

ZAŁĄCZNIK 3
AUTOREFERAT

Dr inż. Magdalena Łepicka

Badania dynamiki procesów tarcia i zużycia powłok przeciwzużyciowych

Wydział Mechaniczny
Instytut Inżynierii Mechanicznej
Politechnika Białostocka

Białystok, 2025 r.

Spis treści

1.	Imię i nazwisko	3
2.	Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej	3
3.	Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	4
4.	Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)	4
4.1.	Tytuł osiągnięcia naukowego	4
4.2.	Cykl publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego	4
4.3.	Cel naukowy publikacji i wyniki badań wchodzące w skład osiągnięcia naukowego	11
a)	Wprowadzenie do tematyki badawczej	11
b)	Osiągnięte cele naukowe	14
c)	Materiał badawczy	15
d)	Omówienie prac naukowych	16
e)	Podsumowanie	37
f)	Literatura	37
5.	Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej	39
5.1.	Praca w Politechnice Białostockiej	39
5.2.	Praca w International Iberian Nanotechnology Laboratory	41
6.	Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę	42
7.	Inne istotne informacje	44
a)	Informacja o współpracy z sektorem gospodarczym	44
b)	Dane naukometryczne (01.03.2025 r.)	45

1. **Imię i nazwisko** Magdalena Łepicka
2. **Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej**

20.09.2017

Doktor nauk technicznych

Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny

Dyscyplina: Budowa i eksploatacja maszyn

Specjalność: Inżynieria powierzchni

Tytuł pracy doktorskiej: *Wpływ modyfikacji powierzchni wybranych biomateriałów metalicznych na ich charakterystyki tribologiczne i korozyjne*

Promotor: dr hab. inż. Małgorzata Grądzka-Dahlke, prof. PB

Praca doktorska została obroniona z wyróżnieniem.

11.07.2013

Magister

Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny

Kierunek: Inżynieria biomedyczna

Temat pracy magisterskiej: *Wpływ modyfikacji powierzchni na odporność korozyjną stali stosowanych na narzędzia chirurgiczne*

Promotor: dr hab. inż. Małgorzata Grądzka-Dahlke, prof. PB

Ocena końcowa: celujący

03.02.2012

Inżynier

Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny

Kierunek: Inżynieria biomedyczna

Temat pracy inżynierskiej: *Analiza odporności korozyjnej elementów metalowych stałych aparatów ortodontycznych*

Promotor: dr hab. inż. Małgorzata Grądzka-Dahlke, prof. PB

Ocena końcowa: celujący

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- | | |
|--------------------------------|--|
| 01.10.2017 – obecnie | Politechnika Białostocka
Wydział Mechaniczny
Stanowisko: Adiunkt |
| 01.02.2018 – 31.07.2019 | International Iberian Nanotechnology Laboratory (Braga, Portugalia)
Nanodevices Research Group
Stanowisko: Postdoctoral Research Fellow |
| 01.10.2015 – 30.09.2017 | Politechnika Białostocka
Wydział Mechaniczny
Stanowisko: Asystent |

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Badania dynamiki procesów tarcia i zużycia powłok przeciwzużyciowych

4.2. Cykl publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego

Osiągnięcie naukowe stanowi spójny cykl badań, koncentrujących się na interdyscyplinarnych aspektach tribologii, inżynierii powierzchni i teorii chaosu, łącząc eksperymentalne analizy powierzchni z metodami analizy dynamiki układów tribologicznych. Oryginalna nowa procedura badania i analizy wyników dostarczyły nowych informacji na temat mechanizmów tarcia, rodzajów zużycia powłok przeciwzużyciowych oraz ich zmienności w czasie. Prezentowany sposób analizy danych tribologicznych, integrujący metody analizy szeregów czasowych oparte na teorii chaosu i konwencjonalne techniki pomiarowe w tribologii, jest nowym narzędziem diagnostyki tribologicznej i dostarcza istotnych informacji umożliwiających monitorowanie dynamiki zużycia cienkich warstw przeciwzużyciowych.

Osiągnięciem naukowym jest:

- a. Opracowanie procedury wykorzystania metod dynamiki nieliniowej do badania zmiennych w czasie procesów tarcia i zużycia ceramicznych powłok przeciwzużyciowych;
- b. Wykorzystanie opracowanej procedury do opisu dynamiki procesów tarcia i zużycia materiałów metalicznych z modyfikowaną warstwą powierzchniową;
- c. Zaproponowanie metody oceny progresji zużycia na podstawie przebiegów czasowych sygnałów tribologicznych.

Rezultaty badań opisano w 7 powiązanych tematycznie publikacjach naukowych, których sumaryczny współczynnik Impact Factor (IF) oraz liczba punktów Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW) wynoszą odpowiednio 27,892 i 1140. Wartości IF i punktacja MNiSW zostały podane zgodnie z rokiem ukazania się artykułów. Oświadczenia wszystkich współautorów publikacji potwierdzające ich indywidualny wkład w powstanie dorobku stanowiącego osiągnięcie i wymienionych w punkcie 4.2 zamieszczone zostały w Załączniku nr 6.

A1 Magdalena Łepicka (80%), Małgorzata Grądzka-Dahlke, The initial evaluation of performance of hard anti-wear coatings deposited on metallic substrates: thickness, mechanical properties and adhesion measurements—a brief review, *Reviews on Advanced Materials Science*, 58, 2019, <https://doi.org/10.1515/rams-2019-0003>.

IF = 1,197; 100 pkt. MNiSW, liczba cytowań wg WoS: 18, autor korespondencyjny

Artykuł stanowi przegląd metod oceny właściwości mechanicznych, grubości i przyczepności twardych powłok przeciwzużyciowych na podłożach metalicznych. Przegląd wzbogacono o wyniki badań własnych, ilustrujących omawiane metody pomiarowe.

Mój wkład w powstanie publikacji obejmował opracowanie koncepcji artykułu, przygotowanie przeglądu literatury oraz realizację badań eksperymentalnych. W szczególności odpowiadałam za wykonanie obserwacji przy użyciu mikroskopii konfokalnej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej, przeprowadzenie pomiarów mikrotwardości, analizę adhezji metodą testu zarysowania oraz dokumentację zarysowań przy wykorzystaniu mikroskopii świetlnej. Ponadto przygotowałam pierwszą wersję manuskryptu, opracowałam warstwę graficzną, przygotowałam odpowiedzi na recenzje oraz przeprowadziłam edycję i finalizację tekstu artykułu.

Najważniejszym opracowanym przeze mnie rezultatem pracy jest identyfikacja kluczowych czynników wpływających na trwałość powłok przeciwzużyciowych, takich jak moduł sprężystości oraz jego dopasowanie do parametrów mechanicznych podłoża. Przeprowadzony przegląd literatury wykazał, że zbyt duże niedopasowanie modułów sprężystości powłoki i podłoża prowadzi do intensyfikacji procesów degradacji cienkich warstw, takich jak pękanie i delaminacja. Rezultaty te stanowiły punkt wyjścia w publikacjach naukowych **A2** i **A3**.

- A2 Magdalena Łepicka (50%),** Małgorzata Grądzka-Dahlke, Daniel Pieniak, Kamil Pasierbiewicz, Kamila Kryńska, Andrzej Niewczas, Tribological performance of titanium nitride coatings: A comparative study on TiN-coated stainless steel and titanium alloy, *Wear*, 422, 2019, str. 68-80, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.029>.

IF = 4,108; 200 pkt. MNiSW, liczba cytowań wg WoS: 94, autor korespondencyjny

Pracę, będącą kontynuacją badań zapoczątkowanych w ramach publikacji A1, poświęcono porównaniu odporności na zużycie powłok azotku tytanu (TiN) w warunkach tarcia suchego naniesionych na nierdzewną stal austenityczną i dwufazowy stop tytanu.

Mój wkład w powstanie publikacji obejmował opracowanie koncepcji artykułu, przygotowanie przeglądu literatury, a także realizację badań eksperymentalnych i ich nadzorowanie. W ramach prac badawczych przeprowadziłam wieloskalowe badania skutków zużycia, stanowiące podstawę dla opracowania procedury wykorzystania metod dynamiki nieliniowej do badania zmiennych w czasie procesów tarcia i zużycia powłok przeciwzużyciowych, obejmujące: pomiary tarcia i zużycia, ocenę adhezji powłoki przy użyciu testu zarysowania, pomiary właściwości mechanicznych powłok i podłoży metodą nanoindentacji oraz obserwacje mikroskopowe i analizy składu chemicznego z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) wyposażonej w spektroskop EDS. Ponadto byłam odpowiedzialna za wizualizację danych, interpretację uzyskanych wyników oraz ich opracowanie graficzne. Przygotowałam również pierwszą wersję manuskryptu, odpowiedzi na recenzje, przeprowadziłam edycję tekstu oraz finalizację ostatecznej wersji artykułu.

Wykazałam, że powłoki TiN znacząco poprawiają odporność na zużycie podłoży metalicznych, takich jak stal nierdzewna 316L VM i stop tytanu Ti6Al4V, w warunkach

suchego tarcia. Potwierdziłam eksperymentalnie, że iloraz modułów sprężystości powłoki i podłoża ($E_{powłoki}/E_{podłoża}$) jest jednym z głównych czynników warunkujących odporność przeciwzużyciową monowarstwowej powłoki TiN. Niedopasowanie tych parametrów prowadzi do intensywnego zużycia powłoki, mimo jej wysokiej twardości i odporności na odkształcenia plastyczne. Zaobserwowałam ponadto duże różnice w trwałości eksploatacyjnej powłoki TiN, wskazujące na znaczące zróżnicowanie dynamiki zjawisk tarciovo-zużyciowych tej samej powłoki na różnych podłożach metalicznych.

- A3 Magdalena Łepicka (70%),** Yurii Tsybrii, Daniel Kiejko, Karol Golak, The Effect of TiN and DLC Anti-Wear Coatings on the Tribofilm Formation and Frictional Heat Phenomena in Coated Metals vs. WC-Co, *Materials*, 14, 2021, 3342, <https://doi.org/10.3390/ma14123342>.

IF = 3,748; 140 pkt. MNiSW, liczba cytowań wg WoS: 7, autor korespondencyjny

W publikacji analizowano wpływ powłok przeciwzużyciowych TiN (azotku tytanu) i DLC (węgla diamentopodobnego) na procesy tarcia i zużycia, w tym tworzenie się warstw wtórnych (tribofilmów) oraz zmiany temperaturowe w układach z modyfikowaną warstwą powierzchniową, pracujących w warunkach tarcia suchego.

Mój wkład w powstanie publikacji obejmował opracowanie koncepcji artykułu, przygotowanie przeglądu literatury oraz zaplanowanie eksperymentu. Brałam udział w przeprowadzeniu pomiarów tarciowych oraz wykonałam pomiary zużycia objętościowego. Ponadto, przeprowadziłam wieloskalowe obserwacje mikroskopowe śladów tarcia, nakierowane na ocenę morfologii śladów tarcia i powstających warstw wtórnych. Obserwacje prowadziłam z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Ponadto, wykorzystując mikroskop jonowy (FIB), przygotowałam przekroje śladów tarcia w mikroskali, co umożliwiło precyzyjną ocenę struktury śladów tarcia i powstałych warstw wtórnych. Skład pierwiastkowy próbek określiłam z wykorzystaniem spektrometru EDS. Byłam również odpowiedzialna za wizualizację i opracowanie graficzne większości danych, interpretację wyników badań oraz przygotowanie pierwszej wersji manuskryptu. Dodatkowo opracowałam odpowiedzi na recenzje, przeprowadziłam edycję tekstu oraz finalizację ostatecznej wersji artykułu.

Najistotniejszym moim osiągnięciem jest wykazanie, że w warunkach tarcia suchego powłoka DLC zapewnia małe opory ruchu nawet po lokalnym uszkodzeniu, w przeciwieństwie do powłoki TiN, która przyczynia się do nadmiernego nagrzewania i przyspieszonego zużycia metalicznego podłoża. Odkryłam również, że zmiany temperatury mogą być używane do prognozowania momentu katastrofalnego zużycia powłoki TiN. Uzyskane wyniki prac badawczych wskazały na potrzebę dogłębnego badania dynamiki zużycia cienkich powłok przeciwzużyciowych w warunkach tarcia suchego.

- A4 Magdalena Łepicka (45%),** Grzegorz Górski, Małgorzata Grądzka-Dahlke, Grzegorz Litak, Bartłomiej Ambrożkiewicz, Analysis of tribological behaviour of titanium nitride-coated stainless steel with the use of wavelet-based methods, *Archive of Applied Mechanics*, 91, 2021, str. 4475–4483, <https://doi.org/10.1007/s00419-021-02016-x>.

IF = 2,467; 100 pkt. MNIŚW, liczba cytowań wg WoS: 7

Praca dotyczy analizy właściwości tribologicznych stali nierdzewnej modyfikowanej powłoką azotku tytanu, z wykorzystaniem metod opartych na transformacji falkowej, do badania zmienności w czasie współczynnika tarcia w warunkach tarcia suchego.

Mój wkład w powstanie publikacji obejmował przygotowanie przeglądu literatury, przeprowadzenie pomiarów tarciovych oraz wykonanie pomiarów zużycia. Ponadto przeprowadziłam obserwacje mikroskopowe przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) oraz uczestniczyłam w wizualizacji danych. Brałam również udział w przygotowaniu pierwszej wersji manuskryptu, interpretacji uzyskanych wyników badań, opracowaniu graficznym większości danych, przygotowaniu odpowiedzi na recenzje, edycji manuskryptu oraz finalizacji ostatecznej wersji artykułu.

Jednym z kluczowych wniosków wynikających z badań było wykazanie, że metody oparte na transformacji falkowej, takie jak ciągła transformacja falkowa (CWT) i indeks skalowy dostarczają nie tylko informacji o bieżącym stanie zużycia powłoki, ale także pozwalają na przewidywanie momentu jej uszkodzenia poprzez śledzenie wzrostu składowych niskoczęstotliwościowych w widmie sygnału. Publikacja ta oferuje nowe podejście do identyfikacji przejściowych stanów tarcia i zużycia powłok ochronnych.

- A5 Magdalena Łepicka (70%),** Grzegorz Górski, Małgorzata Grądzka-Dahlke, Romuald Mosdorf, Study of tribological behaviour of surface modified stainless-steel using

recurrence quantification analysis and principal component analysis, *Tribology International*, 151, 2020, 106402, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106402>.

IF = 4,872; 200 pkt. MNiSW, liczba cytowań wg WoS: 9, autor korespondencyjny

Praca ta, poświęcona analizie procesów tarcia i zużycia stali nierdzewnej modyfikowanej powłoką TiN z wykorzystaniem metod analizy kwantyfikacyjnej rekurencji (RQA) i analizy głównych składowych (PCA), stanowi rozszerzenie prac badawczych poświęconych rozpoznaniu możliwości badania dynamiki procesów tarcia i zużycia układów z modyfikowaną warstwą powierzchniową.

Mój wkład w powstanie publikacji obejmował opracowanie koncepcji artykułu, przygotowanie przeglądu literatury oraz zaplanowanie eksperymentu, w tym zaproponowanie metod RQA i PCA do analizy sygnałów tribologicznych. W ramach badań przeprowadziłam pomiary tribologiczne, pomiary chropowatości powierzchni oraz obserwacje mikroskopowe z wykorzystaniem laserowego mikroskopu konfokalnego (CLSM). Uczestniczyłam także w analizie danych badawczych z zastosowaniem metod RQA i PCA oraz w interpretacji uzyskanych wyników. Ponadto byłam odpowiedzialna za wizualizację i opracowanie graficzne danych, przygotowanie pierwszej wersji manuskryptu, edycję wstępną tekstu, przygotowanie odpowiedzi na recenzje oraz finalizację ostatecznej wersji artykułu.

Najważniejszym opracowanym przeze mnie osiągnięciem jest wykazanie, że ilościowa analiza rekurencji (RQA) oraz analiza głównych składowych (PCA) są skutecznymi narzędziami w badaniach dynamiki zużycia, z uwzględnieniem identyfikacji dominujących rodzajów zużycia. Dzięki tym metodom możliwe było szczegółowe zrozumienie zmienności zachowania układu tribologicznego w czasie. Wyniki wskazują, że proponowane podejście badawcze może być wykorzystane do precyzyjnego monitorowania dynamiki zużycia powłok ochronnych.

A6 Magdalena Łepicka (60%), Małgorzata Grądzka-Dahlke, Iwona Zaborowska, Grzegorz Górski, Romuald Mosdorf, Recurrence analysis of coefficient of friction oscillations in DLC-coated and non-coated Ti6Al4V titanium alloy, *Tribology International*, 165, 2022, 107342, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107342>.

IF = 6,2; 200 pkt. MNiSW, liczba cytowań wg WoS: 6, autor korespondencyjny

Kontynuując badania opisywane w publikacjach **A4** i **A5**, w niniejszej pracy badano oscylacje współczynnika tarcia w stopie tytanu Ti6Al4V, zarówno pokrytym powłoką DLC (węgiel diamentopodobny), jak i niemodyfikowanym, z wykorzystaniem ilościowej analizy rekurencji (RQA), analizy głównych składowych (PCA) oraz sieci neuronowych typu SOM (ang. *self-organizing map*). Celem pracy było rozpoznanie dynamiki procesów zużywania układów z modyfikowaną warstwą powierzchniową, ze szczególnym uwzględnieniem zbadania możliwości precyzyjnego klasyfikowania zjawisk tarciowo-zużyciowych w sposób autonomiczny.

Mój wkład w powstanie publikacji obejmował opracowanie koncepcji artykułu, przygotowanie przeglądu literatury oraz zaplanowanie eksperymentu. W ramach badań przeprowadziłam pomiary tribologiczne oraz obserwacje śladów tarcia z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej. Uczestniczyłam również w analizie danych badawczych przy użyciu metod RQA, PCA i SOM oraz byłam odpowiedzialna za wizualizację większości danych. Ponadto przygotowałam pierwszą wersję manuskryptu, uczestniczyłam w interpretacji uzyskanych wyników badań, opracowałam warstwę graficzną, a także przygotowałam odpowiedzi na recenzje. Dodatkowo zajęłam się edycją manuskryptu oraz finalizacją ostatecznej wersji artykułu.

Wykazałam, że metody analizy dynamiki, takie jak ilościowa analiza powtarzalności (RQA) i samoorganizujące się sieci neuronowe (SOM), mogą być wykorzystane do identyfikacji zmienności zużycia w czasie oraz precyzyjnego rozpoznawania dominujących mechanizmów tarcia, nawet w skomplikowanych systemach tribologicznych z modyfikowaną warstwą powierzchniową. Praca ta stanowi nowe podejście do analizy danych tribologicznych, podkreślając potencjał sieci neuronowych w diagnostyce tribologicznej.

A7 Magdalena Łepicka (100%), Coating failure detection in scratch testing: a cross-sectional SEM/FIB microscopic study coupled with nonlinear analysis methods in a model titanium nitride/stainless steel system, *Wear*, 562-562, 2025, 205670, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205670>.

IF = 5,3; 200 pkt. MNiSW, liczba cytowań wg WoS: 0, publikacja monoautorska

W publikacji analizowałam mechanizmy uszkodzeń powłok TiN (azotek tytanu) na stali nierdzewnej AISI 440B w warunkach testu zarysowania, wykorzystując nowe podejście oparte o integrację mikroskopii SEM/FIB z metodami analizy nieliniowej, takimi jak

analiza kwantyfikacyjna rekurencji (RQA) i profile przekrojowe DCRP (ang. *diagonal cross-recurrence profile*). Celem było zidentyfikowanie etapów uszkodzeń powłoki i ich związku z dynamiką rejestrowanych sygnałów siły tarcia i głębokości penetracji wgłębnika.

Zaproponowana nowa metodyka badawcza umożliwiła szczegółową identyfikację dynamiki deformacji i delaminacji powłoki, dotychczas trudno rozpoznawalną z wykorzystaniem konwencjonalnych metod pomiarowo-analitycznych opartych m.in. na mikroskopii świetlnej (OM). Integracja wyników mikroskopowych SEM/FIB z analizą DCRP pozwoliła na precyzyjne określenie związków między fizycznymi zjawiskami uszkodzeń powłoki a ich odzwierciedleniem w dynamice szeregów czasowych siły stycznej (F_t) i głębokości penetracji wgłębnika (P_d). To odkrycie wskazuje, że analiza DCRP może stanowić skuteczne narzędzie do identyfikacji mechanizmów przejściowych w testach zarysowania oraz do rozróżniania powłok o zróżnicowanych właściwościach adhezyjnych i strukturalnych.

4.3. Cel naukowy publikacji i wyniki badań wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

a) Wprowadzenie do tematyki badawczej

Tribologia zajmuje się badaniem mechanizmów tarcia, zużycia oraz smarowania materiałów, co ma kluczowe znaczenie dla optymalizacji ich trwałości i wydajności. Badania tribologiczne znajdują zastosowanie w przemyśle maszynowym, lotniczym, motoryzacyjnym, a także biomedycynie, gdzie precyzyjne zrozumienie zjawisk tarcia jest niezbędne do projektowania trwałych i efektywnych systemów mechanicznych. Kluczowym elementem tych badań jest analiza właściwości materiałów funkcjonalnych, takich jak cienkie powłoki przeciwzużyciowe, które stosuje się w celu ochrony metalicznych podłoży przed zniszczeniem.

Powłoki TiN (azotku tytanu) są jednymi z najczęściej stosowanych cienkich warstw przeciwzużyciowych w różnych gałęziach przemysłu, takich jak przemysł narzędziowy, medyczny czy lotniczy [1-3]. Charakteryzują się one wysoką twardością, doskonałą odpornością na zużycie oraz chemiczną stabilnością [3, 4], co czyni je idealnym wyborem w zastosowaniach wymagających ochrony metalicznych podłoży przed ekstremalnymi warunkami pracy. Powłoki TiN, dzięki swojemu złocisto-żółtemu kolorowi, znajdują także zastosowanie dekoracyjne [3]. Dodatkowo, ich właściwości antykorozyjne i biokompatybilność sprawiają, że są szeroko wykorzystywane w implantologii oraz w produkcji narzędzi chirurgicznych, gdzie minimalizacja tarcia i odporność na zużycie mają

kluczowe znaczenie [4, 5]. Z kolei powłoki DLC (węgla diamentopodobnego, ang. *diamond-like-carbon*) zdobyły ogromną popularność dzięki swoim unikalnym właściwościom, takimi jak niski współczynnik tarcia, wysoka odporność na zużycie czy wysoki moduł sprężystości [6-10]. Dzięki swojej amorficznej strukturze węglowej, powłoki DLC oferują wyjątkowe właściwości smarne, nawet w warunkach tarcia suchego [8]. Są one szeroko stosowane w przemyśle motoryzacyjnym, gdzie ich zdolność do redukcji strat energii oraz ochrona elementów mechanicznych przekładają się na większą wydajność i trwałość pojazdów [9]. Ponadto w biomedycynie DLC znajduje zastosowanie w powłokach na implanty, zapewniając ich biokompatybilność i minimalizując ryzyko reakcji alergicznych [10]. Kombinacja tych cech czyni powłoki DLC jednym z najbardziej wszechstronnych rozwiązań w inżynierii.

Konwencjonalne metody badawcze w tribologii skupiają się na ilościowym określeniu zjawisk tarcia i zużycia, obejmując różnorodne techniki eksperymentalne. Jednym z podstawowych podejść jest analiza współczynnika tarcia (COF) oraz pomiar zużycia powierzchni badanych materiałów [3]. W testach tych często stosuje się konfiguracje kulka-tarcza (ang. *ball-on-disc*) lub pin-tarcza (ang. *pin-on-disc*), które pozwalają na dynamiczne rejestrowanie zmian COF w czasie oraz ocenę objętości ubytku materiału za pomocą profilometrii kontaktowej czy technik mikroskopii 3D [11, 12]. Chociaż metody te są szeroko stosowane i uznawane za standard w badaniach tribologicznych, dostarczają głównie uśrednionych wyników, co utrudnia szczegółową analizę dynamicznych procesów tarcia i zużycia.

Zaawansowane techniki obrazowania, takie jak skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM), mikroskopia sił atomowych (AFM) czy konfokalna mikroskopia laserowa (CLSM), odgrywają kluczową rolę w obserwacjach mikroskopowych śladów zużycia [11, 12]. Dzięki tym metodom możliwe jest badanie mechanizmów zużycia, analiza topografii powierzchni oraz identyfikacja mechanizmów uszkodzeń w skali mikro, takich jak delaminacja powłok czy pękanie. SEM w połączeniu ze spektrometrią fluorescencji rentgenowskiej z dyspersją energii (EDX) umożliwia dodatkowo analizę składu chemicznego produktów zużycia oraz procesów tworzenia się warstw wtórnych – tribofilmów, co ma kluczowe znaczenie w przypadku oceny właściwości ochronnych powłok [12-14].

Pomiar temperatury w strefie tarcia jest kolejnym istotnym aspektem badań tribologicznych [14, 15]. Wykorzystanie termopar, kamer termowizyjnych czy analizy przewodnictwa cieplnego pozwala na dokładną ocenę lokalnych zmian temperatury. Takie pomiary dostarczają cennych informacji na temat intensywności procesów tarcia, zwłaszcza

w przypadku badania powłok przeciwzużyciowych, które mogą ulegać przyspieszonemu zniszczeniu w warunkach podwyższonych temperatur.

Wytrzymałość powłok na obciążenia mechaniczne jest ponadto badana przy użyciu testów zarysowania (ang. *scratch test*), w których progresywnie zwiększane obciążenie umożliwia ocenę adhezji powłoki oraz jej odporności na pękanie [16]. Wyniki tych testów dostarczają informacji o krytycznych obciążeniach prowadzących do uszkodzenia powłoki, takich jak pękanie na granicy międzyfazowej czy spalling. Precyzyjne przekroje poprzeczne przygotowywane z wykorzystaniem technik metalografii czy zaawansowanej techniki zogniskowanych wiązek jonów i elektronów (FIB-SEM) pozwalają na szczegółowe badanie struktury uszkodzeń i mechanizmów ich rozwoju [17, 18].

Mimo licznych zalet konwencjonalnych metod badawczych, mają one istotne ograniczenia, zwłaszcza w kontekście tribologii materiałów metalicznych modyfikowanych ceramicznymi powłokami przeciwzużyciowymi. Po pierwsze, metody te zazwyczaj dostarczają informacji uśrednionych, co utrudnia analizę dynamicznych procesów zachodzących w strefie styku. Na przykład, testy w konfiguracji kulka-tarcza nie są w stanie uwzględnić mikrostrukturalnych zmian w powłoce, takich jak lokalne pęknięcia czy zjawiska delaminacji, które mogą występować na poziomie mikro- i nanoskali.

Po drugie, ograniczenia mikroskopowych technik obrazowania, takich jak SEM czy AFM, polegają na tym, że dostarczają one szczegółowych danych jedynie o stanie powierzchni po zakończeniu testu. W praktyce oznacza to, że trudno jest uchwycić dynamiczne zmiany zachodzące podczas procesu tarcia, takie jak migracja produktów zużycia czy tworzenie się nowych warstw tribologicznych. Co więcej, analiza składu chemicznego za pomocą EDX, choć przydatna, może być niewystarczająca do pełnego zrozumienia mechanizmów zużycia, które niejednokrotnie związane są ze złożonymi procesami oksydacyjnymi i termicznymi.

Dodatkowym wyzwaniem jest ocena skutków termicznych w przypadku powłok ceramicznych. Pomiary temperatury mają ograniczoną rozdzielczość czasową i przestrzenną. Wysokie temperatury generowane lokalnie mogą prowadzić do przemian fazowych, które nie są wykrywalne za pomocą klasycznych technik termograficznych.

W przypadku testów zarysowania jedną z kluczowych barier jest trudność w dokładnym określeniu momentu początkowego uszkodzenia powłoki. Chociaż testy te dostarczają informacji o krytycznych obciążeniach, nie są w stanie w pełni uchwycić procesów prowadzących do pękania i delaminacji, zwłaszcza gdy uszkodzenia mają charakter wieloetapowy i obejmują zarówno mechanizmy adhezyjne, jak i kohezję wewnętrzną powłoki.

W związku z powyższymi ograniczeniami konieczne jest rozwijanie metod badawczych, które umożliwią analizę procesów tribologicznych z uwzględnieniem ich dynamicznego charakteru. Szczególnie istotna jest identyfikacja zmienności w czasie mikrostrukturalnych zmian zachodzących w powłokach przeciwzużyciowych podczas eksploatacji. Ponadto, kluczowe znaczenie ma rozpoznanie dominujących mechanizmów tarcia i zużycia w układach z modyfikowaną warstwą powierzchniową.

b) Osiągnięte cele naukowe

W oparciu o wymienione założenia sformułowano nadrzędny cel badań naukowych, którym była identyfikacja mechanizmów tarcia i zużycia powłok przeciwzużyciowych z uwzględnieniem ich zmienności w czasie. Aby zrealizować ten cel, zaproponowano nowe podejście łączące konwencjonalne techniki pomiarowe w tribologii z metodami analizy szeregów czasowych opartymi na teorii chaosu. Wśród celów szczegółowych należy wyróżnić:

1. Analizę wpływu struktury i właściwości mechanicznych modelowych powłok ceramicznych na ich trwałość i skuteczność przeciwzużyciową. W ramach tego celu podjęto się oceny roli parametrów mechanicznych, takich jak twardość, moduł sprężystości i adhezja powłok, w kontekście ich odporności na zużycie w warunkach tarcia suchego. Istotna była również identyfikacja dominujących mechanizmów zużycia oraz ich wpływu na odporność tribologiczną podłoży metalicznych. Opracowano wskazówki dotyczące optymalnego doboru parametrów powłok w celu zwiększenia ich trwałości w aplikacjach przemysłowych. Uzyskane wyniki badań stanowiły podstawę dla opracowania procedury wykorzystania metod dynamiki nieliniowej do badania zmienności procesów tarcia i zużycia materiałów metalicznych z modyfikowaną warstwą powierzchniową.
2. Poznanie dynamiki tarcia i zużycia modelowych układów z modyfikowaną warstwą powierzchniową. Do badania zmienności procesów tarcia i zużycia w czasie opracowano nową procedurę, wykorzystującą szereg metod badawczych, w tym: metody analityczne, takie jak analiza falkowa, ilościowa analiza rekurencji (RQA) oraz analiza głównych składowych (PCA), jak i metody konwencjonalne, takie jak pomiary tribologiczne w układzie kulka-tarcza czy obserwacje mikroskopowe. W celu automatycznej klasyfikacji zjawisk tarciovych wykorzystano ponadto samoorganizujące się sieci neuronowe (SOM). Dokonano integracji metod analizy sygnałów z konwencjonalnymi metodami badawczymi w tribologii w celu precyzyjnego monitorowania zmienności układów tribologicznych w czasie.

3. Opracowanie metody oceny progresji zużycia powłok przeciwzużyciowych na podstawie przebiegów czasowych wybranych sygnałów tribologicznych. Aby zrealizować ten cel, połączono zaawansowane techniki mikroskopowe (SEM, FIB) z nieliniowymi metodami analizy sygnałów (DCRP, RQA). Zaproponowano nowe wskaźniki diagnostyczne umożliwiające wczesne wykrywanie oznak degradacji powłok przeciwzużyciowych.

c) Materiał badawczy

W badaniach wykorzystano dwie powłoki przeciwzużyciowe: azotek tytanu (TiN) oraz węgiel diamentopodobny (DLC), które naniesiono na trzy rodzaje podłoży metalicznych: nierdzewną stal austenityczną AISI 316LVM, nierdzewną stal martenzytyczną AISI 440B oraz dwufazowy stop tytanu Ti6Al4V. Powłoki zostały osadzone różnymi metodami w celu zapewnienia ich odpowiedniej przyczepności i jednorodności na podłożach o odmiennych właściwościach mechanicznych. Przygotowanie podłoży oraz dobór metod nanoszenia powłok miały kluczowe znaczenie dla zapewnienia ich trwałości i skuteczności w warunkach eksploatacyjnych. Uwzględnienie różnych materiałów bazowych oraz metod osadzania umożliwiło kompleksową ocenę właściwości ochronnych obu rozpatrywanych powłok.

Powłoka TiN została naniesiona metodą katodowego odparowania łukowego (CAE-PVD), w której źródłem azotku tytanu jest target tytanowy odparowywany w atmosferze mieszaniny gazów Ar + N₂. Proces ten prowadzono w warunkach próżni, co pozwoliło na uzyskanie powłok o jednorodnej grubości i dobrej przyczepności do podłoża.

Powłoka DLC została osadzona w procesie hybrydowym, łączącym magnetronowe rozpylanie katodowe (MS) oraz osadzanie chemiczne z fazy gazowej wspomaganego plazmą (PACVD). Pierwszym etapem procesu było nałożenie cienkiej warstwy adhezyjnej chromu (Cr), następnie osadzono warstwę pośrednią W:DLC (wolfram-DLC), a na końcu wierzchnią warstwę czystego DLC. Taka konfiguracja pozwoliła na uzyskanie wysokiej odporności na zużycie oraz optymalnej przyczepności powłoki do podłoża.

Nierdzewna stal austenityczna AISI 316LVM została przygotowana poprzez szlifowanie i polerowanie mechaniczne w celu uzyskania odpowiedniej chropowatości powierzchni. Następnie została poddana procesowi czyszczenia chemicznego oraz ultradźwiękowego w kąpieli alkalicznej, co miało na celu usunięcie wszelkich zanieczyszczeń oraz poprawę adhezji powłok.

Stal nierdzewna AISI 440B, jako stal martenzytyczna o podwyższonej twardości, została poddana obróbce mechanicznej, a następnie dokładnemu czyszczeniu w celu

zapewnienia optymalnych warunków nanoszenia powłok. Proces przygotowania powierzchni obejmował również odtłuszczenie oraz aktywację chemiczną, co pozwoliło na poprawę adhezji warstw ochronnych.

Stop tytanu Ti6Al4V został przygotowany w podobny sposób jak stale nierdzewne, jednak z uwzględnieniem specyficznych właściwości tytanu, takich jak jego skłonność do pasywacji. W celu zapewnienia wysokiej jakości osadzonych powłok, powierzchnia stopu została aktywowana za pomocą trawienia chemicznego oraz dokładnego czyszczenia w środowisku kontrolowanym.

d) Omówienie prac naukowych

Prowadzone badania naukowe wpisują się w nurt nowoczesnej inżynierii mechanicznej, której jednym z celów jest poprawa właściwości użytkowych powłok ochronnych stosowanych w warunkach intensywnego obciążenia tribologicznego. Szczególną uwagę poświęcono ceramicznym powłokom TiN i DLC, które dzięki swoim unikalnym właściwościom fizykochemicznym znajdują zastosowanie w szerokim zakresie aplikacji przemysłowych – od narzędzi skrawających po biomateriały wykorzystywane w implantologii. Ważnym zagadnieniem badawczym było określenie dominujących mechanizmów tarcia i degradacji powłok TiN i DLC i poznanie dynamiki ich zużycia. Celem badań była również analiza wpływu twardości, modułu sprężystości oraz adhezji powłok do podłoża na ich odporność na zużycie. W prezentowanym cyklu publikacji można wyróżnić trzy główne obszary badawcze, realizowane w kolejności odpowiadającej uprzednio sformułowanym celom naukowym.

Analiza wpływu struktury i właściwości mechanicznych modelowych powłok ceramicznych na ich trwałość i skuteczność przeciwzużyciową

Badania prowadzone w ramach niniejszego obszaru badawczego koncentrowały się na analizie wpływu struktury i właściwości mechanicznych ceramicznych powłok ochronnych na ich trwałość i skuteczność przeciwzużyciową w warunkach tarcia. W szczególności oceniano, w jaki sposób parametry mechaniczne powłok TiN i DLC, takie jak twardość, moduł sprężystości oraz adhezja do podłoża, wpływają na ich odporność na zużycie tribologiczne. Przeprowadzone badania miały na celu określenie dominujących mechanizmów tarcia i degradacji powłok oraz ich wpływu na trwałość podłoży metalicznych. W tym celu zastosowano zestaw konwencjonalnych metod badawczych, które pozwoliły na kompleksową ocenę właściwości mechanicznych i tribologicznych powłok oraz ich efektywności

w modelowych warunkach tarcia. Interdyscyplinarne zadania badawcze prowadzone w ramach tego zagadnienia były niezbędne do opracowania procedury wykorzystania metod opartych na teorii chaosu w analizach dynamiki procesów tarcia i zużycia materiałów z modyfikowaną warstwą powierzchniową.

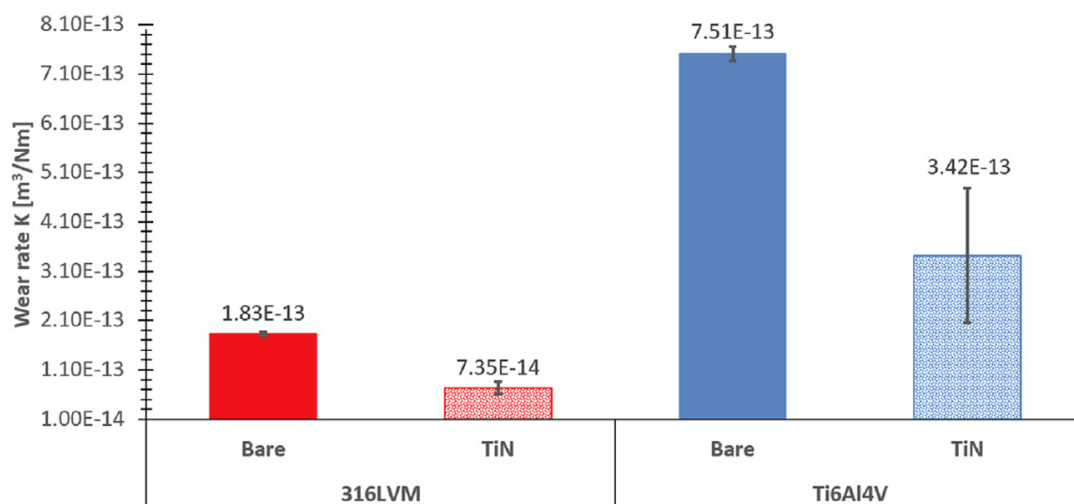
Publikacja **A1** dostarcza szerokiego przeglądu metod badawczych wykorzystywanych w tribologii powłok ochronnych, zwracając uwagę na kluczowe aspekty ich oceny. We współczesnej literaturze tribologicznej szczególną uwagę zwraca się na korelację pomiędzy odpornością na zużycie powłoki a stosunkiem twardości (H) do modułu Younga (E) powłoki. Wskazano, że pomiary nanoindentacyjne odgrywają kluczową rolę w kontroli zużycia, umożliwiając wyznaczenie wartości trzech istotnych współczynników: H/E , H^3/E^2 oraz $E_{\text{powłoki}}/E_{\text{podłoża}}$. Według licznych badań wyższe wartości współczynników H/E oraz H^3/E^2 powinny korelować z wyższą odpornością na zużycie powłoki, natomiast stosunek $E_{\text{powłoki}}/E_{\text{podłoża}}$ musi być dostosowany do właściwości mechanicznych zarówno powłoki, jak i podłoża, aby zapewnić ich optymalną trwałość. Przeprowadzony przegląd literatury wykazał, że zbyt duże niedopasowanie modułów sprężystości powłoki i podłoża prowadzi do intensyfikacji procesów degradacji, takich jak pękanie i delaminacja. Ostatecznie, choć wysokie wartości współczynników H/E i H^3/E^2 są pożądane, ich interpretacja powinna uwzględniać również inne czynniki, takie jak interakcja powłoki z podłożem oraz warunki eksploatacyjne, co stanowiło punkt wyjścia do dalszych badań opisanych w pracach **A2** i **A3**.

Analiza wyników badań przeprowadzonych w ramach publikacji **A2** dostarczyła nowych informacji na temat odporności powłok TiN na zużycie tribologiczne oraz ich skuteczności w ochronie powierzchni metalicznych przed degradacją. Publikacja ta, ciesząca się znacznym zainteresowaniem w środowisku naukowym, była do tej pory cytowana 137 razy (Google Scholar, 01.02.2025 r.), co podkreśla jej znaczenie w badaniach nad trwałością powłok ceramicznych.

Skuteczność przeciwzużyciowa ochronnych powłok zależy m.in. od stopnia dopasowania właściwości mechanicznych powłoki i podłoża, dlatego w badaniach porównano powłoki TiN osadzone na dwóch różnych podłożach metalicznych: stali nierdzewnej 316LVM oraz stopie tytanu Ti6Al4V. Prowadzono m.in. pomiary tribologiczne w warunkach tarcia suchego w konfiguracji kulka-tarcza, pomiary nanoindentacji powłok i podłoży oraz testy zarysowania.

W przypadku stali nierdzewnej 316LVM powłoka TiN skutecznie ograniczyła zużycie tribologiczne, znacznie redukując ślady tarcia oraz zmniejszając objętościowe ubytki materiału (Rys. 1). Jednak jej skuteczność była ograniczona przez możliwość odwarstwiania powłoki

ochronnej w warunkach wysokich naprężeń, co wynikało z występowania różnic w zjawiskach deformacji plastycznej między podłożem a powłoką. W szczególności wykazano, że w początkowej fazie testów tribologicznych powłoka TiN wykazywała bardzo stabilne właściwości ochronne, ale wraz ze wzrostem liczby cykli obciążeń tarciovych, pojawiały się pierwsze oznaki jej delaminacji.

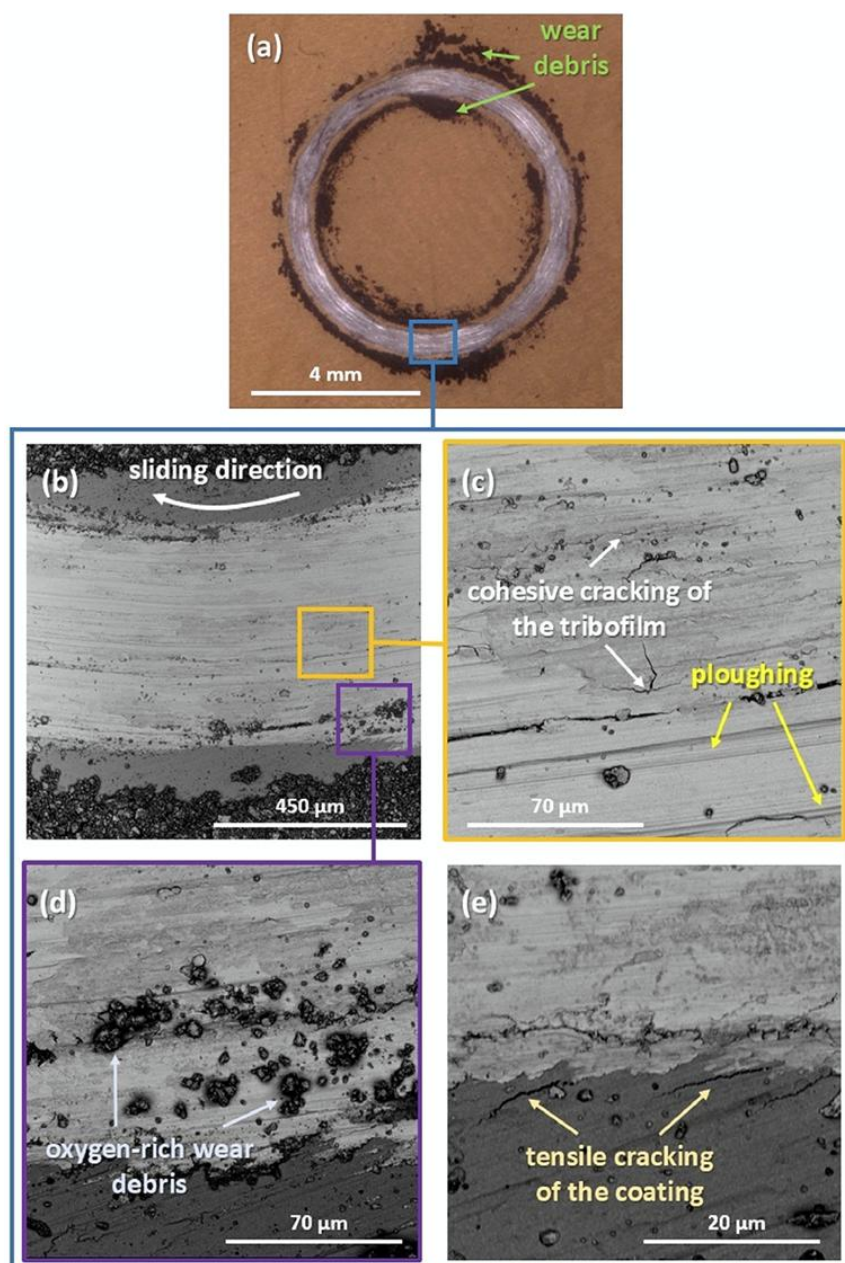


Rys. 1. Wartości współczynników intensywności zużycia badanych materiałów; liczba próbek w ramach każdej pary tarciovej $n = 6$. Źródło: **A2**.

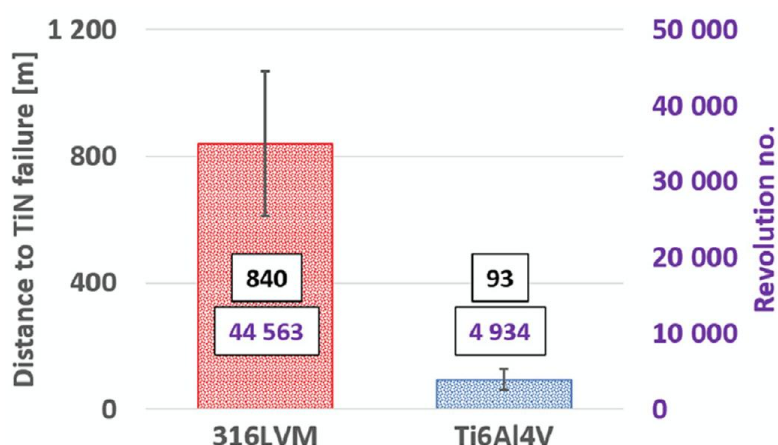
Dla stopu tytanu Ti6Al4V powłoka TiN również przyczyniła się do ograniczenia procesów niszczenia, lecz jednocześnie wykazywała tendencję do powstawania pęknięć w obszarach zwiększonej koncentracji naprężeń (Rys. 2). Badania wykazały, że w przypadku TiN na stopie tytanu Ti6Al4V ryzyko inicjacji pęknięć było wyższe niż w przypadku stali nierdzewnej, co sugeruje, że dla poprawy trwałości powłok na tym podłożu konieczne jest dalsze dopasowanie ich właściwości mechanicznych, szczególnie w zakresie modulowania struktury warstwowej i grubości powłoki.

Wyniki badań jednoznacznie wskazały, że dopasowanie modułu sprężystości powłoki do podłoża miało kluczowy wpływ na trwałość układu tribologicznego. Powłoki TiN naniesione na stali nierdzewnej 316LVM wykazywały wyższą odporność na zużycie niż na stopie tytanu Ti6Al4V, co wynikało z lepszego dopasowania parametrów mechanicznych powłoki do podłoża. W przypadku stali nierdzewnej powłoka TiN lepiej radziła sobie z przenoszeniem obciążeń mechanicznych, co skutkowało dłuższą stabilnością ochronną (Rys. 3) i obniżeniem oporów ruchu w dłuższej perspektywie użytkowania. Podkreślono również, że kluczowe znaczenie dla dalszej optymalizacji układów tribologicznych TiN-metal ma nie tylko

dopasowanie modułu sprężystości, ale także sposób osadzania powłoki i jakość obróbki wstępnej podłoża. Wyniki te wskazują na występowanie znaczących różnic w dynamice tarcia i zużycia tej samej powłoki naniesionej na różnych podłożach. Rezultaty mają istotne znaczenie dla inżynierii powierzchni i optymalizacji procesów nanoszenia powłok TiN, szczególnie w kontekście zastosowań wymagających wysokiej odporności na ścieranie oraz stabilności w warunkach tarcia suchego.



Rys. 2. Obrazy mikroskopowe śladu tarcia uzyskanego na stopie Ti6Al4V modyfikowanego powłoką TiN; stan po przebyciu drogi tarcia równej 263,7 m. Obrazy uzyskane technikami mikroskopii świetlnej (a) i skaningowej mikroskopii elektronowej (b-e). Źródło: **A2**.

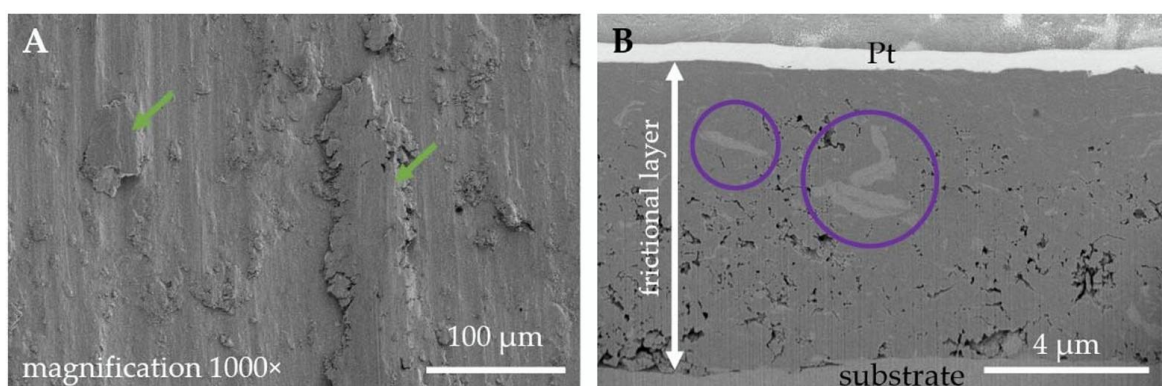


Rys. 3. Trwałość eksploatacyjna powłok TiN osadzonych na stali nierdzewnej 316LVM i stopie tytanu Ti6Al4V; liczba powtórzeń testu $n = 6$. Źródło: A2.

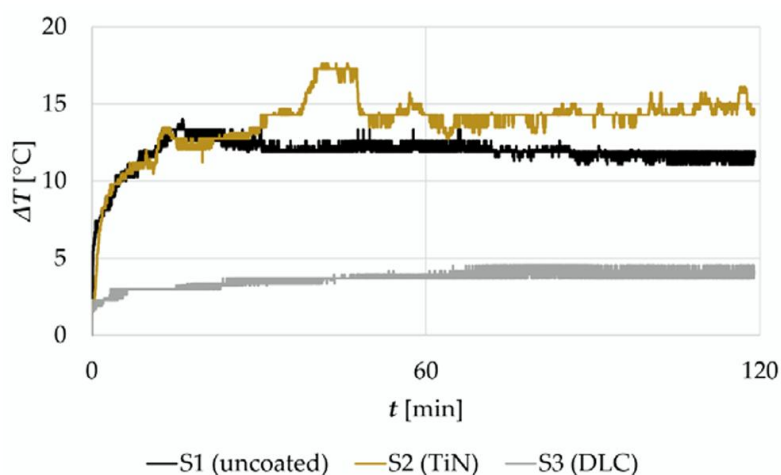
Z kolei, analiza wyników badań przeprowadzonych w ramach pracy A3 dostarczyła istotnych informacji na temat właściwości tribologicznych powłok TiN i DLC oraz ich wpływu na procesy tarcia i zużycia tribologicznego w warunkach tarcia suchego. W badaniach oceniono zarówno wpływ samego naniesienia powłoki na parametry tribologiczne układu, jak i procesy związane z powstawaniem tribofilmów oraz generowaniem ciepła tarcia. Przeprowadzone eksperymenty objęły analizę zachowania powłok TiN i DLC osadzonych na trzech różnych podłożach metalicznych: nierdzewnej stali austenitycznej 316L, nierdzewnej stali martenzytycznej 440B oraz stopie tytanu Ti6Al4V, co pozwoliło na ocenę wpływu struktury i właściwości mechanicznych podłoża na skuteczność ochronną warstw przeciwzużyciowych.

Wyniki badań wykazały, że powłoki TiN i DLC odgrywają istotną rolę w modyfikacji właściwości tribologicznych powierzchni metalicznych, jednak ich efektywność ochronna zależy zarówno od rodzaju powłoki, jak i od podłoża, na którym zostały naniesione. Powłoka TiN charakteryzowała się wyraźnym wpływem na procesy powstawania tribofilmów oraz generowanie ciepła w strefie tarcia. W badaniach wykazano, że w pewnych układach tribologicznych, nawet po zużyciu powłoki TiN i jej usunięciu z powierzchni, pozostające w strefie tarcia produkty zużycia wciąż oddziaływały na układ, co prowadziło do intensyfikacji zjawiska tworzenia bogatych w tlen warstw wtórnych (Rys. 4) a w konsekwencji, nagrzewania powierzchni kontaktujących się elementów. Efekt ten był szczególnie widoczny dla powłoki TiN na podłożu ze stali nierdzewnej 316L, gdzie po zniszczeniu powłoki nastąpił wzrost temperatury w obszarze tarcia (Rys. 5). Z kolei, w przypadku powłoki TiN na stali nierdzewnej

440B, proces zużycia prowadził do zmiany charakteru tarcia, jednak bez gwałtownych zmian w nagrzewaniu się elementów tribologicznych.



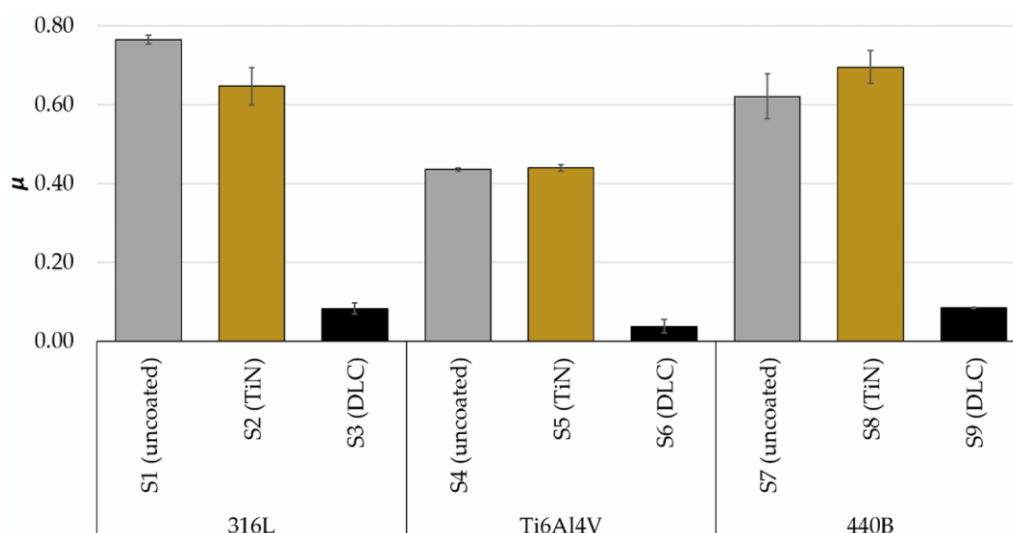
Rys. 4. Obrazy SEM śladu tarcia uzyskanego na austenitycznej stali nierdzewnej 316L pokrytej powłoką TiN: (A) stan powierzchni, (B) przekrój poprzeczny FIB-SEM śladu zużycia. Źródło: A3.



Rys. 5. Oscylacje temperatury pary tarciowej w czasie, zarejestrowane dla próbek wykonanych ze stali 316L: niemodyfikowanych powierzchniowo, oraz modyfikowanych powłokami: TiN lub DLC. Źródło: A3.

Powłoki DLC wykazały zupełnie inny charakter zachowania w warunkach tarcia suchego. W przeciwieństwie do TiN, nawet w przypadku lokalnych uszkodzeń powłoki DLC, jej właściwości przeciwcierne pozostawały zachowane, co przekładało się na stabilny i niski współczynnik tarcia (Rys. 6) oraz ograniczenie efektu nagrzewania powierzchni. Analiza przeprowadzona dla powłok DLC osadzonych na stopie tytanu Ti6Al4V wykazała, że powłoka

ta skutecznie ograniczała tarcie i redukowała intensywność zużycia w porównaniu do powierzchni niemodyfikowanej. Wykazano również, że dzięki swojej strukturze, powłoka DLC efektywnie przeciwdziałała powstawaniu grubych tribofilmów mogących negatywnie wpływać na stabilność procesu tarcia (Rys. 7).



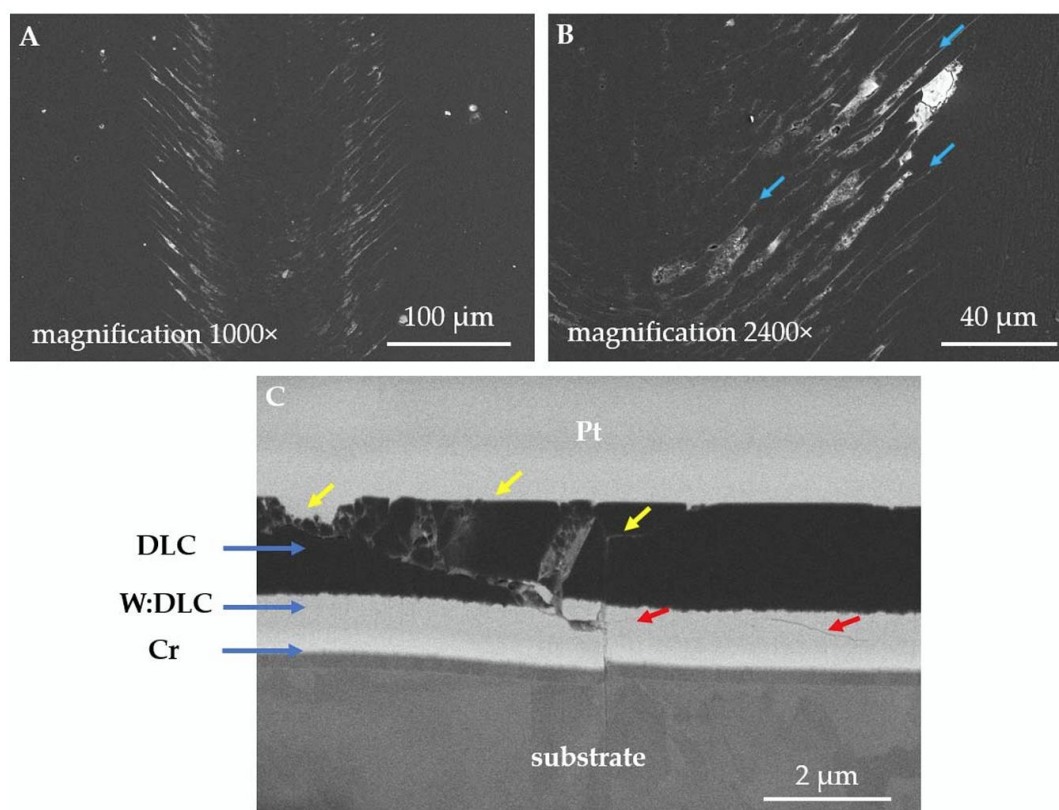
Rys. 6. Średnie wartości współczynnika tarcia zarejestrowane dla: nierdzewnej stali austenitycznej 316L, stopu tytanu Ti6Al4V i nierdzewnej stali martenzytycznej 440B;

$n = 5$ w każdej serii próbek. Źródło: **A3**.

Dodatkowo, przeprowadzone eksperymenty umożliwiły ocenę wpływu zmian temperatury na zachowanie powłok ochronnych oraz ich wpływ na nagrzewanie się elementów współpracujących w układzie tribologicznym. Wyniki wykazały, że w przypadku powłok TiN nagrzewanie powierzchni tarcia było intensywniejsze niż w układach z DLC (Rys. 5), co wynikało zarówno z odmiennych właściwości termicznych tych powłok, jak i ze sposobu ich zużycia. Powłoka DLC wykazywała stabilność temperaturową i skutecznie ograniczała nagrzewanie powierzchni, co było szczególnie istotne w kontekście jej zastosowania w elementach pracujących w warunkach dużych obciążeń i długotrwałego tarcia suchego.

Najważniejsze wnioski wynikające z badań przeprowadzonych w ramach pracy **A3** wskazują, że powłoka TiN, nawet po częściowym zużyciu, wciąż wpływa na wzrost temperatury w strefie tarcia, co wynika z jej oddziaływania na procesy powstawania tribofilmów oraz wytwarzania ciepła w kontakcie tarciovym. W przeciwieństwie do TiN, powłoki DLC wykazują znacznie niższy współczynnik tarcia, co przekłada się na skuteczniejsze ograniczenie zużycia tribologicznego podłoża i wydłużenie jego trwałości.

Efektywność działania powłok TiN i DLC jest ściśle związana z rodzajem podłoża, na którym zostały osadzone, co zostało szczególnie uwidocznione w przypadku stopu tytanu Ti6Al4V oraz stali nierdzewnej 316L, gdzie zaobserwowano różnice w ich zachowaniu w zależności od struktury podłoża oraz jego parametrów mechanicznych. Dodatkowo, wyniki badań wykazały, że powłoki DLC charakteryzują się większą stabilnością termiczną niż TiN, co czyni je bardziej odpowiednimi do zastosowań wymagających minimalizacji procesów wytwarzania ciepła i ograniczenia oporów ruchu w wyniku tarcia. Istotnym wnioskiem jest również to, że procesy tribochemiczne oraz mechanizmy zużycia powłok TiN i DLC różnią się znacząco, co sugeruje konieczność ich optymalizacji w kontekście konkretnych zastosowań w inżynierii mechanicznej. Uzyskane wyniki prac badawczych wskazały na potrzebę dogłębnego badania dynamiki zużycia cienkich powłok przeciwzużyciowych w warunkach tarcia suchego.



Rys. 7. Obrazy SEM śladu tarcia uzyskanego na nierdzewnej stali austenitycznej 316L modyfikowanej powłoką DLC: (a, b) stan powierzchni śladu tarcia, (c) przekrój śladu tarcia uzyskany techniką SEM-FIB. Źródło: A3.

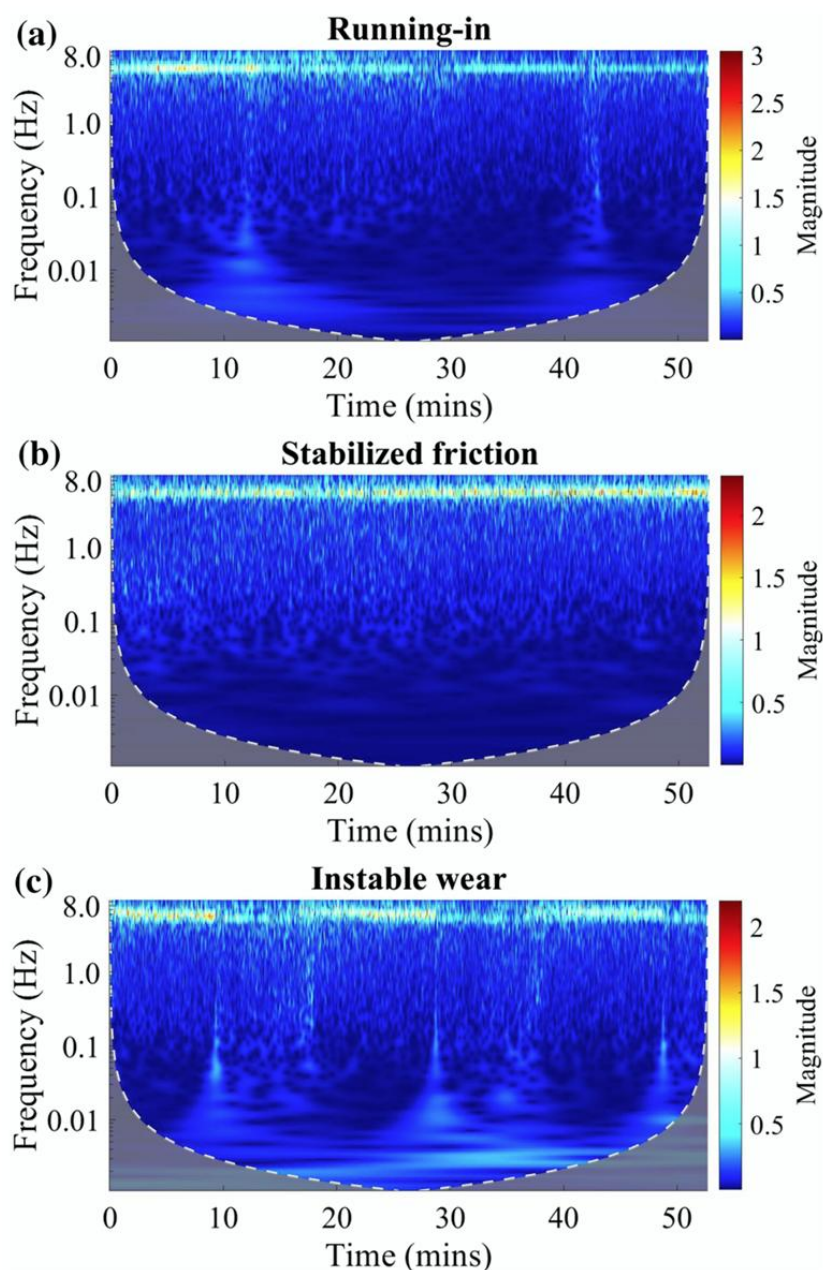
Uzyskane w ramach pierwszego obszaru badawczego wyniki badań dostarczają nowych informacji na temat zmienności tarcia i zużycia powłok TiN i DLC w różnych układach

tribologicznych. Wykazano, że skuteczność powłok przeciwzużyciowych zależy nie tylko od ich twardości, ale także od dopasowania właściwości mechanicznych do podłoża, co ma kluczowe znaczenie dla ich trwałości w warunkach eksploatacyjnych. Odkrycia dotyczące stabilności termicznej oraz wpływu powłok na procesy powstawania tribofilmów otwierają nowe perspektywy w optymalizacji metod modyfikacji powierzchniowej stosowanych w przemyśle. Uzyskane wyniki stanowiły podstawę dla rozwoju procedury oceny dynamiki tarcia i zużycia układów z modyfikowaną warstwą powierzchniową.

Wykorzystanie metod dynamiki nieliniowej do analizy procesów tarcia i zużycia w układach z modyfikowaną warstwą powierzchniową

Współczesna tribologia dąży do lepszego zrozumienia procesów tarcia i zużycia poprzez rozwój zaawansowanych metod diagnostyki. Konwencjonalne podejścia, polegające na analizie średnich wartości współczynnika tarcia (COF) czy objętościowego zużycia materiałów, okazują się niewystarczające do identyfikacji dynamicznych zmian w układach tribologicznych, zwłaszcza w kontekście przejść między różnymi fazami tarcia i zużycia. W odpowiedzi na te wyzwania opracowano procedurę wykorzystania metod dynamiki nieliniowej do badania zmiennych w czasie procesów tarcia i zużycia powłok przeciwzużyciowych. W ramach tego obszaru badawczego podjęto się diagnostyki uszkodzeń powłok ochronnych w czasie i identyfikacji przejść między dominującymi typami zużycia. Zastosowano transformację falkową (ang. *wavelet analysis*), ilościową analizę rekurencji (RQA, ang. *recurrence quantification analysis*), analizę głównych składowych (PCA, ang. *principal component analysis*), a także sieci neuronowe typu *self-organizing map* (SOM).

Analiza wyników badań przeprowadzonych w ramach pracy **A4** dostarczyła nowych informacji na temat możliwości zastosowania transformacji falkowej w diagnostyce dynamicznych zmian w systemach tribologicznych. Publikacja ta stanowi wkład w rozwój metod analizy szeregów czasowych rejestrowanych w badaniach tribologicznych, oferując nowe podejście do identyfikacji przejściowych stanów tarcia i zużycia powłok ochronnych. Badania przeprowadzono dla powłok TiN naniesionych na stali nierdzewnej 316LVM, testowanych w warunkach tarcia suchego w konfiguracji kulka – tarcza. Dzięki zastosowaniu ciągłej transformacji falkowej (CWT, ang. *continuous wavelet transform*) możliwe było przeprowadzenie szczegółowej analizy fluktuacji współczynnika tarcia w różnych skalach czasowych, co pozwoliło na identyfikację kluczowych etapów procesu tarcia oraz momentów przejścia między różnymi trybami zużycia (Rys. 8).



Rys. 8. Wyniki analizy falkowej szeregów czasowych zmian współczynnika tarcia:

(a) docieranie, (b) stabilne tarcie, (c) niestabilne zużycie powłoki. Źródło: **A4**.

Jednym z najważniejszych wyników uzyskanych w ramach badań było określenie trzech wyraźnych faz tarcia: okresu docierania (ang. *running-in*), stabilnego tarcia oraz niestabilnego zużycia powłoki. W pierwszej fazie testów zaobserwowano intensyfikację niskoczęstotliwościowych oscylacji COF, które wynikały z adaptacji powierzchni tribologicznych do kontaktu. Ta faza była szczególnie istotna w kontekście powłok TiN, ponieważ ich powierzchnia początkowo ulegała odkształceniom i degradacji w skali mikro, wpływając na początkowe właściwości tribologiczne układu. W fazie stabilnego tarcia wartości

współczynnika tarcia ulegały wygładzeniu, co sugerowało ustabilizowanie się procesu zużycia. Ostatnia faza, związana ze zniszczeniem powłoki, charakteryzowała się narastającą amplitudą fluktuacji COF, co wskazywało na postępującą utratę zdolności ochronnych warstwy TiN i przejście do intensywnego zużycia.

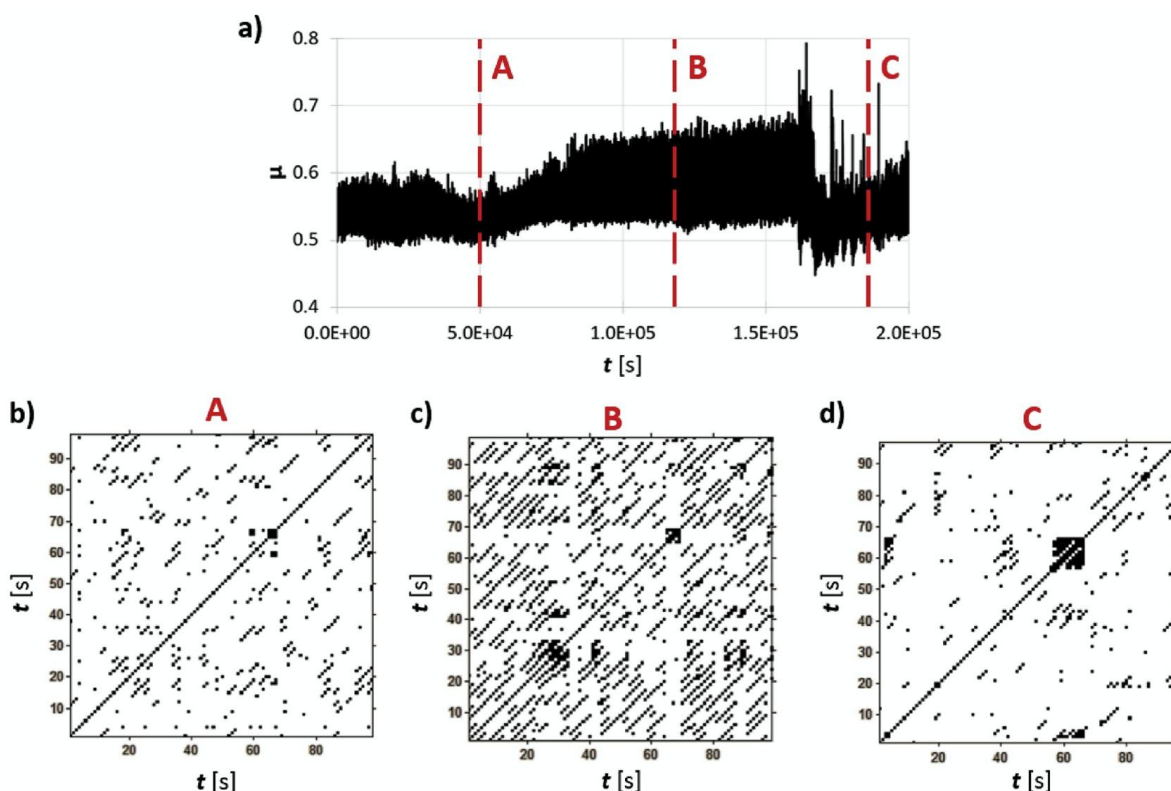
Dzięki zastosowaniu transformacji falkowej udało się nie tylko wykryć te trzy fazy, ale także przeanalizować zmiany w strukturze sygnału COF w kontekście czasu i częstotliwości. W badaniach wykazano, że w końcowej fazie eksploatacji powłoki pojawiają się wysokoczęstotliwościowe oscylacje COF, które mogą być związane z powstawaniem i propagacją lokalnych uszkodzeń. Analiza widmowa sygnału potwierdziła, że w miarę zużycia powłoki dochodzi do stopniowej zmiany dominujących częstotliwości oscylacji, co można wykorzystać jako predykcyjny wskaźnik nadchodzącego krytycznego uszkodzenia warstwy ochronnej.

Jednym z kluczowych wniosków wynikających z badań było wykazanie, że analiza falkowa dostarcza nie tylko informacji o bieżącym stanie zużycia powłoki, ale także pozwala na przewidywanie momentu jej uszkodzenia poprzez śledzenie wzrostu składowych niskoczęstotliwościowych w widmie sygnału. Jest to szczególnie istotne w kontekście wdrażania metod predykcyjnej diagnostyki układów tribologicznych, gdzie możliwość wcześniejszego wykrycia degradacji powłoki może pozwolić na efektywne zarządzanie jej eksploatacją oraz optymalizację harmonogramów konserwacji. Wyniki uzyskane w ramach pracy **A4** wskazują na duży potencjał zastosowania transformacji falkowej w analizie procesów tribologicznych i sugerują, że metoda ta potencjalnie może być wykorzystywana w przemysłowych systemach monitorowania stanu technicznego powłok ochronnych.

W konsekwencji, eksplorowałam kolejne metody analizy dynamiki szeregów czasowych uzyskiwanych w pomiarach tribologicznych. Analiza wyników badań przeprowadzonych w ramach publikacji **A5** dostarczyła istotnych informacji na temat zastosowania ilościowej analizy rekurencji (RQA) oraz analizy głównych składowych (PCA) w diagnostyce dynamicznych zmian zachodzących w systemach tribologicznych. Publikacja ta stanowi rozszerzenie wcześniejszych badań nad wykorzystaniem transformacji falkowej do oceny stanów tarcia (**A4**), wprowadzając metody analizy sygnałów pozwalające na identyfikację przejść między stabilnym a niestabilnym trybem zużycia powłok ochronnych. W badaniach skoncentrowano się na analizie układów tribologicznych z powłokami TiN osadzonymi na stali nierdzewnej 316LVM oraz stopie tytanu Ti6Al4V, testowanych w warunkach tarcia suchego. Wyniki badań wykazały, że typowe metody analizy współczynnika tarcia (COF) mogą być niewystarczające do dokładnego uchwycenia dynamiki

procesów tarcia i zużycia, szczególnie w fazach przejściowych, gdzie oscylacje COF mogą przyjmować nieregularny charakter.

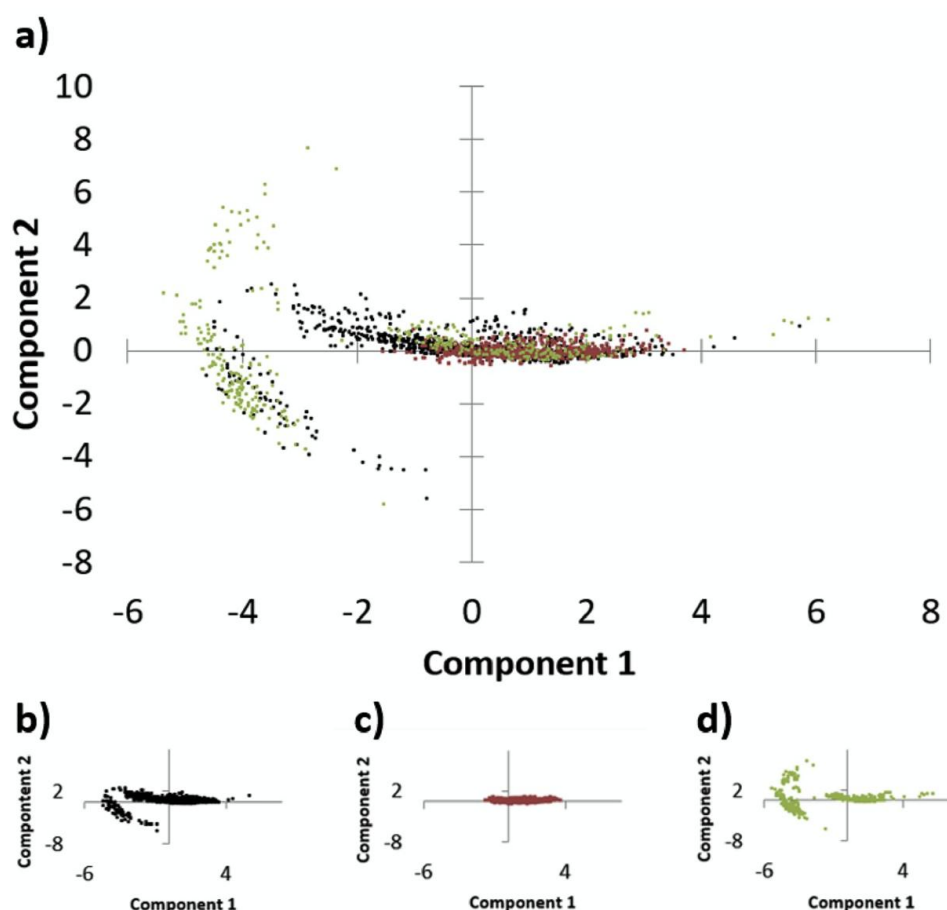
Zastosowanie RQA umożliwiło dokładną analizę rekurencyjnych wzorców w sygnale COF (Rys. 9), co pozwoliło na identyfikację dominujących mechanizmów tarcia oraz ich wzajemnych przejść. Badania wykazały, że na początku testu tribologicznego współczynnik tarcia jest chaotyczny, co wynika z procesu wzajemnego docierania się powierzchni trących. Następnie, w fazie ustabilizowanego zużycia, obserwuje się bardziej powtarzalny charakter współczynnika tarcia, związany ze stabilnym kontaktem powierzchni trących. Jednak w miarę postępu zużycia i narastania uszkodzeń w powłoce TiN, dynamika sygnału współczynnika tarcia ulega zmianie, ponownie przyjmując chaotyczny charakter. Analiza rekurencyjna pozwoliła na ilościowe określenie momentu, w którym układ przechodzi ze stanu stabilnego do niestabilnego zużycia, co ma kluczowe znaczenie dla predykcyjnej diagnostyki systemów tribologicznych.



Rys. 9. Analiza rekurencyjna współczynnika tarcia: (a) szereg czasowy uzyskany na podstawie zarejestrowanego sygnału jako funkcji procesu tarcia, (b) wykresy rekurencyjne szeregów czasowych uzyskanych w zakresach odpowiadających: (A) docieraniu, (B)

stabilnemu zużyciu, (C) niestabilnemu zużyciu, następującemu po całkowitym zniszczeniu powłoki. Źródło: A5.

Z kolei analiza PCA (Rys. 10) pozwoliła na redukcję wymiarowości danych i identyfikację najważniejszych składowych wpływających na dynamikę procesu tarcia. Dzięki zastosowaniu tej metody możliwe było wyodrębnienie kluczowych parametrów, które charakteryzują przejścia między różnymi typami zużycia. Wyniki wykazały, że dominującą rolę w klasyfikacji zjawisk tarciovo-zużyciowych odgrywają zmiany w amplitudzie oscylacji COF oraz nieregularność sekwencji zdarzeń rekurencyjnych wykrytych za pomocą RQA. W szczególności, analiza PCA wykazała, że w fazie stabilnego tarcia układ wykazuje względnie niską liczbę gwałtownych fluktuacji COF, natomiast w fazie zniszczenia powłoki pojawia się wyraźny wzrost nieregularności w przebiegu sygnału, co wskazuje na zwiększoną dynamikę procesów zużycia.



Rys. 11. Dwuwymiarowa reprezentacja dynamiki zmian współczynnika tarcia w czasie:

(a) dynamika całego sygnału, zarejestrowanego w zakresie 0 - $2,00 \times 10^5$ s, (b) docieranie pary

tarciowej ($0 - 0,92 \times 10^5$ s), (c) stabilne zużycie ($0,92 \times 10^5 - 1,61 \times 10^5$ s), (d) całkowite zniszczenie powłoki ochronnej i odsłonięcie materiału podłoża ($0,92 \times 10^5 - 1,61 \times 10^5$ s).

Źródło: **A5**.

Jednym z najistotniejszych wyników uzyskanych w ramach publikacji **A5** było wykazanie, że klasyczne metody analizy średnich wartości współczynnika tarcia mogą nie uwzględniać subtelnych zmian w dynamice systemu, które są wykrywalne innymi metodami analitycznymi. Metody RQA i PCA umożliwiły wykrycie istotnych zmian w zachowaniu powłoki TiN na długo przed jej krytycznym uszkodzeniem, co otwiera nowe możliwości w zakresie monitorowania stanu technicznego systemów tribologicznych oraz ich diagnostyki predykcyjnej.

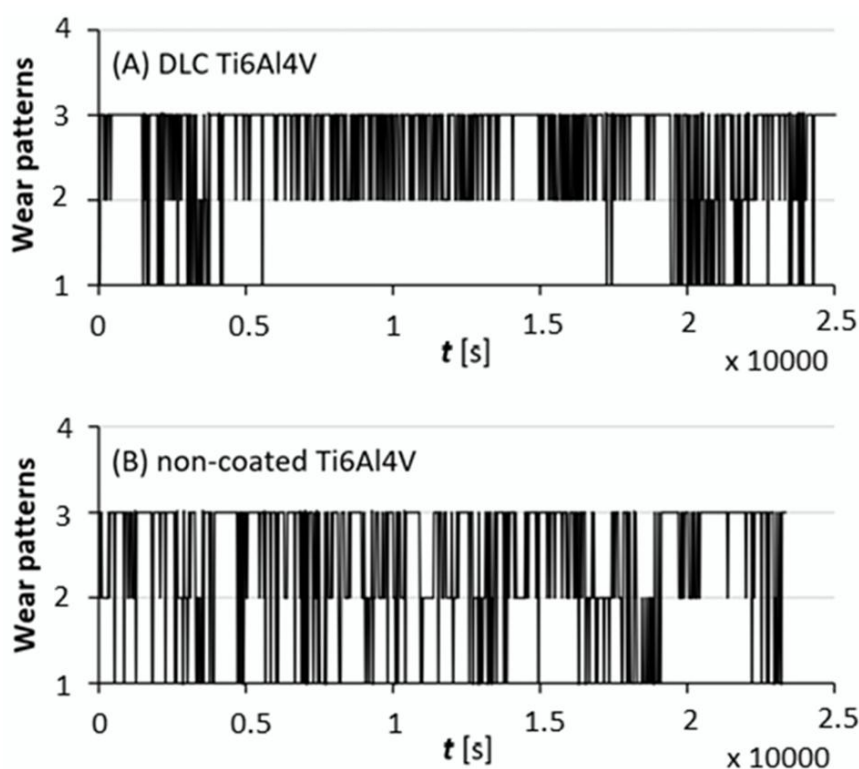
Wyniki badań przeprowadzonych w ramach pracy **A5** mają istotne znaczenie dla rozwoju zaawansowanych metod analizy sygnałów tribologicznych. Po raz pierwszy wykazano, że zastosowanie ilościowej analizy rekurencji (RQA) pozwala na precyzyjne wykrywanie przejściowych stanów zużycia w układach z modyfikowaną warstwą powierzchniową. Ponadto, zastosowanie analizy PCA umożliwiło identyfikację dominujących składowych dynamiki tarcia, co pozwala na efektywniejsze przewidywanie momentów przejścia między stabilnym a niestabilnym zużyciem powłok ochronnych. Odkrycia te wskazują, że metody analizy sygnałów oparte na teorii chaosu mogą znaleźć zastosowanie w predykcyjnej diagnostyce układów tribologicznych.

Kolejna publikacja, **A6**, stanowi kontynuację i rozwinięcie badań nad dynamicznymi zmianami w systemach tribologicznych, zapoczątkowanych w pracy **A5**. Podczas gdy publikacja **A5** koncentrowała się na zastosowaniu ilościowej analizy rekurencji (RQA) i analizy głównych składowych (PCA) do rozpoznania dynamiki procesów zużycia powłok ochronnych, w kolejnej fazie badań podjęto próbę identyfikacji dominujących faz tarcia oraz ich dynamiki w sposób autonomiczny. W pracy **A6** wykorzystano samoorganizujące się sieci neuronowe (SOM), co stanowi istotny krok w kierunku automatyzacji analizy tribologicznej.

Badania przeprowadzono w warunkach tarcia suchego dla powłok DLC osadzonych na stopie tytanu Ti6Al4V, koncentrując się na monitorowaniu zmian współczynnika tarcia (COF) w czasie. Wcześniejsze badania wykazały, że konwencjonalna analiza statystyczna parametrów tribologicznych często pomija subtelne niuanse w dynamice procesu zużycia, a metody takie jak RQA i PCA pozwalają na rozpoznanie zmienności procesów tribologicznych. Jednakże, mimo ich skuteczności w analizie danych, nadal istniała potrzeba opracowania metody

pozwalającej na bieżącą klasyfikację stanów tribologicznych w sposób adaptacyjny. Zastosowanie sieci neuronowych SOM pozwoliło na przełamanie tych ograniczeń i stworzenie narzędzia umożliwiającego identyfikację wzorców tarcia oraz ich ewolucji w czasie bez konieczności definiowania arbitralnych progów czy ustalania *a priori* momentu przejścia między fazami tarcia.

Wyniki badań wykazały, że metoda SOM umożliwia precyzyjne rozróżnianie różnych faz tarcia i przewidywanie przejść między nimi. Algorytm klasyfikował próbki sygnału COF na podstawie podobieństwa strukturalnego, dzięki czemu możliwe było określenie trendów w ewolucji procesu zużycia powłok DLC. W badaniach wykazano, że SOM pozwala na znacznie dokładniejsze uchwycenie subtelnych zmian w dynamice sygnału niż klasyczne metody badawcze czy nawet RQA i PCA. Sieci neuronowe pozwoliły na automatyczne grupowanie danych w klastry odpowiadające różnym stanom tarcia (Rys. 12), co umożliwiło efektywne przewidywanie momentu przejścia z fazy stabilnego tarcia do fazy niestabilnego zużycia.



Rys. 12. Rezultaty analizy SOM – oscylacje faz tarcia w czasie. Źródło: A6.

Ważnym aspektem badań było również porównanie skuteczności metody SOM z wynikami uzyskanymi wcześniej za pomocą analizy RQA i PCA. Rezultaty wykazały, że podczas gdy analiza RQA pozwalała na wykrycie chaotycznych komponentów w dynamice

procesu tarcia, a PCA umożliwiała identyfikację dominujących składowych wpływających na stabilność tarcia, to SOM okazała się metodą bardziej elastyczną, pozwalającą na klasyfikację faz tarcia w czasie. Ponadto, sieci neuronowe SOM pozwoliły na identyfikację w danych wzorców, które wcześniej były trudne do uchwycenia przy użyciu konwencjonalnych metod badawczych. Wykazałam, że SOM może być wykorzystywana jako narzędzie diagnostyczne, umożliwiające bieżące monitorowanie stanu powłok ochronnych i identyfikację momentu ich krytycznego zużycia.

Jednym z kluczowych wniosków wynikających z badań zaprezentowanych w pracy **A6** było potwierdzenie, że sieci neuronowe typu SOM mogą stanowić skuteczne narzędzie do analizy tribologicznej w warunkach rzeczywistych. O ile wcześniejsze badania koncentrowały się na zastosowaniu metod matematycznych do analizy zapisanych danych pomiarowych, w tej pracy wykazano, że SOM może być wykorzystywana do automatycznej klasyfikacji stanów tarcia w czasie. W praktyce oznacza to możliwość implementacji tego podejścia w systemach monitorowania zużycia powłok ochronnych, co może znaleźć zastosowanie w diagnostyce maszyn i urządzeń pracujących w warunkach intensywnego obciążenia tribologicznego.

Badania przedstawione w ramach publikacji **A6** stanowią wkład w rozwój wiedzy z zakresu tribologii układów z modyfikowaną warstwą powierzchniową oraz metod analizy sygnałów tribologicznych. Po raz pierwszy wykazano, że zastosowanie samoorganizujących się sieci neuronowych umożliwia precyzyjne klasyfikowanie typów zużycia powłok ochronnych oraz przewidywanie dynamiki ich degradacji w sposób autonomiczny. Wyniki te podkreślają potencjał sieci neuronowych w diagnostyce tribologicznej.

Rezultaty uzyskane w ramach opisywanego obszaru badawczego przyczyniają się do zrozumienia czasowej ewolucji procesów tarcia i zużycia w tribologicznych układach z modyfikowaną warstwą powierzchniową. Kluczowym osiągnięciem była identyfikacja przejściowych stanów tarcia oraz przewidywanie momentów krytycznego zużycia powłok ochronnych z użyciem metod dynamiki nieliniowej. Zastosowanie transformacji falkowej pozwoliło na precyzyjne określenie faz tarcia oraz analizę oscylacji współczynnika tarcia w różnych skalach czasowych. Z kolei wdrożenie RQA i PCA umożliwiło wykrywanie subtelnych zmian w dynamice sygnałów tribologicznych, wskazując na możliwość zastosowania tych metod w predykcyjnej diagnostyce tribologicznej. Innym ważnym osiągnięciem było wykorzystanie samoorganizujących się sieci neuronowych SOM do klasyfikacji stanów tarcia, co otworzyło perspektywy dla autonomicznego monitorowania procesów zużycia w czasie rzeczywistym.

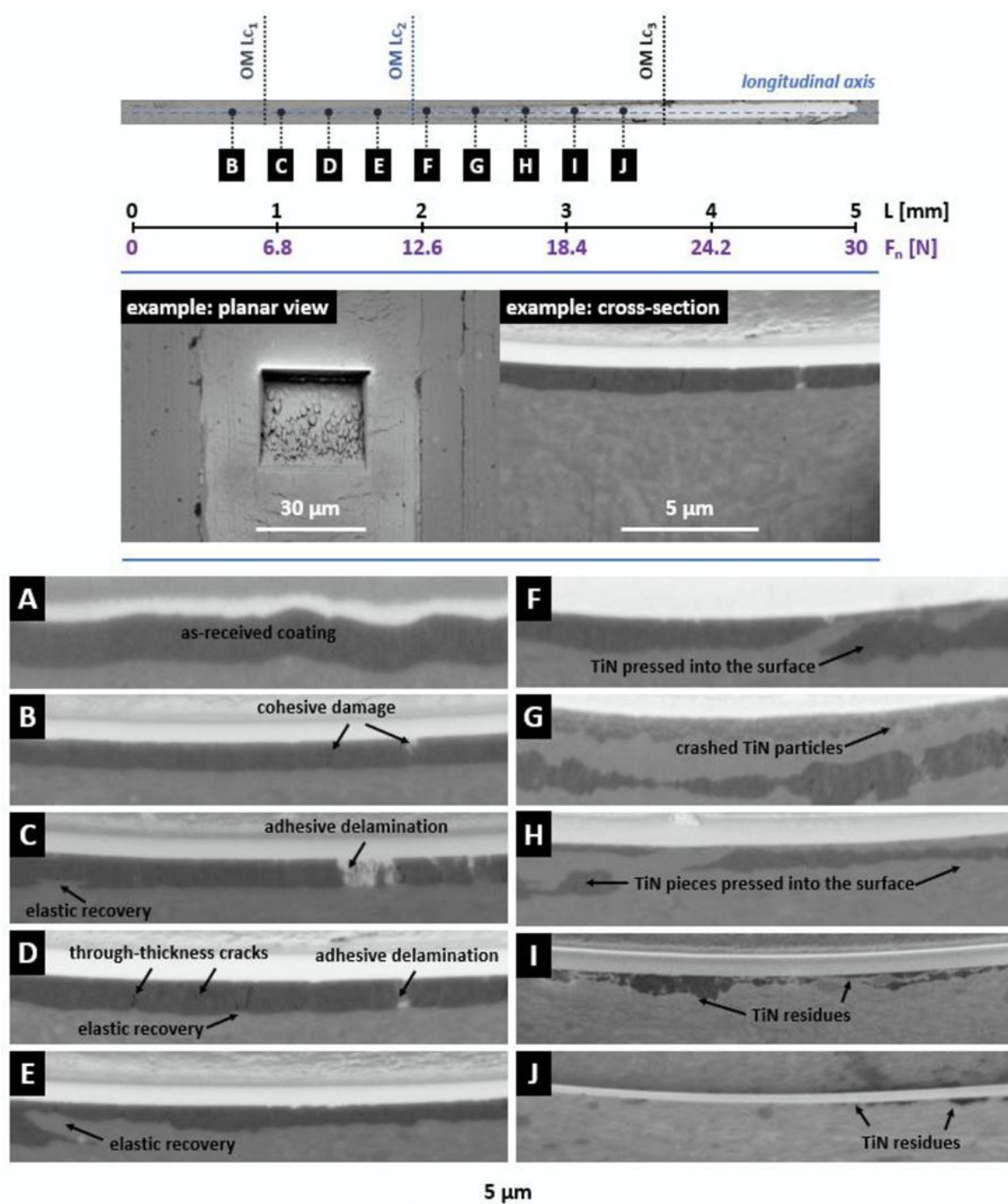
Znaczenie uzyskanych wyników dla rozwoju dyscypliny *inżynieria mechaniczna* jest wielowymiarowe. Po pierwsze, zaimplementowane w badaniach modelowych metody analizy dynamicznych zmian w systemach tribologicznych mogą znaleźć zastosowanie w monitorowaniu zużycia powłok przeciwzużyciowych w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych, co przyczyni się do zwiększenia niezawodności i trwałości elementów maszynowych. Po drugie, proponowana metoda analizy danych tribologicznych otwiera nowe możliwości w zakresie projektowania inteligentnych systemów diagnostycznych, które będą w stanie identyfikować anomalie w procesach tarcia i zużycia na wczesnym etapie ich występowania. Wreszcie, zastosowanie sztucznej inteligencji w analizie tribologicznej, np. poprzez wykorzystanie sieci neuronowych typu SOM, stanowi przełom w kierunku automatyzacji procesów diagnostycznych i może znaleźć szerokie zastosowanie w przemyśle maszynowym, gdzie monitoring stanu technicznego powierzchni roboczych odgrywa kluczową rolę w optymalizacji procesów eksploatacyjnych.

Opracowanie metody oceny progresji zużycia powłok przeciwzużyciowych na podstawie przebiegów czasowych wybranych sygnałów tribologicznych

Współczesne testy tribologiczne coraz częściej wykorzystują różnorodne podejścia do oceny degradacji warstw przeciwzużyciowych, jednak wiele z nich nadal opiera się na standardowych metodach, takich jak analiza optyczna czy pomiary objętości ubytku materiału po zakończeniu testów. W szczególności, w przypadku testów zarysowania (ang. *scratch test*), ocena przyczepności powłok i ich odporności na uszkodzenia wymaga bardziej precyzyjnych narzędzi diagnostycznych niż dotychczas stosowana mikroskopia świetlna czy emisja akustyczna. W publikacji **A7** zaprezentowano podejście do analizy ilościowej progresji uszkodzeń w modelowej powłoce przeciwzużyciowej polegające na połączeniu analizy rekurencyjnej (RQA) oraz analizy diagonalnych profili wzajemnych powtórzeń (DCRP) z obserwacjami mikroskopowymi SEM/FIB. Celem było śledzenie progresji uszkodzeń powłoki TiN osadzonej na stali nierdzewnej AISI 440B (Rys. 13) powstałych podczas testów zarysowania oraz precyzyjna ilościowa ocena jej degradacji w czasie.

Badania przeprowadzono dla monowarstwowej powłoki TiN o grubości 1,35 μm , osadzonej metodą katodowego odparowania łukowego (CAE-PVD) na podłożu ze stali nierdzewnej AISI 440B. Powłokę poddano testom zarysowania w trybie obciążenia progresywnego (PLST) przy użyciu diamentowego wgłębnika Rockwella o promieniu 100 μm . W trakcie testów rejestrowano zarówno siłę styczną (F_t), jak i głębokość penetracji wgłębnika

(P_d), które następnie poddano analizie nieliniowej w celu wykrycia sygnałów wskazujących na przejście od stabilnego kontaktu do uszkodzenia powłoki.



Rys. 13. Przekroje FIB-SEM śladu zarysowania uzyskanego na stali nierdzewnej 440B modyfikowanej powierzchniowo powłoką TiN. W celach informacyjnych uwzględniono obciążenia krytyczne Lc_1 - Lc_3 , określone z użyciem mikroskopii świetlnej (OM). Przedstawiono lokalizacje przekrojów, wraz z przykładowym widokiem planarnym

i odpowiadającym mu przekrojem przygotowanym techniką FIB; (A) powłoka TiN w stanie wyjściowym, (B–J) przekroje prostopadłe do kierunku zarysowania. Źródło: A7.

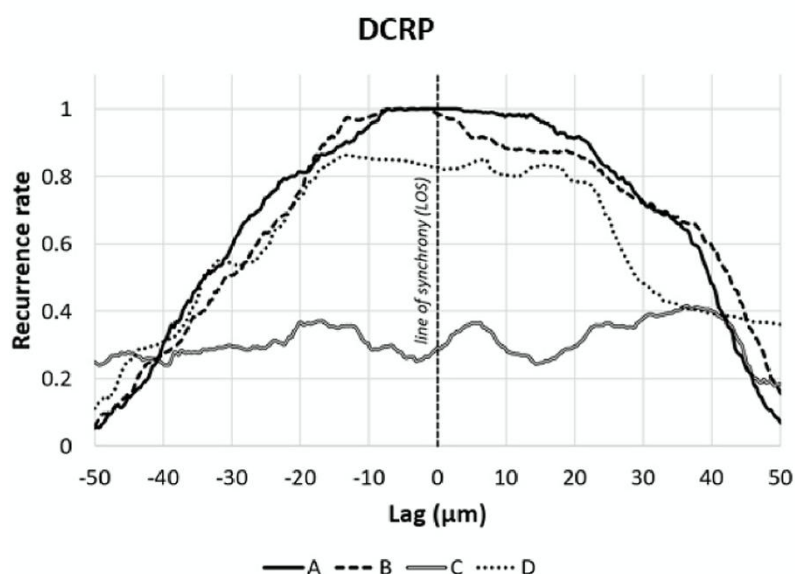
Wyniki badań wykazały, że w trakcie testów zarysowania zmiany w dynamice siły stycznej oraz głębokości penetracji wgłębnika nie zawsze były skorelowane z krytycznymi obciążeniami L_{C1} , L_{C2} i L_{C3} określonymi z wykorzystaniem metod mikroskopii świetlnej (odpowiadającymi kolejno zapoczątkowaniu pęknięcia kohezyjnego, uszkodzeniom adhezyjnym oraz całkowitemu zniszczeniu powłoki). Kluczowym odkryciem było to, że parametry wyznaczone na podstawie analizy rekurencyjnej ujawniały przejścia między różnymi typami uszkodzeń na długo przed ich wykryciem metodami optycznymi. Obserwowano, że już na etapie początkowego pęknięcia powłoki zmieniały się charakterystyczne wartości procentowej ilości stanów rekurencyjnych (RR) oraz długości diagonalnych struktur w analizie RQA. Na podstawie tych danych możliwe było nie tylko wykrycie momentu inicjacji uszkodzenia, ale również określenie stopnia jego propagacji.

W badaniach SEM/FIB potwierdzono, że uszkodzenia powłoki TiN rozpoczynały się w obszarach o lokalnych defektach strukturalnych, takich jak wady strukturalne powłoki powstałe podczas osadzania metodą PVD. Wraz ze wzrostem obciążenia zarysowania dochodziło do propagacji pęknięć zgodnie z charakterystycznymi wzorcami: najpierw w postaci pęknięć rozciągających na krawędziach rysy, następnie w formie pęknięć konforemnych, a na końcu w wyniku spękań i łuszczenia (ang. *buckling spallation*). Co istotne, analiza rekurencyjna potwierdziła, że moment przejścia między pękaniem rozciągającym a pękaniem konforemnym był dobrze skorelowany ze wzrostem wartości wskaźników RQA, podczas gdy standardowe metody optyczne wskazywały ten moment z wyraźnym opóźnieniem.

Dodatkowo zastosowano diagonalny profil wzajemnych powtórzeń (DCRP) do analizy synchronizacji między siłą styczną a penetracją wgłębnika. Wyniki wykazały, że w początkowych fazach testu głębokość penetracji wgłębnika (P_d) była głównym czynnikiem determinującym dynamikę procesu, natomiast w późniejszych fazach, gdy dochodziło do pęknięcia powłoki i wzrostu oporów ruchu, siła styczna (F_t) przejmowała dominującą rolę. To odkrycie sugeruje, że analiza DCRP może być użytecznym narzędziem do identyfikacji mechanizmów przejściowych w testach zarysowania, a także do różnicowania powłok o różnych właściwościach adhezyjnych i strukturalnych.

Wyniki badań przeprowadzonych w ramach pracy A7 mają znaczenie dla rozwoju diagnostyki uszkodzeń powłok ochronnych i pozwoliły na sformułowanie kilku osiągnięć naukowych. Po raz pierwszy wykazano, że nieliniowa analiza rekurencyjna może skutecznie

wykrywać początkowe stadia uszkodzeń powłok w testach zarysowania, zanim staną się one widoczne w klasycznych metodach optycznych, tj. mikroskopii świetlnej. Wynik ten otwiera nowe możliwości w zakresie predykcyjnej diagnostyki systemów tribologicznych, umożliwiając wcześniejsze wykrywanie defektów i planowanie działań prewencyjnych w systemach eksploatacyjnych.



Rys. 14. Synchronizacja F_t i P_d w funkcji długości zarysowania: stopień rekurencji (A–D) obliczony w analizie DCRP. Do analizy DCRP wybrano reprezentatywne okna 750 punktów (350 μm): A – pękanie rozciągające; B – pękanie konforemne; C – pękanie wyboczeniowe; D – zerwanie ciągłości powłoki i jej usunięcie z powierzchni substratu. Źródło: A7.

Po drugie, badania potwierdziły, że diagonalne profile wzajemnych powtórzeń (DCRP) mogą być wykorzystane do analizy dynamiki interakcji pomiędzy siłą styczną a głębokością penetracji wgłębnika w testach zarysowania, co pozwala na identyfikację dominujących mechanizmów zużycia i różnicowanie powłok o różnych właściwościach mechanicznych. Takie podejście stanowi krok w kierunku bardziej kompleksowej oceny jakości powłok przeciwzużyciowych, uwzględniającej zarówno mikroskopowe obserwacje uszkodzeń, jak i zaawansowaną analizę sygnałów tribologicznych.

Wreszcie, proponowane metody w przyszłości mogą znaleźć zastosowanie nie tylko w testach laboratoryjnych, ale także w przemysłowych systemach diagnostycznych, co podkreśla ich znaczenie dla inżynierii mechanicznej. Możliwość zautomatyzowanej analizy uszkodzeń powłok w czasie rzeczywistym pozwala na doskonalenie procesów kontroli jakości

w produkcji powłok ochronnych oraz na rozwój inteligentnych systemów monitorowania stanu technicznego elementów maszynowych, co ma szczególne znaczenie w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym i biomedycznym.

e) Podsumowanie

Osiągnięcie naukowe koncentruje się na zastosowaniu metod dynamiki nieliniowej do analizy procesów tarcia i zużycia powłok przeciwzużyciowych. Badania te stanowią innowacyjne podejście do diagnostyki tribologicznej, łącząc metody analizy szeregów czasowych z konwencjonalnymi technikami eksperymentalnymi. Dzięki opracowanej metodologii możliwe było uzyskanie nowatorskich wyników dotyczących dynamiki tarcia i zużycia powłok TiN i DLC osadzonych na różnych podłożach metalicznych.

W ramach badań przeprowadzono analizę struktury i właściwości mechanicznych powłok ceramicznych, określono ich wpływ na trwałość i odporność przeciwzużyciową, a także opracowano metodykę oceny progresji zużycia powłok na podstawie przebiegów czasowych sygnałów tribologicznych. Osiągnięcie to wnosi wkład w rozwój nowoczesnej tribologii, umożliwiając bardziej precyzyjne monitorowanie i prognozowanie uszkodzeń powłok ochronnych w warunkach eksploatacyjnych.

Jednym z osiągnięć jest opracowanie procedury wykorzystania metod dynamiki nieliniowej do badania zmiennych w czasie procesów tarcia i zużycia ceramicznych powłok przeciwzużyciowych. Wprowadzona metodyka integruje zaawansowane techniki analizy sygnałów tribologicznych z klasycznymi metodami badań tarcia, umożliwiając precyzyjne monitorowanie zmian zachodzących w powłoce podczas eksploatacji. Wykorzystanie transformacji falkowej, analizy kwantyfikacyjnej rekurencji (RQA) oraz analizy głównych składowych (PCA) pozwoliło na identyfikację kluczowych faz tarcia oraz prognozowanie momentu krytycznego zużycia powłoki, co stanowi istotny wkład w rozwój nowoczesnej diagnostyki tribologicznej.

Kolejnym elementem osiągnięcia jest wykorzystanie opracowanej procedury do opisu dynamiki procesów tarcia i zużycia materiałów metalicznych z modyfikowaną warstwą powierzchniową. Dzięki zastosowaniu ilościowej analizy rekurencji (RQA) oraz samoorganizujących się sieci neuronowych (SOM), możliwe było rozpoznanie przejściowych stanów tarcia i określenie mechanizmów dominujących w różnych fazach zużycia powłok TiN i DLC. Analiza czasowo-częstotliwościowa umożliwiła precyzyjne rozróżnienie stanów stabilnego tarcia i postępującej degradacji powłok, co pozwala na bardziej efektywne monitorowanie ich trwałości w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Wykazano,

że dynamika zużycia powłok ochronnych jest silnie uzależniona od dopasowania ich właściwości mechanicznych do podłoża, a nowe metody analityczne umożliwiają wczesne wykrywanie zmian w zachowaniu układów tribologicznych.

Trzecim kluczowym osiągnięciem jest zaproponowanie metody oceny progresji zużycia powłok przeciwzużyciowych na podstawie przebiegów czasowych sygnałów tribologicznych. Wykorzystanie analizy rekurencyjnej i profili przekrojowych DCRP pozwoliło na śledzenie sekwencji zdarzeń prowadzących do inicjacji i propagacji uszkodzeń powłoki. Integracja tych metod z badaniami mikroskopowymi SEM/FIB umożliwiła identyfikację wczesnych etapów degradacji powłoki, jeszcze zanim staną się one widoczne w klasycznych metodach optycznych. Opracowane podejście otwiera nowe perspektywy w zakresie diagnostyki tribologicznej i może być wykorzystane do predykcyjnego monitorowania zużycia powłok ochronnych, umożliwiając optymalizację ich doboru i poprawę niezawodności.

Wyniki badań mają znaczenie dla rozwoju tribologii i inżynierii mechanicznej. Połączenie metod dynamiki nieliniowej z konwencjonalnymi technikami tribologicznymi otwiera nowe możliwości w zakresie inteligentnej diagnostyki eksploatacyjnej, umożliwiając wczesne wykrywanie uszkodzeń oraz optymalizację doboru powłok ochronnych w praktycznych zastosowaniach inżynierskich.

f) Literatura

1. Chatterjee S, Chandrashekhara S, Sudarshan T. Deposition processes and metal cutting applications of TiN coatings. *Journal of materials science*. 1992;27:3409-23.
2. Smyth A, Fisher J, Suñer S, Brockett C. Influence of kinematics on the wear of a total ankle replacement. *Journal of biomechanics*. 2017;53:105-10.
3. Holmberg K, Matthews A. *Coatings tribology: properties, mechanisms, techniques and applications in surface engineering*; Elsevier; 2009.
4. Cui W, Qin G, Duan J, Wang H. A graded nano-TiN coating on biomedical Ti alloy: Low friction coefficient, good bonding and biocompatibility. *Materials Science and Engineering: C*. 2017;71:520-8.
5. Łapaj Ł, Wendland J, Markuszewski J, Mróz A, Wiśniewski T. Retrieval analysis of titanium nitride (TiN) coated prosthetic femoral heads articulating with polyethylene. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2016;55:127-39.
6. Grill A. Diamond-like carbon: state of the art. *Diamond and related materials*. 1999;8(2-5):428-34.

7. Zia AW, Birkett M. Deposition of diamond-like carbon coatings: Conventional to non-conventional approaches for emerging markets. *Ceramics International*. 2021;47(20):28075-85.
8. Zeng Q, Ning Z. High-temperature tribological properties of diamond-like carbon films: A review. *Reviews on Advanced Materials Science*. 2021;60(1):276-92.
9. Kolawole FO, Kolade OS, Bello SA, Kolawole SK, Ayeni AT, Elijah TF, et al. The improvement of diamond-like carbon coatings for tribological and tribo-corrosion applications in automobile engines: an updated review study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023;126(5):2295-322.
10. Birkett M, Zia AW, Devarajan DK, Panayiotidis MI, Joyce TJ, Tambuwala MM, et al. Multi-functional bioactive silver-and copper-doped diamond-like carbon coatings for medical implants. *Acta Biomaterialia*. 2023;167:54-68.
11. Solis J, Zhao H, Wang C, Verduzco J, Bueno A, Neville A. Tribological performance of an H-DLC coating prepared by PECVD. *Applied Surface Science*. 2016;383:222-32.
12. Huang X, Etsion I, Shao T. Effects of elastic modulus mismatch between coating and substrate on the friction and wear properties of TiN and TiAlN coating systems. *Wear*. 2015;338:54-61.
13. Santecchia E, Hamouda A, Musharavati F, Zalnezhad E, Cabibbo M, Spigarelli S. Wear resistance investigation of titanium nitride-based coatings. *Ceramics international*. 2015;41(9):10349-79.
14. Verma PC, Menapace L, Bonfanti A, Ciudin R, Gialanella S, Straffelini G. Braking pad-disc system: Wear mechanisms and formation of wear fragments. *Wear*. 2015;322:251-8.
15. Verma PC, Ciudin R, Bonfanti A, Aswath P, Straffelini G, Gialanella S. Role of the friction layer in the high-temperature pin-on-disc study of a brake material. *Wear*. 2016;346:56-65.
16. Li J, Beres W. Scratch test for coating/substrate systems—A literature review. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2007;46(2):155-73.
17. Hoy R, Sivel V, Kamminga J-D, Janssen G. Failure during scratch testing of thick and thin CrN coatings examined using focused ion Beam. *Surface and Coatings Technology*. 2005;200(1-4):149-52.
18. Wu G, Li Y, Brittain R, Lu Z, Yang L. Understanding of fracture conditions and material response in a model TiN film/stainless steel substrate system—A cross-sectional scratch test study. *Surface and Coatings Technology*. 2022;442:128340.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej

Dotychczasową działalność naukową w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna* realizowałam w ramach współpracy z dwiema instytucjami: Politechniką Białostocką, gdzie jestem zatrudniona od 2015 roku, oraz International Iberian Nanotechnology Laboratory, w którym pracowałam w latach 2018-2019. Poniżej przedstawiam opis działań, których rezultatem były publikacje naukowe w czasopismach indeksowanych na liście *Journal Citation Reports* (JCR), wystąpienia konferencyjne oraz zgłoszenia patentowe. W podanych opisach termin Wykaz odnosi się do *Wykazu osiągnięć naukowych lub artystycznych, stanowiących istotny wkład w rozwój danej dyscypliny*.

5.1. Praca w Politechnice Białostockiej

Interdyscyplinarny charakter prowadzonych na Politechnice Białostockiej (PB) prac naukowych umożliwił mi nawiązanie współpracy z licznymi krajowymi i zagranicznymi ośrodkami badawczymi. Moje badania koncentrują się głównie na analizie właściwości tarcowych oraz odporności na zużycie materiałów z modyfikowaną warstwą powierzchniową. Od kilku lat zajmuję się również oceną struktury i właściwości użytkowych proszkowych materiałów kompozytowych.

Po uzyskaniu stopnia doktora, w latach 2018-2022 pełniłam rolę kierownika finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki projektu naukowo-badawczego *Preludium 13* pt. *Wpływ modyfikacji warstwy powierzchniowej biomateriałów metalicznych na ich właściwości eksploatacyjne* (nr rej. 2017/25/N/ST8/02270). Prace realizowałam we współpracy z Politechniką Lubelską oraz Wyższą Szkołą Ekonomii i Innowacji w Lublinie, koncentrując się m.in. na analizie szeregów czasowych z wykorzystaniem technik falkowych. Efektem tej współpracy są publikacje **A2** i **A4**, stanowiące część osiągnięcia naukowego.

W latach 2019-2021, jako pracownik Politechniki Białostockiej, uczestniczyłam w międzynarodowym projekcie *MECODIA – Nowoczesne kompozyty o podstawie metalicznej wzmacniane naturalnymi okrzemkami* (nr rej. CORNET 26/3/2019), współfinansowanym przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Projekt realizowano w międzynarodowym konsorcjum obejmującym Stiftverband Metalle (Lider – Niemcy), Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems (Niemcy) oraz polski Klaster Obróbki Metali. Moje zadania obejmowały przygotowanie kompozytów wzmacnianych okrzemkami techniką metalurgii

proszków, opracowanie pancerzyków okrzemek oraz charakteryzację materiałową kompozytów, w tym obserwacje mikroskopowe SEM. Rezultaty projektu zaprezentowano na konferencjach międzynarodowych (poz. 8 i 9, pkt. II-2 Wykazu) oraz opublikowano w czasopiśmie *Nanomaterials* (poz. 15, pkt. I-2 Wykazu).

W latach 2020-2022 byłam wykonawcą finansowanego przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej projektu *Zaawansowane biokompozyty dla gospodarki jutra BIOG-NET* (nr rej. POIR.04.04.00-00-1792/18-00), realizowanego w ramach programu TEAM-NET w konsorcjum składającym się z Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu (Lider), Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, Politechniki Warszawskiej, Politechniki Białostockiej oraz Uniwersytetu Szczecińskiego. W projekcie rozwijałam tematykę materiałów kompozytowych wzmacnianych pancerzykami okrzemek do zastosowań w stomatologii. Byłam odpowiedzialna za przygotowanie cementów glasjonomerowych modyfikowanych ziemią okrzemkową i hodowlanymi pancerzykami okrzemek, a także za charakterystykę ich właściwości mechanicznych, tribologicznych i struktury. Rezultaty projektu obejmują zgłoszenie patentowe nr P.445328 (2023) pt. *Kompozycja cementu szkło-jonomerowego z substancją bioaktywną do zastosowań stomatologicznych* (mój udział: 35%) oraz publikacje w czasopismach *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* i *Materials* (poz. 7 i 17, pkt. I-2 Wykazu).

W 2021 roku uczestniczyłam w projekcie *Laboratory methods of assessing the functional properties of dental reconstructive materials* (nr rej. DS.296), realizowanym na Uniwersytecie Medycznym w Lublinie pod kierunkiem dr hab. n. med. Agaty Niewczas. Moje zadania obejmowały ocenę właściwości funkcjonalnych cementów glasjonomerowych poddanych działaniu zmiennych temperatur, w tym analizę ich charakterystyk tribologicznych i mechanicznych oraz statystyczną obróbkę danych. Wyniki opublikowano w czasopiśmie *Scientific Reports* (poz. 3, pkt. I-2 Wykazu) oraz zaprezentowano na międzynarodowej konferencji naukowej (poz. 2, pkt. II-2 Wykazu). Należy podkreślić, że nawiązana współpraca naukowa stanowiła kontynuację działań z 2020 roku, w które, poza pracownikami Wydziału Mechanicznego PB, zaangażowani byli pracownicy: Uniwersytetu Medycznego w Lublinie, Politechniki Lubelskiej, Wyższej Szkoły Ekonomii i Innowacji w Lublinie oraz Szkoły Głównej Służby Pożarniczej w Warszawie. Współpraca zaowocowała wspólną publikacją naukową, poświęconą ocenie właściwości tribologicznych odtwórczych materiałów stomatologicznych (czasopismo *Tribology International*, poz. 16 pkt. I-2 Wykazu).

W latach 2022–2023 prowadziłam badania nad tribologią nowoczesnych materiałów polimerowych i stopów metali. We współpracy z zespołem prof. dr hab. Artura Terzyka (UMK

Toruń) badałam nanomateriały węglowe osadzone na polimerowych foliach, koncentrując się na ich właściwościach tribologicznych w warunkach tarcia suchego i smarowanego. Wyniki opublikowano w *Chemical Engineering Journal* (poz. 4 i 8, pkt. I-2 Wykazu).

Ponadto uczestniczę w badaniach nad wykorzystaniem metod analizy wielokryterialnej (MCDM – ang. *Multiple-Criteria Decision-Making*) w doborze powłok przeciwzużyciowych, realizowanych we współpracy z Sathyabama Institute of Science and Technology (Indie), czego efektem są cztery publikacje w czasopiśmie JCR (poz. 2, 6, 11 i 12, pkt. I-2 Wykazu). Współpracuję także z dr. Oleksandrem Tissovem (Xi'an Jiaotong University, Chiny) nad metodami modyfikacji stopów metali w celu zwiększenia ich odporności na zużycie tribologiczne, co zaowocowało publikacją w *Metals* (poz. 10, pkt. I-2 Wykazu). Kolejna praca jest aktualnie recenzowana w czasopiśmie *Wear*.

Obecnie, poza badaniami nad tribologiczną odpowiedzią stopów metali z modyfikowaną warstwą wierzchnią, rozwijam tematykę cementów szkło-jonomerowych inspirowanych tribologią. Pełnię funkcję kierownika projektu *Cementy szkło-jonomerowe domieszkowane pierwiastkami ziem rzadkich: w kierunku biomateriałów hybrydowych nowej generacji o zwiększonej bioaktywności*, finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach programu Regionalna Inicjatywa Doskonałości. Celem projektu jest opracowanie cementów szkło-jonomerowych na bazie szkła fluoroglinowokrzemianowego domieszkowanego Sm^{3+} .

Równocześnie koordynuję polski zespół badawczy w projekcie *Opracowanie i ocena właściwości nowych cementów szkło-jonomerowych do zastosowań w stomatologii*, finansowanym przez Narodową Agencję Wymiany Akademickiej w ramach programu Wspólne projekty badawcze Polska-Niemcy. Projekt realizuję we współpracy z dr Verą Todorović (Centre for Translational Bone, Joint and Soft Tissue Research, TU Dresden). Dotychczasowe wyniki tych badań opublikowano w *Tribology International* (poz. 1, pkt. I-2 Wykazu).

5.2. Praca w International Iberian Nanotechnology Laboratory

Bezpośrednio po uzyskaniu stopnia doktora, w latach 2018-2019 odbyłam 18-miesięczny staż podoktorski w International Iberian Nanotechnology Laboratory (INL, Załącznik nr 8), gdzie pełniłam rolę wykonawcy projektu naukowo-badawczego pt. *SIMPLIFIED: Easy Tooth Abutment* (nr rej. POCI-01-0247-FEDER-017982). Projekt realizowano w konsorcjum naukowo-przemysłowym, w skład którego wchodziły przedsiębiorstwa: Celoplas, Plásticos para a Indústria SA (Lider) oraz Gadget Whisper Lda., a

także jednostki naukowo-badawcze: FEUP – Faculty of Engineering, University of Porto oraz INL – International Iberian Nanotechnology Laboratory. Zadania badawcze koncentrowały się na opracowaniu nowego rozwiązania w zakresie implantów stomatologicznych – uniwersalnego łącznika implantologicznego, kompatybilnego z każdym konwencjonalnym implantem. System opierał się na uproszczonym systemie retencji, mającym zastosowanie do protez stałych lub ruchomych.

Jako pracownik INL, byłam odpowiedzialna za opracowanie powłoki przeciwzużyciowej, mającej zastosowanie w gwintowanej części łącznika protetycznego. W ramach projektu podjęłam działania ukierunkowane na opracowanie powłoki z wykorzystaniem jednej z dwóch technik: fizycznego osadzania z fazy gazowej metodą rozpylania magnetronowego (MR PVD) lub osadzania z roztworu koloidalnego, tzw. metody zol-żel. Byłam odpowiedzialna również za uzyskanie charakterystyk materiałowo-tribologicznych testowych powłok. Prowadziłam obserwacje mikroskopowe próbek z wykorzystaniem technik mikroskopii świetlnej i elektronowej. Zaangażowałam się w proces projektowania oraz programowania dedykowanego stanowiska do przyspieszonej oceny odporności łącznika protetycznego na działanie sił okluzyjnych. Stanowisko to posłużyło do oceny właściwości użytkowych powłok w warunkach *in vitro*. Urządzenie oraz metodykę badań zaprezentowałam w czasopiśmie *Surface and Coatings Technology* (poz. 13, pkt. I-2 Wykazu) i na międzynarodowej konferencji naukowej (poz. 10, pkt. II-2 Wykazu). Efektem prac jest wzbogacona nanocząstkami tlenku tytanu, kompozytowa, antybakteryjna powłoka przeciwzużyciowa na osnowie polimeru siloksanowego. Właściwości biologiczne opracowanej powłoki omówiono w czasopiśmie *Dental Materials* (poz. 14, pkt. I-2 Wykazu).

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę

Od 2013 roku, tj. od rozpoczęcia studiów doktoranckich, jestem zaangażowana w działalność dydaktyczną, organizacyjną oraz popularyzującą naukę na rzecz Politechniki Białostockiej. Dotychczas pełniłam rolę promotora pięciu obronionych prac magisterskich oraz czterech prac inżynierskich na kierunkach *Mechanika i budowa maszyn* oraz *Inżynieria biomedyczna*. Prowadziłam zajęcia dydaktyczne w języku angielskim z przedmiotów *Materials Science* (wykład i laboratorium), *Medical Materials Orientation* (wykład i laboratorium) oraz *Metrology I* (ćwiczenia i laboratorium). Na potrzeby kursów *Materials Science* oraz *Metrology I* opracowałam autorskie materiały dydaktyczne, w tym pełen zestaw instrukcji do zajęć laboratoryjnych w języku angielskim. Od roku akademickiego 2020/2021 pełnię funkcję

koordynatora przedmiotu *Materials Science* dla studentów anglojęzycznych kierunków *Mechatronics* i *Automatics Control and Robotics* oraz studentów programu *Erasmus+*.

Prowadziłam również zajęcia w języku polskim z przedmiotów związanych z nauką o materiałach, ich właściwościami oraz systemami pomiarowymi, m.in. *Materiały konstrukcyjne* (laboratorium), *Nauka o materiałach* (laboratorium) i *Metrologia i systemy pomiarowe I* (ćwiczenia i laboratorium). Jestem współautorką nowych stanowisk laboratoryjnych oraz materiałów dydaktycznych wykorzystywanych w ramach laboratoriów z przedmiotu *Materiały konstrukcyjne*. Obecnie pełnię funkcję koordynatora przedmiotu *Dobór materiałów inżynierskich*, w ramach którego prowadzę wykład oraz zajęcia projektowe.

W latach 2019-2022 byłam opiekunem dydaktycznym kierunku *Inżynieria materiałowa i wytwarzania*, a w 2022 roku członkiem *Komisji ds. modernizacji kierunku Mechanika i budowa maszyn (I stopień)*. W 2024 r. w ramach programu *Erasmus+* prowadziłam w University of Catania (Włochy) wykłady dla studentów I stopnia kierunku *Mechanika i budowa maszyn*. Tematyka wykładów dotyczyła zagadnień tribologii w budowie maszyn i medycynie. Za dotychczasową działalność dydaktyczną w sierpniu 2022 roku zostałam wyróżniona *Medalem Komisji Edukacji Narodowej* (Załącznik nr 8).

Jestem zaangażowana w działalność recenzyjną i edytorską na rzecz czasopism naukowych indeksowanych na liście *Journal Citation Reports (JCR)*. Dotychczas wykonałam 85 recenzji dla czasopism z tej listy, w tym m.in. dla *Tribology International* (47 recenzji), *Ceramics International* (8 recenzji), *Coatings* (4 recenzje) oraz *Canadian Metallurgical Quarterly* (3 recenzje). W 2018 roku otrzymałam certyfikat *Outstanding Contribution in Reviewing*, przyznawany najlepszym recenzentom czasopisma *Tribology International* (Załącznik nr 8). W 2020 roku zostałam członkiem *Topic Advisory Panel* czasopisma *Crystals* (IF 2023 = 2,4). Pełnię również funkcję *Review Editor*a w czasopismach *Frontiers in Mechanical Engineering* oraz *Frontiers in Manufacturing Technology*. Ponadto pełniłam rolę zaproszonego edytora specjalnego wydania czasopisma *Frontiers in Mechanical Engineering* pt. *Advancements in Thin Film Coating Technologies*, które współredagowałam wraz z dr. Kanaka Kalitą z Vel Tech Rangarajan Dr. Sagunthala R&D Institute of Science and Technology w Indiach oraz dr. Lokeswarem Patnaikiem z Sathyabama Institute of Science and Technology w Indiach.

Aktywnie uczestniczę w działaniach promujących naukę. Po uzyskaniu stopnia doktora, jako przedstawicielka Politechniki Białostockiej występowałam w lokalnym radiu i prasie (Załącznik nr 8). Moja działalność naukowa była przedmiotem publikacji w mediach branżowych, takich jak *portaldentystyczny.pl* i *infodent24.pl* (Załącznik nr 8). Prowadziłam

prezentacje bazy naukowo-dydaktycznej Wydziału Mechanicznego w języku polskim i angielskim. W 2021 roku, jako wykładowca Wydziału Mechanicznego, uczestniczyłam w projekcie *Centrum Kompetencji BOF – Kompleksowy model wsparcia i modernizacji systemu kształcenia zawodowego na terenie Białostockiego Obszaru Funkcjonalnego*. W jego ramach przeprowadziłam wykład pt. *Nowoczesne badania trybologiczne* skierowany do uczniów Zespołu Szkół Mechanicznych w Białymstoku (Załącznik nr 8).

Za dotychczasową działalność naukową, dydaktyczną i organizacyjną zostałam wielokrotnie wyróżniona *Zespołowymi Nagrodami Rektora Politechniki Białostockiej III stopnia* (lata 2020, 2021, 2024; Załącznik nr 8). Przed uzyskaniem stopnia doktora zostałam laureatką *Stypendium dla Doktorantów Województwa Podlaskiego* (2014–2015), realizowanego w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, współfinansowanego przez Europejski Fundusz Społeczny, Budżet Państwa oraz Budżet Województwa Podlaskiego. W 2015 roku otrzymałam *Nagrodę Rektora Politechniki Białostockiej dla najlepszego doktoranta w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn*. Podczas studiów inżynierskich, magisterskich i doktorskich corocznie otrzymywałam *stypendia Rektora Politechniki Białostockiej* za osiągnięcia naukowe i/lub badawcze.

7. Inne istotne informacje

a) Informacja o współpracy z sektorem gospodarczym

Od 2012 roku jestem aktywnie zaangażowana we współpracę z sektorem gospodarczym. W latach 2012–2013 pracowałam w firmie *MEDGAL Sp. z o.o.*, a następnie, po rozpoczęciu studiów doktoranckich, kontynuowałam współpracę naukową z przedsiębiorstwem w zakresie metod modyfikacji warstw powierzchniowych biomateriałów metalicznych. Współpraca ta trwała w latach 2013–2017 i obejmowała badania nad poprawą właściwości eksploatacyjnych materiałów stosowanych w implantologii.

Po uzyskaniu stopnia doktora realizowałam prace naukowo-badawcze w kooperacji z przedsiębiorstwami krajowymi i zagranicznymi w ramach projektów badawczych, takich jak *MECODIA – Nowoczesne kompozyty o osnowie metalicznej wzmacniane naturalnymi okrzemkami* oraz *SIMPLIFIED: Easy Tooth Abutment*, opisanych szczegółowo w sekcjach 5.1 i 5.2. W ramach współpracy z sektorem przemysłowym brałam również udział w przygotowaniu wniosków o dofinansowanie projektów badawczych we współpracy z firmami *MEDGAL Sp. z o.o.* (2020 r.) oraz *Technology Applied* (2021 r.). Od 2021 roku pełnię funkcję członka zarządu w firmie *Handcrafted Mobile Sp. z o.o.*

b) Dane naukometryczne (01.03.2025 r.)

Liczba publikacji punktowanych wg wykazu czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych MNiSW:

w czasopismach JCR: 34

w tym po uzyskaniu stopnia doktora: 25

w czasopismach spoza JCR: 2

w tym po uzyskaniu stopnia doktora: 0

Informacja o współczynniku Impact Factor:

sumaryczny współczynnik Impact Factor: 124,595

w tym po uzyskaniu stopnia doktora: 117,258

Liczba cytowań publikacji wnioskodawcy, z oddzielnym uwzględnieniem autocytowań:

według bazy Web of Science (WoS): 412/376 (wszystkie/bez autocytowań)

według bazy Scopus: 466/432 (wszystkie/bez autocytowań)

Informacja o indeksie Hirscha:

według bazy WoS: 9

według bazy Scopus: 11