

RECENZJA

cyklu publikacji przedstawionego jako rozprawa habilitacyjna „Procesy tribologiczne w wybranych nanostrukturalnych powłokach przeciwzużyciowych”, oraz dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego dr. inż. Sławomira Zimowskiego

Recenzja została przygotowana na podstawie pisma Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH, prof. dr. hab. inż. Antoniego Kalukiewicza, z dnia 20.10.2015 r. Podstawę opinii stanowił zbiór dokumentów zawierający jednotematyczny cykl publikacji oraz obszerny autoreferat wraz z kompletem załączników.

Charakterystyka ogólna Kandydata

Dr inż. Sławomir Zimowski ukończył w 1996 roku studia na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie uzyskując stopień magistra inżyniera mechanika na podstawie pracy magisterskiej pt. „Wyznaczanie charakterystyk tribologicznych skojarzeń PTFE i jego kompozytów w styku ze stalą”. W 2003 roku, na tym samym Wydziale, obronił pracę doktorską pt. „Kompozyt ślizgowy do diagnostyki termicznej węzłów tarcia” uzyskując stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie *Budowa i eksploatacja maszyn*, specjalność *Tribologia*. Od początku pracy zawodowej w 1996 r. związany jest z Katedrą Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH, od 2003 r. zatrudniony na stanowisku adiunkta.

Główny obszar naukowych dociekań Kandydata stanowią procesy tribologiczne rozpatrywane w kontekście materiałowym, przy czym największą grupę zagadnień stanowią powłoki wytwarzane metodami PVD. Przegląd dorobku publikacyjnego oraz tematyka realizowanych projektów wskazują na to, że celem tych dociekań jest badanie mechanizmów destrukcji tarciovych takich powłok i na tej podstawie modyfikowanie technologii ich wytwarzania.

Praca dydaktyczna Kandydata bardzo silnie związana jest również z działalnością naukową, obejmując problemy nauk o materiałach oraz tribologii.

Ocena dorobku naukowego, w tym osiągnięć prezentowanych w habilitacyjnym cyklu publikacji

Dr inż. Sławomir Zimowski przedstawił do oceny cykl 15 publikacji zatytułowany: „Procesy tribologiczne w wybranych nanostrukturalnych powłokach przeciwzużyciowych”. Są to:

[A1] Zimowski S., Rakowski W., Kot M., Major Ł.: Mechanizm zużycia powłok wielowarstwowych typu metal/ceramika (Cr/CrN). *Tribologia* 4 (2008) 223–233. (Udział własny w pracy: 70 %)

- [A2] Zimowski S., Rakowski W., Major Ł.: Obciążenie graniczne powłok wielowarstwowych TiN/CrN w styku tribologicznym kula-tarcza. *Tribologia* 4 (2009) 275–284. (Udział własny w pracy: 75 %)
- [A3] Zimowski S., Rakowski W., Morgiel J., Grzonka J., Mania R.: Wpływ dodatku krzemu do dwuwarstwowych powłok typu (Cr,Si)N/TiN na ich właściwości mikromechaniczne i tribologiczne. *Tribologia* 4 (2009) 285–293. (Udział własny w pracy: 65 %)
- [A4] Zimowski S., Rakowski W., Grzonka J.: Titanium nitride with silicon additions for tribological applications. *Surface and Interface Analysis* 42 (2010) 1364–1367. (Udział własny w pracy: 80 %)
- [A5] Zimowski S., Rakowski W.: Analiza porównawcza zjawisk towarzyszących tarciiu cienkich powłok ceramicznych w ruchu obrotowym, postępowym i postępowo-zwrotnym. *Tribologia* 6 (2010) 283–292. (Udział własny w pracy: 80 %)
- [A6] Zimowski S., Swatowska B., Rakowski W.: Właściwości przeciwwzyciowe amorficznych warstw a-Si:C:H stosowanych w ogniwach fotowoltaicznych. *Tribologia* 3 (2010) 263–273. (Udział własny w pracy: 75 %)
- [A7] Zimowski S., Rakowski W., Jonas S.: Anti-wear properties of amorphous a-C:H and a-C:N:H carbon coatings deposited on polycarbonate. *Surface and Interface Analysis* 44 (2012) 1229–1232. (Udział własny w pracy: 80 %)
- [A8] Zimowski S., Rakowski W.: Analiza deformacji falowych cienkich powłok w ślizgowym styku skoncentrowanym. *Tribologia* 5 (2012) 243–250. (Udział własny w pracy: 90 %)
- [A9] Swatowska B., Stapiński T., Zimowski S.: Properties of a-Si:N:H films beneficial for silicon solar cells applications. *Opto-Electronics Review* 20 (2012) 168-173. (Udział własny w pracy: 30 %)
- [A10] Moskalewicz T., Wendler B., Zimowski S., Dubiel B., Czyrska-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 and Coatings Technology* 205 (2010) 2668-2677. (Udział własny w pracy: 15 %)
- [A11] Zimowski S., Moskalewicz T., Kot M., Wendler B., Czyrska-Filemonowicz A.: Microstructure, mechanical and tribological properties of the nc-CrxCy/a-C and nc-CrxCy/a-C:H nanocomposite coatings on oxygen-hardened Ti-6Al-4V alloy. *Surface and Interface Analysis* 44 (2012) 1225–1228. (Udział własny w pracy: 60 %)
- [A12] Zimowski S., Moskalewicz T., Wendler B., Kot M., Czyrska-Filemonowicz A.: Thick Low-Friction nc-MeC/aC Nanocomposite Coatings on Ti-6Al-4V Alloy: Microstructure and Tribological Properties in Sliding Contact with a Ball. *Metallurgical and Materials Transactions A* 45 (2014) 3916-3928. (Udział własny w pracy: 60 %)
- [A13] Moskalewicz T., Zimowski S., Wendler B., Nolbrzak P., Czyrska-Filemonowicz A.: Microstructure and tribological properties of low-friction composite MoS₂(Ti,W) coating on the oxygen hardened Ti-6Al-4V alloy. *Metals and Materials International* 20(2014), 269–276 (Udział własny w pracy: 40 %)
- [A14] Zimowski S.: Wpływ twardości i modułu sprężystości powłok kompozytowych na ich odporność na zużycie. *Tribologia* 4 (2014) 149–160
- [A15] Zimowski S.: Twarde powłoki kompozytowe w zastosowaniach tribologicznych. Rozdział w monografii "Tribologia i inżynieria powierzchni – wybrane zagadnienia" red. Stanisław Flaga i in. Monografie Katedry Automatykacji Procesów AGH w Krakowie. Kraków 2014, s. 8-21.

Oprócz dwóch ostatnich wszystkie pozostałe publikacje są współautorskie, z przeważającym udziałem Kandydata (za wyjątkiem pozycji A9 z 30% udziałem). Najwięcej ze wskazanych w tym cyklu prac opublikowanych zostało w czasopiśmie TRIBOLOGIA (7). Za granicą opublikowanych zostało 6 z nich. Chociaż wymienione jako stanowiące jednotematyczny cykl, ich problematyka naukowa i podejście metodologiczne są bardzo zróżnicowane; właściwie wspólny mianownik stanowi to, że dotyczą cienkich, mieszczących się w granicach tolerancji wymiarowej ($< 2\mu\text{m}$) powłok, nakładanych w celach łagodzenia negatywnych skutków procesów tribologicznych, głównie zmniejszania intensywności zużycia przez tarcie. Wrażenia zróżnicowania i rozproszenia merytorycznego nie niweluje przegląd kopii tych publikacji, zamieszczonych w załączniku nr 5.

W dużym stopniu niezależnie od zestawienia tych publikacji, w rozdz. 5.3 Autoreferatu przedstawiony jest dość szczegółowo dorobek naukowy Kandydata. Zawiera on opis przeprowadzonych przez niego badań oraz uzyskanych wyników, ale odnoszenie tego opisu kodami (np. [II.E45-Zał.3]) do innych załączników, głównie nr 3, w którym jest tylko wykaz tytułów publikacji oraz przedstawienie swojego w nich udziału, również nie pozwala na wyekstrahowanie wątku monotematyczności. Zwłaszcza, że przedstawiony w Autoreferacie opis wykracza poza publikacje wymienione do oceny jako jednotematyczny cykl - obejmuje bowiem dorobek przedstawiony we wszystkich publikacjach Kandydata. Nie ułatwia lektury redakcja Autoreferatu – bez wyraźnej struktury prezentacji merytorycznych kwestii, sprawiającej wrażenie wymieszania wątków i komentarzy, bez syntezy informacji stanowiących wyniki badań i niemal zupełnie bez jakichkolwiek uogólnień.

Niełatwa lektura zamieszczonego w Autoreferacie zapisu osiągniętych wyników oraz przegląd kopii publikacji pozwala wszakże na stwierdzenie znaczącego dorobku badawczego Kandydata; jego słabszą stroną jest duże rozproszenie w odniesieniu zarówno do badanych układów materiałowych, jak i badanych właściwości, łącznie z różnorodnością podejścia metodologicznego. Uznał on jednak, że możliwe jest na podstawie własnych (raczej: współwłasnych) wyników wysnuć pewnych reguł ogólnych, stwierdzając m.in., że:

1. odporność na zużycie powłok CrN/Cr i CrN/TiN w ślizgowym styku skoncentrowanym, pomimo poprawy odporności na pękanie powłok wielowarstwowych typu ceramika/metal, jest mniejsza (?) ze względu na intensywne ścieranie międzywarstw metalicznych,
2. zwiększenie odporności na zużycie powłok jest możliwe dzięki korzystnym właściwościom ślizgowym tych powłok i możliwości utworzenia tribowarstwy, a nie ich bardzo dużej twardości,
3. trwałość tribowarstwy utworzonej w procesie tarcia nanokompozytowych powłok na bazie amorficznego węgla jest zależna od udziału fazy dyspersyjnej twardych węglików w kompozycie oraz warunków współpracy.

Pierwszy wniosek może stanowić kanwę ciekawego opracowania, gdyby próbować go uogólnić do postaci reguły dla tego rodzaju powłok, z określeniem granic jej obowiązywania. Drugi wniosek może być prawdziwy dla określonego przypadku, ale jest błędnie podany w sensie uogólnienia. Najkorzystniejsze właściwości ślizgowe mają powłoki o małych granicznych wartościach naprężeń ścinających, ale te są jednocześnie mało twarde i mało odporne na

zużywanie przez tarcie. Najlepszy jest klasyczny układ Bowdena-Tabora – miękka warstwa powierzchniowa na twardym podłożu – takie cechy wykazuje np. mająca strukturę DLC nanokrystaliczna powłoka WC/C – przesycona węglem sp^2 warstwa WC o sieci sp^3 . Ponieważ jest to znana sprawa, dotyczący jej w gruncie rzeczy wniosek 3 jest oczywisty, nie ma cech oryginalności.

Ponadto jako osiągnięcia naukowe Kandydat przedstawia rozwiązane przez siebie problemy:

- określenie wpływu zawartości krzemu w powłokach (Cr,Si)N oraz (Ti,Si)N wytwarzanych metodą magnetronowego rozpylania w układzie jednotarczowym na ich właściwości mikromechaniczne i tribologiczne,
- dokonanie optymalizacji struktury powłok (Cr,Si)N ze względu na ich największą odporność na zużycie,
- zbadanie mechanizmu zużywania oraz wyznaczenie charakterystyk tribologicznych nanokompozytowych powłok: nc-WC/a-C, nc-TiC/a-C, nc-CrC/a-C, nc-CrC/a-C:H,
- zidentyfikowanie zjawisk fizyko-chemicznych zachodzących w styku tarciovym powłok MoS₂(Ti,W) podczas ich pracy w podwyższonej temperaturze, co pozwoliło określić zakres ich aplikacyjny,
- zbadanie mechanizmu zużywania cienkich powłok a-Si:N:H oraz a-Si:C:H stosowanych na ogniwa fotowoltaiczne w szczególności osadzonych na krzemie multikrystalicznym,
- zbadanie mechanizmu zużywania twardych powłok osadzonych na miękkim podłożu polimerowym z poliwęglanu.

Jest to spory dorobek badawczy, niezależnie od tego, że w żadnym przypadku jego prezentacja w Autoreferacie jako oryginalnego nie jest odniesiona do istniejącego stanu wiedzy - czego dokonanie, owszem, można uznać, że leży poniekąd w obowiązkach recenzentów. Ale przytoczone powyżej osiągnięcia, zamieszczone w autopodsumowaniu, nawet przy silnym poczuciu tego obowiązku nie pozwalają na znalezienie wspólnego mianownika dla monograficzności przedstawionego cyklu publikacji. Zresztą tak samo jak przedstawione przez niego główne wnioski swoich badań świadczą o rozproszeniu tematyki, tak samo dowodzi tego cel naukowy prac przedstawiony na początku rozdz. 5.3. w postaci: „*określenie procesów tarcia i zużycia tribologicznego oraz innych form niszczenia powłok, a także zmian strukturalnych i powierzchniowych zachodzących w styku tarciovym*”. Aspekty tribologiczne różnorodnych powłok PVD, w tym powiązanie ich ze zmianami strukturalnymi, doczekały się mnóstwa (idących w setki, jeśli nie więcej) opracowań, w tym wielu uogólnień, stanowiąc już wręcz wiedzę podręcznikową i poradnikową.

Pewną próbą interpretowania istnienia powiązania tematycznego przedmiotowego cyklu publikacji jest deklaracja jednakowego podejścia do badania powłok, określonego przez Kandydata jako „*przyjętą strategię badawczą zakładającą zastosowanie tych samych metod badawczych w każdym z cykli badań dla każdej grupy powłok poddanych testom*”. Jest to założenie słuszne, aczkolwiek w niewielkim stopniu, mając na uwadze treść poszczególnych publikacji, zastosowane w praktyce.

Niezależnie od powyższych uwag dotyczących odpowiedniości prezentowanego dorobku do ogólnej konwencji obecnej procedury habilitowania, należy stwierdzić, że działalność Kandydata jest skoncentrowana na jednym rodzaju obiektów - powłokach PVD

przeznaczonych do „aplikacji tribologicznych”, że obejmuje stosunkowo szeroki zakres ich materiałowych kombinacji, a także to, że – pomimo braku sformułowania znaczących reguł ogólnych, działalność ta doprowadziła do szeregu rozwiązań szczegółowych, np. w odniesieniu do powłok wielowarstwowych typu ceramika/metal oraz powłok: (Cr,Si)N, (Ti,Si)N, nc-WC/a-C, nc-TiC/a-C, nc-CrC/a-C, nc-CrC/a-C:H, MoS₂(Ti,W), a-Si:N:H, a-Si:C:H.

Należy żałować, że Kandydat nie ujął zgromadzonego dorobku w postaci opracowania zwartego, co nie tyle byłoby istotne dla ułatwienia jego oceny w ramach procedury kwalifikacyjnej, ile przydatne dla badaczy i technologów zajmujących się tym sposobem podnoszenia trwałości i jakości eksploatacyjnego elementów maszyn i narzędzi. Zwłaszcza, że jego naukowe dociekania dotyczą rozwiązywania problemów o ukierunkowaniu użytkowym (trwałe, wolnozużywające się pokrycia o przeznaczeniu technicznym). Weryfikacja praktyczna stanowi najlepszą ocenę wartości efektów prowadzonych badań – a tych w dorobku Kandydata jest niewiele, jeśli nie liczyć pewnej liczby opracowań „na zamówienie”. W Autoreferacie przytoczona jest ich znacząca liczba (35); obejmie ona głównie analizę instrumentalną lub charakteryzację tribologiczną wykonywanych na zlecenie jednostek badawczych. Część z nich, o tym samym charakterze, wykonanych zostało na zlecenie firm – nie ma jednak żadnych informacji o jakichkolwiek wdrożeniach.

Dr inż. Sławomir Zimowski był wykonawcą 10. oraz głównym wykonawcą 2. projektów badawczych (KBN, POIG, PW, EEA, ERA NET). Nie kierował żadnym.

Opublikował jako współautor 76 publikacji (po doktoracie 70) oraz 2. jako autor, w tym 15 w czasopismach z listy JCR: Surface and Coatings Technology, Surface and Interface Analysis, Metallurgical and Materials Transactions, Materials Science and Engineering, Materials Characterization, Intermetallics, Metals and Materials International, Opto-Electronics Review, Metallic Materials, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Vacuum, Materials Science-Poland. Jest autorem i współautorem 2. rozdziałów w publikacjach zwartych, 31. opracowań (artykuły i abstrakty) w materiałach konferencyjnych, jednego patentu oraz 7. zgłoszeń patentowych. Brał udział w 12. konferencjach krajowych i 7. międzynarodowych (za granicą – Antalya, Turcja, 2009, Cardiff, W. Brytania, 2011, Kijów, Ukraina, 2012).

Sumaryczny impact factor czasopism, w których opublikowane zostały artykuły współautorstwa Kandydata, wynosi 21,022 (w roku opublikowania, wszystkie po doktoracie). Index Hirscha wg WoS 4 (wg Scopusu też 4).

W podsumowaniu można stwierdzić, że osiągnięcia naukowe dr. inż. Sławomira Zimowskiego przedstawione w przedłożonym do oceny cyklu publikacji w wystarczającym stopniu odpowiadają wymaganiom stawianym przy ocenie dorobku habilitacyjnego. Kandydat wnosi wkład do nauki w dyscyplinie *Budowa i eksploatacja maszyn* w zakresie tribologii.

Ocena dorobku dydaktycznego i organizacyjnego

Dr inż. Sławomir Zimowski jest autorem programów kształcenia z przedmiotów: *Podstawy projektowania inżynierskiego* (2012 r.) oraz *Grafika inżynierska-rysunek techniczny* (2012 r.), a także współautorem programów kształcenia przedmiotów: *Tribologia* (2012 r.), *Współczesne*

materiały inżynierskie (2012 r.) oraz *Podstawy nauki o materiałach* (2010 r.). Opracował stanowiska badawcze do realizacji ćwiczeń laboratoryjnych pt. „Wyznaczenie charakterystyki tribologicznej i rezystancyjnej miliłożyska z ślizgową warstwą sensorową” oraz „Badanie oporów ruchu podczas tarcia pierścieni uszczelnień czolowych”.

W latach 2004 – 2015 był promotorem 25 prac magisterskich – wszystkie z obszaru tribologii.

Pełni funkcję koordynatora współpracy Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH z Wyższą Szkołą Inżynierską ICAM Lille we Francji w programie ERASMUS+. Uczestniczy w wymianie wykładowców w ramach staży edukacyjnych pracowników WIMiR AGH oraz University of Chemical Technology and Metallurgy in Sofia (Bulgaria) w ramach programu CEEPUS.

Uczestniczył w Warsztatach Tribologicznych organizowanych pod auspicjami Polskiego Towarzystwa Tribologicznego oraz specjalistycznych szkoleniach z zakresu badania właściwości powłok i metodyki badań tribologicznych.

Działalność dydaktyczna Kandydata jest znacząca; skromna jest natomiast działalność organizacyjna: opiekun pracowni Laboratorium Tribologii i Inżynierii Powierzchni w Katedrze Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn AGH, członek Polskiego Towarzystwa Tribologicznego oraz SIMP.

Wniosek końcowy

Na podstawie dokonanej oceny dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego dr. inż. Sławomira Zimowskiego stwierdzam, że odpowiada on warunkom stawianym ubiegającym się o nadanie stopnia doktora habilitowanego nauk technicznych w Ustawie o Stopniach i Tytule Naukowym (Dz. U Nr 65, 2003, Dz U. Nr 164, 2005, Dz. U. Nr 84, 2011). Wnoszę o nadanie dr. inż. Sławomirowi Zimowskiemu stopnia naukowego doktora habilitowanego w dyscyplinie naukowej *Budowa i eksploatacja maszyn*.

