

większe opory tarcia wykazywała powłoka TiN przy współczynniku tarcia $\mu = 0,317$, a najmniejsze dla powłoki wielowarstwowej CrN/a:C:H:W, uzyskując wielkość $\mu = 0,119$. Z kolei dla układu badawczego z kulką ZrO_2/Y_2O_3 zarejestrowane efekty były podobne, ale w znacznie mniejszym stopniu zróżnicowane, największy współczynnik tarcia $\mu = 0,169$ również uzyskano dla TiN, a dla elementu z powłoką CrN/a:C:H:W najmniejszy $\mu = 0,124$.

Na **Rysunku 6** zestawiono wyniki badań tribologicznych w postaci współczynnika tarcia uzyskane na aparacie T-01M w zależności od zastosowanego materiału powłokowego. Badania przeprowadzono w warunkach tarcia technicznie suchego i ze smarowaniem odczynnikiem Ringera.

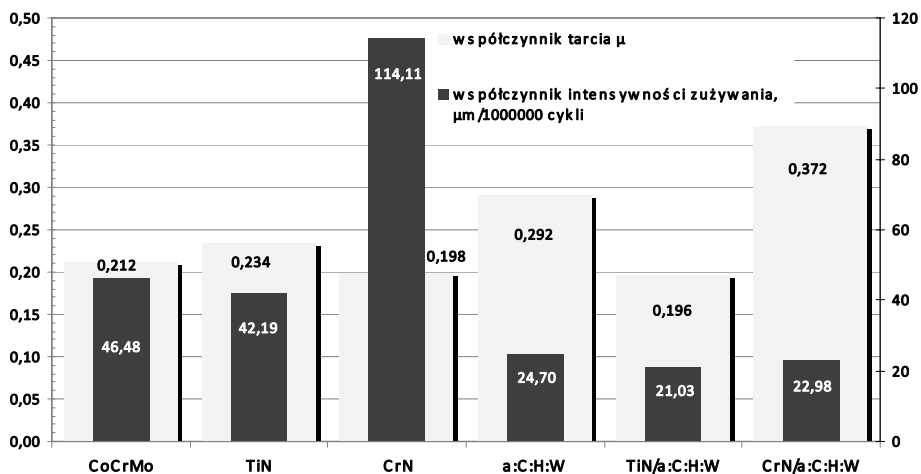


Rys. 6. Wartości współczynników tarcia węzła tribologicznego w zależności od zastosowanego materiału powłokowego i substancji smarowej. Aparat T-01 M

Fig. 6. Coefficients of friction for a tribological pair applying different coating materials and lubricants. T-01 M tester

Z przeprowadzonej analizy porównawczej widać, że w warunkach tarcia technicznie suchego największe opory tarcia wykazywała powłoka z CrN przy $\mu = 0,417$, ale i tak znacznie mniejsze niż zarejestrowane dla materiału podłoża dla którego zarejestrowano wielkość $\mu = 0,510$. Natomiast w warunkach smarowania odczynnikiem Ringera największy współczynnik tarcia $\mu = 0,258$ uzyskano dla elementu z powłoką CrN, a najmniejszy $\mu = 0,124$ dla powłoki CrN/a:C:H:W. Uzyskane wyniki badań wskazują, że stosowanie powłok wielowarstwowych dla określonych warunków eksploatacji może być jak najbardziej zasadne.

Z kolei na **Rysunku 7** zestawiono wielkości współczynnika tarcia oraz współczynnika intensywności zużywania uzyskane na tribometrze T-17. Parę trącą w tym przypadku stanowił nieruchomy trzpień wykonany z wielkocząsteczkowego polietylenu UHMW PE i ruchoma płytkę ze stopu Co-Cr-Mo lub stopu Co-Cr-Mo z naniesionymi powłokami. Testy zrealizowano zgodnie z normą ASTM 732-82 [L. 6]. W ich wyniku uzyskano charakterystyki współczynnika tarcia oraz zużycia liniowego w funkcji liczby cykli, na podstawie których obliczono średni współczynnik tarcia oraz wyznaczono intensywność zużywania elementów współpracujących tarciowo.



Rys. 7. Wykresy zmian współczynnika tarcia oraz współczynnika intensywności zużywania. Tester T-17

Fig. 7. Coefficient of friction versus the wear rate. T-17 tester

Z zestawionych rezultatów badań wynika, że spośród badanych materiałów najlepsze właściwości tribologiczne w warunkach prowadzenia testu wykazuje powłoka wielowarstwowa TiN/a:C:H:W charakteryzująca się najmniejszym współczynnikiem intensywności zużywania równym 21,03 przy współczynniku tarcia $\mu = 0,196$. Natomiast powłoka CrN/a:C:H:W, pomimo stosunkowo małego współczynnika intensywności zużywania równym 22,98, charakteryzowała się stosunkowo dużym współczynnikiem tarcia $\mu = 0,372$, największym spośród badanych powłok. Z punktu widzenia zużycia energii jest to właściwość niekorzystna.

Profile chropowości

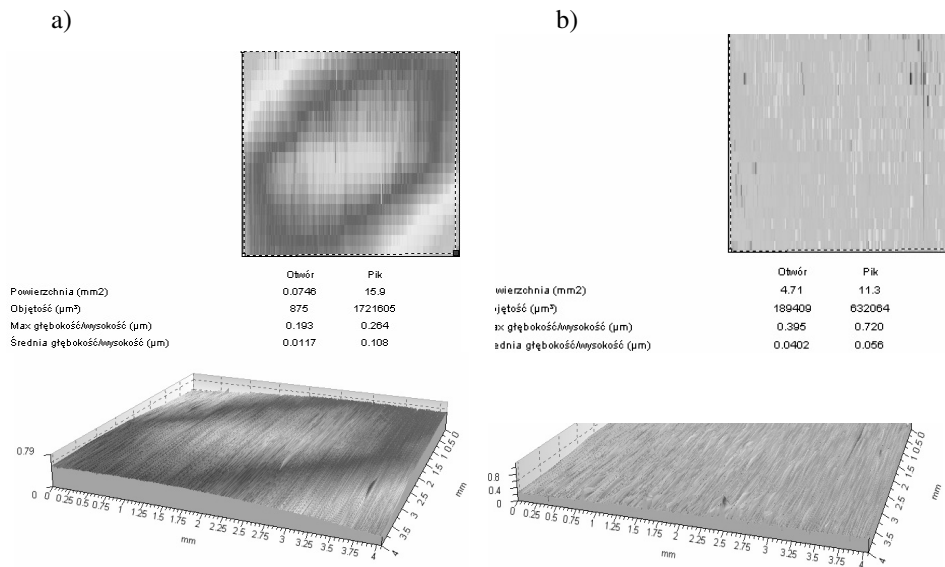
Morfologiczna analiza struktury geometrycznej powierzchni posłużyła badaniom materiału podstawowego – stopu Co-Cr-Mo z naniesionymi powłokami a:CH:W, TiN, TiN/a:C:H:W, CrN, CrN/a:C:H:W. Na **Rysunkach 8–11** przedstawiono mikrogeometrie badanych materiałów z wybranymi powłokami z określeniem powierzchni, objętości, maksymalnej głębokości/wysokości oraz średniej głębokości/wysokości tych profili. Pomiarom poddano próbki przed testami oraz po testach tarciovych na aparacie T-17. Z uzyskanych profili chropowości powierzchni wyszczególniono według norm ISO 4287 i ISO 25178 następujące parametry, które zamieszczono w **Tabeli 1**:

- Amplitudy:
 - R_p – maksymalna wysokość piku profilu chropowości,
 - R_a – odchylenie średnie arytmetyczne profilu chropowości,
 - R_q – odchylenie średnie kwadratowe profilu chropowości.
- Wysokości:
 - S_p – maksymalna wysokość piku powierzchni
- Parametry funkcyjne:
 - V_m – objętość materiału powierzchni,
 - V_v – objętość pustej przestrzeni powierzchni
- Parametry cech:
 - S_{pd} – gęstość pików powierzchni.

Tabela 1. Wartości zmierzone i określone na podstawie profilu chropowości

Table 1. Measured values and values determined from the roughness profile

| Materiał | Parametry | | | | | | |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| | R_p , μm | R_a , μm | R_q , μm | S_p , μm | V_m , mm^3/mm^2 | V_v , mm^3/mm^2 | S_{pd} , $1/\text{mm}^2$ |
| CoCrMo | 0,019 | 0,005 | 0,007 | 0,160 | $1,31 \cdot 10^{-6}$ | $7,8 \cdot 10^{-5}$ | 1,34 |
| CoCrMo po teście | 0,172 | 0,031 | 0,043 | 0,710 | $6,69 \cdot 10^{-6}$ | $8,33 \cdot 10^{-5}$ | 33,2 |
| TiN | 0,117 | 0,014 | 0,018 | 0,479 | $1,78 \cdot 10^{-6}$ | $0,1 \cdot 10^{-3}$ | 7,75 |
| TiN po teście | 0,208 | 0,033 | 0,046 | 0,985 | $7,46 \cdot 10^{-6}$ | $6,69 \cdot 10^{-5}$ | 27,8 |
| CrN | 0,076 | 0,010 | 0,015 | 0,362 | $2,78 \cdot 10^{-6}$ | $0,1 \cdot 10^{-3}$ | 3,48 |
| CrN po teście | 0,457 | 0,064 | 0,089 | 1,96 | $1,47 \cdot 10^{-5}$ | $1,53 \cdot 10^{-3}$ | 49,4 |
| a:C:H:W | 0,259 | 0,029 | 0,046 | 0,957 | $1,03 \cdot 10^{-5}$ | 0,02 | 17,1 |
| a:C:H:W po teście | 0,144 | 0,041 | 0,066 | 0,689 | $5,96 \cdot 10^{-6}$ | $9,01 \cdot 10^{-5}$ | 13,7 |
| TiN/ a:C:H:W | 0,339 | 0,051 | 0,079 | 1,09 | $8,7 \cdot 10^{-6}$ | 0,01 | 78,6 |
| TiN/ a:C:H:W po teście | 0,170 | 0,033 | 0,044 | 0,555 | $4 \cdot 10^{-6}$ | $7,14 \cdot 10^{-5}$ | 25,9 |
| CrN/ a:C:H:W | 0,386 | 0,041 | 0,068 | 0,991 | $4,06 \cdot 10^{-6}$ | $6,94 \cdot 10^{-5}$ | 18,2 |
| CrN/ a:C:H:W po teście | 0,167 | 0,089 | 0,116 | 0,412 | $1,52 \cdot 10^{-6}$ | $1,32 \cdot 10^{-3}$ | 5,92 |

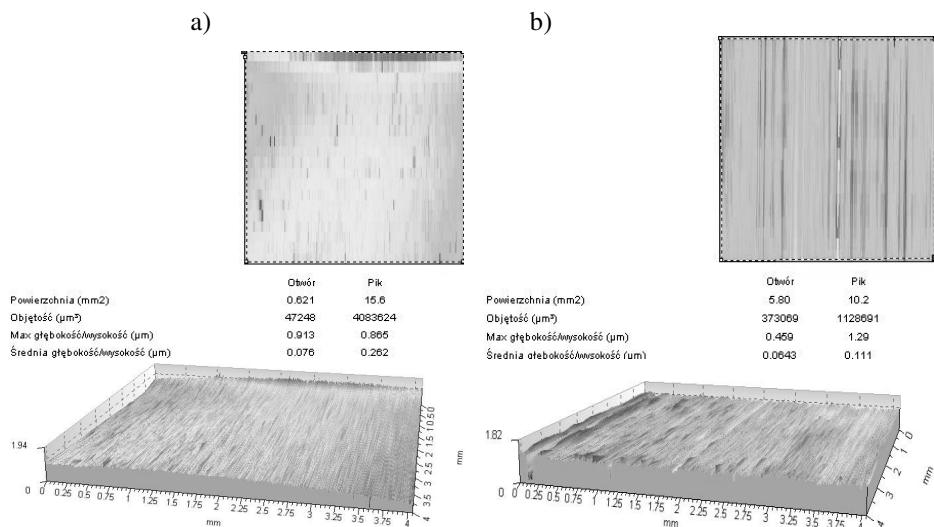


Rys. 8. Morfologia powierzchni stopu Co-Cr-Mo: a) przed testami tarciovymi; b) po testach

Fig. 8. Surface morphology of the Co-Cr-Mo alloy: a) before friction tests; b) after friction tests

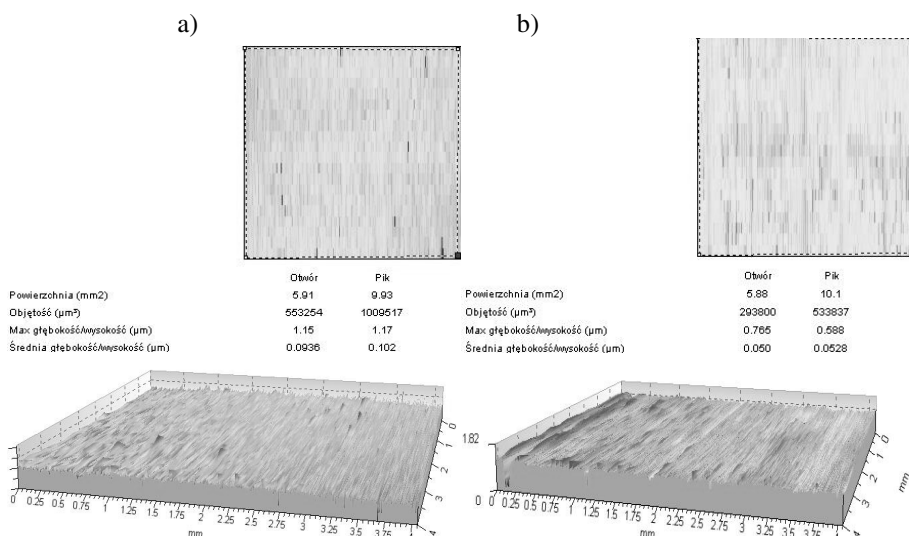
Przedstawione na **Rysunku 8** obrazy powierzchni elementów ze stopu Co-Cr-Mo wskazują, że podczas tarcia nastąpiło zużycie ścierno-utleniające. Wszystkie wartości zmierzone oraz określone na podstawie profilu chropowatości uległy podwyższeniu (**Tab. 1**), co świadczy o znacznym pogorszeniu parametrów SGP w stosunku do stanu przed testami tarciovymi. Podobnie zmiany podczas tarcia, jednak ze znacznie mniejszą intensywnością, przebiegały na powierzchniach elementów z powłokami TiN oraz CrN, dla których parametry SGP również zamieszczono w **Tabeli 1**.

Odmienny przebieg procesów zużycia zarejestrowano dla powłoki a:C:H:W przedstawionej na **Rysunku 9**. W przypadku tej powłoki następuje poprawa niektórych jej parametrów, i tak przykładowo R_p z wartości 0,259 ulega zmianie do 0,144 po tarcu, a R_q z wartości 0,046 wzrasta nieznacznie do 0,066. Widać cienie zarysowania powierzchni powłoki i miejscowe nierówności profilu w postaci wzniesień i sąsiadujących z nimi niewielkich wgłębień. Przedstawiona tendencja jeszcze wyraźniej występuje w przypadku powłok wielowarstwowych TiN/a:C:H:W oraz CrN/a:C:H:W, których morfologie powierzchni zostały przedstawione odpowiednio na **Rysunku 10** i **11**.



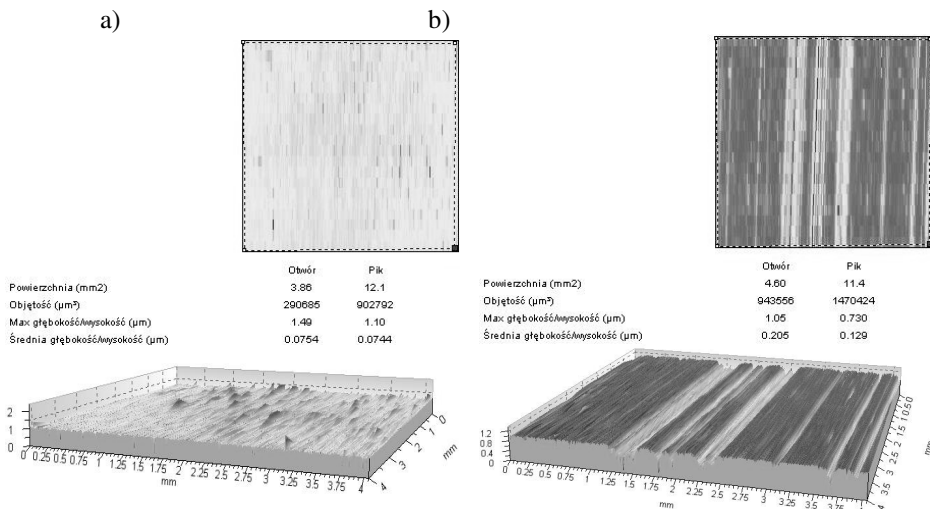
Rys. 9. Morfologia powierzchni powłoki a:C:H:W: a) przed testami tarciovymi; b) po testach

Fig. 9. Surface morphology of the a:C:H:W coating: a) before friction tests; b) after friction tests



Rys. 10. Morfologia powierzchni stopu powłoki TiN/ a:C:H:W: a) przed testami tarciovymi; b) po testach

Fig. 10. Surface morphology of the TiN/ a:C:H:W coating: a) before friction tests; b) after friction tests



Rys. 11. Morfologia powierzchni stopu powłoki CrN/ a:C:H:W: a) przed testami tarcowymi; b) po testach

Fig. 11. Surface morphology of the CrN/ a:C:H:W coating: a) before friction tests; b) after friction tests

W przypadku powłoki CrN/a:C:H:W zaprezentowanej na **Rysunku 10**, przedstawiona wyżej tendencja również jest zachowana i powłoka po tarcu ulega znaczącemu wygładzeniu z tą jednak różnicą, że na jej powierzchni pojawiają się dodatkowo nieliczne bruzdy o charakterze stochastycznym. Przyczynę i mechanizm ich powstawania na obecnym etapie badań trudno jest nam obecnie w sposób racjonalny wyjaśnić.

Przeprowadzona w opracowaniu analiza przedstawionych wyników stanowi dobre uzasadnienie podjętego przez autorów kierunku prowadzonych badań [**L. 10**]. Znajduje to bezpośrednie potwierdzenie w uzyskanych rezultatach badań wynikających z faktu, że zastosowane przez nas powłoki wykazują lepsze właściwości tribologiczne niż materiał bazowy, który stanowi stop Co-Cr-Mo. Zaprezentowane rezultaty stanowią kolejny etap realizowanego programu badań tribologicznych ze szczególnym uwzględnieniem zmian powstających w strukturze geometrycznej powierzchni powłok jedno- i wielowarstwowych podczas tarcia.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

1. Powłoki jedno i wielowarstwowe otrzymane metodą PVD oraz PACVD na elementach ze stopu Co-Cr-Mo wykazują lepsze właściwości tribologiczne niż materiał podłoża i daje to podstawę do prowadzenia badań z ukierunkowaniem na zastosowania biotribologiczne, jak i tribotechniczne.
2. Modyfikacja powłok DLC poprzez domieszkowanie wybranymi pierwiastkami metalicznymi, jak i niemetalicznymi wpływa w znaczący stopniu na poprawę funkcjonalnych właściwości eksploatacyjnych.
3. Podczas obserwacji badanych powłok za pomocą mikroskopu SEM ustalono, że charakteryzują się one jednorodną strukturą oraz nie stwierdzono żadnych defektów i nieciągłości.
4. Badanie mikrotwardości materiałów powłokowych pozwoliło na ustalenie, że największą twardość wykazuje powłoka TiN, a wszystkie pozostałe wykazują zdecydowanie większą twardość w odniesieniu do materiału podłoża.
5. Badania przeprowadzone za pomocą mikrotribometru wykazały, że największy współczynnik tarcia zarejestrowano dla powłoki TiN, a najmniejszy dla powłoki wielowarstwowej CrN/a:C:H:W.
6. Badania tribologiczne przeprowadzone na tribometrze T-17 z nieruchym trzpieniem z polietylenu wielkocząsteczkowego UHMW PE wykazały, że w warunkach tarcia technicznie suchego, jak i ze smarowaniem odczynnikami Ringera najmniejsze opory tarcia wykazywały elementy z powłokami wielowarstwowymi oraz powłoka a:C:H:W.
7. Struktura geometryczna powierzchni badanych powłok jest bardzo zróżnicowana, a najlepsze parametry po badaniach tribologicznych uzyskują powłoki wielowarstwowe.
8. Ustalono, że powłoki TiN i CrN jako materiał międzywarstwy pozytywnie wpływają na właściwości tribologiczne warstw powierzchniowych a:C:H:W.
9. Wyniki badań prowadzonych na różnych aparatach tarciovych upoważniają do stwierdzenia, że najlepsze właściwości tribologiczne wykazują powłoki wielowarstwowe.

PODZIĘKOWANIE

Autorzy dziękują Panu Stanisławowi Adamczakowi za umożliwienie wykonania badań struktury geometrycznej powierzchni w Laboratorium Komputerowych Pomiarów Wielkości Geometrycznych Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach.

LITERATURA

1. Ronkainen H., Varjus S., Koskinen J., Holmberg K., Differentiating the tribological performance of hydrogenated and hydrogen-free DLC coatings. *Wear* 249 (2001) 260–266.
2. Ozimina D., *Przeciwzużyciowe warstwy wierzchnie w układach tribologicznych*, Monografia 33, Wyd. PŚk, Kielce 2002.
3. Robertson J., Diamond-like amorphous carbon. *Materials Science Eng.* 3 (2002) 129–281.
4. Grill A., Diamond-like carbon coating as biocompatible materials. *Diamond & Related Materials*. 12 (2003) 166–170.
5. Yamamoto K., Matsukado K., Effect of hydrogenated DLC coating hardness on the tribological properties under water lubrication, *Tribology Intern.* 39 (2006) 1609–1614.
6. ASTM 732-82. Reciprocating pin-on-flat evaluation of friction and wear properties of polymeric materials for use in total joint prostheses.
7. Adamczak S., Janecki D., Komputeryzacja przyrządów do pomiaru zarysów okrągłości i falistości powierzchni. *ZN PŚk. Mechanika* 60 (1996) 325–334.
8. Wieczorowski M., *Wykorzystanie analizy topograficznej w pomiarach nierówności powierzchni*. Wyd. P.P., Poznań 2009.
9. Michalczewski R., Piekoszewski W., Szczerek M., *Metoda i urządzenie do badań tribologicznych materiałów na endoprotezy*. *Tribologia* 5 (2002) 1491–1502.
10. Madej M., Ozimina D., Ocena właściwości powłok DLC stosowanych w układach biotribologicznych, *Tribologia* 3 (2009) 105–114.

Recenzent:
Marian W. SUŁEK

Summary

The paper deals with the testing of single-layer DLC coatings (a:C:H:W, TiN/a:C:H:W, and CrN/a:C:H:W). The coatings were deposited on Co-Cr-Mo (BIODUR CCM Plus alloy) specimens using the PVD and PACVD processes. The topography and morphology of the specimens were determined using a scanning electron microscope (SEM). The hardnesses of specimens with and without coatings were measured under a load of 10 G applying a Matsuzawa tester (HV 0.01). The characteristics of the geometrical surface structure were obtained using a Taylor Hobson Form Talysurf PGI 1230 profilometer. The tribological tests were conducted using a T-23 microtribometer and a T-01M ball-on-disc tester under dry friction conditions and under lubricated friction conditions using Ringer's solution and a T-17 pin-on-plate tester under lubricated friction conditions using Ringer's solution. The results show that the wear mechanisms in friction pairs are dependent mainly on the material the working surfaces are made of.