

Powłoki WC-a:C i MoS₂ (Ti, W) na stopie Inconel 600 przeznaczone do pracy w łożyskach foliowych

Katarzyna Pietrzak¹, Marcin Chmielewski¹, Witold Piekoszewski², Remigiusz Michalczewski², Anita Mańkowska-Snopczyńska²

¹ Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych
ul. Wólczyńska 133, 01-919 Warszawa;
e-mail: katarzyna.pietrzak@itme.edu.pl

² Instytut Technologii Eksploatacji, Zakład Tribologii,
ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom

Streszczenie: Łożyska foliowe stanowią nowe alternatywne rozwiązanie łożyskowania dla systemów ślizgowych (wymagających smarowania) bądź tocznych szczególnie tam, gdzie z uwagi na warunki pracy (np. temperatura, prędkość obrotowa, środowisko pracy) konwencjonalne rozwiązania nie mogą być stosowane. Jak dotychczas znalazły one zastosowanie m.in. w turbinach silników odrzutowych, mikroturbinach, pompach, sprężarkach, etc. W celu rozszerzenia możliwości ich stosowanie, na świecie prowadzone są badania skoncentrowane w głównej mierze na opracowaniu nowych materiałów, które mogą spełniać coraz wyższe wymagania (trybologiczne, mechaniczne, cieplne). Jednym z możliwych rozwiązań jest zastosowanie modyfikowanych powierzchniowo, przy zastosowaniu techniki rozpylania magnetronowego, cienkich folii metalowych. W prezentowanej pracy przedstawiono opracowane przez autorów warunki technologiczne modyfikacji stopu Inconel 600, poprzez wytworzenia dwóch rodzajów powłok (WC-a:C oraz MoS₂). Przedstawiono również wyniki badań mikrostruktury powłok i podłoża po procesie osadzania oraz porównano właściwości trybologiczne opracowanych powłok z właściwościami charakterystycznymi dla niemodyfikowanego materiału podłoża.

Słowa kluczowe: łożyska foliowe, rozpylanie magnetronowe, warstwy, mikrostruktura, właściwości trybologiczne

WC-a:C and MoS₂ (Ti, W) layers on Inconel 600 alloy for foil bearing elements

Abstract: Foil bearings are a new, alternative solution to apply to systems for which conventional oil-lubricated or rolling element bearings are unsuitable due to their operational conditions such as the temperature, rotational speed, working environment, etc. There are many possible applications of foil bearings, including aircraft gas turbine engines, auxiliary power units, microturbines, pumps, compressors, cryogenic turboexpanders and turbochargers. At present, several investigations into the materials that could possibly fulfill many different requirements are being conducted to expand the range of the practical implementations of foil bearings. Both tribological properties (friction coefficient and wear resistance) and thermal properties (thermal conductivity) are claimed to be the most important for obtaining top quality foils. One of the possible solutions in complex systems could be using magnetron sputtering for the surface modification of a foil metallic material. The results of technological tests aimed at producing WC-a:C and MoS₂ layers on the Inconel 600 alloy are presented in this work. In addition, the effects of microstructural investigations and tribological tests are shown for the two aforementioned systems and compared with non-modified substrates.

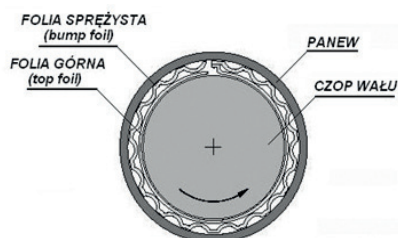
Key words: foil bearings, magnetron sputtering, layers, microstructure, tribological properties

1. Wprowadzenie

Jednym z ważniejszych elementów mikroturbin, czyli urządzeń służących do jednoczesnego wytwarzania energii elektrycznej i cieplnej są łożyska. Służą one do łożyskowania wałów o małych średnicach nominalnych (rzędu kilku bądź kilkunastu milimetrów) z osadzonym na nich wirnikiem mikroturbiny. Wirniki mikroturbin obracają się najczęściej z prędkościami obrotowymi powyżej 40000 obr/min, przy dość częstych przerwach w pracy, a temperatura wewnątrz mikroturbiny może wynosić kilkaset stopni Celsjusza. W związku z tym łożyskom foliowym stosowanym do łożyskowania wirników mikroturbin stawia się wiele rygorystycznych wymagań. Najistotniejszymi kryteriami doboru odpowiednich łożysk w zależności od konkretnego zastosowania są m.in.: dopuszczalna prędkość obrotowa, nośność, dopuszczalna temperatura pracy, trwałość i niezawodność, jak i łatwość

naprawy. Już sama bardzo wysoka prędkość obrotowa eliminuje zastosowanie łożysk ślizgowych czy tocznych. Najkorzystniejszym rozwiązaniem wydaje się być wykorzystanie łożysk foliowych. W łożysku tym klasyczna panew grubościenna pokryta jest zespołem folii złożonym z folii falistej (zwanej również folią sprężystą *bump foil*) oraz folii gładkiej (zwanej również folią górną *top foil*). Zespół współpracujących ze sobą folii charakteryzuje się małą sztywnością oraz dobrymi własnościami tłumiącymi. Zapewnia to doskonałe warunki pracy takiego łożyska, nawet przy znacznych prędkościach obrotowych. Folia sprężysta, niezależnie od sposobu ukształtowania, ma za zadanie przenoszenie obciążeń wynikających z ruchu obrotowego wału. Natomiast główną rolą folii górnej jest zminimalizowanie oporów tarcia pomiędzy nią, a powierzchnią czopa wału (schemat ideowy konstrukcji łożyska foliowego przedstawiono na Rys. 1).

Dlatego też materiały stosowane na poszczególne folie powinny charakteryzować się odpowiednimi



Rys. 1. Schemat ideowy łożyska foliowego [1].

Fig. 1. Schematic design of a foil bearing [1].

właściwościami. I tak, materiał przeznaczony na folię sprężystą powinien charakteryzować się: wysoką granicą sprężystości, podatnością do formowania skomplikowanych kształtów i odpornością na środowisko pracy (np. korozja), a materiał przeznaczony na folię górną: wysoką odpornością na zużycie ściernie, niskim współczynnikiem tarcia, stosunkowo wysoką przewodnością cieplną oraz odpornością korozyjną. Jak widać są to warunki trudne do równoczesnego spełnienia przez znane, stosowane dotychczas materiały konwencjonalne.

W praktyce przemysłowej można znaleźć wiele różnych rozwiązań dla materiałów pracujących jako elementy ślizgowe w łożyskach foliowych. W zależności od warunków pracy stosuje się czyste metale (np. Ni), stopy (m.in. aluminium, niklu, miedzi), tworzywa sztuczne oraz materiały kompozytowe [1 - 3].

Tradycyjne materiały, w związku z coraz wyższymi wymaganiami konstruktorów łożysk nie spełniają jednak wszystkich oczekiwań. Konieczne jest zatem wytwarzanie nowych materiałów specjalnych, bądź powierzchniowa modyfikacja materiałów ogólnodostępnych.

Jednym z możliwych do zastosowania materiałów jest stop specjalny Inconel 600. Jest to stop niklowo - chromowy, charakteryzujący się dobrą odpornością na utlenianie w wysokich temperaturach oraz wysoką odpornością na pękanie korozyjne w środowisku jonów chlorkowych i korozję w środowisku sody kaustycznej. Skład stopu Inconel 600 to (% wag.): min. 72,0 Ni + Co, 14,0 - 17,0 Cr, 6,0 - 10,0 Fe, max. 0,15 C, max. 1,0 Mn, max. 0,015 S, max. 0,50 Si, max. 0,50 Cu [4] (podstawowe właściwości przedstawiono w Tab. 1).

Wstępne próby technologiczne wykazały, że jego stosowanie jako elementu ślizgowego łożyska foliowe-

Tab. 1. Wybrane właściwości fizyczne i mechaniczne stopu Inconel 600.

Tab. 1. Physical and mechanical properties of Inconel 600 alloy.

Gęstość, g/cm ³	8,47
Temperatura topnienia, °C	1354 - 1413
Rozszerzalność cieplna, (21 - 93 °C) *10 ⁻⁶ /°C	13,3
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	655
Umowna granica plastyczności, MPa	310
Wydłużenie, %	40
Twardość	75HRB

go ograniczone jest niewystarczającą odpornością na ścieranie oraz zbyt wysokim współczynnikiem tarcia. W pracach [5 - 6] przedstawiono wyniki modyfikacji stopu Inconel 600 przy wykorzystaniu techniki implantacji jonów, jednak pomimo poprawy parametrów trybologicznych, z uwagi na ograniczony zasięg implantacji oraz niewielką żywotność takiego rozwiązania, podjęto próby wytworzenia warstw WC-a:C i MoS₂ na stopie Inconel 600 wykorzystując technikę rozpylania magnetonowego.

Według danych literaturowych warstwy WC-a:C i MoS₂ charakteryzują się znakomitymi właściwościami trybologicznymi [7 - 8], co może predysponować je do zastosowania w łożyskach foliowych. W pracy przedstawiono technologię wytwarzania, wyniki badań mikrostrukturalnych oraz testów trybologicznych warstw WC-a:C i MoS₂ nakładanych na podłoże ze stopu Inconel 600.

2. Prace technologiczne

Wytypowane rodzaje powłok osadzono na podłożu ze stopu Inconel 600. Osadzanie prowadzono wykorzystując technikę rozpylania magnetonowego (metoda PVD), na stanowisku próżniowym B.90 (Instytut Inżynierii Materiałowej Politechniki Łódzkiej). Komora reakcyjna urządzenia wyposażona była w układ próżniowy (pompa rotacyjna, pompa Roota oraz pompa próżniowa) umożliwiający uzyskanie ciśnienia rzędu 10⁻³ Pa oraz układ zasilania w gazy (zarówno obojętne, jak i reakcyjne). Urządzenie umożliwia: rozpylanie z czterech źródeł magnetonowych o targetach w postaci tarcz (ø 107 mm), czyszczenie podłoża za pomocą plazmy wyładowania jarzeniowego oraz ich polaryzację.

Modyfikowany materiał został pocięty na fragmenty o wymiarach ~ 150 x 150 mm. Kolejnym etapem przygotowywania podłoża było czyszczenie powierzchni wsadu: próbki myto za pomocą detergentu oraz odtłuszczano w acetonie i suszono w strumieniu sprężonego powietrza. Przygotowane podłoża instalowano w ramowym uchwycie i umieszczano w komorze reakcyjnej.

Wymaganą próżnię w komorze urządzenia uzyskiwano stosując kolejno: pompę rotacyjną (do ~100 Pa), pompę Roota (do kilku paskali) oraz stosując pompę dyfuzyjną (do ciśnienia < 2 * 10⁻³ Pa). W czasie pracy pompy dyfuzyjnej, gdy ciśnienie w komorze osiągnęło wartość < 10⁻² Pa, załączano radiator IR i następowało wygrzewanie komory. Czas grzania wynosił ~ 40 min. Miało to na celu szybsze odparowanie substancji zaadsorbowanych na powierzchni ścian komory i wsadzie. Po wyłączeniu grzania i osiągnięciu zadanego ciśnienia w komorze, przeprowadzany był proces czyszczenia powierzchni wsadu przy pomocy wyładowania jarzeniowego. Po jego zakończeniu próbki wprowadzano w ruch obrotowy w osi pionowej (~ 5 ÷ 6 obr/min), a następnie rozpoczynano proces osadzania powłok.

2.1. Osadzanie powłoki MoS₂ (Ti, W)

Czyszczenie jarzeniowe prowadzono przez 12 min. Parametrem startowym był prąd wyładowania o wartości 50 mA (prąd zwiększano krokowo do wartości 0,5 A i utrzymano na tym poziomie do końca procesu czyszczenia).

Powłokę MoS₂ (Ti, W) osadzono z wykorzystaniem: dwóch źródeł magnetronowych z targetami z MoS₂ domieszkowanym Ti (12 %), jednego źródła z targetem z metalicznego Ti oraz jednego źródła z targetem z metalicznego W.

Podczas osadzania powłok, w komorze reakcyjnej utrzymywano stałe ciśnienie argonu (0,4 Pa), ujemną polaryzację podłoża (25 V) oraz zależne od składu, moce podczas rozpylania materiału targetów:

- MoS₂ + Ti - 3 kW (moc łączna na obu magnetronach),
- Ti - 0,75 kW (tylko w początkowej fazie osadzania),
- W - 0,16 kW

2.2. Osadzanie powłoki WC-a:C

Po wygrzaniu komory i uzyskaniu próżni w komorze rzędu $2 \cdot 10^{-3}$ Pa do komory wpuszczano argon (do uzyskania ciśnienia kilkunastu Pa) i czyszczono wsad przy pomocy wyładowania jarzeniowego. Czyszczenie trwało do ustabilizowania wyładowania co następowało po ~ 10 min. Prąd wyładowania był stopniowo zwiększany do wartości maksymalnej 1 A. Po oczyszczeniu wsadu podłoża były chłodzone przez 10 min z ciągłym przepływem Ar przez komorę.

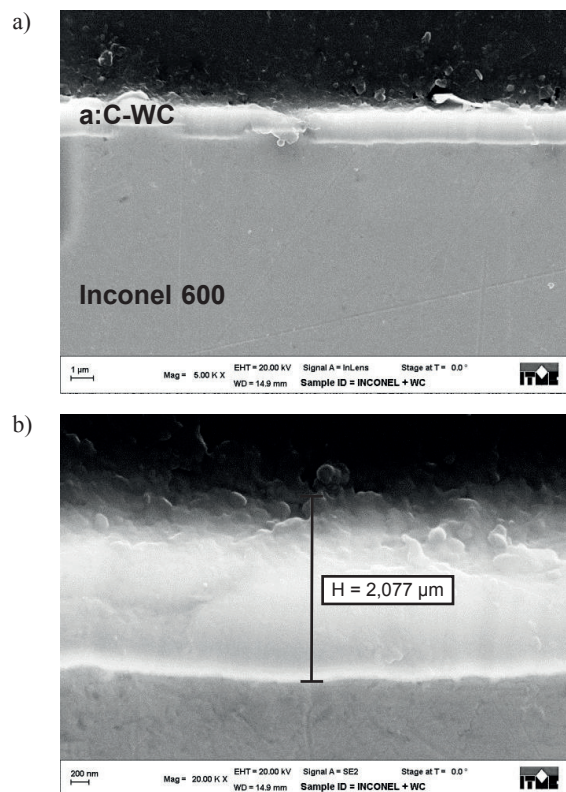
Po ostudzeniu wsadu przepływ Ar był zmniejszany do ~ 25 l/min, co obniżało ciśnienie w komorze do 0,55 Pa. Wsad był polaryzowany potencjałem -50 V polaryzacji impulsowej. Do wytwarzania powłok wykorzystywano cztery magnetrony kołowe z targetami $\varnothing 107 \times 10$ mm (jeden magnetron z targetem z czystego W oraz trzy z targetami grafitowymi). Proces osadzania powłok kompozytowych odbywał się w trzech etapach. Pierwszym etapem było osadzenie międzywarstwy z czystego W, z mocą na magnetronie z targetem wolframowym 1 kW przez 15 min. Następnie uruchomione zostały trzy magnetrony z targetami węglowymi i stopniowo zwiększana była na nich moc wyładowania od 0 do 1,4 kW na każdym. W tym czasie moc wyładowania na magnetronie z targetem wolframowym była zmniejszana z 1 kW do 0,25 kW. Proces wytwarzania warstwy przejściowej trwał 15 minut. Po osiągnięciu zadanych mocy wyładowania na magnetronach (1,4 kW na każdym z trzech targetów węglowych i 0,25 kW na magnetronie z targetem wolframowym), do komory wpuszczano wodór z przepływem ok 12,5 l/min. Całkowity czas osadzania powłoki trwał 2 h 15 min, w tym 15 min osadzania międzywarstwy z czystego W i 15 min warstwy przejściowej.

W pracy przeprowadzono analizę mikrostruktury wytworzonych powłok w celu oceny ich grubości oraz spójności powłok z podłożem. Badania przeprowadzono na skaningowym mikroskopie elektronowym AURIGA CrossBeam Workstation (firmy Carl Zeiss) wyposażonym

w układ EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer) o rozdzielczości energetycznej <125 eV, umożliwiającym detekcję pierwiastków od B do Am (firmy Bruker AXS Microanalysis GmbH). Przed badaniami próbki zostały zainkudowane w żywicy, a następnie szlifowane i polerowane na szlifierko-polerce LaboPol-2 firmy Struers.

3. Wyniki badań i dyskusja

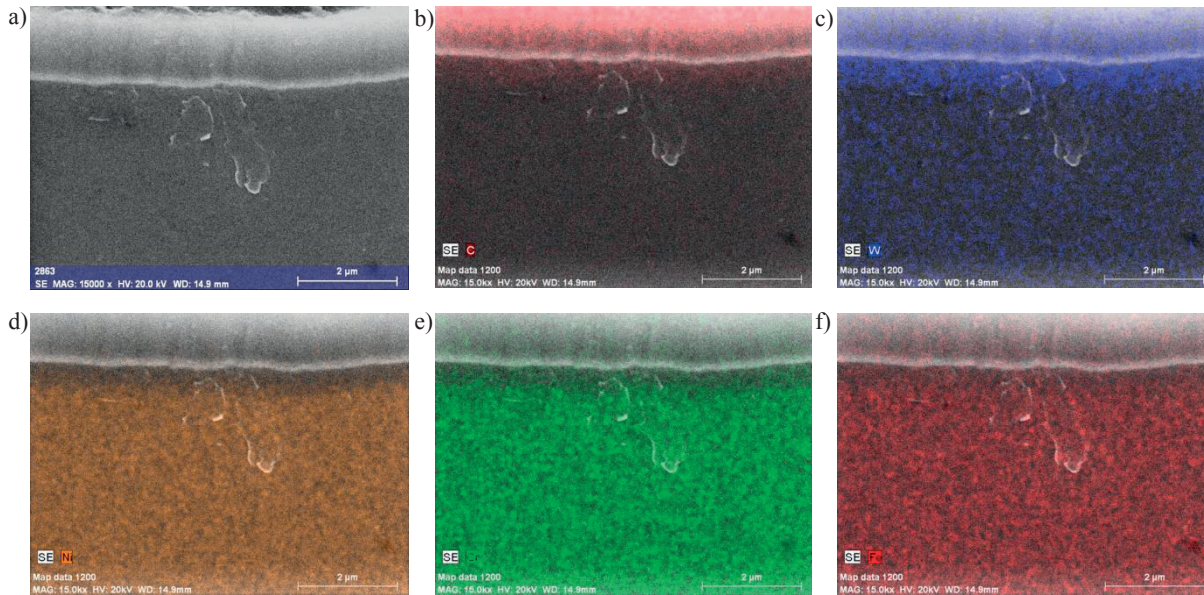
Wybrane wyniki badań strukturalnych oraz powierzchniowej analizy pierwiastków przedstawiono na Rys. 2 - 5.



Rys. 2. Obrazy SEM warstwy WC-a:C na Inconelu, wytworzonej techniką rozpylania magnetronowego.

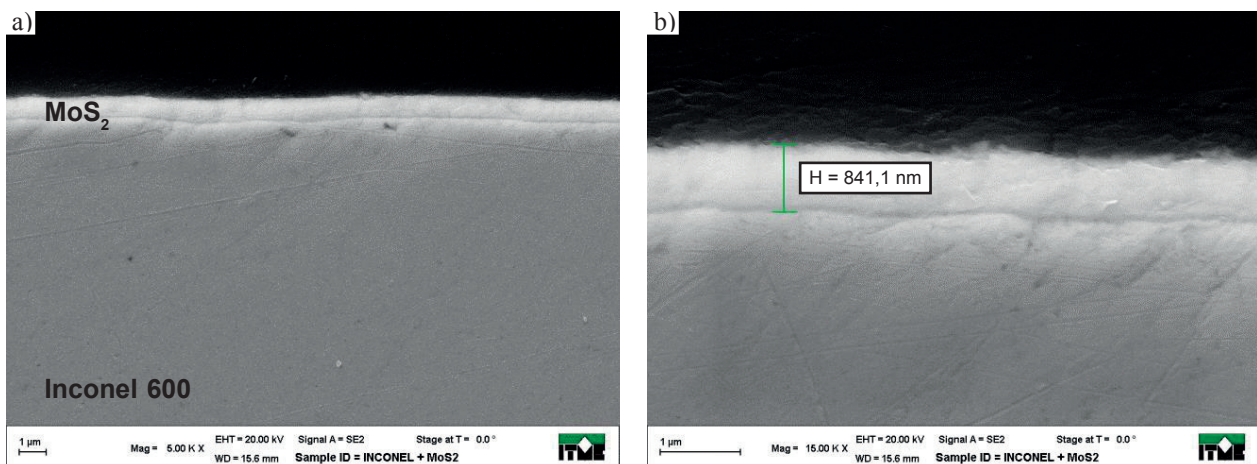
Fig. 2. SEM images of WC-a:C layer on Inconel alloy substrate obtained by magnetron sputtering technique.

Stwierdzono, że: grubość wytworzonej w jednej operacji powłoki z węgla wolframu ma ~ 2,0 µm, powłoka jest ciągła i jednorodna, pozbawiona pęknięć i mikroszczelin, charakteryzuje się dobrą adhezją do podłoża, granica pomiędzy podłożem i powłoką jest ciągła. Przeprowadzona analiza rozkładu pierwiastków wykazała obecność wszystkich składników podłoża i warstwy kompozytowej WC-a:C. W warstwie wytworzonej techniką rozpylania magnetronowego stwierdzono równomierne rozłożenie węgla i wolframu na przekroju warstwy. Znaczna koncentracja węgla, widoczna w górnej części rysunku jest spowodowana obecnością żywicy, której użyto do procesu inkludowania próbek. Nie zaobserwowano również koncentracji chromu w przypowierzchniowej warstwie



Rys. 3. Rozkłady powierzchniowe pierwiastków C, W, Ni, Cr, Fe na przekroju folii Inconel 600 z warstwą WC-a:C wytworzonej techniką rozpylania magnetronowego.

Fig. 3. Surface distribution of C, W, Ni, Cr, Fe on the cross-section of WC-a:C layer on Inconel alloy substrate obtained by magnetron sputtering technique.



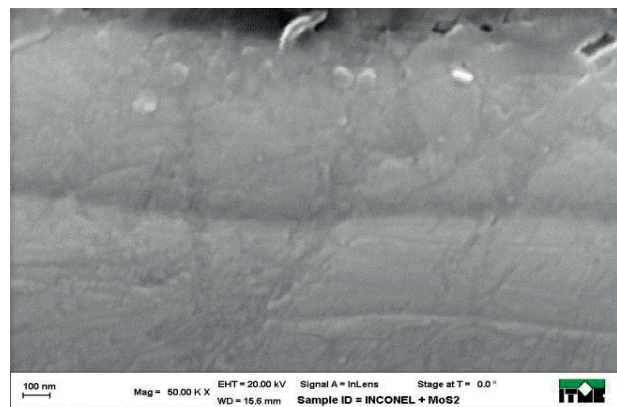
Rys. 4. Obrazy SEM warstwy MoS₂ (Ti, W) na Inconelu wytworzonej techniką rozpylania magnetronowego.

Fig. 4. SEM images of MoS₂ (Ti, W) layer on Inconel alloy substrate obtained by magnetron sputtering technique.

podłoża. Można zatem wnioskować, że połączenie podłoża - warstwa WC-a:C otrzymane techniką rozpylania magnetronowego powinno charakteryzować się lepszymi właściwościami mechanicznymi z uwagi na brak kruchych faz węgla wolframu, mogących osłabiać jakość warstwy przejściowej na granicy podłoża - warstwa.

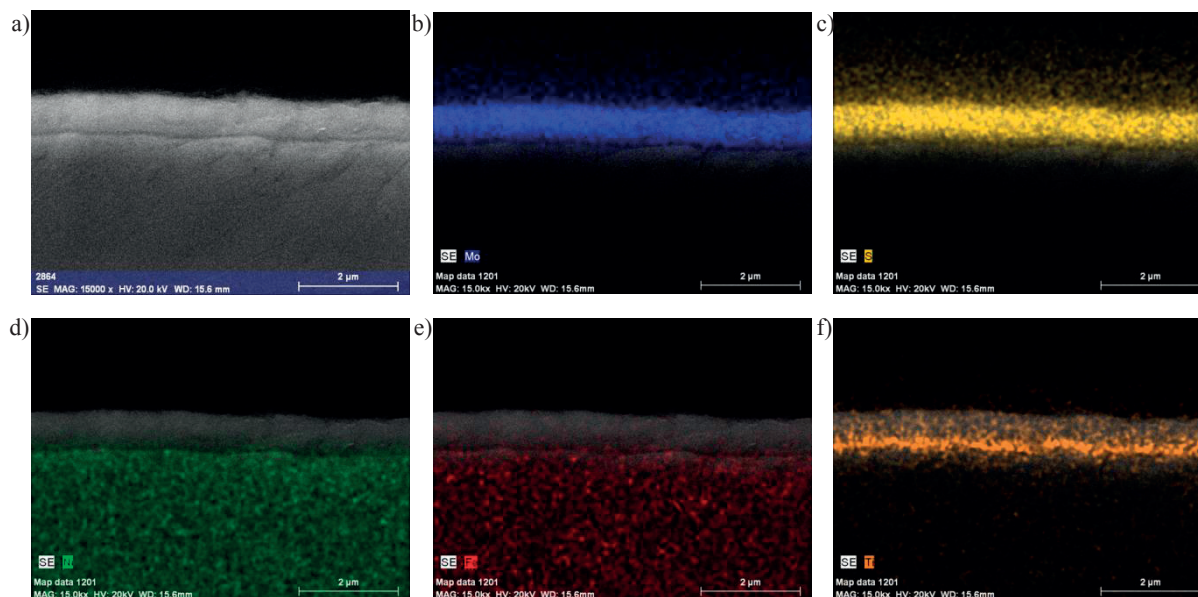
Analogicznym badaniom mikrostrukturalnym poddano układ: stop Inconel 600 - naniesiona techniką rozpylania magnetronowego powłoka dwusiarczku molibdenu MoS₂ (Ti, W). Przykładowy obraz struktury powłoki na podłożu przedstawiono na Rys. 4.

Jak widać na przedstawionych zdjęciach warstwa dwusiarczku molibdenu tworzy ciągłą strukturę, bardzo dobrze przylegającą do podłoża ze stopu Inconel. Jej grubość na całym przekroju materiału jest na poziomie nieco poniżej 1,0 µm. Warstwa bardzo dobrze odwzorowuje



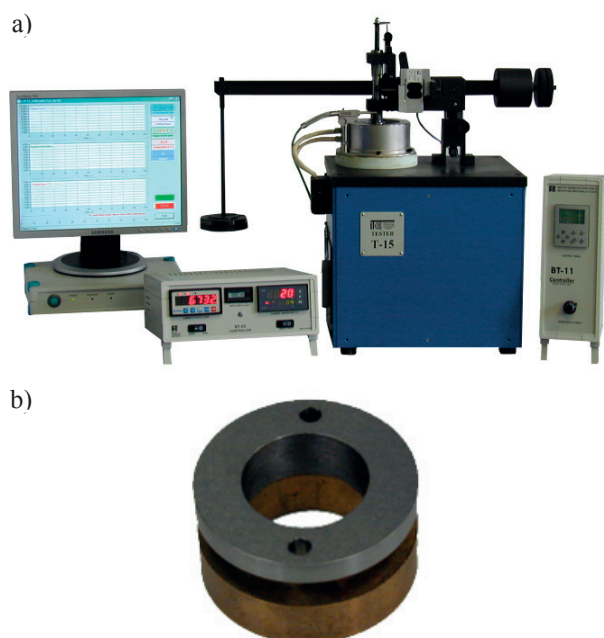
Rys. 5. Obraz SEM granicy podłoża - warstwa MoS₂ (Ti, W).

Fig. 5. SEM image of interlayer in substrate- MoS₂ (Ti, W) system.



Rys. 6. Rozkłady powierzchniowe pierwiastków Mo, S, Ni, Fe, Ti na przekroju folii Inconel 600 z warstwą MoS₂ (Ti, W) wytworzonej techniką rozpylania magnetronowego.

Fig. 6. Surface distribution of Mo, S, Ni, Fe, Ti on the cross-section of MoS₂ (Ti, W) layer on Inconel alloy substrate obtained by magnetron sputtering technique.



Rys. 7. Stanowisko T-15 ze stykiem rozłożonym; a) widok ogólny, b) badany węzeł tarcia.

Fig. 7. T-15 tribotester with conformal friction contact: a) photograph, b) friction joint.

Tab. 2. Twardości HV 0,025 stopu Inconel 600 po procesach modyfikacji powierzchni.

Tab. 2. HV hardness (0.025) of Inconel 600 alloy after surface modification.

Material	Twardość
Inconel 600	185 ± 7
Inconel 600 + WC	466 ± 26
Inconel 600 + MoS ₂	239 ± 16

i uzupełnienia wszelkiego rodzaju nierówności powierzchni podłoża. Bardzo dobrą adhezję warstwy do podłoża widać jeszcze wyraźniej przy zastosowaniu znacznie większych powiększeń (Rys. 5).

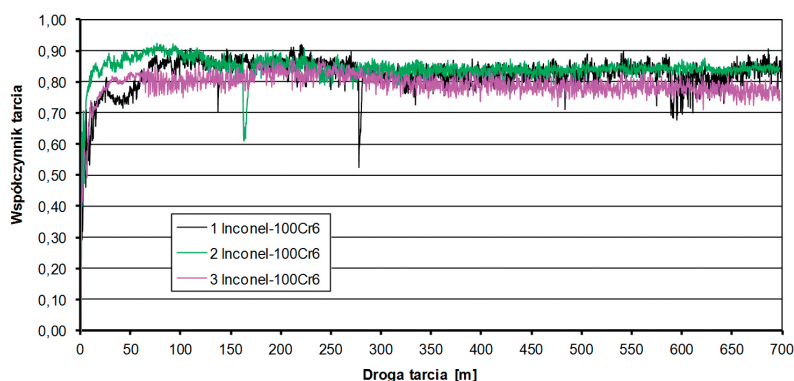
Bardzo istotną rolę w procesie osadzania odgrywa tytan, który determinuje jakość połączenia. Jego koncentracja na granicy podłoża - powłoka jest wyraźnie widoczna na mapach rozkładu pierwiastków (Rys. 6). Poza tytanem w wytworzonej warstwie zidentyfikowane pierwiastki wchodzące w skład warstwy to molibden i siarka. Nie stwierdzono żadnych widocznych zmian w strukturze podłoża, co dobrze rokuje w odniesieniu do zastosowań wytworzonych warstw.

W Tab. 2 przedstawiono wyniki pomiarów twardości opracowanych warstw. Badania przeprowadzono na twardościomierzu Durascan 10 firmy Struers z diamentowym wgłębnikiem Vickersa. Pomiar przeprowadzono stosując obciążenie 0,245 N, czas obciążenia wynosił 10 s. Przedstawione wyniki stanowią wartość średnią z 10 pomiarów.

Badania tribologiczne przeprowadzono dla dwóch rodzajów styku: rozłożonego na stanowisku T - 15 (Rys. 7) i skoncentrowanego liniowego na stanowisku Optimol SRV® (Rys. 12). Badania przeprowadzono w specjalnie do tego celu przygotowanym pomieszczeniu klimatyzowanym z regulacją temperatury i wilgotności powietrza. Należy zaznaczyć, że wyniki badań tribologicznych każdego skojarzenia określano jako średnią z trzech biegów badawczych.

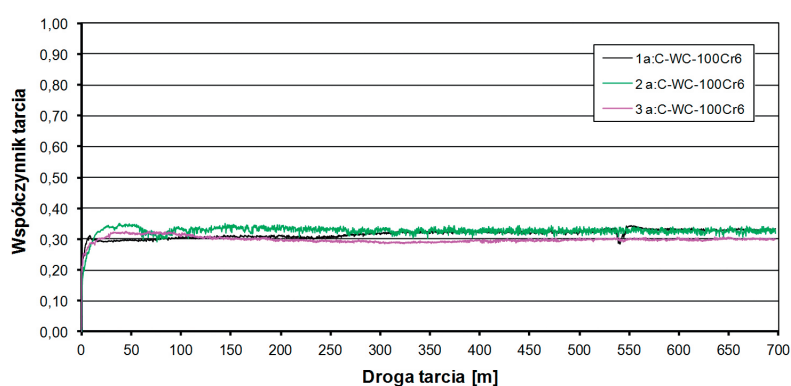
We wszystkich badanych przypadkach przeciwpróbka wykonana była ze stali łożyskowej 100Cr6.

Badania na stanowisku T-15 przeprowadzono przy następujących parametrach: obciążenie styku 60 N, prędkość poślizgu 0,1 m/s, droga tarcia 700 m, temperatura otoczenia 23 °C, wilgotność względna 50 %. W przypadku



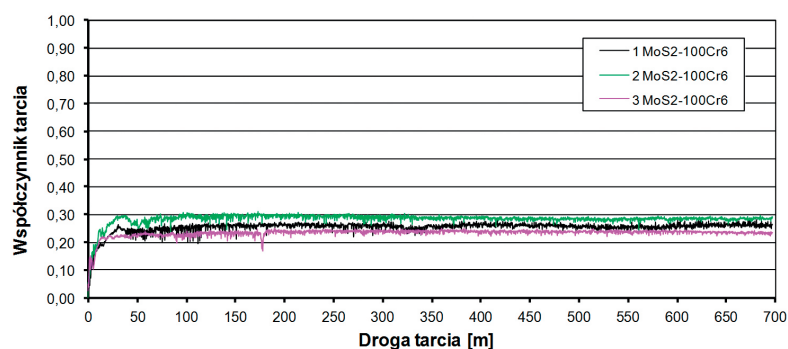
Rys. 8. Przebiegi współczynnika tarcia elementów wykonanych z Inconel 600 współpracujących w styku rozłożonym ze stalą 100Cr6 w warunkach tarcia technicznie suchego.

Fig. 8. Friction coefficient curves for elements made of Inconel 600 cooperating with 100Cr6 steel in conformal contact under dry friction.



Rys. 9. Przebiegi współczynnika tarcia elementów wykonanych z Inconel 600 z nałożoną powłoką WC-a:C współpracujących w styku rozłożonym ze stalą 100Cr6 w warunkach tarcia technicznie suchego.

Fig. 9. Friction coefficient curves for elements made of Inconel 600 coated with WC-a:C cooperating with 100Cr6 steel in conformal contact under dry friction.



Rys. 10. Przebiegi współczynnika tarcia elementów wykonanych z Inconel 600 z nałożoną powłoką MoS₂ współpracujących w styku rozłożonym ze stalą 100Cr6 w warunkach tarcia technicznie suchego.

Fig. 10. Friction coefficient curves for elements made of Inconel 600 coated with MoS₂ cooperating with 100Cr6 steel in conformal contact under dry friction.

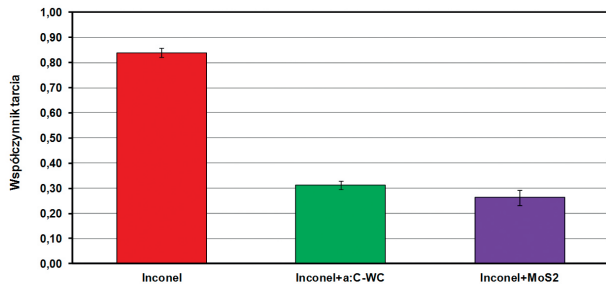
badan na tym stanowisku folię klejono do tarczy, nie było możliwe ze względów technicznych określenie wartości zużycia elementów testowych i skoncentrowano się tylko na określeniu wartości współczynnika tarcia. Średnie wartości współczynnika tarcia określano na drodze tarcia pomiędzy 100 ÷ 650 m. Przebiegi współczynników tarcia badanych skojarzeń materiałowych dla trzech biegów badawczych przedstawiono na Rys. 8 - 10. W oparciu

o te wykresy można stwierdzić, że dotarcie skojarzenia i ustabilizowanie się współczynników tarcia następowało szybko, a po drodze wynoszącej 50 m współczynnik ten nie zmieniał się zasadniczo.

Należy jednak zaznaczyć, że chociaż pod koniec drogi tarcia wartości współczynników nieznacznie zmniejszały się, to stosunek współczynników tarcia skojarzenia Inconel z nałożoną warstwą (MoS₂ czy WC-a:C) -100Cr6 w odnie-

sieniu do skojarzenia Inconel 600 - 100Cr6 był ponad 2,5-krotnie mniejszy. Najlepiej obrazują to średnie wartości współczynników tarcia przedstawione na Rys. 11.

Drugą serię badań, jak już zaznaczono wcześniej, przeprowadzono na stanowisku SRV® firmy Optimol. Jest to aparat przeznaczony do badań tribologicznych środków



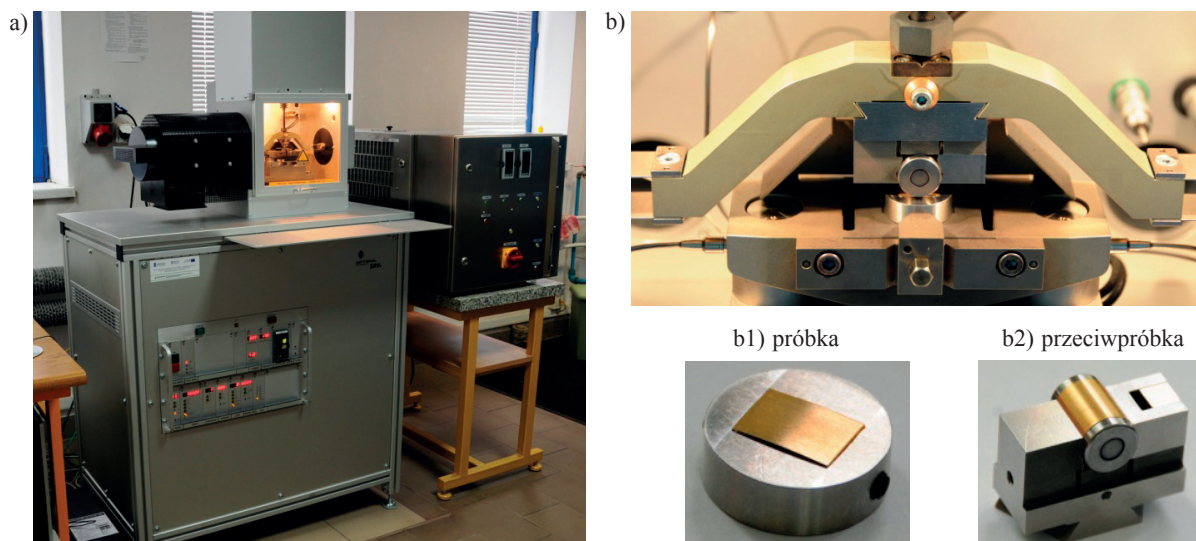
Rys. 11. Średnie wartości współczynnika tarcia elementów wykonanych z Inconel 600 i z nałożonymi powłokami współpracujących w styku rozłożonym ze stalą 100Cr6 w warunkach tarcia technicznie suchego.

Fig. 11. Average values of friction coefficient for elements made of Inconel 600 coated with WC-a:C and MoS₂ cooperating with 100Cr6 steel in conformal contact under dry friction.

smarowych, materiałów i warstw powierzchniowych w warunkach ruchu oscylacyjnego o dużej częstotliwości.

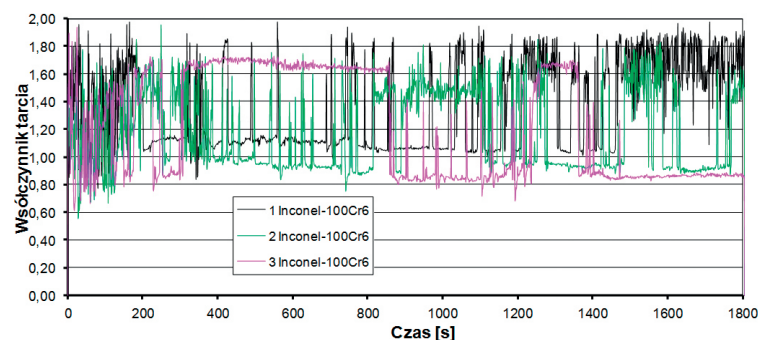
Skojarzenie (para cierna) badawcze składało się, jak zaznaczono wcześniej z folii (Rys. 12b1) oraz rolki wykonanej ze stali 100Cr6 (Rys. 12b2). Badania przeprowadzono przy następujących parametrach: obciążenie styku 15 N, amplituda 1000 μm, częstotliwość 50 Hz, temperatura 23 °C, wilgotność 50 %, czas biegu badawczego 1800 s. W przypadku tych badań możliwe było określenie zużycia folii po zakończeniu testu. Należy zaznaczyć, że wszystkie średnie wyniki badań tribologicznych określano podobnie jak w przypadku styku rozłożonego na podstawie co najmniej trzech biegów badawczych. Zbiorcze zestawienie przebiegu współczynników dla przeprowadzonych biegów badawczych przedstawiono na Rys. 13 - 15.

Należy zwrócić uwagę na znaczne rozbieżności i niestabilność współczynników tarcia dla przebiegów skojarzenia materiałowego Inconel 600 - 100Cr6 (Rys. 13) sięgającego nawet 100 % w stosunku do zmian współczynników tarcia pozostałych badanych skojarzeń, w których jeden z elementów pokryty był powłoką (MoS₂ lub WC-a:C).



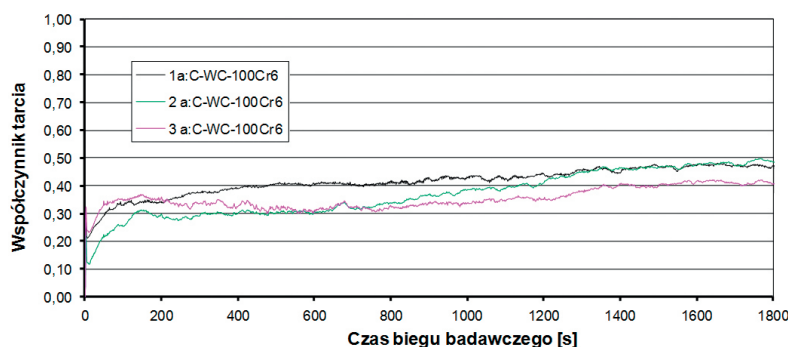
Rys. 12. Stanowisko badawcze SRV: a) widok ogólny, b) elementy węzła tarcia.

Fig. 12. SRV tester: a) test rig, b) test specimens.



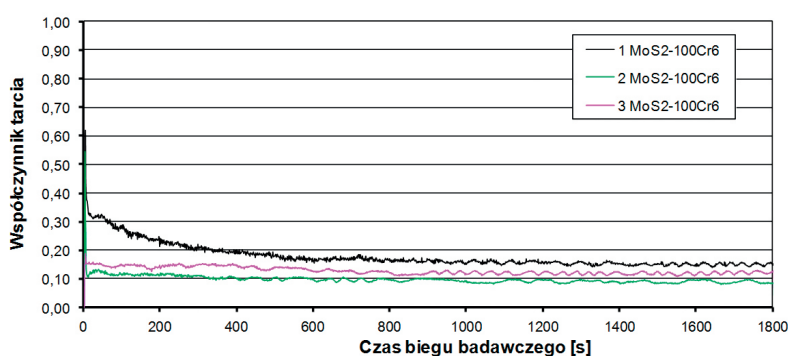
Rys. 13. Przebiegi współczynnika tarcia elementów wykonanych z Inconel 600 współpracujących w styku skoncentrowanym ze stalą 100Cr6 w warunkach tarcia technicznie suchego w ruchu oscylacyjnym.

Fig. 13. Friction coefficient curves for elements made of Inconel 600 cooperating with 100Cr6 steel in non-conformal contact under dry friction in oscillating motion.



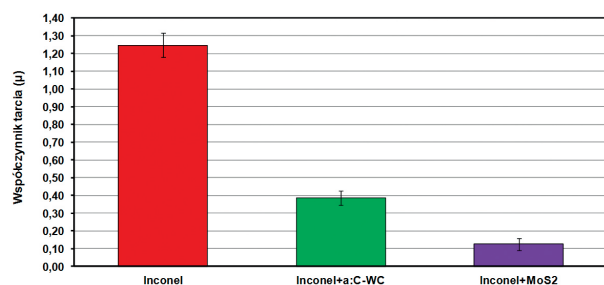
Rys. 14. Przebiegi współczynnika tarcia elementów wykonanych z Inconel 600 z nałożoną powłoką WC-a:C współpracujących w styku skoncentrowanym ze stalą 100Cr w warunkach tarcia technicznie suchego w ruchu oscylacyjnym.

Fig. 14. Friction coefficient curves for elements made of Inconel 600 coated with WC-a:C cooperating with 100Cr6 steel in non-conformal contact under dry friction in oscillating motion.



Rys. 15. Przebiegi współczynnika tarcia elementów wykonanych z Inconel 600 z nałożoną powłoką MoS₂ współpracujących w styku skoncentrowanym ze stalą 100Cr w warunkach tarcia technicznie suchego w ruchu oscylacyjnym.

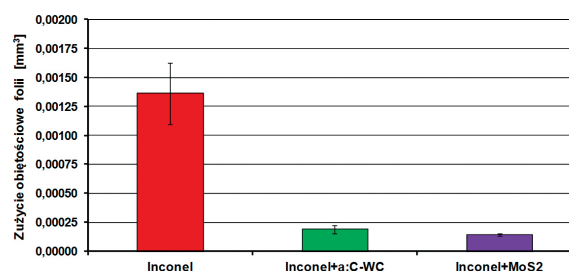
Fig. 15. Friction coefficient curves for elements made of Inconel 600 coated with MoS₂ cooperating with 100Cr6 steel in non-conformal contact under dry friction in oscillating motion.



Rys. 16. Średnie wartości współczynnika tarcia elementów wykonanych z Inconel 600 oraz z nałożonymi powłokami współpracujących w styku skoncentrowanym ze stalą 100Cr6 w warunkach tarcia technicznie suchego w ruchu oscylacyjnym.

Fig. 16. Average values of friction coefficient for elements made of Inconel 600 coated with WC-a:C and MoS₂ cooperating with 100Cr6 steel in non-conformal contact under dry friction in oscillating motion.

Analizując przebiegi współczynników tarcia badanych skojarzeń materiałowych należy podkreślić bardziej stabilne przebiegi współczynników tarcia w przypadku badania skojarzeń z elementami pokrytymi powłokami PVD w odniesieniu do skojarzenia Inconel 600 - 100Cr6. Należy również zwrócić uwagę, że w przypadku skojarzenia z elementem z powłoką WC-a:C wartość współczynnika tarcia po okresie docierania rośnie, natomiast w przypadku

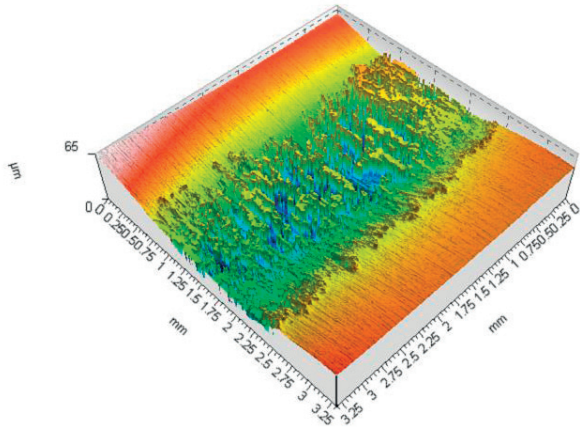


Rys. 17. Średnie wartości zużycia objętościowego folii z Inconel 600 i z nałożonymi powłokami współpracujących w styku skoncentrowanym ze stalą 100Cr6 w warunkach tarcia technicznie suchego w ruchu oscylacyjnym.

Fig. 17. Average values of volumetric wear for Inconel 600 coated with WC-a:C and MoS₂ cooperating with 100Cr6 steel in non-conformal contact under dry friction in oscillating motion.

skojarzenia z powłoką MoS₂ maleje. Ponadto należy podkreślić znacznie większe zróżnicowanie średnich wartości współczynników tarcia badanych skojarzeń w przypadku ruchu oscylacyjnego (Rys. 16) w odniesieniu do ruchu ślizgowego (Rys. 11).

Na Rys. 17 przedstawiono zużycie objętościowe badanych próbek foliowych określone po biegach badawczych. Z zestawienia tego wyraźnie widać ponad 6-krotnie mniej-



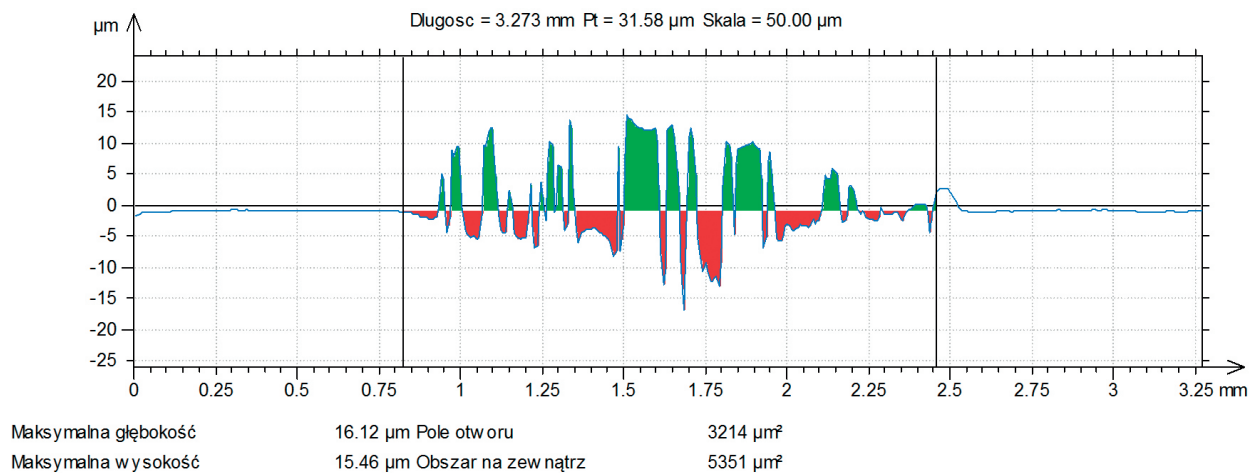
Rys. 18. Ślad wytarcia na folii z Inconelu współpracującej z rolką ze stali 100Cr6 w warunkach tarcia technicznie suchego w ruchu oscylacyjnym.

Fig. 18. Wear track of Inconel specimen cooperating with ring made of 100Cr6 steel under dry friction in oscillating motion.

sze zużycie folii pokrytych powłokami w odniesieniu do folii z czystego Inconelu.

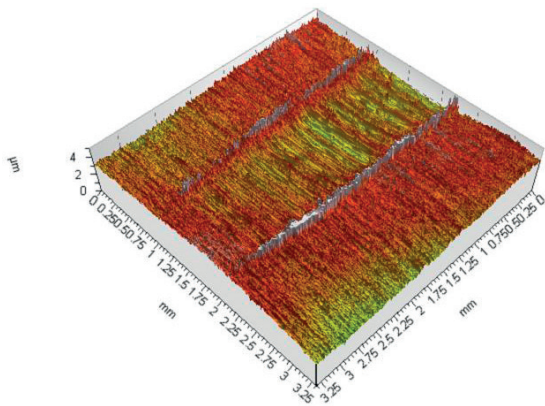
Bardzo interesujące jest również porównanie śladów tarcia folii z czystego Inconelu oraz folii z naniesionymi powłokami, które współpracowały z przeciwpóbką ze stali 100Cr6. Na przestrzennym obrazie śladów wytarcia na folii z czystego Inconelu (Rys. 18) widać wyraźnie, że w styku następowało zacieranie i prawdopodobne przeniesienie materiału pomiędzy współpracującymi elementami. Potwierdzeniem tego jest wybrany profil chropowatości śladu tarcia przedstawiony na Rys. 19, gdzie obszary wytarte przedstawione są kolorem czerwonym, natomiast naniesienia kolorem zielonym. O procesie zacierania świadczyć może niestabilność współczynnika tarcia, który został przedstawiony dla tego skojarzenia na Rys. 13.

Zdecydowanie odmiennie przedstawia się sytuacja w przypadkach śladów tarcia na foliach z naniesionymi powłokami, które przedstawione są na Rys. 20 i Rys. 22. Najdobitniej świadczą o tym wybrane profile chropowa-



Rys. 19. Profil śladu wytarcia na folii z Inconelu współpracującej z rolką ze stali 100Cr6 w warunkach tarcia technicznie suchego w ruchu oscylacyjnym.

Fig. 19. Wear track profile of Inconel specimen cooperating with ring made of 100Cr6 steel under dry friction in oscillating motion.

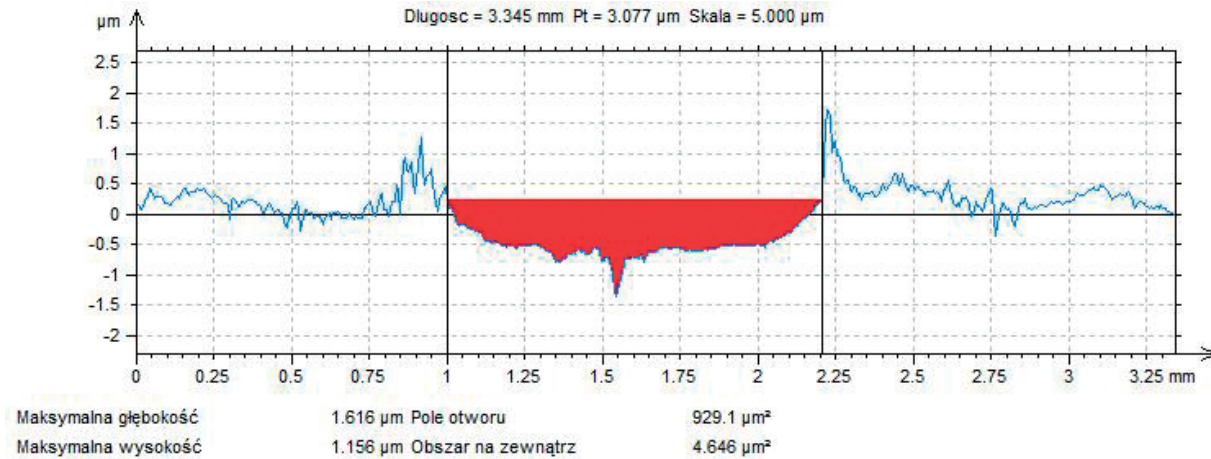


Rys. 20. Ślad wytarcia na folii z Inconelu z naniesioną powłoką WC-a:C współpracującą z rolką ze stali 100Cr6 w warunkach tarcia technicznie suchego w ruchu oscylacyjnym.

Fig. 20. Wear track of WC-a:C coated Inconel cooperating with ring made of 100Cr6 steel under dry friction in oscillating motion.

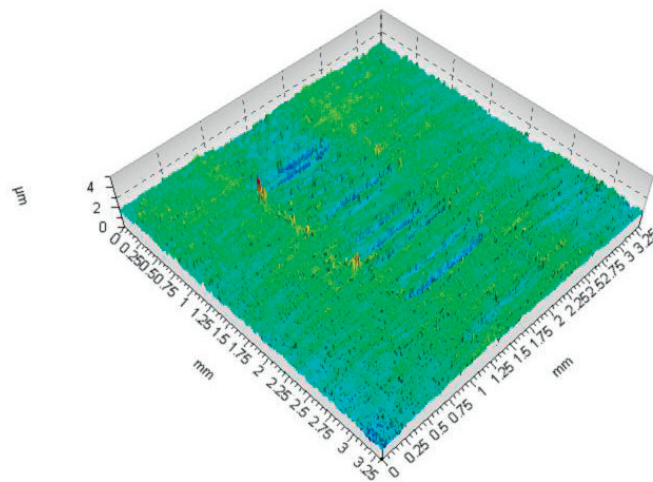
tości przedstawione na Rys. 21 i Rys. 23. Z wykresów przedstawionych na tych rysunkach widać wyraźnie w miarę gładkie profile śladów wytarcia dla obu folii z powłokami. Na uwagę zasługuje również głębokość ich wytarcia, która nie przekracza 1,5 μm, co w porównaniu z głębokościami wytarc i wzniesień folii z czystego Inconelu (- 15 i +15 μm) jest wartością małą.

Podsumowując wyniki badań tribologicznych należy jednoznacznie stwierdzić, że pokrycie jednego z elementów trących powłoką PVD zdecydowanie obniża zarówno zużycie, jak i wartości współczynników tarcia badanego skojarzenia. Najkorzystniejsze w obydwu przypadkach konfiguracji styku okazało się skojarzenie, w którym Inconel 600 pokryty był powłoką MoS₂.



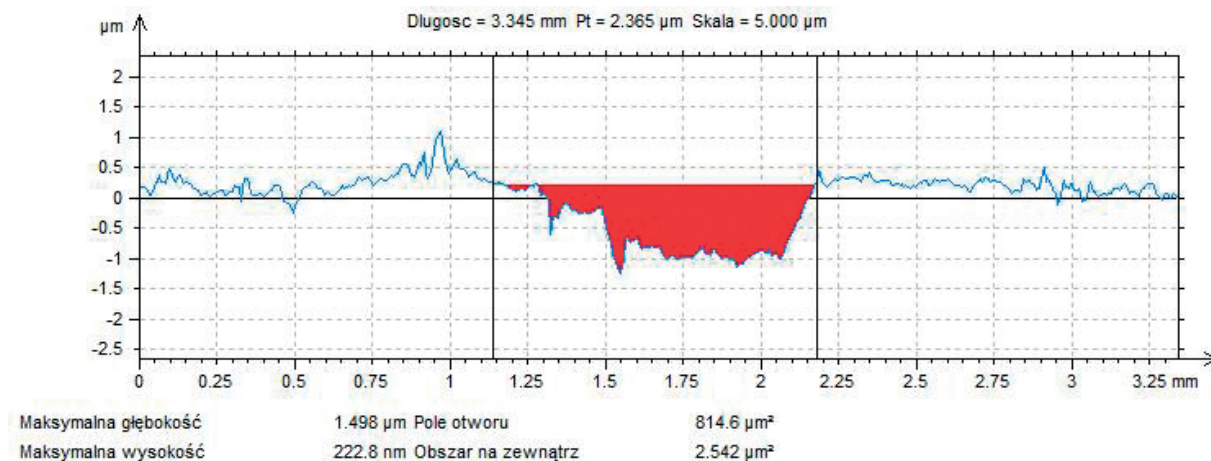
Rys. 21. Profil śladu wytarcia na folii z Inconelu z naniesioną powłoką WC-a:C współpracującą z rolką ze stali 100Cr6 w warunkach tarcia technicznie suchego w ruchu oscylacyjnym.

Fig. 21. Wear track profile of WC-a:C coated Inconel cooperating with ring made of 100Cr6 steel under dry friction in oscillating motion.



Rys. 22. Ślad wytarcia na folii z Inconelu z naniesioną powłoką MoS₂ współpracującą z rolką ze stali 100Cr6 w warunkach tarcia technicznie suchego w ruchu oscylacyjnym.

Fig. 22. Wear track of MoS₂ coated Inconel cooperating with ring made of 100Cr6 steel under dry friction in oscillating motion.



Rys. 23. Profil śladu wytarcia na folii z Inconelu z naniesioną powłoką MoS₂ z rolką ze stali 100Cr6 w warunkach tarcia technicznie suchego w ruchu oscylacyjnym.

Fig. 23. Wear track profile of MoS₂ coated Inconel cooperating with ring made of 100Cr6 steel under dry friction in oscillating motion.

4. Wnioski

W pracy przedstawiono wyniki badań nad wykorzystaniem techniki rozpylania magnetronowego do modyfikacji powierzchni cienkiej folii ze stopu Inconel 600. Naniesione warstwy WC-a:C i MoS₂ (Ti,W) o grubości około max. 2 μm charakteryzowały się bardzo dobrą przyczepnością do podłoża. W bardzo znaczący sposób poprawiały się również właściwości trybologiczne (współczynnik tarcia, odporność na zużycie ścierne) w porównaniu z materiałem podłoża. Najkorzystniejsze w obydwu przypadkach konfiguracji styku okazało się skojarzenie, w którym Inconel 600 pokryty był powłoką MoS₂. Uzyskane niskie wartości współczynników tarcia stwarzają możliwość zastosowania tych materiałów na elementy ślizgowe w łożyskach foliowych.

Podziękowania

Badania zostały wykonane w ramach Projektu POIG.01.03.01-00-027/08 p.t. „Wykorzystanie materiałów i konstrukcji inteligentnych do opracowania koncepcji i wykonania innowacyjnego systemu łożyskowania wirników mikroturbin energetycznych.”

Literatura

[1] Heshmat H., Hryniewicz P., Walton J.F., Willis J.P., Jahanmir S., DellaCorte C.: Low-friction wear-resistant coatings for high-temperature foil bearings,

Tribology International, 2005, 38, 1059 – 1075

- [2] Kovacic J., Emmer S., Bielek J., Kelesi L.: Effect of composition on friction coefficient of Cu-graphite composites, *Wear*, 2008, 265, 417–421
- [3] Fuentes G.G., Diaz de Cerio M.J., Rodriguez R., Avelar-Batista J.C., Spain E., Housden J., Qin Y.: Investigation on the sliding of aluminium thin foils against PVD-coated carbide forming-tools during micro-forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 177, 644 – 648
- [4] Inconel® alloy 600, W.No.2.4816, www.bibusmetals.com.pl
- [5] Chmielewski M., Barlak M., Pietrzak K., Kaliński D., Kowalska E., Strojny-Nęcza A.: Tribological effects of ion implantation of Inconel 600, *Nukleonika*, 2012, 57(3), 357 – 362
- [6] Konarski P., Kaczorek K., Kaliński D., Chmielewski M., Pietrzak K., Barlak M.: Ion implanted inconel alloy – SIMS and GDMS depth profile analysis, *Surface and Interface Analysis*, 2013, 45(1), 494 – 497
- [7] Moskalewicz T., Wendler B., Zimowski S., Dubiel B., Czyska-Filemonowicz A.: Microstructure, micro-mechanical and tribological properties of the nc-WC/a-C nanocomposite coatings magnetron sputtered on non-hardened and oxygen hardened Ti-6Al-4V alloy, *Surface & Coatings Technology*, 2010, 205(7), 2668 – 2677
- [8] Pawlak W., Wendler B., Nolbrzak P., Makowka M., Włodarczyk K., Rylski A.: Low friction MoS₂(Ti,W) coatings deposited by magnetron sputtering, *Inżynieria Materiałowa*, 2010, 3, 418 – 421