
Autoreferat w języku polskim

Autoreferat

przedstawiający dorobek i osiągnięcia naukowe,
w szczególności określone w art. 16 ust. 2 Ustawy

dr inż. Łukasz Kołodziejczyk

Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny

Instytut Inżynierii Materiałowej

lukasz.kolodziejczyk@p.lodz.pl

1. Imię i nazwisko

Łukasz Dariusz Kołodziejczyk

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

26.IX.2003	doktor nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa praca doktorska (z wyróżnieniem) pt. „Modelowanie matematyczne procesu nawęglania próżniowego” Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny Promotor: prof. dr hab. inż. Piotr Kula Recenzenci: prof. dr hab. Stanisław Mitura, Politechnika Łódzka prof. dr hab. inż. Jan Kusiński, Akademia Górniczo-Hutnicza
23.VII.1999	magister inżynier inżynierii materiałowej praca dyplomowa pt. „Characterization and properties of the modulated Titanium Vanadium carbide coatings on HS steel” Politechnika Łódzka oraz Ecole Centrale de Lyon, Francja pod kierunkiem prof. dr hab. Bogdana Wendlera

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych

X.2005 – obecnie	adiunkt Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny Instytut Inżynierii Materiałowej
X.2003 – IX.2005	staż podoktorski Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla Universidad de Sevilla (Hiszpania) grupa Prof. Asunción Fernández Camacho
I.2001 – IX.2003	asystent Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny Instytut Inżynierii Materiałowej

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

a) Tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

Jako „osiągnięcie naukowe uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora stanowiące znaczący wkład autora w rozwój określonej dyscypliny naukowej” wskazuję cykl publikacji zatytułowany:

**„Właściwości tribologiczne w skali mikro- i nanometrycznej
powłok na bazie węgla oraz nanocząstek metalicznych”**

Cykl ten tworzy **9 prac o spójnej tematyce (8 publikacji i 1 patent)** wyszczególnionych w wykazie zamieszczonym w punkcie 4b, których treść została opisana w punkcie 4c niniejszego autoreferatu. Przedstawione publikacje stanowią własne osiągnięcia badawczo-naukowe dotyczące tematyki stosowania różnych technik badawczych w celu określenia właściwości tribologicznych powłok na bazie węgla, struktur grafenowych oraz nanocząstek jako dodatków uszlachetniających do olejów bazowych.

b) Wykaz wybranego cyklu publikacji

Wykaz publikacji z listy A Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego

- B1.** D. Martínez-Martínez, **L. Kolodziejczyk**, J.C. Sánchez-López, A. Fernández, Tribological carbon-based coatings: An AFM and LFM study, *Surface Science* 603 (2009) 973–979 (IF₂₀₀₉ = 1,798)
- B2.** **L. Kolodziejczyk**, W. Szymanski, D. Batory, A. Jedrzejczak, Nanotribology of silver and silicon doped carbon coatings, *Diamond and Related Materials* 67 (2016) 8–15 (IF₂₀₁₅ = 2,125)
- B3.** **L. Kolodziejczyk**, P. Kula, W. Szymanski, R. Atraszkiewicz, K. Dybowski, R. Pietrasik, Frictional behaviour of polycrystalline graphene grown on liquid metallic matrix, *Tribology International* 93 (2016) 628–639 (IF₂₀₁₅ = 2,259)
- B4.** L. Kaczmarek, A. Kopia, K. Kyziol, W. Szymanski, **L. Kolodziejczyk**, J. Gawronski, J. Kleczewska, Wear resistant carbon coatings deposited at room temperature by pulsed laser deposition method on 7075 aluminum alloy, *Vacuum* 97 (2013) 20–25 (IF₂₀₁₃ = 1,426)
- B5.** L. Kaczmarek, B. Adamczyk-Cieslak, J. Mizera, M. Steglinski, K. Kyziol, D. Miedzinska, **L. Kolodziejczyk**, W. Szymanski, M. Kozanecki, Influence of chemical composition of Ti/TiC/a-C:H coatings deposited on 7075 aluminum alloy on their selected mechanical properties, *Surface and Coatings Technology* 261 (2015) 304–310 (IF₂₀₁₅ = 2,417)

- B6.** J. Rymarczyk, **L. Kolodziejczyk**, E. Czerwosz, Topography, mechanical and tribological properties of nanocomposite carbon-palladium films, *Open Physics* 13 (2015) 72–77 (IF₂₀₁₅ = 0,948)
- B7.** **L. Kolodziejczyk**, D. Martínez-Martínez, T.C. Rojas, A. Fernández, J.C. Sánchez-López, Surface-modified Pd nanoparticles as a superior additive for lubrication, *Journal of Nanoparticle Research* 9 (2007) 639–645 (IF₂₀₀₇ = 2,338)
- B8.** J.C. Sánchez-López, M.D. Abad, **L. Kolodziejczyk**, E. Guerrero, A. Fernández, Surface-modified Pd and Au nanoparticles for anti-wear applications, *Tribology International* 44 (2011) 720–726 (IF₂₀₁₁ = 1,553)

Wykaz patentów

- B9.** Lubricant formulation based on metallic nanoparticles for electrical contacts and preparation method. J.C. Sanchez-Lopez, **L. Kolodziejczyk**, D. Martinez Martinez, Ma A. Fernandez Camacho, T. C. Rojas Ruiz, R. Litran Ramos, Numer patentu WO2006114469-A1; ES2267384-A1; ES2267384-B1. Data publikacji: 02.11.2006

c) Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. prac/pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

I. Wprowadzenie

Tribologia jest nauką i techniką zajmującą się współoddziałującymi powierzchniami we względnym ruchu i wynikającymi z tego zależnościami podstawowymi i praktycznymi. Zajmuje się ona opisem zjawisk fizycznych (głównie mechanicznych oraz cieplnych, elektrycznych i magnetycznych), chemicznych, biologicznych i innych w obszarach tarcia. Tribologia jest również definiowana jako nauka zajmująca się badaniem zjawisk zachodzących podczas ruchu ciał stałych pozostających ze sobą w kontakcie. W takich warunkach pojawia się siła o przeciwnym zwrocie do ruchu tych ciał (siła tarcia), co nieuchronnie powoduje straty energetyczne. Występować może także zużywanie się jednego lub obu materiałów pozostających w kontakcie. Właściwości tribologiczne nie mogą być definiowane w prosty sposób w zależności od rodzaju materiałów styku ciernego, jak to jest możliwe w przypadku określania, na przykład, właściwości mechanicznych. Zagadnienia tribologii często dotyczą złożonych systemów, na które mają wpływ zarówno rodzaj materiałów styku ciernego próbki i przeciwpróbki (np. stal, tlenek glinu), warunki środowiskowe (np. wilgotność, ciśnienie), parametry testu (np. prędkość, obciążenie) itd. Ponadto, w warunkach makroskopowych tarcie między dwoma materiałami jest uzależnione od struktury geometrycznej stykających się powierzchni (chropowatość) i oddziaływania między nimi (modyfikacja powierzchni, reakcje chemiczne, itp.). Możliwymi zjawiskami mogą być reakcje zachodzące pomiędzy powierzchniami materiałów styku ciernego (adhezja, tworzenie warstwy przejściowej) lub między jednym lub obydwooma materiałami a otaczającą atmosferą (korozja, adsorpcja). Ponadto, system tribologiczny może być jeszcze bardziej złożony z powodu obecności w styku cząstek pochodzących od materiałów pary cierniej na skutek procesów

zużycia (tzw. trzecie ciało), które mogą być także modyfikowane w wyniku reakcji chemicznych. Jeśli procesy zużycia będą się odbywały w środowisku płynnych substancji smarujących sytuacja staje się jeszcze bardziej skomplikowana.

Mikroskopia sił bocznych

W wielu przypadkach zagadnienia tribologiczne można rozpatrywać na poziomie cząsteczkowym, nanometrycznym a nawet atomowym. Ich analiza wymaga nowego podejścia do badań, którymi zajmuje się mikro- i nanotribologia. Decydującą rolę w procesach tribologicznych w skali mikro- i nanometrycznej odgrywają właściwości fizykochemiczne powierzchni elementów skojarzenia tarcowego (Płaza et al., 2005). Najnowsze osiągnięcia techniki w zakresie badań powierzchni, a w szczególności gwałtowny rozwój mikroskopii z sondą skanującą (*ang. scanning probe microscopy, SPM*), w tym zarówno mikroskopii sił atomowych (*ang. atomic force microscopy, AFM*) jak i mikroskopii skaningowej tunelowej (*ang. scanning tunneling microscopy, STM*), pozwalają prowadzić badania w omawianym zakresie na poziomie atomowym ze zdolnością mierzenia sił poniżej 1 μN występujących pomiędzy powierzchnią sondy SPM a powierzchnią próbki. AFM stał się użyteczny jako profilometr topografii powierzchni w mikro- i nanoskali. Mate i współpracownicy (Mate et al., Phys. Rev. Lett., 1987) zmodyfikowali AFM do mierzenia sił normalnej i tarcia, tworząc tzw. mikroskopię sił bocznych (*ang. lateral force microscopy, LFM*), umożliwiając tym samym wykorzystanie jej do pomiaru m.in. współczynnika tarcia i zużycia w skali nanometrycznej. Istnieje kilka czynników odpowiedzialnych za różnice współczynników tarcia w mikro- i nanoskali. Można do nich zaliczyć udział cząstek będących produktami zużycia oraz zanieczyszczeniami, przejście z reżimu odkształceń sprężystych do plastycznych a także efekt tworzenia się menisku.

W przypadku ilościowych pomiarów współczynnika tarcia za pomocą LFM pojawia się szereg problemów związanych z kalibracją mierzonych sygnałów. Podczas gdy kalibracja sił normalnych jest zagadnieniem, które potencjalnie wpływa na wszystkie pomiary AFM, kalibracja sił bocznych jest istotna tylko dla ilościowej analizy LFM. Pomimo tego, prowadzone są nadal badania mające na celu wyjaśnienie wpływu różnych metod kalibracyjnych na uzyskany wynik. W celu pełnego opisanie sygnału LFM takie parametry jak promień sondy, stała siłowa skręcenia dźwigni oraz czułość optyczna dźwigni muszą być skalibrowane, a dodatkowo należy uwzględnić kształt sondy skanującej (Eaton & West, 2010). Ponadto, w przeciwieństwie do ugięcia dźwigni AFM, **nie istnieje prosta "wbudowana" metoda wywołania skręcenia dźwigni, czyniąc optyczną kalibrację dźwigni bardziej skomplikowaną**. Jedną z pierwszych metod i prawdopodobnie najczęściej używaną jest procedura kalibracji sił bocznych opisana w 1996 roku przez Ogletree ze współpracownikami (Ogletree et al., Rev. Sci. Instrum., 1996). Metoda ta, znana również jako metoda „klina”, ma znaczną przewagę nad innymi metodami w tym, że jednocześnie kalibruje stałą skręcenia dźwigni oraz jej czułość optyczną. Polega ona na wykorzystaniu próbek kalibracyjnych o ściśle zdefiniowanych nachyleniach w celu wywołania stałej siły poprzecznej na powierzchni kontaktu ostrza z próbką. Porównując sygnały siły bocznej dla różnych kierunków skanowania oraz różnych sił normalnych

(zadane wartości ugięcia) można uzyskać tzw. współczynnik kalibracji bocznej, wyrażony najczęściej w jednostce N/V, który umożliwia pomiar siły tarcia między ostrzem a próbką. Niniejsza metoda, wraz z jej późniejszymi modyfikacjami zostały szeroko omówione w literaturze. Pozostałe metody kalibracji siły bocznej, rzadziej wykorzystywane, obejmują dociskanie dźwigni do elementu piezoelektrycznego, pomiar tarcia statycznego, ilościowe porównanie z podobną dźwignią, metody numeryczne i inne.

Powłoki na bazie węgla

Amorficzne uwodornione powłoki węglowe a-C:H stały się bardzo popularnymi materiałami, głównie z powodu ich doskonałych właściwości, takich jak niski współczynnik tarcia, wysoka twardość, dobra odporność na zużycie i właściwości korozyjne. Oprócz ich typowego zastosowania jako materiałów niskotarciowych, są one powszechnie stosowane w implantologii. Wynika to głównie ze względu na dobrą biogodność tych powłok w środowisku tkankowym. Powłoki węglowe doskonale nadają się do zastosowania na elementy pracujące w warunkach niskiego obciążenia, takich jak gwoździe śródszpikowe lub stenty. Jedną z zalet wytwarzanych powłok jest ochrona otaczających tkanek przeciwko migracji jonów metali uwalnianych przez podłoże (Ni, V, Co, itd.). Coraz częściej prowadzone są prace mające na celu poprawę biogodności i zmniejszenie stopnia adherowania komórek bakteryjnych przez domieszkowanie powłok węglowych TiO_2 , Cu i Ag, które są toksyczne dla mikroorganizmów. Wśród tych prac znakomita większość poświęcona jest powłokom węglowym domieszkowanym srebrem, które zapewniają korzystne właściwości bakteriobójcze. Domieszkowanie srebrem nie powinno jednak istotnie wpłynąć na właściwości tribologiczne samej powłoki. Manninen ze współpracownikami (Manninen et al., Surf. Coatings Technol., 2013) przeprowadzili badania powłok węglowych z domieszką srebra (w zakresie 1,3–13% at.). Wykazały one, że dla powłok zawierających srebro do 6,1% at. nie obserwowano istotnego pogorszenia właściwości mechanicznych i odporności na zużycie. Tak więc wydaje się, że **możliwe jest osiągnięcie kompromisu pomiędzy właściwościami antybakteryjnymi, przy zachowaniu dobrych właściwości mechanicznych i tribologicznych** (charakterystycznych dla niemodyfikowanej powłoki węglowej) dla powłok węglowych domieszkowanych Ag. Powłoki węglowe domieszkowane krzemem wytwarzane z wykorzystaniem różnych metod osadzania charakteryzują się podwyższonymi właściwościami mechanicznymi, tribologicznymi, korozyjnymi oraz biologicznymi w porównaniu do konwencjonalnych powłok DLC. Pozytywny wpływ domieszki można obserwować dla powłok DLC z dodatkiem krzemu (5% at.) (Randeniya et al., Acta Biomater., 2009). M. Ikeyama ze współpracownikami (Ikeyama et al., Surf. Coatings Technol., 2005) wykazał, że wzrost zawartości Si w powłoce DLC powoduje spadek twardości, modułu sprężystości wzdłużnej oraz to, że domieszkowanie Si powoduje obniżenie naprężeń w powłoce co korzystnie wpływa na adhezję powłok. Zawartość krzemu powoduje obniżenie wartości współczynnika tarcia. W kolejnej pracy D. Hofmann (Hofmann et al., Surf. Coatings Technol., 2013) wykazał niewielki wzrost twardości powłok DLC domieszkowanych krzemem. Równolegle z zawartością krzemu w powłoce malała zawartość wodoru oraz rosło zużycie abrazyjne

badanych powłok. Natomiast w publikacji Junjun Wang (Wang et al., Surf. Coatings Technol., 2013) wykazano znaczący wzrost twardości powłok DLC z około 7 GPa dla czystej powłoki do około 22 GPa dla powłoki DLC o zawartości krzemu 14,8% at. Dla tej powłoki zaobserwowano najmniejsze zużycie i najniższą wartość współczynnika tarcia.

Powłoki węglowe znajdują również zastosowanie jako pokrycia na stopach lekkich, w tym stopach aluminium. Niepokryte stopy aluminium nie mogą być stosowane na elementy pracujące w warunkach zużycia ze względu na ich szybkie utlenianie (wysokie powinowactwo chemiczne tlenu i aluminium). Powstała na skutek procesów utleniania twarda warstwa Al_2O_3 na powierzchni stopu ulega delaminacji w skojarzeniu ze współpracującym elementem, powodując wzrost zużycia na skutek obecności trzeciego ciała (produktów zużycia) w styku. W celu zwiększenia odporności na ścieranie i dla ochrony powierzchni stopów aluminium przed tlenem z powietrza, stosuje się różne techniki osadzania powłok lub modyfikacji powierzchni.

Z kolei nanostrukturalne powłoki węglowe zawierające nanometrycznej wielkości ziarna Pd, tzw. powłoki C-Pd, ze względu na swoje unikalne właściwości oraz strukturę znajdują zastosowanie jako czujniki wodoru lub jego związków. Czułość takich czujników jest warunkowana głównie strukturą oraz składem nanomateriałów. Wspomniane powłoki nanokompozytowe cechują się wysokim stosunkiem pola powierzchni do objętości stąd ich właściwości powierzchniowe i przypowierzchniowe determinować będą rodzaj mechanizmów oddziaływania w układzie H_2 – powłoka C-Pd. Ocena właściwości mechanicznych i tribologicznych powłok C-Pd jest istotna z punktu widzenia zarówno niezawodności samej powłoki jak i mechanicznego układu detektora.

Struktury grafenowe

Grafen jest materiałem, nad którym trwają obecnie intensywne prace badawcze. Dwuwymiarowy charakter oraz hybrydyzacja elektronów sp^2 sprawia, że grafen charakteryzuje się wyjątkowymi właściwościami praktycznie nieosiągalnymi w odniesieniu do typowych materiałów inżynierskich. Jego bardzo dobre właściwości elektryczne (duża ruchliwość elektronów w temperaturze pokojowej, powyżej $\approx 15000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$), mechaniczne - moduł sprężystości wzdłużnej sięgający 1 TPa oraz cieplne - przewodność cieplna $\approx 5000 - 5300 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, stawiają go na czele materiałów najbardziej pożądanym do zastosowań w różnych gałęziach nauki i przemysłu. W ostatniej dekadzie obserwuje się zwiększone zainteresowanie w obszarze syntezy grafenu, którą można podzielić na dwie grupy metod: top-down oraz bottom-up.

Badania właściwości tribologicznych grafenu zyskały na uwadze dopiero w ostatnich latach (Berman et al., Mater. Today, 2014), natomiast początkowo bazowały one na wynikach opisujących anizotropię tych właściwości przede wszystkim ze względu na zmarszczki powstałe zarówno w trakcie syntezy jak i transferu na inne podłoża. W cytowanej pracy stwierdzono istotne obniżenie współczynnika tarcia dla grafenu w porównaniu do czystych podłoży. Wyniki te uzyskano zarówno w przypadku grafenu eksfoliowanego, wzrastającego epitaksjalnie jak i osadzonego metodą CVD na różnych podłożach (np. miedzi, niklu, dwutlenku krzemu). Pomimo wielu prac na temat ogólnych

właściwości grafenu **właściwości tribologiczne grafenu są nadal słabo scharakteryzowane**. Właściwości te determinowane są przez adhezję grafenu do podłoża, liczbę warstw a także powstawanie zmarszczek, (Lin et al., Surf. Coatings Technol., 2011).

Nanocząstki metaliczne

Stosowanie ultra drobnych cząstek w postaci zawiesiny koloidalnej do poprawy właściwości olejów smarnych jest znane od lat 50-tych ubiegłego stulecia. Pierwszą grupę takich związków stanowiły tzw. dodatki dyspergujące będące cząsteczkami wodorotlenków i węglanów metali ziem alkalicznych, zawieszonymi w olejach smarnych na bazie węglowodorów. Na podstawie badań smarów stałych jako dodatków do olejów smarnych, stwierdzono, że skuteczność tych dodatków jest zależna od rozmiaru ich cząstek. W ciągu ostatnich dwóch dekad podejmowano szereg prób w celu syntezy nanocząstek nieorganicznych jako dodatków smarnych, głównie tribologicznie aktywnych.

W odniesieniu do właściwości tribologicznych, obecność określonej ilości nanocząstek w nierównościach współpracujących powierzchni zabezpiecza je przed ich bezpośrednim kontaktem, zwiększając tym samym odporność na zużycie. Ponadto, dodawanie nanocząstek do środka poślizgowego (oleju) wydaje się zwiększać zdolność nośną (Rapoport et al., Adv. Mater., 2003). W przypadku wysoko obciążonych powierzchni kontaktu zarówno płyny jak i smary są wypychane z obszaru styku, a tym samym nie zapewniają odpowiednich warunków smarowania. Jednak jedną z głównych trudności w stosowaniu jako dodatki nanocząstek jest ich dyspersja lub rozpuszczanie w olejach smarnych, które zazwyczaj bazują na węglowodorach. Dzięki modyfikacji powierzchni nanocząstek przez długołańcuchowe węglowodory o wysokiej masie cząsteczkowej, stało się możliwe tworzenie związków nieorganicznych stabilnie zdyspergowanych w olejach smarnych. Wytwarzanie powierzchniowo modyfikowanych nanocząstek metalicznych do zastosowań tribologicznych oparte jest na wykorzystaniu dobrze znanych metod syntezy nanocząstek metali i półprzewodników przez chemiczne procesy koloidalne, które pozwalają na dokładną kontrolę rozmiaru cząstek i stopnia ich agregacji.

Odpowiednie smarowanie oraz redukcja zużycia mechanicznego stanowią kluczowe wyzwania dla technologii urządzeń w skali mikro i nano. W przypadku ochronnych materiałów smarnych przeznaczonych na styki elektryczne **alternatywą dla stosowania metali szlachetnych (Ag, Au, Pd) w postaci stopów, powłok lub wielowarstw może być wykorzystanie do tych celów nanocząstek tych metali**. Dyspersja powierzchniowo zmodyfikowanych nanocząstek metalicznych w olejach bazowych może być łatwo wprowadzona do obecnie stosowanych substancji smarujących poprzez odpowiednie zaprojektowanie struktury typu rdzeń-otoczka (*ang. core-shell structure*).

Głównym celem naukowym moich prac badawczych prowadzonych po doktoracie było opracowanie metodologii pomiaru, przeprowadzenie badań oraz analiza właściwości tribologicznych w skali mikro- i nanometrycznej powłok na bazie węgla oraz nanocząstek metalicznych.

Publikacje wchodzące w skład cyklu [B1, B2, B3] prezentują rezultaty badań współczynnika tarcia w nanoskali przeprowadzonych dla szeregu powłok na bazie węgla (w tym amorficznego węgla a-C, powłok nanokompozytowych TiC/a-C o różnym udziale fazowym, uwodornionego amorficznego węgla a-C:H niemodyfikowanego oraz modyfikowanego domieszką Ag i Si o różnej koncentracji oraz struktur grafenowych mono- i wielowarstwowych). W swoich badaniach dotyczących zagadnień nanotribologii przeprowadzałem kalibrację sił bocznych w oparciu o opisaną powyżej metodę Ogletree. W publikacjach [B4, B5] opisano badania właściwości tribologicznych w skali nano/mikro dla powłok węglowych naniesionych na stopy aluminium w wykorzystaniu technik nanoindentacji. Publikacja [B6] dotyczy pomiaru właściwości mechanicznych i tribologicznych nanokompozytowych powłok C-Pd z wykorzystaniem technik nanoindentacji. Natomiast dwie ostatnie publikacje cyklu [B7, B8] oraz patent [B9] prezentują rezultaty badań właściwości tribologicznych nanocząstek Pd oraz Au wykorzystywanych jako dodatki do olejów bazowych.

Artykuły wchodzące w skład cyklu [B1–B8] opublikowane są w czasopismach indeksowanych w Journal Citation Reports (JCR), które są sklasyfikowane tematycznie przez JCR jako: „Materials Science”, „Multidisciplinary Science”, „Physics”, „Nanoscience & Nanotechnology”, „Mechanical Science” oraz „Coatings & Films Science”. Wymienione wyżej kategorie dotyczą badań właściwości nanomateriałów i wpisują się w zakres dyscypliny Inżynieria Materiałowa.

II. Badania właściwości tribologicznych powłok na bazie węgla

Głównym obszarem moich zainteresowań w zakresie tribologii są szeroko definiowane materiały na bazie węgla ze szczególnym uwzględnieniem powłok nanokompozytowych, których charakterystyka jest zamieszczona w pracach [B1, B2, B4, B5, B6]. Wytwarzane powłoki na bazie węgla odgrywają ważną rolę ze względu na prezentowane właściwości mechaniczne i tribologiczne. W zależności od sposobu wytwarzania (syntezy) oraz kontroli szeregu parametrów, takich jak zawartość wodoru lub stosunek wiązań sp²/sp³, materiały te mogą charakteryzować się optymalną twardością, jak i niską wartością współczynnika tarcia i zużycia w warunkach ciśnienia atmosferycznego lub próżni. Ponadto, jeśli do powłok węglowych wprowadzone zostaną krystalicity drugiej fazy o wymiarach nanometrycznych uzyskać można struktury nanokompozytowe, mogące wykazywać wzrost właściwości mechanicznych (np. zwiększenie twardości) podczas gdy właściwości tribologiczne są utrzymywane na niezmiennym poziomie bądź w niektórych przypadkach również ulegają polepszeniu.

Pierwsza z serii prac [B1] jest wynikiem współpracy z grupą Prof. Asunción Fernández Camacho podczas odbytego przeze mnie stażu podoktorskiego w Instytucie Inżynierii Materiałowej Uniwersytetu w Sewilli (Hiszpania). Praca ta dotyczy badań właściwości tribologicznych powłok, w której cztery różne powłoki osadzone metodą magnetronową: amorficzny węgiel (a-C), dwie powłoki nanokompozytowe TiC/a-C o różnym udziale fazowym (1:1 oraz 1:3) oraz nanokrystaliczny TiC zostały wykorzystane jako powierzchnie do określenia ich współczynnika tarcia w nanoskali oraz identyfikacji kontrastu tarcia na badanych powierzchniach. Jako próbki odniesienia wykorzystano próbkę wysoko zorientowanego grafitu pirolitycznego (*ang. highly oriented pyrolytic graphite, HOPG*) oraz próbkę uwodornionego amorficznego węgla (a-C:H, 42% at. H) aby określić wpływ struktury geometrycznej powierzchni oraz obecności wodoru w powłoce na mierzone wartości. Badanie topografii powierzchni przeprowadziłem w oparciu o tryb kontaktowy AFM natomiast badania właściwości tribologicznych w nanoskali zostały przeprowadzone dwutorowo. W pierwszym etapie charakteryzowałem kontrast tarcia na badanych powierzchniach. Następnie szacowałem średni współczynnik tarcia analizowanych powierzchni. Dodatkowo zaproponowałem metodę „kanapkową” (*ang. „sandwich method”*) pozwalającą uwzględnić zużywanie się bądź niszczenie ostrza AFM występujące w trakcie badania, ograniczając tym samym występowanie błędów pomiarowych z tym związanych. Ponadto, w celu ułatwienia obliczeń matematycznych związanych z analizą ilościową i jakościową uzyskanych obrazów LFM opracowałem oprogramowanie pozwalające na przeprowadzenie tych obliczeń w sposób rutynowy [L. Kołodziejczyk, D. Martinez-Martinez, J.C. Sanchez-Lopez, Playing the AFM, 2006. <http://www.icmse.csic.es/software/playing-AFM.zip>, 2B1]. W przypadku analizy jakościowej oprogramowanie umożliwia analizę kontrastu tarcia z uwzględnieniem korekty przesunięć obrazów LFM. Do analizy ilościowej oprogramowanie wykorzystuje procedury kalibracji sygnału LFM metodą Ogletree, segmentacji obrazów dla różnych sił normalnych oraz umożliwia uzyskanie histogramów LFM oraz obliczanie nachylenia prostych LFM w celu uzyskania wartości współczynnika tarcia.

Metoda LFM okazała się być użytecznym narzędziem do charakteryzowania mieszaniny faz o różnych współczynnikach tarcia. Uzyskane wyniki wskazały dominujący wpływ fazy amorficznego węgla nie pozwalającego na znalezienie różnic dla badanych materiałów nanokompozytowych. Wyznaczone wartości współczynnika tarcia badanych powłok są zbliżone do danych literaturowych dotyczących makroskali.

Druga praca cyklu [B2] dotyczy badań właściwości tribologicznych warstw na bazie węgla a-C:H zawierających dodatek srebra lub krzemu. Badania te zostały zapoczątkowane w ramach międzynarodowego projektu badawczego ERA-NET "Warstwy Węgiel-Srebro" [CARSILA - CARbon-Silver LAYer] realizowanego w latach 2010 – 2013 [2J5]. Pomiar współczynnika tarcia badanych powłok przeprowadziłem w oparciu o mikroskopię sił bocznych LFM z wykorzystaniem dwu różnych materiałów sond AFM (krzemowej oraz pokrytej powłoką nieuwodornionego węgla ta-C). Zużycie sondy określałem w oparciu o procedurę dekonwolucji ostrza (*ang. blind tip reconstruction*). Natomiast badania zużycia w skali nano/mikro wykonałem z wykorzystaniem

zmodyfikowanej metody rysy na nanoindenterze dla dwu różnych sił normalnych. Modyfikacja metody umożliwiła przeprowadzenie badań zużycia w trybie posuwisto-zwrotnym (*ang. reciprocating sliding*). Metoda bazuje na klasycznej metodzie rysy podczas gdy wartość przyłożonej siły normalnej na stożkowym penetratorze jest utrzymywana na stałym poziomie dla określonej liczby cykli. W celu pomiaru współczynnika zużycia wykonałem profile poprzeczne w miejscu przeprowadzenia testu. Następnie wartość współczynnika zużycia wyznaczałem w oparciu o równanie Archarda. Próbkki zostały wcześniej zbadane pod kątem właściwości mechanicznych: twardości i modułu Younga z wykorzystaniem technik nanoindentacji w trybie ciągłego pomiaru sztywności układu wgłębnik-próbka (*ang. continuous stiffness measurement, CSM*) a następnie dane te zostały zanalizowane w oparciu o model zaproponowany przez Olivera i Pharra (Pharr et al., J. Mater. Res., 1992). Pozwoliło to na określenie parametru plastyczności H/E oraz H^3/E^2 (*ang. plasticity index*) przekładającego się bezpośrednio na zachowanie powłoki w trakcie badań zużycia. W celu zbadania wpływu topografii powierzchni badanych powłok na ich właściwości tribologiczne a w szczególności na wartość współczynnika tarcia, wykorzystałem obrazowanie AFM w trybie kontaktu przerywanego (*ang. tapping mode, TM*).

W rezultacie przeprowadzonych badań uzyskałem niewielki wzrost zużycia dla powłok Si-DLC względem DLC, co jednakże nie eliminuje ich w zastosowaniu do nisko-obciążonych par ciernych. W przypadku powłok Ag-DLC zaobserwowałem negatywny wpływ domieszki srebra na właściwości tribologiczne. Jednym z istotniejszych wniosków jest także stwierdzenie braku korelacji parametrów H^3/E^2 oraz H/E ze zużyciem powłok Si-DLC.

Praca [B2] jest tematycznie powiązana z szeregiem badań poświęconych charakterystyce powłok węglowych domieszkowanych Ag lub Si, których wyniki zamieszczone są w moich pracach [2A5, 2A7, 2A8, 2A11, 2E1, 2E3] oraz patencie [2C2] spoza cyklu habilitacyjnego, wymienionych w Załączniku Nr 6 „Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki”.

Prace [B4, B5] cyklu habilitacyjnego dotyczą badań właściwości tribologicznych powłok węglowych wytworzonych na umocnionym wydzieleniowo stopie aluminium 7075 z wykorzystaniem dwóch technologii osadzania: za pomocą lasera impulsowego (*ang. pulsed laser deposition, PLD*) [B4] oraz metody hybrydowej na bazie wspomaganego plazmą częstotliwości radiowej chemicznego osadzania z fazy gazowej wraz z rozpylaniem magnetronowym (*ang. radio frequency plasma assisted chemical vapour deposition/magnetron sputtering, RF PACVD/MS*) [B5]. Przygotowane próbki badane były pod kątem morfologii i struktury geometrycznej powierzchni z wykorzystaniem obrazowania AFM w trybie przerywanego kontaktu. Właściwości mechaniczne określiłem z wykorzystaniem technik nanoindentacji w trybie CSM. Badania tribologiczne zostały poprzedzone analizą przyczepności powłok do podłoża ze stopu aluminium, na podstawie metody rysy z wykorzystaniem nanoindentera. Badania zużycia w skali

nano/mikro przeprowadziłem w trybie posuwisto-zwrotnym, które zostały uzupełnione o wyniki badania zużycia oraz współczynnika tarcia metodą kulka-tarcza (*ang. ball on disk*).

W przypadku powłok osadzanych metodą PLD badałem wpływ wprowadzania azotu w trakcie tworzenia powłoki przejściowej Ti lub docelowej powłoki węglowej na właściwości tribologiczne. W wyniku przeprowadzonych badań adhezji powłok najwyższą wartość krytycznej siły delaminacji (6,9 mN) otrzymano w przypadku powłoki Ti/a:C, której synteza powłoki przejściowej jak i docelowej powłoki węglowej przebiegała w warunkach próżni. Wspomniana powłoka cechuje się również najwyższą odpornością na zużycie ($K = 50 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) oraz odpowiednio niskim współczynnikiem tarcia (0,16). Wprowadzenie azotu w trakcie osadzania powłoki węglowej zmniejszyło wartość krytycznej siły delaminacji o prawie połowę (3,1 – 3,8 mN) w stosunku do powłoki Ti/a:C, natomiast w przypadku prowadzenia procesu osadzania powłoki przejściowej w atmosferze azotu uzyskana powłoka TiN/a:C:N charakteryzowała się pośrednią wartością siły delaminacji wynoszącą 4,6 mN. Może to być wynikiem tworzenia się fazy przejściowej TiN o wysokim stopniu koherencji z materiałem podłoża ze względu na identyczną budowę krystalograficzną. Uzyskane wartości parametru zużycia dla powłok, której synteza przebiegała częściowo w atmosferze azotu są ok. 3–4 krotnie wyższe niż dla powłoki Ti/a:C (od $143 \cdot 10^{-6}$ do $211 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) natomiast współczynnik tarcia zawiera się w przedziale 0,13 – 0,15.

Reasumując, wprowadzenie azotu w trakcie wytwarzania zarówno warstwy przejściowej jak i warstwy węglowej powoduje wzrost zużycia powłok, pomimo niewielkiego obniżenia współczynnika tarcia.

W przypadku powłok osadzanych metodą hybrydową RF PACVD/MS badałem właściwości tribologiczne powłok węglowych Ti/TiC/a-C:H powstałych w wyniku syntezy przy zastosowaniu różnego ujemnego potencjału autopolaryzacji podłoża (w zakresie 150 – 600 V). Badania przeprowadziłem z wykorzystaniem technik nanoindentacji bazując na trybie posuwisto-zwrotnym, stosując diamentowy penetrator stożkowy o promieniu zaokrąglenia równym 1 μm oraz obciążenia z zakresu 1 – 3 mN. Na podstawie przeprowadzonych badań najniższe wartości odporności na zużycie wykazała powłoka Ti/TiC/a-C:H osadzana przy najmniejszym ujemnym potencjale autopolaryzacji podłoża (150 V), cechująca się zarazem najniższą twardością (ok. 10 GPa). Podobne najniższe wyniki uzyskano niezależnie od użytej siły obciążającej penetrator podczas prób tarcia (1–3 mN) i wynosiły one od $2,55 \cdot 10^{-5}$ do $4,08 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. W przypadku twardszych powłok (ok. 15 i 18 GPa) osadzanych przy wyższych ujemnych potencjałach autopolaryzacji (300 i 600 V) uzyskano wartości zbliżone i odpowiednio niższe o 35 – 75% od uzyskanych dla powłoki wytwarzanej przy najniższym potencjale autopolaryzacji (dla Ti/TiC/a-C:H-2 od $1,17 \cdot 10^{-5}$ do $1,95 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$; Ti/TiC/a-C:H-3 od $9,88 \cdot 10^{-6}$ do $2,03 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$). Wyższe zużycie w przypadku najmniej twardych powłok może być wynikiem innego mechanizmu odkształcenia pod wpływem działającego obciążenia w trakcie prób tarcia. Obserwowano tworzenie się wypływek materiału na krawędziach

śladów zużycia osiągających niekiedy wysokość ok. 40 nm powyżej profilu powierzchni, przy głębokości zużycia rzędu 50 nm (po 250 cyklach w trybie posuwisto-zwrotnym). Podobne zjawisko nie było obserwowane dla powłoki o najwyższej twardości. Uzyskane wyniki zużycia są w zgodzie z często pojawiającą się w literaturze odwrotnie proporcjonalną zależnością współczynnika zużycia w funkcji parametru plastyczności H^3/E^2 . Dla badanych powłok współczynnik ten wynosił odpowiednio 0,18 (potencjał autopolaryzacji -150 V); 0,27 (potencjał autopolaryzacji -300 V) oraz 0,38 (potencjał autopolaryzacji -600 V). Aczkolwiek, w opinii autora niniejszego Autoreferatu pomimo zgodności powyższej zależności nie należy bezkrytycznie traktować parametru H^3/E^2 jako parametr definiujący odporność na zużycie zawsze w sposób poprawny. Dowodem na zgoła odmienną zależność lub jej brak może być jedna z opisanych wcześniej prac [B2] zawartych w cyklu habilitacyjnym. Przedstawione badania tribologiczne powłok w nanoskali zostały uzupełnione o wyniki zużycia dla testów z skali makro (metoda kulka-tarcza, przeciwpróbka Al_2O_3) dla powłok o skrajnych wartościach twardości (10 i 18 GPa). W zależności od potencjału autopolaryzacji (twardości powłok) uzyskano następujące wyniki parametru zużycia: $9,0 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ dla Ti/TiC/a-C:H-1 oraz $4,4 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ dla Ti/TiC/a-C:H-3. Podobnie do wyników badań w nanoskali, różnice w wartościach parametru zużycia mogą być tłumaczone faktem, iż podczas tarcia powłoka Ti/TiC/a-C:H o twardości ok. 10 GPa podlega odkształceniu plastycznemu na skutek przyłożonego obciążenia.

Zwiększone zużycie dla powłoki Ti/TiC/a-C:H osadzonej przy najniższym ujemnym potencjale autopolaryzacji podłoża wynika z jej mechanizmu odkształcenia (plastycznego) powodującego tworzenie spiętrzeń materiału na brzegach śladu zużycia i jest ściśle związane z właściwościami mechanicznymi (twardością) otrzymanych powłok. Zjawisko to nie było obserwowane dla powłoki osadzonej przy najwyższej wartości ujemnego potencjału autopolaryzacji podłoża.

Prace [B4, B5] są tematycznie powiązane z innymi moimi pracami spoza cyklu habilitacyjnego dotyczącymi analizy wpływu modyfikacji stopów aluminium na ich właściwości [2A10, 2A12, 2A13, 2E2, 2E7]. Wspomniane prace zawarte zostały w Załączniku Nr 6 „Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki”.

Praca [B6] dotyczy badań właściwości tribologicznych i mechanicznych powłok C-Pd z wykorzystaniem technik nanoindentacji. Czujniki wodoru z aktywnymi powłokami C-Pd działają na zasadzie pomiaru zmiany rezystancji tej powłoki pod wpływem wodoru. Stąd też istotne jest również, aby aktywna warstwa tego czujnika posiadała najlepsze właściwości mechaniczne i tribologiczne. Badane powłoki zostały wytworzone metodą PVD z wykorzystaniem fulerenów C_{60} oraz octanu palladu jako prekursorów. Powłoki te zostały osadzone na dwu różnych podłożach krzemowych: z wytworzoną powłoką DLC (grubość 160 nm) oraz warstwą SiO_2 (grubość ok. 390 nm). Powłoki C-Pd miały następujące grubości: 503 nm (na podpowłoce DLC) oraz 452 nm i 932 nm (na

międzywarstwie SiO₂). W celu określenia w sposób pośredni właściwości tribologicznych powłok C-Pd wykorzystano metodę rysy z zastosowaniem nanoindentera (*ang. nanoscratch*). W celu wykluczenia ewentualnych błędów siła krytyczna delaminacji obliczana była na podstawie zmian wartości współczynnika tarcia rejestrowanego podczas testu, wielkości zagłębienia w powłoce w trakcie testu oraz obserwacji śladów zużycia (powstałej rysy) przy użyciu mikroskopii optycznej. W rezultacie przeprowadzonych badań najwyższą adhezją do podłoża cechowała się najgrubsza z powłok C-Pd osadzana na podłożu z międzywarstwą SiO₂ (siła krytyczna wynosiła 4,18 mN). Natomiast wartości adhezji w przypadku powłok C-Pd osadzanych na podłożach z międzywarstwami DLC i SiO₂ o podobnej grubości są do siebie zbliżone pomimo istotnych różnic w zawartości Pd oraz struktury geometrycznej powierzchni.

III. Badania właściwości tribologicznych struktur grafenowych

W kontekście uzupełnienia przytoczonych wcześniej danych literaturowych dotyczących nanotribologii grafenu podjąłem prace badawcze, których rezultaty zawarte są w pracy [B3] cyklu habilitacyjnego. Badania te zapoczątkowane zostały w ramach realizacji projektu GRAF-TECH „GraphRoll: Grafenowy nanokompozyt do rewersyjnego magazynowania wodoru” w latach 2013–2015 [2J4]. W pracy [B3] badałem właściwości tribologiczne struktur grafenowych wytwarzanych klasyczną metodą CVD oraz nową metodą wzrostu grafenu na ciekłej matrycy formującej. Pomiar współczynnika tarcia grafenu przeprowadziłem metodą mikroskopii sił bocznych LFM z uwzględnieniem modyfikacji zaproponowanej we wcześniejszej pracy z cyklu habilitacyjnego [B1]. Głównym zamysłem prowadzonych badań było określenie charakterystyki tarciowej polikrystalicznego grafenu wytwarzanego nową technologią, opracowaną w moim macierzystym Instytucie. Dodatkowo, została przeprowadzona pełna charakterystyka grafenu włączając jakościową i ilościową analizę z wykorzystaniem mikroskopii optycznej, skaningowej elektronowej, sił atomowych oraz spektroskopii ramanowskiej. Jako próbki referencyjne wykorzystałem HOPG oraz krzem z wytworzoną na jego powierzchni 300 nm warstwą tlenku krzemu, który stanowił materiał podłoża dla transferowanych struktur grafenowych. Ponieważ otrzymywane i przenoszone na materiał podłoża struktury grafenowe nie są wolne od zanieczyszczeń, będących wynikiem zarówno samej technologii wytwarzania jak i późniejszej metody transferu, w pierwszym etapie badane powierzchnie zostały poddane alternatywnej metodzie oczyszczania mechanicznego z wykorzystaniem sondy AFM. Oczyszczanie przeprowadziłem w trybie kontaktowym przy niewielkiej wartości obciążenia (2-3 nN), aby nie wpływać na strukturę samego grafenu a jedynie usunąć zanieczyszczenia poza obszar badania. W rezultacie przeprowadzonych badań oszacowałem średnie wartości współczynnika tarcia dla struktur grafenowych i powierzchni referencyjnych w oparciu o kalibrację siły bocznej metodą Ogletree.

W niniejszej pracy wykazałem znaczny spadek (od 1,4 do ponad 5 razy) wartości współczynnika tarcia dla obu rodzajów struktur grafenowych w porównaniu z powierzchnią materiału podłoża, co pozostaje w pełnej zgodności z dotychczasowymi doniesieniami literaturowymi. Ponadto różnice w wartościach współczynnika tarcia dla

pomiarów z wykorzystaniem różnych materiałów sond AFM związane są z ich powinowactwem chemicznym do skanowanej powierzchni, stąd dla wszystkich powierzchni „węglowych” (grafen i grafit) wyższe wartości współczynnika tarcia otrzymałem dla sond pokrytych DLC w porównaniu z sondami Si. Natomiast niższy współczynnik tarcia dla grafenu CVD w porównaniu do grafenu metalurgicznego jest głównie następstwem dużej ilości defektów powstałych na etapie wytwarzania oraz transferu drugiego z wymienionych. Ponadto współczynnik tarcia nie jest bezpośrednio determinowany strukturą geometryczną badanych powierzchni.

Przytoczona praca jest tematycznie powiązana z szeregiem badań nad charakterystyką grafenu pozyskiwanego na drodze wzrostu z ciekłej matrycy, których wyniki zamieszczone są w moich pracach [2A1, 2A4, 2A6, 2A9] spoza cyklu habilitacyjnego, wymienionych w Załączniku Nr 6 „Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki”.

IV. Badania właściwości tribologicznych nanocząstek metalicznych

Podczas stażu podoktorskiego w grupie Prof. Asunción Fernández Camacho w Instytucie Inżynierii Materiałowej Uniwersytetu w Sewilli (Hiszpania) zajmowałem się również zagadnieniami tribologii nanocząstek metalicznych. Badania tribologiczne powierzchniowo modyfikowanych nanocząstek palladu [B7] przeprowadziłem z wykorzystaniem metody kulka-tarcza w temperaturze otoczenia przy względnej wilgotności w zakresie 40–50%. Parę cierną stanowiły dyski z wypolerowanej stali szybkoobrotowej HS 6-5-2 oraz kulki o średnicy 6 mm wykonane ze stali łożyskowej 100Cr6. Maksymalne naprężenia hertzowskie w powstałym styku ciernym wynosiły ok. 1,26 GPa. W trakcie prób tarcia jednocześnie rejestrowałem wartość oporu elektrycznego powstałego styku ciernego. Skład środka smarnego w postaci zawiesiny koloidalnej przygotowany został poprzez zmieszanie nanocząstek Pd (5% wag. rozpuszczonych uprzednio w tetrahydrofuranie, THF) z olejami bazowymi: octanem tetrabutylamonianu (TBA, użytego również podczas syntezy nanocząstek) lub ciekłą parafiną (typowym oleju na bazie węglowodorów). Utworzona zawiesina koloidalna została naniesiona na stalowy dysk przed rozpoczęciem testów tribologicznych. Otrzymane wartości współczynnika tarcia przy zastosowaniu obu substancji smarujących (TBA i parafina) z dodatkiem powierzchniowo zmodyfikowanych nanocząstek Pd były podobne i wynosiły ok. 0,08 co stanowiło niewielki wzrost w stosunku do olejów bazowych bez nanocząstek. Natomiast wartości współczynnika zużycia przy stosowaniu olejów bazowych modyfikowanych nanocząstkami były ponad 50-krotnie niższe w stosunku do olejów bez nanocząstek i wynosiły poniżej $1 \cdot 10^{-10}$ mm³/Nm. Ponadto zarejestrowana wartość oporu elektrycznego badanego styku ciernego wykazała 35-krotny (n-Pd/TBA) oraz ponad 200-krotny (n-Pd/parafina) spadek jego wartości w przypadku zastosowania środków smarnych modyfikowanych nanocząstkami Pd.

Podsumowując, opisana w pracy [B7] procedura, dzięki zastosowaniu małych nanocząstek metalicznych Pd (o średnicy 2 nm), zabezpieczonych warstwą środka

powierzchniowo czynnego, pozwala na efektywne smarowanie elektrycznych styków metalowych o niskiej wartości oporu elektrycznego ($<1 \text{ k}\Omega$). Nanocząstki, w momencie gdy znajdują się w obszarze kontaktu adherują do współpracujących powierzchni styku ciernego, tworząc warstwę ochronną na powierzchni przeciwpróbki (kulki) oraz „uzupełniają” ślady zużycia na powierzchni próbki (dysku). W ten sposób, nanocząstki pomagają dostosować ruch ślizgowy w obszarze styku, zwiększyć obciążalność a także zmniejszyć wytrzymałość na ścinanie i szybkość zużycia. Ponadto w opisywanej pracy zaobserwowałem ukierunkowywanie się cząstek po testach tribologicznych o rozmiarach zbliżonych do tych pierwotnych, co może być dowodem na ich zachowanie zbliżone do łożysk kulkowych w trakcie ich przejścia przez obszar styku. Podsumowując, przedstawione nanocząstki metaliczne modyfikowane powierzchniowo mogą być bardzo przydatne w celu zwiększenia trwałości połączeń ślizgowych dla małych powierzchni styku ze względu na ich wysoką wytrzymałość i doskonałe właściwości tribologiczne, umożliwiając tym samym zachowanie przewodności elektrycznej.

Kolejna praca cyklu habilitacyjnego [B8] stanowi kontynuację wcześniejszych prac dotyczących badania właściwości tribologicznych substancji smarujących wzbogaconych dodatkiem powierzchniowo modyfikowanych nanocząstek. W tej pracy skupiłem się na porównaniu współczynników tarcia i przeprowadzeniu charakterystyk przeciwzużyciowych dla dwu rodzajów nanocząstek, Pd i Au o wielkościach ok. 2nm pokrytych środkiem powierzchniowo czynnym, jako dodatków do dwóch olejów smarnych (TBA oraz parafina). Badania przeprowadziłem dla dwu różnych wartości naprężeń hertzowskich: 1,26 oraz 1,62 GPa. Również w tym przypadku monitorowałem w sposób ciągły opór elektryczny w styku ciernym w celu zdefiniowania zjawisk tribologicznych zachodzących w styku oraz oszacowania potencjalnych możliwości zastosowania nanocząstek do ochrony styków elektrycznych.

W odróżnieniu od nanocząstek Pd nanocząstki Au nie zmieniają w zauważalny sposób wartości współczynnika tarcia oraz kontaktowego oporu elektrycznego w stosunku do olejów bazowych niemodyfikowanych nanocząstkami. Średnia wartość współczynnika tarcia (ok. 0,08) oraz jego zachowanie podczas trwania testu są bardzo podobne do niemodyfikowanej parafiny. Natomiast przeprowadzone badania zużycia przeciwpróbek wykazały ponad 10-krotne obniżenie współczynnika zużycia w przypadku stosowania środków smarnych bazujących na nanocząstkach ($3\text{--}4\cdot 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) będące m.in. wynikiem tworzenia się warstwy przejściowej (*ang. transfer film*) na powierzchni przeciwpróbki. Badania właściwości tribologicznych zostały uzupełnione badaniami przeprowadzonymi dla większych naprężeń hertzowskich w styku ciernym. Uzyskane wyniki pokazały, iż wraz ze wzrostem obciążenia zarówno wartości współczynnika tarcia jak i współczynnika zużycia pozostają na tym samym poziomie lub ulegają poprawie. Wartości współczynnika zużycia wyniosły poniżej $3\cdot 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ a współczynnik tarcia pozostawał na poziomie 0,1 lub niższym podczas trwania całego testu.

Wyniki te potwierdzają, że nanocząstki metaliczne stanowią doskonały materiał do zastosowania jako dodatki przeciwzużyciowe w ekstremalnych warunkach obciążenia

węzła tarcia. Dodatkowo, w przypadku środków smarnych modyfikowanych nanocząstkami Pd uzyskiwane ponad 95% obniżenie oporu elektrycznego w styku ciernym umożliwia ich zastosowanie w mikroelektronice oraz w takich obszarach mikro- i nanotechnologii, gdzie odpowiednie smarowanie oraz ograniczenie zużycia są parametrami krytycznymi. Uzyskane wyniki stanowiły punkt wyjścia do optymalizacji oraz opatentowania technologii syntezy modyfikowanych powierzchniowo nanocząstek metalicznych [B9] jako dodatki przeciwzużyciowe do środków smarnych w zastosowaniu na styki elektryczne.

V. Osiągnięcia naukowo-badawcze w ramach cyklu habilitacyjnego

Do najważniejszych moich osiągnięć naukowo-badawczych stanowiących znaczący wkład w rozwój inżynierii materiałowej należy zaliczyć:

- **Określenie korelacji współczynnika tarcia z parametrami chropowatości nanokompozytowych powłok węglowych TiC/a-C oraz struktur grafenowych.** W przypadku badanych powierzchni dowiodłem, że ich właściwości tarciove nie są bezpośrednio determinowane przez strukturę geometryczną powierzchni.
- **Określenie wpływu materiału sondy LFM na wartość współczynnika tarcia powłok DLC domieszkowanych Ag lub Si oraz struktur grafenowych.** Różnice w wartościach współczynnika tarcia z wykorzystaniem różnych materiałów sond LFM związane są z ich powinowactwem chemicznym do skanowanej powierzchni. W przypadku powłok Si-DLC wyższe wartości współczynnika tarcia uzyskałem dla pomiarów z wykorzystaniem sond krzemowych. Natomiast dla wszystkich powierzchni „węglowych” wyższe wartości współczynnika tarcia otrzymałem dla sond pokrytych DLC w porównaniu z sondami Si.
- **Wykazanie braku korelacji parametrów H^3/E^2 oraz H/E powłok węglowych domieszkowanych krzemem z ich odpornością na zużycie.** Szeroko opisywany dotychczas w literaturze parametr plastyczności (H^3/E^2 i H/E) w sposób pośredni determinował zachowanie tribologiczne powłok węglowych, wyższy indeks plastyczności przekładał się na podwyższoną odporność na zużycie. W przypadku badanych powłok Si-DLC powyższa zależność nie była zachowana, czego przyczyną może być przemiana fazowa zachodząca w powłoce w trakcie próby tarcia przy wysokich obciążeniach styku ciernego.
- **Wykazanie, że zastosowanie nowej generacji środków smarnych na bazie nanocząstek Pd pozwala na ponad 50-krotne obniżenie zużycia oraz ponad 95% obniżenie oporu elektrycznego w styku ciernym.** Przedstawione osiągnięcie jest rezultatem opracowania i charakterystyki tribologicznej olejów bazowych modyfikowanych nanocząstkami Pd dedykowanych na styki elektryczne.
- **Modyfikację metody pomiaru współczynnika tarcia techniką LFM (metoda kanapkowa).** Modyfikacja ta jest użyteczna w przypadku ilościowej analizy współczynnika tarcia badanych powierzchni i pozwala na monitorowanie procesu zużywania się sond pomiarowych. Dodatkowo można ją stosować w przypadku braku wzorców wykorzystywanych do szacowania promienia zaokrąglenia ostrza pomiarowego (procesy dekonwolucji).

- **Stworzenie autorskiego oprogramowania wspomagającego analizę wyników LFM.** Oprogramowanie umożliwia m.in. uwzględnianie w analizie ilościowej kalibracji sygnału LFM, segmentację i korektę przesunięć obrazów LFM, analizę kontrastu tarcia, uzyskanie histogramów LFM oraz obliczanie nachylenia prostych LFM.
- **Wykazanie znacznego obniżenia wartości współczynnika tarcia struktur grafenowych w porównaniu z powierzchnią materiału podłoża.** W ramach tego osiągnięcia opracowałem metodologię pomiaru właściwości tribologicznych grafenu metalurgicznego, w tym metodę mechanicznego czyszczenia struktur grafenowych. Zastosowanie obrazowania AFM w trybie kontaktowym z niewielką wartością obciążenia umożliwiło uzyskanie wolnej od zanieczyszczeń powierzchni w stopniu dużo lepszym niż w przypadku zastosowania innych metod. Dodatkowo metoda ta nie powoduje degradacji badanej powierzchni.

Ponadto, do moich pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych należy zaliczyć:

- Wykazanie dominującego wpływu fazy amorficznego węgla nanokompozytowych powłok węglowych TiC/a-C uniemożliwiającego znalezienie różnic we współczynniku tarcia dla badanych materiałów nanokompozytowych. Pomimo tego metoda LFM okazała się być użytecznym narzędziem do charakteryzowania mieszaniny faz o różnych współczynnikach tarcia. Uzyskane wartości współczynnika tarcia badanych powłok okazały się zbliżone do danych literaturowych dotyczących makroskali.
- Określenie wpływu wprowadzenia azotu w trakcie wytwarzania warstwy przejściowej lub warstwy węglowej na umocnionym wydzieleniowo stopie aluminium 7075 z wykorzystaniem technologii PLD na ich zużycie. Wprowadzenie azotu obniżało odporność na zużycie uzyskanych powłok, przy nieznacznym zmniejszeniu współczynnika tarcia.
- Określenie wpływu stosowanego ujemnego potencjału autopolaryzacji podłoża na wartość zużycia dla powłok wytworzonych na umocnionym wydzieleniowo stopie aluminium 7075 z wykorzystaniem technologii RF PACVD/MS. Wykazałem powiązanie mechanizmu odkształcenia ze zużyciem dla powłok nanoszonych przy różnych wartościach ujemnego potencjału autopolaryzacji podłoża.
- Wykazanie, że wartości adhezji w przypadku powłok węglowych C-Pd osadzanych na podłożach z międzywarstwami DLC i SiO₂ o podobnej grubości są do siebie zbliżone pomimo istotnych różnic w zawartości Pd oraz struktury geometrycznej powierzchni. Osiągnięcie jest wynikiem przeprowadzenia charakterystyki właściwości tribologicznych i mechanicznych nanostrukturalnych powłok węglowych C-Pd.
- Wykazanie, że nanocząstki Au nie wpływają na zmianę wartości współczynnika tarcia oraz kontaktowego oporu elektrycznego, natomiast powodują około 10-krotne zmniejszenie zużycia. W ramach tego osiągnięcia opracowałem i przeprowadziłem charakterystykę tribologiczną nowej generacji środków smarnych na bazie nanocząstek Au.

- Przeprowadzenie charakterystyki właściwości tribologicznych powłok węglowych DLC domieszkowanych srebrem (Ag-DLC) lub krzemem (Si-DLC) z wykorzystaniem techniki LFM. W przypadku powłok Si-DLC otrzymałem niewielki wzrost współczynnika zużycia w porównaniu do powłok niedomieszkowanych. Jednakże uzyskane wyniki nie eliminują ich w zastosowaniu do nisko-obciążonych par ciernych. Natomiast domieszkowanie Ag powłok DLC powoduje znaczne pogorszenie ich właściwości tribologicznych.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

Szczegółowy wykaz cytowanych poniżej osiągnięć naukowo-badawczych zawarty został w Załączniku Nr 6 „Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki”.

W roku 2003 uzyskałem stopień doktora nauk technicznych w dziedzinie inżynierii materiałowej. Pracę doktorską realizowałem na Wydziale Mechanicznym Politechniki Łódzkiej w Instytucie Inżynierii Materiałowej pod kierunkiem Prof. dr hab. inż. Piotra Kuli. Dysertację pt. „Modelowanie matematyczne procesu nawęglania próżniowego” obroniłem z wyróżnieniem. Głównymi zagadnieniami obejmującymi tematykę rozprawy doktorskiej były zjawiska towarzyszące konstytuowaniu się warstwy nawęglonej oraz ich modelowanie matematyczne, które wykonywałem w ramach projektu promotorskiego. Podczas realizacji doktoratu zatrudniony byłem na stanowisku asystenta w Zakładzie Inżynierii Powierzchni i Obróbki Ciepłno-Chemicznej Instytutu Inżynierii Materiałowej.

Wkrótce po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych odbyłem 2 letni staż podoktorski w Instytucie Inżynierii Materiałowej Uniwersytetu w Sewilli (Hiszpania) w grupie Prof. Asunción Fernández Camacho. W ramach stażu zaangażowany byłem w realizację międzynarodowego projektu badawczego FP5-HUMAN POTENTIAL (Research Training Network) [2J10] dotyczącego wytwarzania nowych nanokompozytów na bazie magnezu dedykowanych do magazynowania i transportu wodoru. Jednym z efektów prac wykonanych w ramach tego projektu były dwie publikacje opisujące syntezę proszku MgH_2 oraz analizę jego właściwości [2A15, 2A16] oraz patent dotyczący syntezy proszku uwodornionego magnezu o rozmiarach nanometrycznych przeznaczonego do przechowywania wodoru [2C1]. Oprócz tematyki projektu moje zainteresowania skierowałem również na zagadnienia szeroko pojętej tribologii. W swoich pracach badawczych oprócz tribologii w skali makro skupiłem się na analizie tych właściwości w skali nano- i mikrometrycznej. Podczas stażu podoktorskiego miałem możliwość pogłębiania wiedzy z zakresu mikroskopii sił atomowych we współpracy z dr Peterem Eatonem, specjalistą w dziedzinie obrazowania technikami AFM, autora licznych prac i książek z tej tematyki. Jednym z pierwszych moich osiągnięć w zakresie obrazowania AFM była praca dotycząca charakterystyki nanocząstek metalicznych [2E12].

Od roku 2005 zatrudniony jestem na stanowisku adiunkta w Zakładzie Inżynierii Powierzchni i Obróbki Ciepłno-Chemicznej Instytutu Inżynierii Materiałowej. Wykorzystaną wiedzę ze stażu podoktorskiego mogłem wykorzystywać do badań na nowo zakupionych mikroskopie sił atomowych oraz nanoindenterze. Jednym z tematów badawczych, którym również się zajmowałem była charakterystyka właściwości mechanicznych warstw i powłok z wykorzystaniem technik nanoindentacji. W celu pogłębienia wiedzy z zakresu technik nanoindentacji odbyłem 2 krótkoterminowe staże zagraniczne w Surface Systems & Technology GmbH & Co. KG (Huekelhoven, Niemcy). Badania technikami nanoindentacji wykonywałem w ramach projektów dotyczących wytwarzania nanokompozytów ceramiczno-metalowych [2J6] oraz funkcjonalnych materiałów gradientowych [2J8].

Kolejnym zagadnieniem badawczym, które po części nawiązuje do tematyki mojej rozprawy doktorskiej są procesy obróbki ciepłno-chemicznej, w szczególności nawęglania próżniowego i azotowania. W tym obszarze badań brałem udział w realizacji projektu dotyczącego opracowania procesu hartowania w azocie [2J9] oraz jestem współautorem kilku prac związanych z tą tematyką [2E6, 2E10, 2E13]. Badania wstępne opisane w pracy [2E11] dotyczące możliwości zastosowania symulacji komputerowych nawęglania próżniowego do nawęglania części napawanych zaowocowały późniejszym udziałem w projekcie związanym z wytwarzaniem gradientowych warstw niskotarciowych dla regeneracji części w przemyśle motoryzacyjnym [2J7]. Natomiast w latach 2014 – 2015 realizowałem część zadań projektu, którego celem było opracowanie i wdrożenie technologii recyklingu poprodukcyjnych odpadów taśmy stalowej [2J2]. Poza głównymi tematami badawczymi będącymi tematem Autoreferatu moje zainteresowania naukowe obejmują także charakterystykę powłok wytwarzanych metodą aerozol – żel [2E5] i lekkich stopów Al [2E2, 2E4, 2E7] oraz powłok na bazie TiO₂ [2A2]. Ponadto brałem także udział w badaniach właściwości mechanicznych wykrojników nożowych stosowanych w przemyśle papierniczym [2E8] oraz określeniu potencjału erozyjnego wybranych napojów izotonicznych [2A3].

W ramach kontynuacji badań nad charakterystyką grafenu pozyskiwanego na drodze wzrostu z ciekłej matrycy [2A1, 2A4, 2A6, 2A9] obecnie biorę udział w realizacji głównych zadań projektu zatytułowanego „Materiały kompozytowe na bazie grafenu przeznaczone do oczyszczania wody” [2J1]. Z kolei badania poświęcone charakterystyce powłok węglowych domieszkowanych Ag i Si [2A5, 2A7, 2A8, 2A11, 2C2, 2E1, 2E3] kontynuuję poprzez udział w kolejnym międzynarodowym projekcie ERA-NET [2J3], w którym jestem kierownikiem jednego z głównych zadań.

Podsumowując, po uzyskaniu stopnia doktora byłem zaangażowany w przygotowanie wniosków, wykonanie i raportowanie 3 projektów międzynarodowych oraz 7 projektów finansowanych przez Komitet Badań Naukowych, Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Dodatkowo jestem kierownikiem polskiej części projektu międzynarodowego złożonego na konkurs M-ERA.NET „Atomic Layer Deposition For tailored bottom-top growth of MAX and MXene

films (ALD4MAX)”, który został w lutym 2017r. zaakceptowany przez UE do finansowania [2J0]. W ramach tego projektu będę zajmował się m.in. analizą właściwości tribologicznych i elektrycznych nowych dwuwymiarowych materiałów opartych na fazach MAX (tzw. MXene).

Moja współpraca z jednostkami naukowymi opiera się głównie na realizowanych projektach badawczych wymienionych w Załączniku Nr 6 „Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki”. Nawiązywana była ona również w celu pozyskania partnerów naukowych do nowych projektów lub przeprowadzania określonych badań. Wśród tych jednostek należy wymienić m.in.: Institut National Polytechnique de Grenoble (Francja), Consejo Superior de Investigaciones Cientificas (Hiszpania), The University Of Oxford (Wielka Brytania), Universitaet Dortmund (Niemcy) [3E1]; Technical University of Liberec oraz Charles University, Praga (Republika Czeska) [3E2]; National Institute for Lasers, Plasma, and Radiation Physics (INFLPR), Bukareszt (Rumunia) [3E3] oraz École catholique d'Arts et Métiers ECAM w Lyonie (Francja) a także park naukowo-technologiczny Bionanopark w Łodzi.

W roku 2007 otrzymałem zespołową Nagrodę Gospodarczą Wojewody Łódzkiego za opracowanie „Technologii nawęglania wyrobów stalowych przy obniżonym ciśnieniu wraz z metodą komputerowego projektowania parametrów warstwy nawęglanej” [2K1]. Dodatkowo, efektem prowadzonych przeze mnie prac badawczych było trzykrotnie uhonorowanie mnie nagrodą J.M. Rektora Politechniki Łódzkiej za wybitne osiągnięcia naukowe [2K2, 2K3, 2K4]. W roku 2016 zostałem odznaczony w imieniu Prezydenta RP medalem brązowym za długoletnią służbę [3D1].

Wyniki moich prac zaprezentowane zostały na 30 konferencjach naukowych krajowych oraz międzynarodowych z zakresu inżynierii materiałowej w tym inżynierii powierzchni oraz tribologii. W przypadku wymienionych komunikatów ustnych [2L1-2L8] w 7 z nich byłem prezentującym autorem. W roku 2013 oraz 2016 byłem współorganizatorem Ogólnopolskiej Konferencji Naukowa "Nowoczesne Technologie w Inżynierii Powierzchni Łódź – Spała” mającej na celu prezentację aktualnych osiągnięć naukowych w inżynierii powierzchni oraz wymianę doświadczeń w zakresie tej dyscypliny naukowej [3C3, 3C7]. Prowadziłem także warsztaty z zakresu wykorzystania mikroskopii sił atomowych w badaniach grafenu podczas SENM 2015 Graphene Workshop, satelickiego wydarzenia podczas międzynarodowej konferencji Smart Engineering of New Materials 2015 w Łodzi [3C6], a także podczas dwu seminariów naukowych GRAFEN organizowanych przez Instytut Inżynierii Materiałowej PŁ [3C4, 3C5]. Byłem również zaangażowany w organizację dwu edycji Ogólnopolskiej Konferencji „Nauka i Biznes” - transfer nowych technologii (edycje 2007 i 2008) organizowanych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Łódzkiej [3C1, 3C2].

Do zrealizowanych przeze mnie prac organizacyjnych, oprócz wspomnianego powyżej zaangażowania w organizację konferencji oraz seminariów, mogę zaliczyć prace w

zespołach odpowiedzialnych za przygotowanie Instytutu Inżynierii Materiałowej Politechniki Łódzkiej do przeprowadzenia i uzyskania pozytywnej akredytacji Komisji Akredytacyjnej Uczelni Technicznych (KAUT) oraz Polskiej Komisji Akredytacyjnej (PKA).

Ponadto jestem również recenzentem kilku artykułów w międzynarodowych czasopismach indeksowanych w JCR [**3P1**, **3P2**, **3P3**].

Działalność dydaktyczna

Swoją działalność dydaktyczną rozpocząłem z chwilą podjęcia studiów doktoranckich. Prowadziłem zajęcia na studiach stacjonarnych, niestacjonarnych, a także doktoranckich dla studentów Wydziału Mechanicznego, Chemicznego, Elektrycznego oraz Centrum Kształcenia Międzynarodowego IFE. Obecnie jestem kierownikiem dwu przedmiotów:

- Metody badań nanomateriałów (wydział Mechaniczny, kierunek Inżynieria Materiałowa, studia doktoranckie),
- Laboratory of Materials Science (IFE, kierunek Telecommunication and Computer Science, studia stacjonarne pierwszego stopnia).

W ramach wyżej wymienionych przedmiotów prowadzę zajęcia w postaci wykładów oraz laboratoriów. Oprócz nich prowadziłem lub prowadzę także wykłady, ćwiczenia, laboratoria oraz projekty w języku polskim oraz angielskim w ramach następujących przedmiotów z zakresu:

- materiałoznawstwa (Nauka o materiałach, Teoretyczne podstawy materiałoznawstwa, Materiałoznawstwo i obróbka cieplna, Urządzenia i technologie obróbki cieplno-chemicznej, Obróbka cieplna, Nowoczesne materiały inżynierskie, Niszczenie i zużycie elementów maszyn, Basic Materials, Materials Science, Advanced Materials Science);
- metodyki badawczej (Podstawowe metody badań materiałów, Metody i techniki badań materiałów, Metody badań materiałów protetycznych, Zaawansowane metody badań materiałów stomatologicznych, Methods and Techniques for Materials Testing);
- technik wytwarzania (Przetwarzanie materiałów metalicznych, Manufacturing);
- informatyki (Podstawy informatyki, Grafika i komputerowe wspomaganie prac inżynierskich).

W latach 2005–2006 byłem opiekunem kierunku Inżynieria Materiałowa pierwszego roku studiów dziennych Wydziału Mechanicznego PŁ (r. akad. 2005/06) [**3J4**]. Obecnie pełnię funkcję promotora pomocniczego w jednym przewodzie doktorskim z zakresu funkcjonalizacji grafenu poprzez jego wzrost na cząstkach stałych [**3K1**]. Byłem opiekunem naukowym 11 prac inżynierskich i magisterskich na kierunku Inżynieria Materiałowa [**3J1**, **3J2**]. Pełniłem również opiekę naukową nad pracą inżynierską we współpracy z École catholique d'Arts et Métiers ECAM w Lyonie (Francja) [**3J3**]. Efektem tej współpracy było powstanie publikacji z zakresu azotowania plazmowego powłok syntezowanych metodą PVD [**2A14**]. Byłem również recenzentem kilku prac magisterskich na kierunku Inżynieria Materiałowa oraz 3 projektów European Project

Semester w Centrum Kształcenia Międzynarodowego Politechniki Łódzkiej (International Faculty of Engineering - IFE). Na zamówienie wydawnictwa „Galaktyka” dokonałem przekładu na język polski dwóch rozdziałów podręcznika „Materials engineering, science, processing and design” (wyd. II z 2010 r., pod red. Michael Ashby, Hugh Shercliff, David Cebon) zatytułowanych: „Poza sprężystość: plastyczność, uplastycznienie i ciągliwość” oraz „Sztywność i masa: gęstość i moduły sprężystości”, które ukazały się w polskojęzycznej wersji tego podręcznika zatytułowanej „Inżynieria Materiałowa” pod redakcją naukową prof. dr hab. Małgorzaty Lewandowskiej, prof. dr hab. Krzysztofa Kurzydłowskiego oraz prof. dr hab. Zbigniewa Pakiely [2F1, 2F2].

Od 4 lat jestem członkiem Komisji Kierunkowej dla kierunku Inżynieria Materiałowa na Wydziale Mechanicznym PŁ [3Q1]. Ponadto brałem również udział w prezentacjach Instytutu Inżynierii Materiałowej PŁ dla uczniów szkół średnich oraz gimnazjów. W latach 2008–2009 byłem wykładowcą Łódzkiego Uniwersytetu Dziecięcego [3I1], przybliżając najmłodszym uczestnikom zagadnienia związane z budową aut rajdowych oraz nanotechnologią.

Oprócz prowadzonych zajęć staram się podnosić swoje kwalifikacje dydaktyczne poprzez udział w studium podyplomowym „Podwyższanie kompetencji kadry akademickiej i umiejętności absolwentów w aspekcie nowoczesnych metod analizy, symulacji i optymalizacji w procesie projektowania i eksploatacji” dotyczącym obsługi programu inżynierskiego ANSYS Workbench, szkoleniach z zakresu korzystania z uczelnianej platformy WIKAMP i tworzenia e-zajęć w systemie Moodle, a także szkoleniach z zakresu autoprezentacji i wystąpień publicznych.

Dane bibliometryczne

Według bazy **Web of Science**, dnia 16.03.2017 byłem współautorem **24** artykułów w czasopismach indeksowanych w JCR, cytowanych **137** razy, w tym 113 razy z pominięciem autocytowań. Mój indeks Hirscha wynosił **8**.

Według bazy **Scopus**, dnia 16.03.2017 byłem współautorem **27** artykułów w czasopismach indeksowanych w JCR, cytowanych **167** razy, w tym 147 razy z pominięciem autocytowań. Mój indeks Hirscha wynosił **8**.

Sumaryczny współczynnik wpływu Impact Factor (IF) moich prac, wg roku publikacji to **42,715**, w tym dla prac wchodzących w skład cyklu habilitacyjnego sumaryczny IF to **14,586**.

Sumaryczny 5-letni współczynnik wpływu Impact Factor (IF_{5-year}) moich prac, wg roku publikacji to **42,735**, w tym dla prac wchodzących w skład cyklu habilitacyjnego sumaryczny IF_{5-year} to **15,518**.

Sumaryczna liczba punktów za publikacje na podstawie wykazu czasopism naukowych MNiSW, wg roku publikacji wynosi **762** z czego 687 to publikacje z listy A posiadające współczynnik wpływu, natomiast **239** to liczba punktów dla prac wchodzących w skład cyklu habilitacyjnego.

Literatura

- Berman, D., Erdemir, A., & Sumant, A. V. (2014). Graphene: A new emerging lubricant. *Materials Today*, 17(1), 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.12.003>
- Eaton, P., & West, P. (2010). *Atomic Force Microscopy*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199570454.001.0001>
- Hofmann, D., Kunkel, S., Bewilogua, K., & Wittorf, R. (2013). From DLC to Si-DLC based layer systems with optimized properties for tribological applications. *Surface and Coatings Technology*, 215, 357–363. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.06.094>
- Ikeyama, M., Nakao, S., Miyagawa, Y., & Miyagawa, S. (2005). Effects of Si content in DLC films on their friction and wear properties. *Surface and Coatings Technology*, 191(1), 38–42. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.08.075>
- Lin, L.-Y., Kim, D.-E., Kim, W.-K., & Jun, S.-C. (2011). Friction and wear characteristics of multi-layer graphene films investigated by atomic force microscopy. *Surface and Coatings Technology*, 205(20), 4864–4869. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.04.092>
- Manninen, N. K. K., Ribeiro, F., Escudeiro, A., Polcar, T., Carvalho, S., & Cavaleiro, A. (2013). Influence of Ag content on mechanical and tribological behavior of DLC coatings. *Surface and Coatings Technology*, 232, 440–446. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.05.048>
- Mate, C. M., McClelland, G. M., Erlandsson, R., & Chiang, S. (1987). Atomic-scale friction of a tungsten tip on a graphite surface. *Physical Review Letters*, 59(17), 1942–1945. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.59.1942>
- Ogletree, D. F., Carpick, R. W., & Salmeron, M. (1996). Calibration of frictional forces in atomic force microscopy. *Review of Scientific Instruments*, 67(9), 3298. <https://doi.org/10.1063/1.1147411>
- Pharr, G. M., Oliver, W. C., & Brotzen, F. R. (1992). On the generality of the relationship among contact stiffness, contact area, and elastic modulus during indentation. *Journal of Materials Research*, 7(3), 613–617. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.0613>
- Płaza, S., Margielewski, L., & Celichowski, G. (2005). *Wstęp do tribologii i tribochemia*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
- Randeniya, L. K., Bendavid, A., Martin, P. J., Amin, M. S., Preston, E. W., Magdon Ismail, F. S., & Coe, S. (2009). Incorporation of Si and SiO_x into diamond-like carbon films: Impact on surface properties and osteoblast adhesion. *Acta Biomaterialia*, 5(5), 1791–1797. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.01.013>
- Rapoport, L., Fleischer, N., & Tenne, R. (2003). Fullerene-like WS₂ Nanoparticles: Superior Lubricants for Harsh Conditions. *Advanced Materials*, 15(78), 651–655. <https://doi.org/10.1002/adma.200301640>
- Wang, J., Pu, J., Zhang, G., & Wang, L. (2013). Tailoring the structure and property of silicon-doped diamond-like carbon films by controlling the silicon content. *Surface and Coatings Technology*, 235, 326–332. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.07.061>

Lukasz Kołodziejczyk