

Załącznik nr III do wniosku

**dr inż. Wiesław Antoni Graboń**

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

# AUTOREFERAT



## SPIS TREŚCI

I.	Imię i nazwisko .....	2
II.	Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej .....	2
III.	Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych .....	2
IV.	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.).....	3
IV.1.	Wprowadzenie – zdefiniowanie i uzasadnienie wyboru obszaru badawczego .....	4
IV.2.	Krótką charakterystyką celu naukowego, wyników oraz oryginalnego wkładu w prace składające się na spójny tematycznie cykl publikacji.....	7
IV.3.	Podsumowanie .....	39
IV.4.	Literatura .....	41
V.	Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej .....	44
VI.	Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę .....	50
VII.	Oprócz kwestii wymienionych w pkt 1-6 wnioskodawca może podać inne informacje ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.....	52

# Autoreferat

## I. Imię i nazwisko

Wiesław Antoni Graboń

## II. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

Stopień doktora	rok uzyskania: 2009 podmiot nadający: Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Dyscyplina: Budowa i eksploatacja maszyn Dziedzina: nauki techniczne tytuł rozprawy doktorskiej: Badania struktury geometrycznej powierzchni o warstwowych właściwościach funkcjonalnych promotor: prof. dr hab. inż. Paweł Pawlus – Politechnika Rzeszowska recenzenci: prof. dr hab. inż. Władysław Jakubiec, prof. ATH – Akademia Techniczno-Humanistyczna prof. dr hab. inż. Volodymyr Liubimov – Politechnika Rzeszowska
Tytuł magistra	rok uzyskania: 2001 podmiot nadający: Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa kierunek studiów: Organizacja i zarządzanie w przemyśle tytuł pracy magisterskiej: System informatyczny w strukturze Delphi, WWW i Oracle promotor: dr hab. inż. Stanisław Wołek prof. PRZ – Politechnika Rzeszowska

## III. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

2009-obecnie	Adiunkt, Zakład Informatyki, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
2001-2009	Asystent, Zakład Informatyki, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
2000-2001	Stażysta w zakładzie Informatyki Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza



#### **IV. 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.)**

Jako osiągnięcie naukowe wskazuję jednotematyczny cykl publikacji zatytułowany „Struktura geometryczna powierzchni mających ślady wielu procesów obróbkowych i zużycia eksploatacyjnego – aspekty tribologiczne i nowe metody opisu”, który składa się z powiązanych tematycznie następujących artykułów naukowych:

- A1 **Graboń W.A.:** Surface as a carrier of information about the tribological process. Tribology International 2020, vol. 149:105561. **IF 4,872, MNiSW 200 pkt** (Załącznik nr V.1).
- A2 **Graboń W.A.:** A new approach to the description of height distribution of plateau honed cylinder liner surface texture during the initial stage of wear. Wear 2018, vol. 408–409:34–42. **IF 2,95, MNiSW 35 pkt (obecnie 200 pkt)** (Załącznik nr V.2).
- A3 **Graboń W., Pawlus P.:** Improvement of the Rpq parameter calculation. Measurement 2018, vol. 129:236-244. **IF 2,791, MNiSW 30 pkt (obecnie 200 pkt)** (Załącznik nr V.3).
- A4 **Graboń W., Pawlus P., Woś S., Koszela W., Wieczorowski M.:** Evolutions of cylinder liner surface texture and tribological performance of piston ring-liner assembly. Tribology International 2018, vol. 127:545-556. **IF 3,517, MNiSW 35 pkt (obecnie 200 pkt)** (Załącznik nr V.4).
- A5 **Graboń W., Pawlus P., Woś S., Koszela W., Wieczorowski M.:** Effects of cylinder liner surface topography on friction and wear of liner-ring system at low temperature. Tribology International 2018, vol. 121:148–160. **IF 3,517, MNiSW 35 pkt (obecnie 200 pkt)** (Załącznik nr V.5).
- A6 **Graboń W., Pawlus P., Woś S., Koszela W., Wieczorowski M.:** Effects of honed cylinder liner surface texture on tribological properties of piston ring-liner assembly in short time tests. Tribology International 2017, vol. 113:137–148. **IF 3,246, MNiSW 35 pkt (obecnie 200 pkt)** (Załącznik nr V.6).
- A7 **Graboń W., Pawlus P.:** Distinguishing the plateau and valley components of profiles from various types of two-process textures. Metrology and Measurement Systems 2016, vol. 23. **IF 1.598, MNiSW 20 pkt (obecnie 100 pkt)** (Załącznik nr V.7).
- A8 **Graboń W., Pawlus P., Koszela W., Reizer R.:** Proposals of methods of oil capacity calculation. Tribology International 2014, vol. 75:117–22. **IF 1.936, MNiSW 35 pkt (obecnie 200 pkt)** (Załącznik nr V.8).
- A9 **Graboń W., Koszela W., Pawlus P., Ochwat S.:** Improving tribological behaviour of piston ring–cylinder liner frictional pair by liner surface texturing. Tribology International 2013, vol. 61: 102-108. **IF 2,124, MNiSW 35 pkt (obecnie 200 pkt)** (Załącznik nr V.9).

Liczba punktów według punktacji MNiSW, Impact Factor (IF) oraz Category Quartile (CQ) dla czasopism w których opublikowane zostały prace od [A1]–[A9] wynoszą (na dzień 26.10.2021 r.):

Tribology International -	<b>200 pkt MNiSW, IF: 4.872</b> za 2020 rok, IF z 5 lat: 4.766, CQ: <b>Q1</b> ,
WEAR -	<b>200 pkt MNiSW, IF: 3.892</b> za 2020 rok, IF z 5 lat: 4.231, CQ: <b>Q1</b> ,
Measurement -	<b>200 pkt MNiSW, IF: 3.927</b> za 2020 rok, IF z 5 lat: 3.778, CQ: <b>Q1</b> ,
Metrology and Measurement Systems -	<b>100 pkt MNiSW, IF: 1.155</b> za 2020 rok, IF z 5 lat: 1.194, CQ: <b>Q4</b> .

Aby zrealizować szeroki zakres zaplanowanych przeze mnie i przedstawionych w cyklu powiązanych tematycznie publikacji badań, niezbędna była współpraca z naukowcami – światowej klasy specjalistami w swych dziedzinach. Natomiast moją rolę wiodącą i istotny wkład w powstanie tych publikacji potwierdzają oświadczenia współautorów, które zostały dołączone do kopii każdej z prac (załączniki od V.1 do V.9). Większość tych publikacji jest rozpoznawalna w międzynarodowym środowisku naukowym związanym z badaniami nad wpływem struktury geometrycznej powierzchni na zjawisko tarcia i zużycie elementów maszyn i stanowi znaczny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna, o czym bezpośrednio świadczy liczba cytowań (bez autocytowań), która według bazy Web of Science wynosi 286, natomiast według bazy Scopus – 298. Ponadto artykuł [A9] był na liście najczęściej cytowanych prac w czasopiśmie Tribology International w latach 2014–2016, za co otrzymałem od redaktorów tego czasopisma certyfikat (Załącznik VIII.1)

#### **IV.1. Wprowadzenie – zdefiniowanie i uzasadnienie wyboru obszaru badawczego**

Obecnie jednym z najbardziej krytycznych wyzwań dla ludzkości jest ochrona środowiska, a istotnym czynnikiem, który może w tym pomóc, jest oszczędzanie energii. Kluczowym elementem wpływającym na oszczędność energii może być zwiększenie wydajności maszyn i urządzeń, na przykład przez zmniejszenie tarcia. W związku z tym na przestrzeni ostatnich lat na znaczeniu zyskują kwestie zmniejszenia strat powodowanych przez tarcie i zużycie mające miejsce w elementach maszyn wraz z dążeniem do redukcji zużycia energii i paliw w branży transportowej [1],[2]. Szacuje się, że obecnie około od 20% [3] do 30% [4], [5] światowego zużycia energii jest przeznaczane na przezwyciężenie tarcia, przy czym około 3% energii jest wykorzystywane do regeneracji zużytych części i wyposażenia zapasowego z powodu zużycia i awarii z nim związanych [3]. Według autorów pracy [3] straty energii spowodowane tarciami i zużyciem można potencjalnie zmniejszyć o 40% w perspektywie długoterminowej (15 lat) przez wprowadzenie nowych rozwiązań tribologicznych w pojazdach, maszynach i innych urządzeniach. Holmberg i Erdemir [3] stwierdzili, że największe krótkoterminowe oszczędności energii są przewidywane w transporcie (25%) i wytwarzaniu energii (20%), przy czym w dłuższej perspektywie oszczędności wyniosłyby odpowiednio 55% i 40%. Ci sami autorzy szacują, że wdrażanie zaawansowanych rozwiązań tribologicznych może zmniejszyć globalną emisję CO<sub>2</sub>, jak również w krótkim czasie przynieść znaczne oszczędności.

W celu zmniejszenia tarcia oraz zwiększenia efektywności i trwałości skojarzeń ciernych wprowadzana są nowe rozwiązania związane z ukształtowaniem Struktury Geometrycznej Powierzchni (SGP), tak aby była ona wynikiem nakładania się kilku procesów obróbkowych, tworzących niezależne składowe SGP, których zadaniem jest pełnienie odrębnych funkcji. Typowym przykładem jest wewnętrzna powierzchnia tulei cylindrowych po procesie gładzenia płaskowierzchołkowego. W tego typu SGP tak zwana część dolin, utworzona w trakcie procesu gładzenia wykończającego, odpowiedzialna jest za magazynowanie i transport oleju, natomiast część gładka, płaskowierzchołkowa (zwana także plateau), utworzona w trakcie gładzenia ostatecznego, odpowiedzialna jest za zjawiska kontaktowe [6],[7]. Innym przykładem są powierzchnie posiadające tak zwane mikrokieszenie smarowe, które wykonywane są różnymi technikami i które obecnie są przedmiotem wielu badań. Jednym z rozwiązań w dziedzinie powierzchni wieloprocessowych jest opracowany w ostatnich latach przez duńskich badaczy nowy rodzaj tego typu powierzchni przeznaczony do poprawy właściwości tribologicznych smarowanych węzłów ślizgowych [8]. Powierzchnie te są wytwarzane w dwuetapowym procesie technologicznym – wstępnej operacji toczenia, która zapewnia na ostatecznej topografii mający okresowy charakter rowek służący do utrzymania substancji smarującej, oraz operacji szlifowania wspomaganego przez robota, w ramach której

tworzony jest obszar płaskowierzchołkowy zdolny do przenoszenia dużych obciążeń. Powierzchnie te ze względu na swój wielofunkcyjny charakter zostały nazwane MUFU (od angielskiego słowa *multifunctional*).

Należy zaznaczyć, że powierzchnie kilkuprocesowe powstają także podczas okresu docierania, wówczas taka powierzchnia nosi ślady procesu obróbczego i procesu zużycia. Typowym przykładem mogą być powierzchnie tulei cylindrowych na etapie początkowego zużycia [9] i płaszczy tłoków również po wstępnym zużyciu [10]. Zgodnie z pracą [11] początkowe zużycie (zwane niekiedy w anglojęzycznej literaturze *zero-wear*) ma miejsce w przypadku zachowania na powierzchni śladów poprzedzającej obróbki, tzn. gdy zużycie liniowe jest mniejsze od maksymalnej wysokości chropowatości pierwotnej powierzchni. Powierzchnie wieloprocesowe posiadają korzystne właściwości ślizgowe, będące domeną powierzchni gładkich, jak również dużą zdolność do magazynowania oleju, charakterystyczną dla powierzchni porowatych. Dodatkowo, odpowiednio ukształtowana ich struktura geometryczna zapewnia utrzymanie oleju, co wpływa na zmniejszenie ryzyka zatarcia węzłów ślizgowych zawierających tego typu powierzchnie. Ponadto celowo ukształtowane wgłębienia stanowią „pułapkę” na produkty zużycia, przez co zapobiega się gwałtownemu niszczeniu powierzchni, a tym samym szybkiemu zatarciu pary cierniej.

Z punktu widzenia tribologicznego istotną kwestią jest dobre zrozumienie wzajemnych interakcji zachodzących w węźle ślizgowym zawierającym powierzchnie wieloprocesowe, gdyż jest to pierwszy krok do opracowania rozwiązań pozwalających na zmniejszenie strat powodowanych tarciem. Struktura geometryczna powierzchni elementów ciernych, która jest jak „odcisk palca” tej interakcji, zawiera cenne informacje o zachodzących procesach tribologicznych. Podczas eksploatacji, głównie w początkowym jej okresie, właśnie na etapie początkowego zużycia zachodzą istotne zmiany w warstwie wierzchniej, a w szczególności w strukturze geometrycznej powierzchni węzłów ciernych. Zachodzące w SGP zmiany mają ogromny wpływ na jakość i trwałość współpracy elementów danego układu [9],[10],[12]. Dlatego w czasie eksploatacji, a zwłaszcza w trakcie docierania ważne jest poznanie mechanizmów oraz intensywności procesów zużycia, które są zależne od charakterystycznych dla danego układu wymuszeń. Poznanie mechanizmów zużycia występujących podczas współpracy par ciernych może się przyczynić do takiego ukierunkowania procesu technologicznego, który pozwoli na uzyskanie cech użytkowych SGP zapewniających jej podczas eksploatacji jak najlepsze właściwości funkcjonalne.

Tribologiczne aspekty SGP są bezpośrednio związane z jej parametrami. Przykładowo, parametry amplitudowe są związane z tarciem, smarowaniem i zużyciem, mogą także służyć do określania jakości wykonania SGP. Zgodnie z pracą [13] parametr  $S_q$  jest przydatny w badaniu deformacji powierzchni. Skośność  $S_{sk}$  i kurtoza  $S_{ku}$  charakteryzują kształt rozkładu rzędnych powierzchni, przy czym ujemna skośność zazwyczaj pozytywnie wpływa na zjawiska kontaktowe chropowatych powierzchni, przez co prowadzi do zmniejszenia tarcia i dobrego utrzymania substancji smarującej. Orientacja powierzchni względem kierunku poślizgu również jest ważna z punktu widzenia tribologii. Poprzeczna orientacja nierówności prowadzi zazwyczaj do lepszych właściwości tribologicznych w porównaniu z orientacją wzdłużną [14], [15]. Kierunkowość SGP tulei cylindrowych jest więc istotna z perspektywy kontroli ich jakości. Parametry hybrydowe są związane zarówno z kontaktem między chropowatymi powierzchniami, tarciem, zużyciem, jak i uszczelnieniem. Parametry dotyczące Krzywej Udziału Materiałowego (KUM) związane są z tarciem i zużyciem. Krzywa ta ma wiele przydatnych zastosowań, takich jak określanie pojemności olejowej powierzchni czy też ocena początkowego zużycia. Służy ona również do kontroli jakości wykonania SGP tulei cylindrowych wytwarzanych w procesie gładzenia płaskowierzchołkowego. Głównym problemem jest dobór parametrów opisujących KUM i poprawny sposób wyznaczania tychże parametrów, jak również matematyczny opis krzywej. Z matematycznego punktu widzenia krzywa ta jest bezpośrednio powiązana z rozkładem rzędnych SGP. Kluczowy jest więc poprawny opis rozkładu rzędnych powierzchni noszących ślady kilku procesów obróbkowych, zwłaszcza że według autorów prac [16], [4]

rozkład rzędnych powierzchni ma właśnie istotny wpływ na mechanikę kontaktu ciał o powierzchniach chropowatych. Należy zaznaczyć, że wielu badaczy próbuje formułować statystyczne reguły dotyczące opisu SGP. Jednak w doborze prawidłowego opisu problem polega na tym, że powierzchnie mogą być losowe, okresowe bądź też – jak to zwykle bywa w przypadku powierzchni wieloprocessowych – mogą być mieszaniną obu tych typów. W pracy [17] dokonałem gruntownej analizy różnych podejść związanych z opisem rozkładu rzędnych SGP w tym kilkuprocessowych, wykazując ich wady jak również zwracając uwagę na fakt, iż słabą stroną większości rozwiązań jest to, że dają one całkowitą charakterystykę struktury geometrycznej powierzchni, bez odniesienia się do poszczególnych jej składowych. Natomiast w przypadku powierzchni wieloprocessowych mamy do czynienia zwykle z topografiami powierzchni powstającymi w kilku procesach. Każda składowa struktury geometrycznej takiej powierzchni wynika z kształtu ostrza narzędzia wykorzystywanego do jej obróbki oraz z parametrów tej obróbki bądź też jest efektem procesu początkowego zużycia. Rozkład rzędnych tego typu SGP powinien więc być charakteryzowany funkcją gęstości prawdopodobieństwa uwzględniającą każdą ze składowych SGP. Należy również zaznaczyć, że zgodnie z pracą [18] wiedza na temat związku między topografią powierzchni a jej właściwościami funkcjonalnymi jest wciąż niepełna.

Z przedstawionych informacji można wnioskować, że ważnym krokiem do weryfikacji tribologicznych aspektów struktury geometrycznej powierzchni jest jej właściwy opis. Szczególnie w przypadku powierzchni wieloprocessowej, jej odrębne warstwy należy tak opisać, aby możliwe było odwołanie się do pełnionych przez poszczególne warstwy funkcji. Ponadto właściwa charakterystyka powinna dawać możliwość wychwycenia zmian zachodzących w SGP podczas eksploatacji. Faktem jest, że wytwarzanie tego typu powierzchni na szeroką skalę wymaga posiadania metod pozwalających na weryfikację poprawności ich wykonania. Poprawny opis SGP jest zatem kluczem do właściwego określenia jakości wykonania, która bezpośrednio wiąże się z tribologicznymi aspektami SGP. Ponieważ obecne standardy nie pozwalają na dokładną charakterystykę tego typu powierzchni (co zostało omówione w cyklu publikacji przedstawionym do oceny), niezbędne jest ciągłe doskonalenie metod oraz wprowadzenie nowych sposobów określania charakterystycznych i istotnych z perspektywy trybologicznej cech struktury geometrycznej tych powierzchni.

W związku z powyższym prowadzone przeze mnie po uzyskaniu stopnia doktora prace naukowo-badawcze koncentrują się na analizie tribologicznych aspektów struktury geometrycznej powierzchni, w szczególności powierzchni wieloprocessowych. W pracach koncentruję się również na metodach opisu SGP pozwalających określić ich istotne z punktu widzenia tribologii cechy geometryczne, jak również pozwalających na opis zużycia powierzchni wieloprocessowych. Efektem prowadzonych przeze mnie prac naukowo-badawczych jest przedstawiony do recenzji cykl publikacji, który obejmuje dziewięć prac związanych tematycznie z tribologicznymi aspektami struktury geometrycznej powierzchni, ze szczególnym uwzględnieniem elementów ciernych występujących w układzie Tłok/Pierścień/Cylinder (TPC). Układ ten został wybrany do badań, ponieważ według prac [19], [20] tarcie mechaniczne w silniku spalinowym zajmuje około 4–15% całkowitej energii pochodzącej z paliwa, a istotnym źródłem strat powodowanych tarciami (około 50%) jest właśnie zespół TPC oraz korbówód [21]. Należy jednak zaznaczyć, że tłok z pierścieniami odpowiada za około 75% tych strat, natomiast straty spowodowane przez interakcję pierścieni tłokowych z tuleją cylindrową stanowią ponad ich połowę [22]. Istnieje zatem duży potencjał zmniejszenia zużycia paliwa przez poprawę właściwości tribologicznych skojarzenia ciernego, jaką jest pierścień tłokowy z tuleją cylindrową. Ponadto autorzy pracy [22] twierdzą, że aby zmniejszyć te straty, należy dobrze zrozumieć wzajemne oddziaływanie pary cierniej, jaką jest pierścień tłokowy i tuleja cylindrowa [22]. Dodatkowo, według Bussas i współautorów [23] w najbliższych latach będzie się dążyć do

optymalizacji układu TPC, głównie przez dalsze udoskonalanie pary ciernej, jaką jest pierścień tłokowy i tuleja cylindrowa.

Należy jednak zaznaczyć, że zgodnie z katalogiem firmy SUNNEN [24] badane przeze mnie powierzchnie powstające w procesie gładzenia można również spotkać w przemyśle motoryzacyjnym w cylindrach sprężarek, korpusach turbosprężarek, łożyskach turbosprężarek, elementach układów Common Rail, elementach aparatury wtryskowej, elementach układów wspomagania, bębnach hamulcowych, kołach zębatych, dźwigienkach zaworowych, korbowodach. Technologia gładzenia jest również stosowana: w hydraulice (pompy wielotłoczkowe, rozdzielacze, zawory, tuleje sterujące, siłowniki hydrauliczne), górnictwie i wytwarzaniu energii (siłowniki górniczych podpór zmechanizowanych, wały turbin, części maszyn i aparatury dla przemysłu wydobywczego ropy naftowej i gazu, części elektrowni wiatrowych), przemyśle lotniczym (elementy podwozi, elementy turbin, wały silników, obsady łopat, połączenia elementów podwozi, części zespołów odwracania ciągu silnika, zasilacze hydrauliczne), przemyśle maszynowym (korpusy urządzeń, lufy pistoletów i karabinów oraz armat, stojany silników elektrycznych, elementy łożysk tocznych i łożysk ślizgowych, matryce z węgla spiekane, ze stali oraz ceramiczne), produkcji form wtryskowych i ich elementów oraz części maszyn dla przetwórstwa tworzyw sztucznych (cylindry wytłaczarek, tuleje prowadzące form, wypychacze tulejowe, elementy form do produkcji butelek, wykrojniki) [24]. Spektrum zastosowań tego typu powierzchni jest zatem bardzo szerokie.

Zakres tematyczny zawarty w przedstawionym do oceny cyklu publikacji obejmuje następujące zagadnienia:

- badania tribologiczne mające na celu określenie wpływu SGP wieloprocessowych na tarcie, z nastawieniem na wychwycenie zmian, jakie zachodzą w tego typu SGP podczas pracy węzła tarcia, jakim jest układ Pierścień /Cylinder (PC) (prace [A4], [A5], [A6], [A9]),
- opis struktury geometrycznej powierzchni wieloprocessowych umożliwiające wyodrębnienie i określenie istotnych z punktu widzenia tribologicznego jej wybranych parametrów, jak również pozwalający na monitorowanie procesu wytwarzania i modelowanie procesu zużycia tego typu powierzchni, ze szczególnym uwzględnieniem powierzchni tulei cylindrowych oraz płaszczy tłoków (prace [A1], [A2], [A3], [A7], [A8]).

Prowadzone przeze mnie badania stanowią nowe spojrzenie na aspekty związane ze zmianami zachodzącymi w strukturze geometrycznej powierzchni noszących ślady kilku procesów, w szczególności powierzchni tulei cylindrowych oraz płaszczy tłoków w początkowym etapie docierania oraz w dłuższej eksploatacji, dostarczają modeli pozwalających na precyzyjną analizę SGP wieloprocessowych, jak również umożliwiają określenie aspektów tribologicznych tego typu SGP.

Warto podkreślić, że przedstawiony cykl publikacji zawiera rezultaty badań, które wynikają z zamierzonego, spójnego celu, określonego i sukcesywnie realizowanego przeze mnie po uzyskaniu stopnia doktora. Większość moich dotychczasowych prac zmierzała do realizacji tego celu. Należy zaznaczyć, że uporządkowanie aktualnego stanu wiedzy w obszarze badań, stanowiące punkt wyjścia do zaprezentowania osiągniętych wyników, zostało zrealizowane w każdej z prac [A1]–[A9].

#### **IV.2. Krótka charakterystyka celu naukowego, wyników oraz oryginalnego wkładu w prace składające się na spójny tematycznie cykl publikacji**

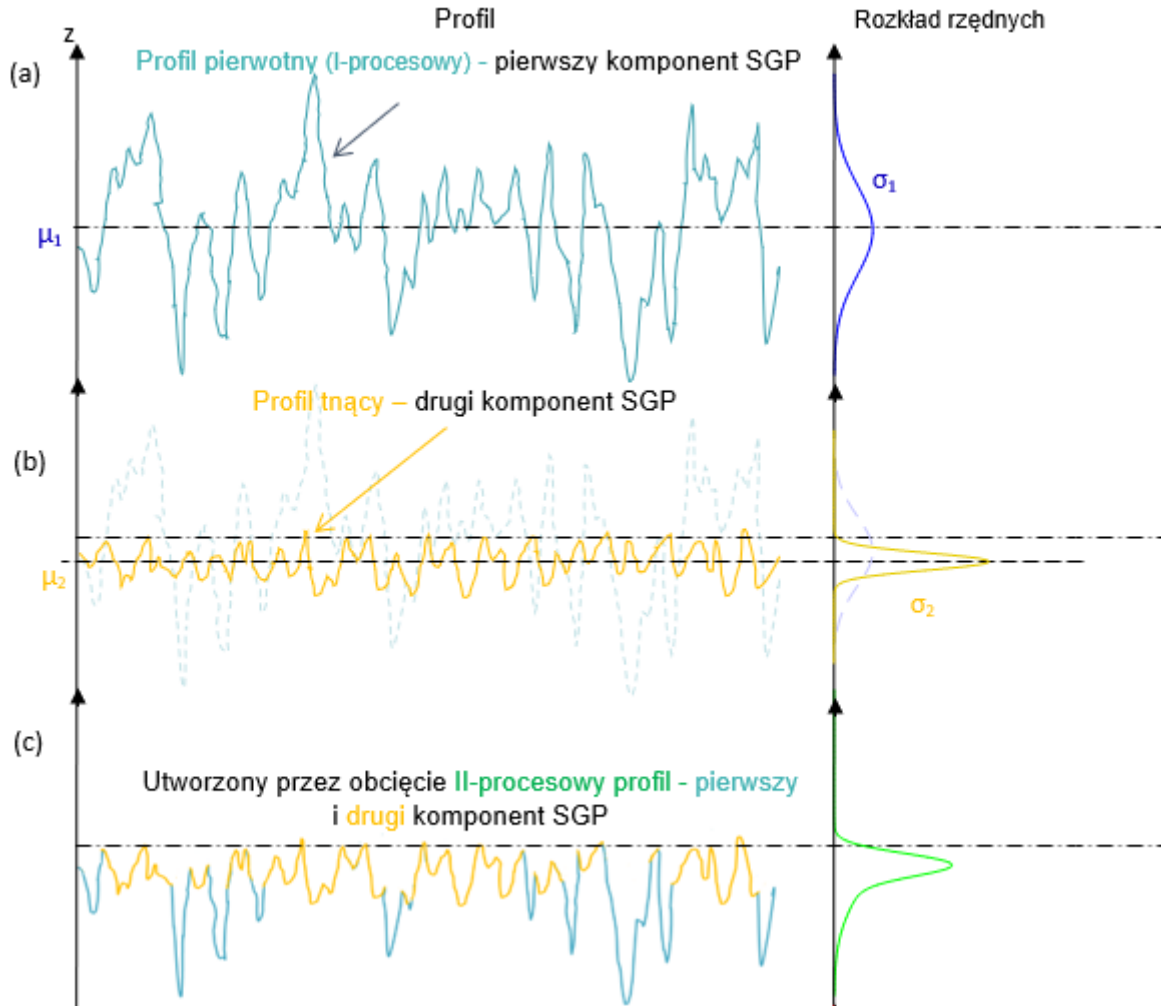
Jak już wspomniano we wprowadzeniu, aby właściwie określić wpływ struktury geometrycznej powierzchni na właściwości funkcjonalne układu tribologicznego, należy posiadać metody pozwalające na opis cech SGP, które ulegają zmianie podczas zużycia. Opis ten w odniesieniu do powierzchni noszących

ślady wielu procesów obróbkowych powinien umożliwiać oddzielną charakterystykę poszczególnych składowych tego typu powierzchni. Jest to niezmiernie istotne w przypadku np. powierzchni tulei cylindrowych po procesie gładzenia płaskowierzchołkowego oraz powierzchni zawierających tzw. mikrokieszenie smarowe, część wierzchołkowa SGP jest bowiem odpowiedzialna za zjawiska kontaktowe, część dolin natomiast za utrzymanie i transport oleju w celu zapewnienia dobrych właściwości smarnych. Ponieważ ogromny wpływ na właściwości funkcjonalne węzła trącego ma struktura geometryczna powierzchni, a w szczególności zmiany w niej zachodzące na etapie docierania, przy czym zgodnie z pracą [25] mechanizm tych zmian nie jest wciąż wystarczająco zbadany, w pracach [A4], [A5], [A6], [A9] skoncentrowałem się na badaniach uwzględniających te kwestie. Należy zaznaczyć, że firmy i instytucje naukowe prowadzą badania w celu zgłębienia wiedzy na temat zjawisk zachodzących podczas docierania powierzchni wieloprocessowych, gdyż lepsze poznanie mechanizmów występujących na tym etapie współpracy par ciernych może pomóc w opracowaniu nowych rozwiązań pozwalających na zmniejszenie tarcia [26],[22]. Ponadto, opierając się na stwierdzeniach autoritetów w tej dziedzinie Stouta i Speddinga [27], według których głównym celem powierzchni dwuprocessowych wykonywanych przez gładzenie płaskowierzchołkowe jest uzyskanie SGP tulei cylindrowej podobnej do tej po docieraniu, nasunęły mi się następujące fundamentalne pytania:

1. Skoro powierzchnia po gładzeniu płasko-wierzchołkowym jest tylko strukturą przejściową, jaka jest zatem topografia tej powierzchni w trakcie i po procesie docierania?
2. Jak zmienia się rozkład rzędnych topografii powierzchni dwuprocessowych podczas początkowego etapu docierania?
3. Czy aktualne modele opisujące rozkład rzędnych SGP dwuprocessowych są wystarczające do analizy tego typu topografii, biorąc pod uwagę, że ostateczna SGP wynika z dwóch następujących po sobie procesów obróbkowych (tworzących poszczególne składowe SGP) i dodatkowo z procesu zużycia?
4. Jeżeli podczas procesu docierania powierzchni dwuprocessowych występuje wpływ trzeciego procesu wynikającego ze zużycia, czy zatem odpowiedni model matematyczny opisujący rozkład rzędnych tego typu topografii powierzchni uwzględniający trzy procesy nie powinien być zastosowany – a jeśli tak to jak powinien on wyglądać?
5. Jak należy modelować początkowe zużycie powierzchni wieloprocessowych i jakich funkcji użyć do opisu ich rozkładów rzędnych?

Niestety w dostępnej literaturze nie znalazłem dokładnych odpowiedzi na nurtujące mnie wątpliwości, dlatego też stały się fundamentalnymi kwestiami, które poruszyłem w pracy [A2]. Aby odpowiedzieć na te pytania, niezbędne było zaplanowanie i przeprowadzenie odpowiednich eksperymentów tribologicznych. Badania tribologiczne mające na celu określenie wpływu topografii powierzchni wieloprocessowych na tarcie z nastawieniem na wychwycenie zmian, jakie zachodzą w tego typu SGP podczas pracy węzła tarcia, jakim jest układ Pierścień tłokowy/Tuleja cylindrowa (PT), zostały zawarte w pracach [A4], [A5], [A6], [A9]. W publikacjach [A4]–[A6] istotną kwestią była obserwacja mechanizmów początkowego zużycia powierzchni jedno- i dwuprocessowych oraz ich transformacja, odpowiednio w powierzchni dwuprocessowe i powierzchnie noszące ślady trzech procesów. Natomiast dane zestawione w pracy [A9] pozwoliły mi na analizę początkowego zużycia powierzchni noszącej ślady trzech procesów obróbkowych oraz weryfikację wpływu kieszeni smarowych powodujących zwiększenie pojemności olejowej powierzchni na procesy tribologiczne występujące w parze trącej PT. Badania te miały za zadanie dostarczyć informacji niezbędnych do zrozumienia procesu początkowego zużycia powierzchni wieloprocessowych, a w konsekwencji zdobycie wiedzy niezbędnej do utworzenia matematycznego modelu pozwalającego na opis początkowego zużycia tego typu powierzchni.

Cel ten wynikał z faktu, że znaleziony w literaturze bardzo realistyczny model zużycia przez ścieranie bardziej miękkiej powierzchni o gaussowskim charakterze rozkładu rzędnych (rys. 1a – przedstawia profil takiej powierzchni) przez twardszą powierzchnię również o gaussowskim charakterze rozkładu rzędnych (rys. 1b – przedstawia profil takiej powierzchni), zaproponowany przez Kinga i współautorów w pracy [28], można wykorzystać jedynie do analizy zużycia powierzchni jednoprosesowych, w dodatku o gaussowskim charakterze rozkładu rzędnych.



Rys. 1. Wizualizacja powstawania dwuprosesowego profilu chropowatości (o dwugaussowskim charakterze rozkładu rzędnych) zgodnie z modelem Kinga [28]  
 Źródło: opracowanie własne na podstawie [A2].

Należy zaznaczyć, że profil/powierzchnia dwuprosesowy (rys. 1c) jest efektem obcięcia profilu bardziej chropowatego (pierwszego komponentu topografii powierzchni dwuprosesowej) przez profil mniej chropowaty (drugi komponent topografii powierzchni dwuprosesowej). Do opisu rozkładu rzędnych dwugaussowskiego profilu/powierzchni (rys. 1c) King i współautorzy zaproponowali funkcję (1).

$$p_{1,2}(z) = \frac{1}{\sigma_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-0.5 \cdot \left(\frac{z-\mu_1}{\sigma_1}\right)^2} \cdot \left(1 - \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sigma_2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-0.5 \cdot \left(\frac{\xi-\mu_2}{\sigma_2}\right)^2} d\xi\right) + \frac{1}{\sigma_2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-0.5 \cdot \left(\frac{z-\mu_2}{\sigma_2}\right)^2} \cdot \left(1 - \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sigma_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-0.5 \cdot \left(\frac{\xi-\mu_1}{\sigma_1}\right)^2} d\xi\right) \quad (1)$$

Symbole  $\mu_1$  i  $\sigma_1$  przedstawione na rys. 1a (jak również w omawianym modelu) oznaczają wartość średnią i odchylenie standardowe rzędnych profilu/powierzchni pierwotnego mającego gaussowski charakter rozkładu rzędnych. Natomiast  $\mu_2$  i  $\sigma_2$  są wartością średnią i odchyleniem standardowym rzędnych profilu tnącego (również o gaussowskim charakterze rozkładu rzędnych), będącego drugim komponentem SGP (rys. 1b).

Przeprowadzone badania tribologiczne, których wyniki zaprezentowane zostały w pracach [A4]-[A6] i [A9] dały mi możliwość wglądu w zachodzącą transformację SGP podczas procesu początkowego zużycia zarówno jedno-, dwu-, jak i trzyprocesowych powierzchni. Wynikiem obserwacji transformacji, jakie zachodzą w SGP na etapie początkowego zużycia, jest praca [A2], w której zaproponowałem podstawy teoretyczne modelowania początkowego zużycia powierzchni noszących ślady dwu procesów obróbkowych. Przedstawiony przeze mnie w pracy [A2] model bazuje na założeniu, że podczas procesu docierania tulei cylindrowej wykonanej w procesie gładzenia płaskowierzchołkowego, następują zmiany w SGP, wynikające głównie z procesu ścinania wierzchołków znajdujących się w części plateau tego typu powierzchni. W związku z tym, aby opisać rozkład rzędnych dwuprocesowej powierzchni w początkowej fazie zużycia (czyli np. na etapie docierania silnika), w artykule [A2] zaproponowałem nowy model, którego koncepcję oparłem na tym, że dwuprocesowy profil/powierzchnia przedstawiony na rys. 2a, (którego sposób powstawania zilustrowano na rys. 1), jest poddawana trzeciemu procesowi będącemu procesem zużycia. W zaproponowanym modelu założyłem, że dwuprocesowy profil/powierzchnia (przedstawiony na rys. 2a) jest obcinany przez trzeci profil/powierzchnię (rys. 2b) posiadający gaussowski charakter rozkładu rzędnych, wyrażony wzorem (2).

$$p_3(z) = \frac{1}{\sigma_3 \sqrt{2\pi}} e^{-0.5 \left( \frac{z-\mu_3}{\sigma_3} \right)^2} \quad (2)$$

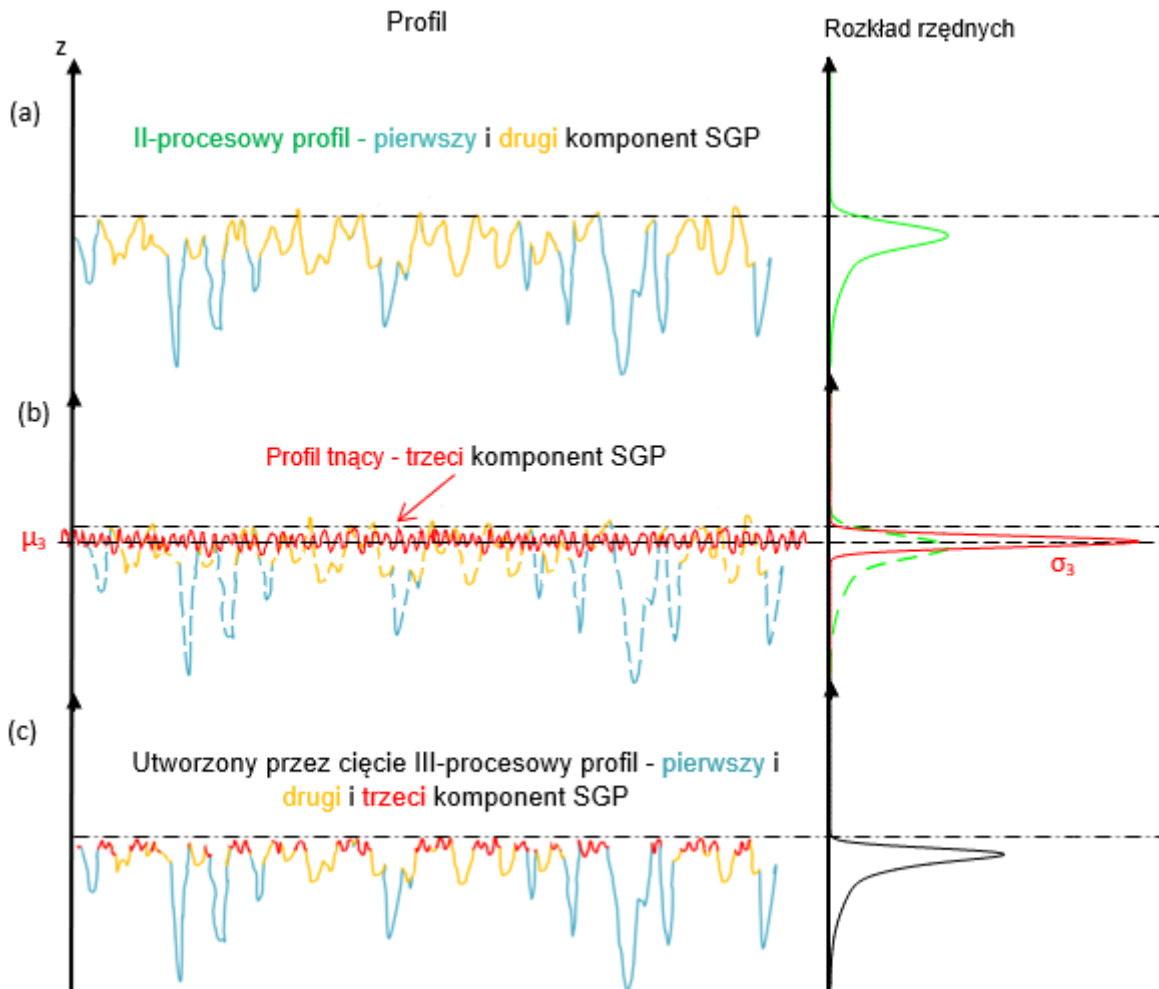
Profil ten jest charakteryzowany przez  $\mu_3$  i  $\sigma_3$ , które są odpowiednio wartością średnią i odchyleniem standardowym jego rzędnych, przy czym parametr  $\mu_3$  odwołuje się do poziomu, na którym profil/powierzchnia dwuprocesowy jest obcinany przez profil/powierzchnię tnący. Część tego profilu staje się trzecim komponentem ostatecznej trzyprocesowej SGP. Należy zaznaczyć, że profil tnący (rys. 2b) pozostawia na profilu dwuprocesowym swój ślad w postaci trzeciego składnika struktury geometrycznej powierzchni, który istnieje na ściętych wierzchołkach części profilu/powierzchni będącej drugim jej komponentem. Rys. 2c prezentuje ostateczny profil trójprocesowy wraz z poszczególnymi jego elementami składowymi wynikającymi z oddziaływania trzech procesów. Do opisu rozkładu rzędnych profilu/powierzchni zawierającego ślady trzech procesów (rys. 2c) w pracy [A2] zaproponowałem funkcję określoną wzorem (3).

$$p_{1,2,3}(z) = \left( \frac{1}{\sigma_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-0.5 \cdot \left( \frac{z-\mu_1}{\sigma_1} \right)^2} \cdot \left( 1 - \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sigma_2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-0.5 \cdot \left( \frac{a-\mu_2}{\sigma_2} \right)^2} da \right) + \frac{1}{\sigma_2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-0.5 \cdot \left( \frac{z-\mu_2}{\sigma_2} \right)^2} \cdot \left( 1 - \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sigma_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-0.5 \cdot \left( \frac{a-\mu_1}{\sigma_1} \right)^2} da \right) \right) \cdot \left( 1 - \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sigma_3 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-0.5 \cdot \left( \frac{a-\mu_3}{\sigma_3} \right)^2} da \right) + \frac{1}{\sigma_3 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-0.5 \cdot \left( \frac{z-\mu_3}{\sigma_3} \right)^2} \quad (3)$$

$$\left( 1 - \int_{-\infty}^z \left( \frac{1}{\sigma_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-0.5 \cdot \left( \frac{a-\mu_1}{\sigma_1} \right)^2} \cdot \left( 1 - \int_{-\infty}^a \frac{1}{\sigma_2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-0.5 \cdot \left( \frac{u-\mu_2}{\sigma_2} \right)^2} du \right) + \frac{1}{\sigma_2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-0.5 \cdot \left( \frac{a-\mu_2}{\sigma_2} \right)^2} \cdot \left( 1 - \int_{-\infty}^a \frac{1}{\sigma_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} e^{-0.5 \cdot \left( \frac{u-\mu_1}{\sigma_1} \right)^2} du \right) \right) da \right)$$



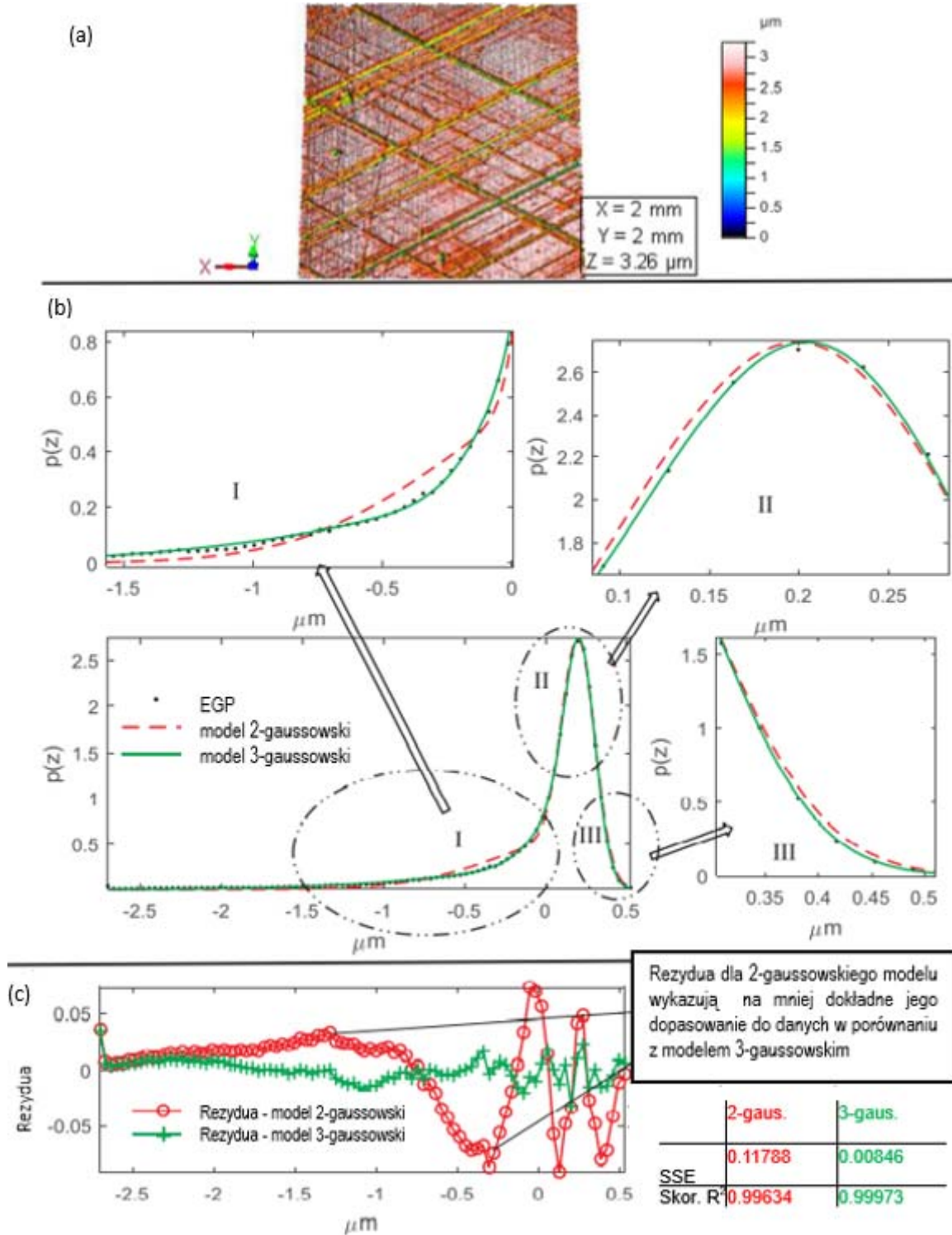
W funkcji (3) symbole  $\mu_1$  i  $\sigma_1$  są wartością średnią i odchyleniem standardowym rzędnych pierwotnego profilu posiadającego gaussowski charakter rozkładu rzędnych (rys. 1a), natomiast  $\mu_2$  i  $\sigma_2$  to odpowiednio wartość średnia i odchylenie standardowe rzędnych profilu będącego drugim komponentem SGP (rys. 1b), również mającego gaussowski charakter rozkładu rzędnych. Wszystkie współczynniki zawarte w modelu trójgaussowskim mają konkretne fizyczne oraz statystyczne znaczenie, tzn. odpowiadają komponentom SGP będącym efektem oddziaływania poszczególnych procesów obróbkowych oraz procesu zużycia.



Rys. 2. Wizualizacja powstawania trójprocesowego profilu chropowatości (o trójgaussowskim charakterze rozkładu rzędnych) zgodnie z wprowadzoną w pracy [A2] koncepcją  
Źródło: opracowanie własne na podstawie [A2].

W pracy przedstawiłem również wyniki badań, które wskazują na to, że model trójgaussowski dokładniej opisuje rozkład rzędnych (wyrażony na rys. 3 przez Estymowaną Gęstość Prawdopodobieństwa – EGP) struktury geometrycznej powierzchni tulei cylindrowych gładzonych płaskowierzchołkowo po okresie początkowego zużycia niż stosowany dotychczas model dwugaussowski (rys. 3). Ponadto wykazałem, że jeśli chce się zastosować wykorzystywany dotychczas model dwugaussowski do opisu topografii powierzchni tulei cylindrowej gładzonej płaskowierzchołkowo podczas docierania lub po początkowym procesie zużycia, niestety nie zostaną odzwierciedlone wszystkie procesy mające wpływ na ostateczny kształt powierzchni i odpowiadające im statystyki danych. Ma to związek z faktem, że jeśli powierzchnia mająca ślady dwóch procesów obróbkowych jest poddawana trzeciemu procesowi, w tym wypadku procesowi zużycia, to naturalne i oczywiste jest to, że model opisujący rozkład rzędnych takiej

powierzchni powinien odwoływać się do wszystkich trzech procesów. Aby jednak potwierdzić te oczywiste spostrzeżenia, w pracy zastosowałem metody statystyczne, które pozwoliły zweryfikować jakość dopasowania modelu do EGP, jak również istotność wprowadzania dodatkowych jego parametrów. Należy zaznaczyć, że we wszystkich analizowanych przypadkach wartość skorygowanego  $R^2$  wskazywała, że wprowadzenie dodatkowych zmiennych występujących w modelu trójgaussowski jest uzasadnione.



Rys. 3. Widok izometryczny 3D SGP po zużyciu (a), porównanie dopasowania modeli dwu- i trójgaussowskiego do EGP (b), wizualizacja rezydów obliczonych dla obydwu modeli (c)

Źródło: opracowanie własne na podstawie [A2].

Lepsze dopasowanie się modelu trójgaussowskiego do danych (EGP) wynika z faktu że model ten może rozpoznać odchylenia standardowe i wartości średnie rzędnych trzech komponentów tekstury powierzchni, będących wynikiem trzech procesów, które oddziaływały na powierzchnię. Przy czym trzeci komponent wynika z faktu, że w okresie docierania wierzchołki występujące w części płaskowierzchołkowej powierzchni dwuprocesowych częściowo podlegają procesowi zużycia i są zastępowane przez bardziej gładką strukturę geometryczną powierzchni, która jest, używając przerośni, „odciskiem palca” SGP pierścienia tłokowego.

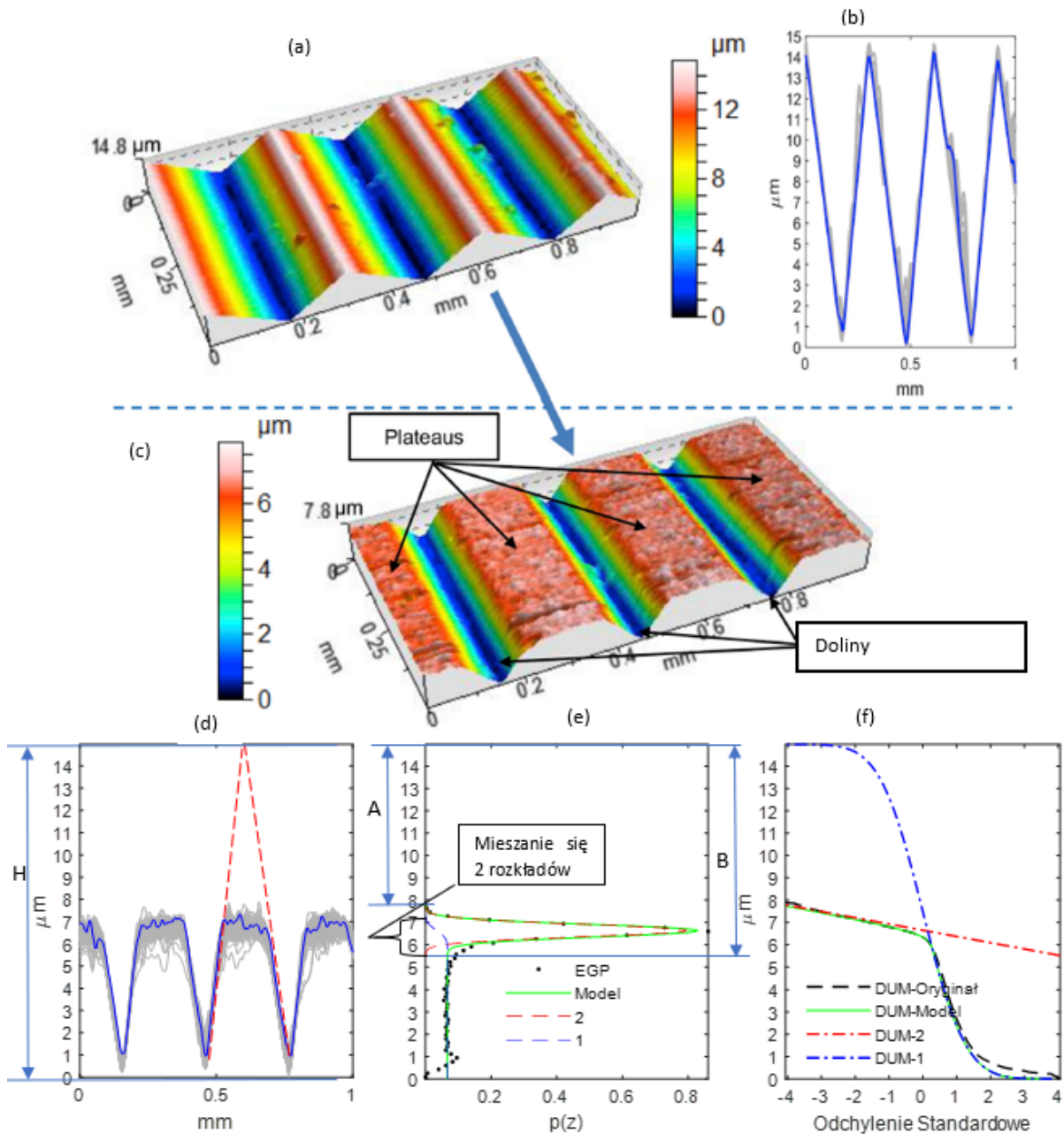
Dodatkowo w pracy zaznaczyłem, że analiza zmian udziału poszczególnych składników SGP podczas procesu zużycia w porównaniu ze zmianami tarcia może pomóc zrozumieć związek między mikrogeometrią a funkcjonalnością powierzchni. W szczególności zmiany zachodzące w części płaskowierzchołkowej powierzchni (zwanej plateau), opisane przez trzeci komponent gaussowski, mogą dostarczyć cennych informacji o procesie docierania, ponieważ zlokalizowane w tej części wierzchołki narażone są na zderzenia ze współpracującą powierzchnią pierścienia tłokowego w warunkach mieszanego smarowania. Analiza tego typu może pozwolić na precyzyjne monitorowanie procesu docierania. Dodatkowo, analiza zmian składowej dolin (pierwszy komponent modelu) może zwrócić informacje o zdolności do przechowywania oleju i cząstek zużycia. Informacje dostarczone przez model można wykorzystać do lepszego zrozumienia procesu docierania powierzchni dwuprocesowych, tak aby możliwe było ustanowienie właściwej równowagi między metodami wytwarzania części płaskowierzchołkowej i doliny w celu zapewnienia lepszego dopasowania elementów układu TPC.

Bardzo ważną zaletą zaproponowanego modelu jest to, że umożliwia on na wykrycie komponentów SGP o zbliżonych wartościach odchyżeń standardowych rzędnych, co jest szczególnie istotne w przypadku analizy początkowego zużycia tulei cylindrowych gładzonych płaskowierzchołkowo.

**Podsumowując, opracowanie nowego modelu zużycia powierzchni dwuprocesowej o losowo-losowym charakterze rozkładu rzędnych oraz wykazanie, że w początkowym etapie zużycia tego typu powierzchni zaproponowany model trójgaussowski (ze względu na odzwierciedlenia wszystkich trzech procesów oddziałujących na powierzchnię) dokładniej opisuje rozkład rzędnych tego typu struktury geometrycznej powierzchni niż istniejący dwugaussowski model stanowi mój wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna.**

Badania zaprezentowane w pracy [A1] stanowią kontynuację przedstawionej w artykułach [A3], [A7], [A8] problematyki związanej z opisem struktury geometrycznej powierzchni posiadających losowo-losowy i losowo-okresowy charakter, przy czym częściowo były one realizowane w trakcie mojego stażu na Uniwersytecie w Koszycach. W artykule [A1] przedstawiłem modele pozwalające na transformację (przez ścieranie) powierzchni jednoprocesowej w powierzchnię dwuprocesową. Zaprezentowałem zarówno analizę transformacji powierzchni o charakterze losowym w powierzchnię o charakterze losowo-losowym, jak i powierzchni okresowej w powierzchnię o charakterze okresowo-losowym. Wprowadziłem również sposób określania krzywej udziału materiałowego tego typu powierzchni prezentowanej na siatce rozkładu normalnego oraz sposób pomiaru zużycia liniowego SGP mającej okresowo-losowy charakter. Przedstawione modele opisu SGP zapewniają kompleksowe podejście, umożliwiające zarówno analizę rozkładu rzędnych, jak i analizę krzywej udziału materiałowego wykreślanej na siatce probabilistycznej. Zaproponowałem również odrębną charakterystykę poszczególnych składowych rozkładów gęstości odnoszących się do odrębnych składowych SGP, tzn. składowej odnoszącej się do części dolin i składowej odnoszącej się do części płaskowierzchołkowej. Należy podkreślić, że obydwie składowe SGP spełniają odrębne właściwości funkcjonalne podczas pracy skojarzenia trącego. W pracy [A1] dowiodłem skuteczność opisanych modeli do analizy struktury geometrycznej powierzchni płaszczy tłoków przed i po procesie eksploatacji. Przeprowadzone przeze mnie badania wykazały, że SGP płaszczy tłoków w procesie

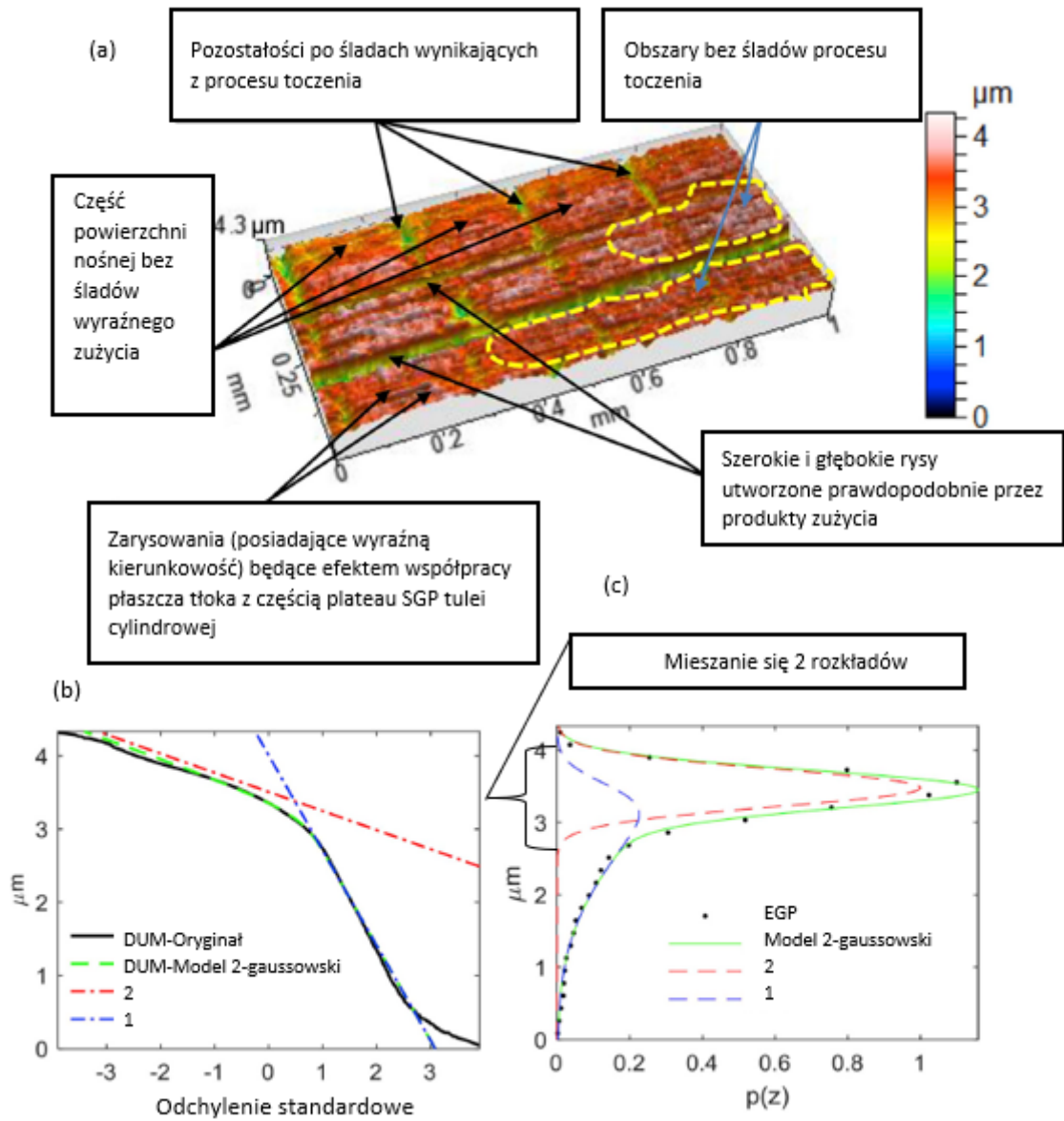
zużycia zmienia charakter z wyraźnie jednoprosesowej, okresowej struktury będącej efektem procesu toczenia (rys. 4a,b), przez istniejącą w okresie początkowego zużycia powierzchnię o charakterze okresowo-losowym (rys. 4c-f), do prawie całkowicie zużytej powierzchni, która wykazuje losowo-losowy charakter (rys. 5), cechujący się dwugaussowskim rozkładem rzędnych.



Rys. 4. Powierzchnia płaszczka tłka bez śladów zużycia (a), seria profili uzyskanych z niezużytej powierzchni (b), powierzchnia płaszczka tłka po małym zużyciu (c), powierzchnia z rysunku (c) zamieniona na szereg nakładających się na siebie profili (d), wizualizacja dopasowania przedstawionego w pracy modelu (Model) do EGP z wizualizacją udziału poszczególnych składowych rozkładów (1 - rozkład równomierny, 2 - rozkład Gaussa) (e), dopasowanie zaproponowanego modelu DUM (DUM-Model) do DUM-Oryginał, jak i rekonstrukcja dystrybuanty udziału materiałowego powierzchni nie zużytej (o charakterze okresowym) - DUM-1, oraz rekonstrukcja dystrybuanty udziału materiałowego powierzchni powodującej zużycie (o charakterze losowym) - DUM-2 (f)

Źródło: opracowanie własne na podstawie [A1].

Ponadto w pracy wykazałem trafność stwierdzenia przedstawionego w artykule [A3] dotyczącego przenikania się poszczególnych składowych SGP na większym obszarze niż zakłada to norma ISO 13565-3 [30], co również zostało zobrazowane na rys. 4 i 5.



Rys. 5. Powierzchnia płaszcza tłka po zużyciu (a), wizualizacja dopasowania DUM modelu dwugaussowskiego (DUM-Model 2-gaussowski) do DUM prezentowanej powierzchni (DUM-Oryginał), nachylenia niebieskiej (1) i czerwonej (2) linii typu kropka kreska odpowiadają wartościom odchyień standardowych poszczególnych składowych SGP (b), wizualizacja dopasowania modelu dwugaussowskiego (Model 2-gaussowski) do EGP z wizualizacją udziału poszczególnych składowych rozkładów (c)  
 Źródło: opracowanie własne na podstawie [A1].

W artykule [A1] zaprezentowałem również możliwość odtworzenia zarówno rozkładu gęstości rzędnych, jak i krzywej udziału materiałowego wykreślonej na siatce probabilistycznej, zwanej w polskojęzycznej literaturze Dystrybuantą Udziału Materiałowego (DUM) niezużytej powierzchni płaszcza tłka, jedynie bazując na danych pochodzących z powierzchni płaszcza tłka noszącej ślady początkowego zużycia. Na podstawie tego typu inżynierii odwrotnej zaprezentowanej na rys. 4f dokonałem oceny lokalnego zużycia liniowego tego typu powierzchni, opierając się na parametrach dostarczanych przez zaproponowany przeze mnie model DUM.



Określiłem także wpływ procesu zużycia na procentowy udział poszczególnych składowych rozkładów gęstości rzędnych SGP odpowiadających poszczególnym składowym strukturom geometrycznym powierzchni. Dokonałem analizy wpływu zmian SGP płaszczy tłoków zachodzącej zarówno podczas procesu początkowego zużycia, jak i zużycia wychodzącego poza zakres początkowego zużycia na właściwości funkcjonalne układu TPC.

Podsumowując, przedstawiony w pracy model jest w stanie właściwie opisać powierzchnię płaszcza tłoka po procesie początkowego zużycia. Wszystkie współczynniki wyodrębnione podczas dopasowywania modelu do DUM mają konkretne znaczenie statystyczne, a także fizyczne. Odpowiadają one konkretnym składnikom SGP. Wyodrębnione współczynniki opisują zakres rozkładu wysokości składowej doliny (składowej powierzchni uzyskanej w procesie toczenia) oraz średnie i standardowe odchylenie w części plateau, usytuowanej na ściętych wierzchołkach struktury będącej wynikiem procesu toczenia. Na podstawie parametrów dostarczonych przez model można również obliczyć lokalne liniowe zużycie SGP płaszcza tłoka. Tymczasem wprowadzony przez Kinga i współautorów model dwugaussowski wydaje się być odpowiedni do opisu mocno zużytej SGP płaszczy tłoków. Model ten pozwala na wyodrębnienie poszczególnych składowych gaussowskich tego typu powierzchni.

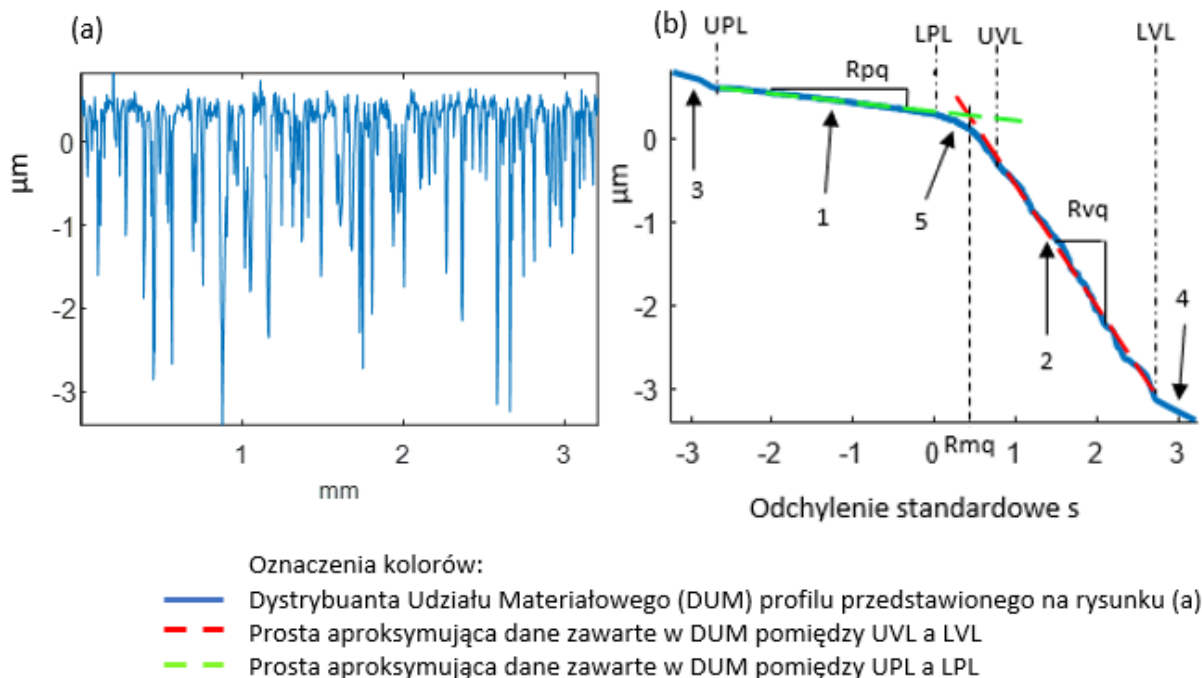
Przedstawiona analiza zmian SGP płaszcza tłoka podczas pracy w warunkach eksploatacyjnych pozwala wnioskować, że wydaje się być stosownym, aby doprowadzić do ukształtowania jej SGP do postaci przypominającej dwuprocesową dotartą SGP.

**Dzięki pracy [A1] autorski wkład w rozwój dyscypliny *inżynieria mechaniczna* polega na wprowadzeniu metody pomiaru lokalnego liniowego początkowego zużycia SGP o charakterze okresowym, opartej na parametrach otrzymywanych z zaproponowanego przeze mnie w pracy modelu krzywej udziału materiałowego (przedstawionej na siatce probabilistycznej) powierzchni po procesie początkowego zużycia mającej charakter okresowo-losowy, jak również szczegółowej analizy wpływu procesów zużycia na udział poszczególnych składowych (składowej płaskowierzchołkowej i składowej dolin) tego typu powierzchni. Zaproponowana metoda pozwala na określenie procentowego udziału części dolin (będących efektem procesu toczenia) w SGP zużytej powierzchni, która jest istotna ze względów funkcjonalnych. Równie ważna z punktu widzenia mechaniki kontaktu powierzchni dwuprocesowej jest wiedza na temat odchylenia standardowego części płaskowierzchołkowej tego rodzaju powierzchni [31],[7], a także jej udział w SGP całej powierzchni. Należy zauważyć, że w dotychczasowych pracach (np. [32]) dotyczących modelowania zagadnień kontaktu płaszcza tłoka brano pod uwagę jedynie profil jednoprocesowy, wynikający z obróbki toczeniem, pomijano natomiast dwuprocesowy charakter tego profilu. Przedstawiona metoda analizy SGP powierzchni mających okresowo-losowy charakter zapewnia określenie tych istotnych z funkcjonalnego punktu widzenia parametrów. Należy podkreślić, że metoda ta może być stosowana do analizy i modelowania procesu tworzenia i zużycia nowo opracowanych przez duńskich badaczy i przedstawionych w pracach [8], [33] powierzchni MUFU.**

Dokładna charakterystyka powierzchni noszących ślady dwu lub więcej procesów obróbkowych bądź też procesu obróbkowego i procesu zużycia jest zagadnieniem skomplikowanym i wybiegającym poza standardowe metody stosowane do opisu SGP [34]. Użycie standardowych parametrów chropowatości, takich jak np. parametr  $R_a$ , pozwala jedynie na całościowy opis powierzchni, natomiast w przypadku powierzchni dwuprocesowych, takich jak np. powierzchnie tulei cylindrowych po procesie gładzenia płaskowierzchołkowego, istotna jest charakterystyka poszczególnych składowych SGP, ponieważ mają one odrębne znaczenie tribologiczne [35],[36]. Struktura płaskowierzchołkowa utworzona w dwóch procesach – gładzenia wykańczającego i gładzenia płaskowierzchołkowego, łączy dobre właściwości ślizgowe charakterystyczne dla powierzchni gładkiej z możliwością utrzymania i transport cieczy smarującej, która jest charakterystyczna dla powierzchni chropowatych, a którą zapewniają wytworzone w procesie

gładzenia doliny. Autorzy prac [6],[7] wykazali, że część płaskowierzchołkowa SGP dwuprosocowej, która charakteryzowana jest parametrem  $R_{pq}$ , decyduje o mechanice kontaktu. W związku z tym część płaskowierzchołkową i doliny należy analizować oddzielnie ze względu na ich odmienne właściwości tribologiczne. Należy zaznaczyć, że dokładny opis struktury geometrycznej tulei cylindrowych po gładzeniu płaskowierzchołkowym jest bardzo istotny z punktu widzenia kontroli tego typu powszechni zarówno na etapie produkcyjnym, jak i eksploatacyjnym.

Warto podkreślić, że do opisu tego typu powierzchni została wdrożona norma ISO 13565-3 [30]. Zgodnie z założeniami tej normy dla profilu chropowatości o dwugaussowskim charakterze rozkładu gęstości rzędnych (rys. 6a) w KUM wykreślonej na siatce probabilistycznej (zwanej w tej normie Dystrybuantą Udziału Materiałowego (DUM)) można wyodrębnić dwa obszary liniowe, tj. obszar plateau (oznaczony na rys. 6b numerem 1) oraz obszar wgłębień (oznaczony na rys. 6b numerem 2). Ponadto w DUM można wyróżnić obszary nielinowe, takie jak: odbiegające od danych znajdujących się w obszarze plateau wierzchołki oznaczone numerem 3, głębokie rysy lub wgłębienia odbiegające od danych znajdujących się w obszarze dolin – oznaczone numerem 4 oraz niestabilny obszar przejścia (zakrzywienie) między obszarem plateau a obszarem wgłębień spowodowany mieszaniną dwóch rozkładów – oznaczony jako 5. W standardzie ISO określono sposób wyznaczania górnych i dolnych brzegów obu obszarów liniowych, tj.: górnej granicy rejonu plateau oznaczonej przez UPL, dolnej granicy rejonu dolin – LVL, dolnej granicy rejonu plateau – LPL i górnej granicy rejonu doliny – UVL. W normie założono, że jeśli przez każdy z tych obszarów liniowych 1 i 2 zostanie przeprowadzona prosta regresji, to wówczas współczynniki kątowne nachylenia tych prostych będą co do wartości równe odpowiednio parametrowi  $R_{pq}$  i  $R_{vq}$ . Po przedłużeniu prostej przeprowadzonej przez obszar plateau na prawo od LPL i prostej przeprowadzonej przez obszar 2 na lewo od UVL w punkcie przecięcia tych prostych wyznacza się wartość udziału materiałowego, którą określa się jako parametr  $R_{mq}$ .

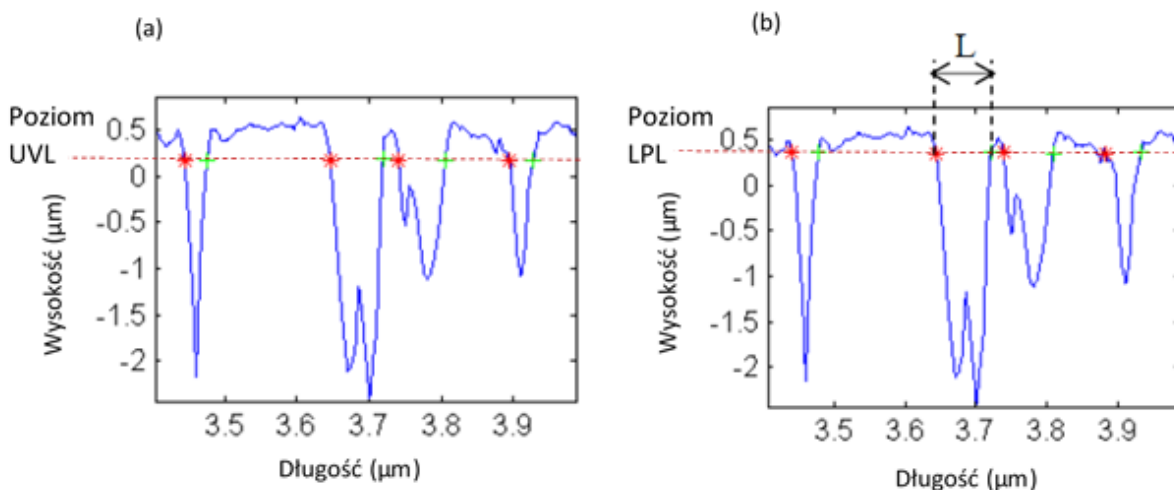


Rys. 6. Graficzna interpretacja parametrów zawartych w normie ISO 13565-3, profil chropowatości o dwugaussowskim charakterze rozkładu rzędnych (a), Krzywa Udziału Materiałowego wykreślona na siatce probabilistycznej zwana Dystrybuantą Udziału Materiałowego (DUM) (b)

Źródło: opracowanie własne na podstawie [A3].

W pracach [A7], [A3] wykazałem, że przedstawiona w normie ISO 13565-3 [30] metoda nie jest precyzyjna. Aby zredukować niedoskonałości wynikające ze standardu ISO 13565-3, w pracy [A7] zaproponowałem rozwiązanie, które pozwala rozdzielić poszczególne elementy profilu chropowatości należące do części płaskowierzchołkowej od elementów części dolin w celu ich odrębnej analizy. Do realizacji tego zadania wykorzystałem założenia dotyczące granic obszaru plateau i dolin zawarte w standardzie ISO 13565-3, z tą jednak różnicą, że aproksymację DUM przeprowadziłem przy użyciu innego równania. W zaproponowanym przeze mnie rozwiązaniu w pierwszym kroku należy określić na prawych i lewych brzegach każdej z dolin punkty znajdujące się poniżej poziomu nierówności w części plateau (rys. 7a). Jako poziom przyjąłem wartość rzędnej na poziomie udziału materiałowego wyznaczonego przez górną granicę liniowego obszaru dolin (oznaczoną jako UVL na rys. 6b i 7a). Następnie, poczynając od znalezionych punktów profilu leżących na poziomie UVL, należy podążać po brzegach dolin w kierunku górnej części powierzchni, zwanej płaskowierzchołkową, aby znaleźć punkty leżące na poziomie LPL (rys. 6b i 7b). Wyznaczone punkty pozwalają na odseparowanie danych należących do części płaskowierzchołkowej od danych części dolin oraz na osobną ich analizę polegającą na obliczeniu parametru  $R_{pq}$ . Dodatkowo, taki sposób analizy pozwala na określenie szerokości każdej z dolin, jak również ich liczby. Należy zaznaczyć, że informacje te zgodnie z pracami [6],[7],[37] są bardzo istotne z punktu widzenia tribologicznego. Wyznaczenie punktów UVL i LPL realizowane jest według procedury przyjętej w normie ISO 13565-3.

Kolejnym rozwiązaniem zaproponowanym przeze mnie w pracy jest procedura opisu SGP o losowo-deterministycznym charakterze rozkładu rzędnych. Przykładem jest powierzchnia płaszczka tłoka (wykonywana w procesie toczenia) po niewielkim zużyciu. Również powierzchnie po obróbce ścierniej (szlifowanie, polerowanie) zawierające oddzielne kieszenie olejowe, wykonane np. w procesie nagniatania [38], mogą być przykładami takich tekstur, ponieważ nagniatanie lub toczenie tworzy składową okresową SGP, a zużycie lub obróbka ścierna – składową losową.



Rys. 7. Przykładowy profil chropowatości z wyznaczonymi na lewych i prawych brzegach każdej z dolin dolnymi progami (UVL) (a); górne progi wyznaczone na lewych i prawych brzegach każdej z dolin oraz wizualizacja przyjętego sposobu definiowania szerokość doliny  $L$  na poziomie LPL (b)

Źródło: opracowanie własne na podstawie [A7].

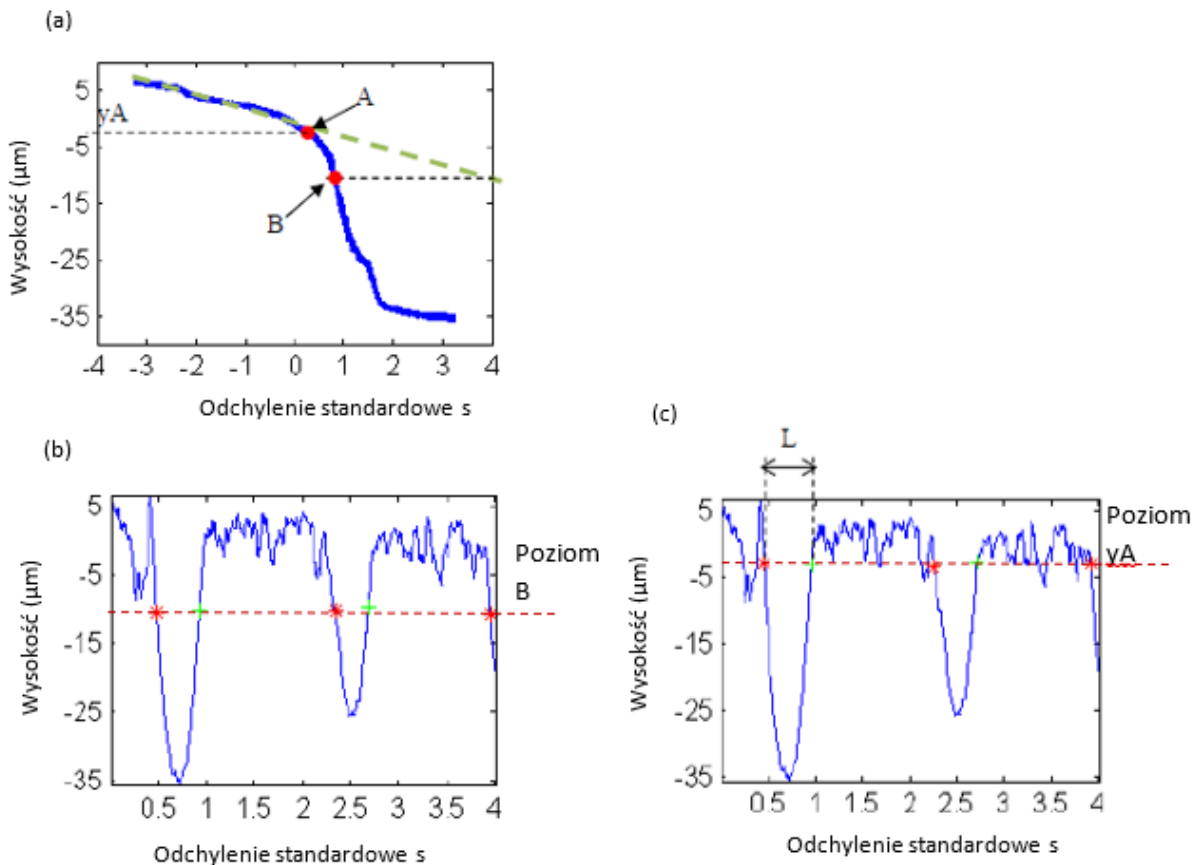
Do analizy tego typu powierzchni nie można zastosować procedury znajdującej się w standardzie ISO 13565-3, gdyż komponent dolin mający okresowy charakter nie może być opisany za pomocą parametru  $R_{vq}$ . Kwestią problematyczną jest również ustalenie punktu przejścia pomiędzy częścią dolin a częścią płaskowierzchołkową.



W pracy [39] została zaprezentowana utworzona przeze mnie metoda oszacowania tego punktu przejściowego. Publikacja ta stała się inspiracją dla duńskich badaczy [33], którzy na bazie zaprezentowanej przeze mnie w [39] metody utworzyli zmodyfikowaną jej wersję, rozbudowując ją o możliwość separacji części losowej od części okresowej. W pracy tej zaproponowali metodę polegającą na znalezieniu dolnego progu przejściowego z części płaskowierzchołkowej do części dolin. Próg ten ustalili arbitralnie na poziomie stanowiącym 25–50% całkowitej wysokości profilu. Następnie, wyznaczając na poziomie tego progu dolne brzegi każdej z dolin, opracowali algorytm pozwalający na znalezienie górnych brzegów tych dolin. Jako poziom górnych brzegów przyjęli poziom przejścia z części płaskowierzchołkowej do dolin, wyznaczany według zasady, którą przedstawiłem w pracy [39]. Analizując metodę zaproponowaną przez duńskich badaczy, zauważyłem, że arbitralne przyjęcie dolnego progu na poziomie 25–50% całkowitej wysokości profilu może doprowadzić w niektórych przypadkach do błędnego wyznaczania dolnego progu przejścia z sekcji dolin do części płaskowierzchołkowej, powodując tym samym zakwalifikowanie niektórych płytszych dolin do części plateau. W związku z tym zaproponowałem nową metodę pozwalającą na ominięcie tego typu niedoskonałości. Metodę tę oparłem na matematycznym oszacowaniu dolnego progu – ponieważ część płaskowierzchołkowa tego typu powierzchni posiada losowy charakter rozkładu rzędnych (zbliżony do Gaussowskiego) założyłem, że maksymalna wysokość tej części profilu wynosi  $6 \cdot R_{pq}$ . Następnie przyjąłem, że dolny próg powinien być umieszczony w odległości nieco większej niż  $7 \cdot R_{pq}$ , licząc od najwyższego punktu profilu po wyeliminowaniu wartości odstających, czyli bardzo wysokich wierzchołków (znacznie odbiegających od danych w części plateau), będących wynikiem błędów pomiarowych. Jako praktyczne rozwiązanie tego zagadnienia zaproponowałem aproksymowanie części płaskowierzchołkowej DUM linią prostą i znalezienie punktu przecięcia tej linii z linią pionową przecinającą oś odciętych w punkcie o wartości czterech odchyłek standardowych liczonych na podstawie danych w części płaskowierzchołkowej. Rzędna punktu przecięcia tych dwu linii to proponowana rzędna dolnego progu oznaczona na rys. 8a literą B. Górny próg (punkt A na rys. 8a) o wartości rzędnej oznaczonej przez  $y_A$  wyznaczany jest zgodnie z opracowaną przeze mnie procedurą zaprezentowaną w pracy [39].

Po przeanalizowaniu wielu zmierzonych i symulowanych profili dwuprocesowych w pracy [A7] wykazałem, że dolny próg został za pomocą tej metody określony prawidłowo (części profilu plateau zostały dokładnie rozdzielone), przy założeniu, że wysokość plateau była znacznie mniejsza niż amplituda profilu w części dolin. Należy podkreślić, że stopień arbitralności zaproponowanego przeze mnie rozwiązania jest znacznie mniejszy niż metody, która została przedstawiona przez duńskich badaczy. Zaproponowany przeze mnie sposób wyznaczania dolnego progu jest zatem bardziej precyzyjny. Rys. 8b stanowi wizualizację dolnego progu uzyskanego w nowy wskazany przeze mnie sposób. Po określeniu dolnego progu procedura, podobna do tej opisanej dla powierzchni o charakterze losowo-losowym, jest realizowana. Mianowicie, poczynając od znalezionych punktów leżących na poziomie B poszczególnych dolin, należy podążać po ich brzegach w kierunku górnej części powierzchni zwanej płaskowierzchołkową w celu znalezienia punktów leżących na poziomie  $y_A$  (rys. 8c). Wyznaczone w ten sposób punkty pozwalają na odseparowanie danych należących do części płaskowierzchołkowej od części danych należących do dolin i osobną ich analizę polegającą na obliczeniu parametru  $R_{pq}$ . W przypadku tej metody możliwe jest również wyznaczenie szerokości poszczególnych dolin oraz ich liczby.

Trzecie z zaproponowanych nowych rozwiązań dotyczy opisu powierzchni dwuprocesowych zawierających dwa komponenty, z których każdy posiada okresowy charakter. Dobrym przykładem jest powierzchnia po procesie precyzyjnego toczenia zawierająca dodatkową teksturę w postaci mikrokieszeni olejowych, wykonanych np. metodą wygniataania. Należy zaznaczyć, że w przypadku tego typu powierzchni analiza przy użyciu DUM jest niemożliwa, gdyż nie zawierają one komponentów posiadających Gaussowski charakter rozkładu rzędnych.

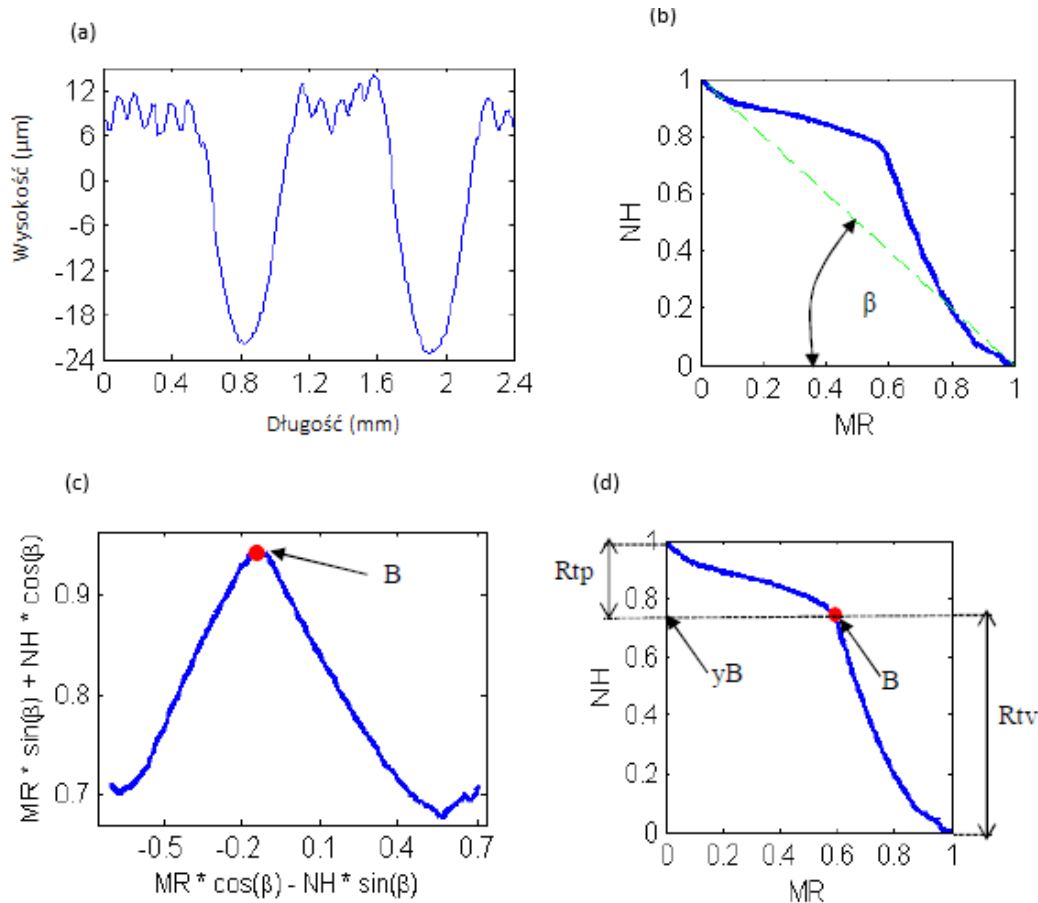


Rys. 8. Krzywa udziału materiałowego przedstawiona na siatce probabilistycznej z zaznaczonym górnym progiem A oraz linią prostą aproksymującą dane w części płaskowierzchołkowej wraz z wizualizacją dolnego progu B (a), wizualizacja dolnego progu na przykładowym profilu (b), wizualizacja górnego próg oraz sposobu określania szerokości dolin oznaczonych jako L (c)

Źródło: opracowanie własne na podstawie [A7].

Zaproponowane przeze mnie rozwiązanie oddzielenia części płaskowierzchołkowej od części dolin w celu ich odrębnej analizy polega na znajdowaniu punktu przejścia z części plateau do części dolin w sposób zwizualizowany na rys. 9. Zgodnie z tą metodą należy obrócić znormalizowany wykres udziału materiałowego (NH – znormalizowana wysokość profilu, MR – znormalizowany udział materiałowy) przeciwnie do ruchu wskazówek zegara o kąt  $\beta$ , po czym w znormalizowanym i obróconym wykresie KUM znaleźć punkt posiadający najwyższą wartość rzędnej (rys. 9c – punkt B).

Punkt B nazwany został górnym progiem przejścia z części płaskowierzchołkowej do części dolin. Dodatkowo wprowadziłem oszacowanie wysokości części plateau oznaczone jako  $R_{tp}$  oraz wysokość części dolin jako  $R_{tv}$ . Wizualizacja tych parametrów została zaprezentowana na rys. 9d. Na podstawie przeprowadzonych analiz dolny próg profilu ustanowiłem na poziomie  $0.25-0.5R_{tv}$  poniżej punktu B. W kolejnym kroku należy przeprowadzić procedurę wyszukiwania krawędzi dolin na poziomie dolnego, a następnie górnego progu przejścia z części plateau do dolin (przy użyciu procedury podobnej do tej przyjętej w poprzednich dwóch rozwiązaniach) w celu odseparowania części płaskowierzchołkowej. Tak wyodrębnione poszczególne elementy profilu można poddać osobnej analizie. Podobnie jak w poprzednich dwóch metodach, w tym rozwiązaniu można również określić liczbę dolin oraz ich szerokość. Procedura ta może być zastosowana dla profili dwuprosesowych o nieokreślonym charakterze części płaskowierzchołkowej oraz dolin.



Rys. 9. Okresowy profil dwuprocesowy (a), jego znormalizowana krzywa udziału materiałowego (gdzie:  $NH$  – znormalizowana wysokość profilu,  $MR$  – znormalizowany udział materiałowy) z linią prostą przechodzącą przez pierwszy i końcowy punkt (b), przeskalowana krzywa udziału materiałowego obrócona o kąt  $\beta$  wraz z wyznaczonym punktem przejścia B z części plateau do dolin (c), punkt przejścia B, oraz oznaczenie wysokości części płaskowierzchołkowej i doliny, odpowiednio  $R_{tp}$  i  $R_{tv}$  (d)

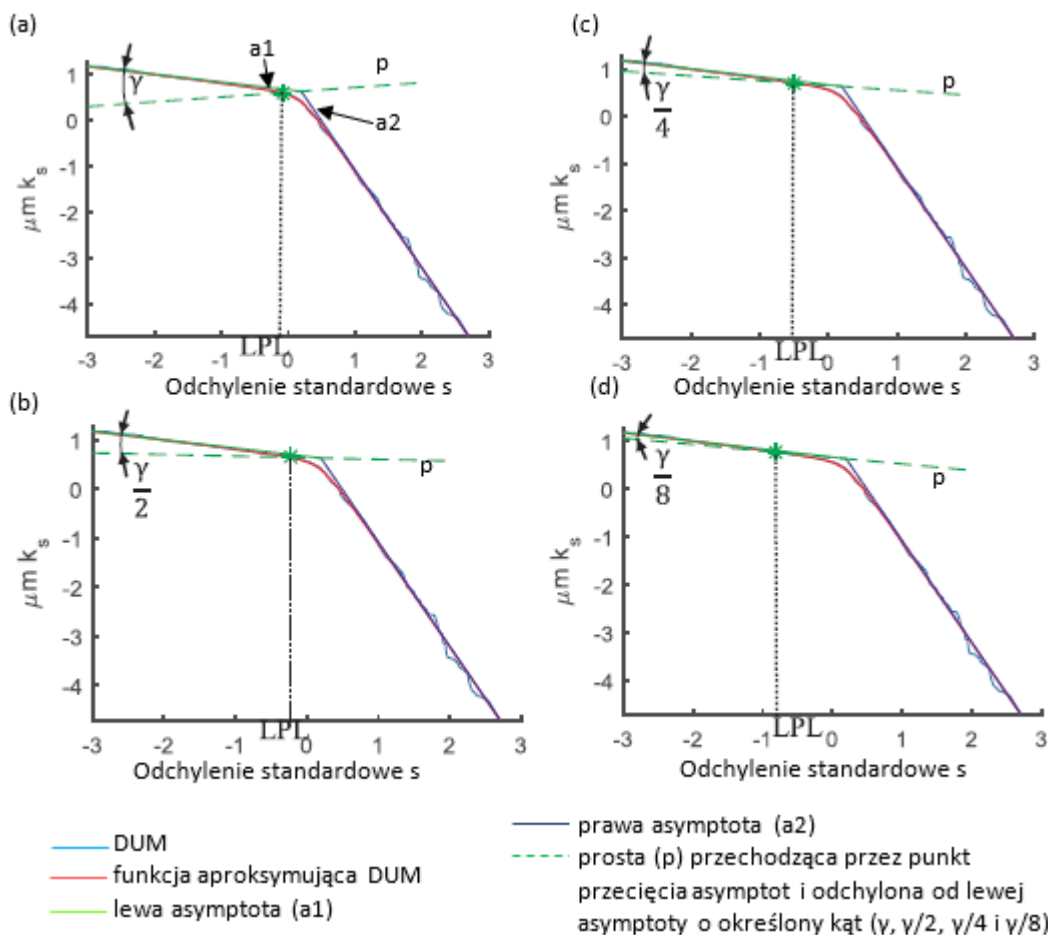
Źródło: opracowanie własne na podstawie [A7].

Podsumowując, dzięki publikacji [A7] mój wkład w rozwój dyscypliny *inżynieria mechaniczna* polega na wprowadzeniu rozwiązań pozwalających na wyodrębnieniu części zwanej płaskowierzchołkową z profilu zawierającego ślady dwóch procesów obróbkowych. Należy zaznaczyć, że zaproponowane przeze mnie rozwiązania umożliwiają analizę powierzchni mających losowo-losowy, losowo-okresowy oraz okresowo-okresowy charakter. W przypadku profili o charakterze losowo-losowym i losowo-okresowym zaproponowane przeze mnie rozwiązania pozwalają dodatkowo na określenie poziomu przejścia z każdej z dolin do części płaskowierzchołkowej, dzięki czemu możliwe jest określenie liczby dolin oraz ich średniej szerokości.

Kontynuacją badań przedstawionych w artykule [A7] jest praca [A3]. Prowadząc badania dotyczące dokładności wyznaczania parametrów zdefiniowanych w normie ISO 13565-3 [30], zauważyłem, że w przypadku zastosowania procedury zawartej w tym standardzie mogą powstać znaczne błędy w określaniu parametrów  $R_{pq}$ , co omówiłem w pracy [A3]. Ponadto w literaturze nie znalazłem prac, które wskazywałyby na ten problem. Dodatkowo, w pracy [A3] zwróciłem uwagę, że w normie ISO 13565-3 tylko region DUM znajdujący się pomiędzy dolną granicą plateau (LPL) a górną granicą dolin (UVL) (wizualizację tych granic przedstawia rys. 6b) błędnie jest nazywany mieszaniną dwóch rozkładów, przy czym ze statystycznego punktu widzenia mieszanina ta istnieje w niemal całym obszarze plateau, co również

zostało wizualnie przedstawione na rys. 4e i 5c oraz matematycznie udokumentowane w pracy [A1]. Ponadto metoda ta nadaje się do analizy powierzchni tylko wtedy, kiedy stosunek parametru  $R_{vq}$  do  $R_{pq}$  wynosi co najmniej 5, co jest jednym z podstawowych ograniczeń tego standardu. W związku z tym w pracy [A3] zaproponowałem dwa sposoby pozwalające na poprawę wyników obliczeń parametru  $R_{pq}$ .

W pierwszym z zaproponowanych przeze mnie rozwiązań (nazwanym w pracy [A3] jako A) zmniejszenie błędów parametru  $R_{pq}$  uzyskałem przez przesunięcie do bardziej liniowego obszaru DUM dolnej granicy zakresu plateau (LPL). Aby to zrealizować, zaproponowałem rozwiązanie polegające na dodatkowym podziale kąta  $\gamma$  (sposób wyznaczania kąta  $\gamma$  został szczegółowo zwizualizowany i opisany w pracy [A3]), o który odchylna jest od lewej asymptoty prosta  $p$  przechodząca przez punkt przecięcia asymptot  $a1$  i  $a2$  (rys. 10a). Należy zaznaczyć, że w standardzie ISO13565-3 LPL znajduje się w punkcie przecięcia funkcji aproksymującej DUM z prostą  $p$  przechodzącą przez punkt, w którym przecinają się asymptot  $a1$  i  $a2$  oraz odchylną od lewej asymptoty ( $a1$ ) o kąt  $\gamma$ . Na rys. 10b-d został zobrazowany nowy sposób wyznaczania granicy LPL oparty na dodatkowym podziale kąta  $\gamma$ . Nowo określona granica LPL znajduje się w punkcie przecięcia prostej  $p$  z funkcją aproksymującą DUM, przy czym prosta  $p$  jest prostą przechodzącą przez punkt przecięcia asymptot  $a1$  i  $a2$  z gałęzią hiperboli aproksymującej DUM i może być odchylna od asymptoty  $a1$  o kąty:  $\gamma/2$  (rys. 10b),  $\gamma/4$  (rys. 10c) i  $\gamma/8$  (rys. 10d).



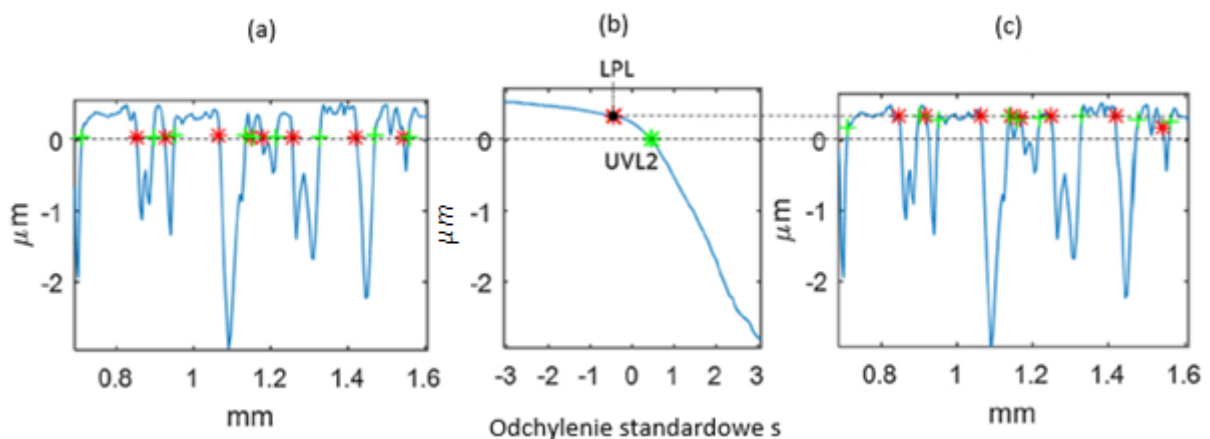
Rys. 10. Wizualizacja przesunięcia dolnej granicy (LPL) w obszar DUM o większym promieniu krzywizny  
Źródło: opracowanie własne na podstawie [A3].

Tak wyznaczony punkt przecięcia prostej  $p$  z funkcją aproksymującą DUM przyjąłem jako potencjalną, nową dolną granicę obszaru plateau (nazwaną w pracy LPL). Górną granicę plateau (nazwaną w pracy UPL) określiłem zgodnie z proponowaną w standardzie ISO 13565-3 [30] procedurą. Następnie

w nowo wyznaczonym obszarze DUM, znajdującym się pomiędzy UPL i nowo określonym LPL, należy przeprowadzić linię regresji, nachylenie linii regresji jest równe co do wartości parametrowi  $R_{pq}$ . Schemat blokowy obrazujący w poszczególnych krokach procedury, jakie należy zrealizować w celu wyznaczenia zaproponowaną przeze mnie procedurą parametrów  $R_{pq}$ ,  $R_{vq}$  i  $R_{mq}$ , przedstawiłem w pracy [A3].

W wyniku przeprowadzonych przeze mnie analiz w pracy zalecony został trzykrotny podział kąta  $\gamma$ , przy czym w przypadku zbyt małej liczby punktów pomiarowych usytuowanych w części DUM znajdującej się pomiędzy punktami LPL i UPL sugeruje się dwukrotny podział kąta  $\gamma$ . W doborze liczby podziałów kąta  $\gamma$  pomocna może być również obserwacja zmiany parametru  $R_{pq}$ . Po dużym wzroście parametru  $R_{pq}$  należy przerwać podział kąta  $\gamma$  i wybrać wyniki z poprzedniego podziału. Metodę tę można łatwo dostosować do analizy topografii powierzchni (3D). W takim przypadku prawdopodobieństwo błędów spowodowanych podziałem kąta  $\gamma$  na więcej niż trzy części będzie mniejsze, ponieważ dane pochodzące z pomiarów 3D zawierają znacznie więcej punktów pomiarowych w porównaniu z danymi otrzymanymi z pojedynczego profilu. Określiłem również względne błędy wynikające z obliczeń parametru  $R_{pq}$  po uwzględnieniu podziału kąta.

Drugie z zaproponowanych przeze mnie rozwiązań umożliwia rozpoznanie początkowego i końcowego punktu każdego z obszarów plateau, a następnie połączenie każdego z wyodrębnionych obszarów plateau w jeden profil, na podstawie którego oblicza się parametr  $R_{pq}$ . Podejście przedstawione w tej pracy jest kontynuacją metody zaproponowanej w artykule [A7]. Na podstawie szeregu analiz, które przeprowadziłem na modelu wprowadzonym przeze mnie w pracy [A7], zauważyłem, że przyjęcie jako dolnego progu startowego służącego do wyznaczania poszczególnych górnych brzegów dolin proponowanej w normie dolnej granicy plateau powoduje zbyt wysokie usytuowanie tego dolnego progu na DUM. W związku z tym można pominąć niektóre płytkie doliny, które powinny wchodzić w skład obszaru plateau. W pracy [A3] zastosowałem więc odmienne podejście do wyznaczania dolnego progu startowego (oznaczonego jako UVL2 – rys. 11b).



Rys. 11. Przykładowy profil dwuprosowy (a), (c) i jego dystrybuenta udziału materiałowego (b) z górnymi i dolnymi progami wyznaczonymi według granic LPL i UVL2

Źródło: opracowanie własne na podstawie [A3].

Wartość rzędnej profilu odpowiadająca temu progowi została przeze mnie przyjęta w punkcie przecięcia prostej przechodzącej przez punkt przecięcia asymptot krzywej stożkowej, którą aproksymowana jest dystrybuenta udziału materiałowego i odchylonej od prawej asymptoty o kąt  $\theta/2$  (co zobrazowałem w artykule [A3] na rys. 3c). Na podstawie tak przyjętej procedury wyznaczania dolnego i górnego progu (LPL) skonstruowałem algorytm (którego schemat blokowy i opis zamieściłem w pracy [A3]) pozwalający na oddzielenie części dolin od części płaskowierzchołkowej. Przykładowy profil wraz

odpowiadającą mu dystrybuantą udziału materiałowego oraz z wyznaczonymi (zgodnie z opracowanym przeze mnie algorytmem) brzegami dolin na poziomie LPL i UVL2 zaprezentowany został na rys. 11.

Wydzielone obszary plateau należy połączyć w jeden profil, przy czym należy podkreślić, że na podstawie tego nowo utworzonego profilu możliwe jest obliczenie również innych istotnych z punktu widzenia tribologicznego parametrów chropowatości. W omawianej pracy przeprowadziłem również porównanie wyników działania obu proponowanych przeze mnie rozwiązań z wynikami, które otrzymałem przy użyciu zaproponowanej w normie ISO 13565-3 procedury. W celu lepszej wizualizacji wyników oprócz omówienia ich w tekście [A3] zestawiłem je także w formie tabel (tab. 3 i 4 w pracy [A3]). W każdym z analizowanych przypadku zaproponowane przeze mnie rozwiązania pozwalały na znaczne zmniejszenie błędów związanych z obliczeniem parametru  $R_{pq}$ .

**Podsumowując, przez pracę [A3] mój wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna polega na zaproponowaniu i opracowaniu dwu rozwiązań pozwalających na bardziej precyzyjne obliczanie parametru  $R_{pq}$  w porównaniu z istniejącymi rozwiązaniami zawartymi w normie ISO 13565-3.**

Niewłaściwe obliczenie pojemności olejowej powierzchni istotnych tribologicznie może skutkować błędnym oszacowaniem właściwości tribologicznych smarowanych węzłów ciernych pracujących w warunkach tarcia ślizgowego, co z kolei może doprowadzić do zatarcia tego typu układów. Przeprowadzone przeze mnie badania dotyczące wpływu zwiększonej pojemności olejowej SGP na tarcie [A9] utwierdziły mnie w przekonaniu o znaczeniu metod pozwalających na dokładne określanie pojemności olejowej SGP, w szczególności powierzchni teksturowanych.

Uwzględniając powyższe oraz wzrost roli powierzchni teksturowanych w zastosowaniach inżynierskich, poruszona w pracy [A8] tematyka związana z prawidłowym obliczaniem pojemności olejowej tego typu powierzchni wydaje się być niezmiernie ważna. Publikacja [A8] jest kontynuacją przedstawionych przeze mnie w pracach [A7] i [39] badań dotyczących opisu powierzchni zawierających tzw. mikrokieszenie smarowe. Zaimplementowane przez mnie cztery metody obliczania pojemności olejowej powierzchni oparte na analizie krzywej udziału materiałowego porównałem z metodą odniesienia polegającą na obliczaniu pojemności olejowej poszczególnych mikrokieszeni smarowych przy użyciu komercyjnego oprogramowania. W przypadku pierwszej z analizowanych w pracy metod obliczałem znormalizowaną objętość retencji oleju (nazwaną w pracy  $OC_{Sk}$ ) według wzoru:

$$OC_{Sk} = 0.005 \cdot S_{vk} \cdot (100 - S_{r2}) \quad (4)$$

w którym  $S_{vk}$  i  $S_{r2}$  to parametry funkcjonalne określone zgodnie ze standardem EUR 15178N. Otrzymana wartość  $OC_{Sk}$  pomnożona przez zmierzony obszar dawała ostatecznie wartość pojemności olejowej.

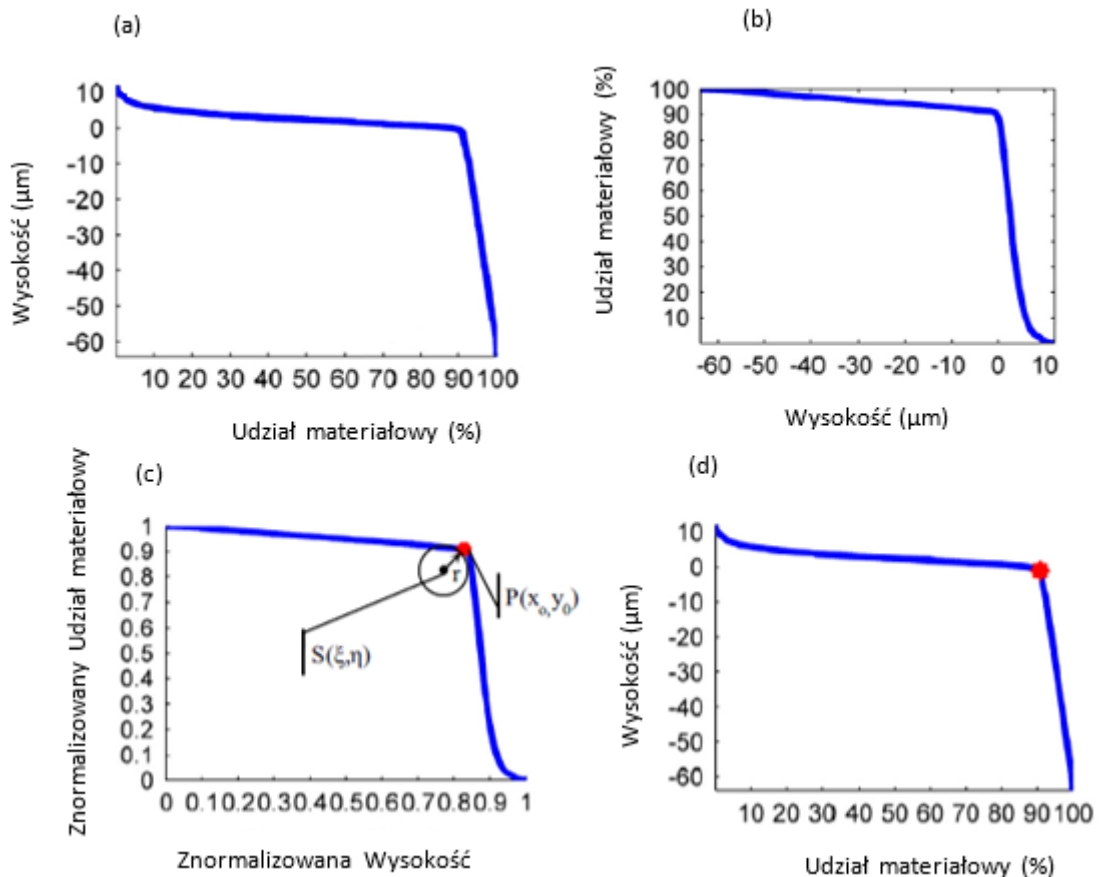
Pozostałe metody zastosowane przeze mnie do obliczenia pojemności olejowej bazowały na znalezieniu na KUM punktu przejścia (zwanego dalej PP) z tzw. obszaru rdzenia do obszaru głębokich dolin. Po wyznaczeniu punktu przejścia powierzchnię obcinałem w taki sposób, aby wyeliminować część powierzchni leżącą powyżej tego punktu, dzięki czemu tylko część głębokich dolin powierzchni pozostawała po realizacji tej operacji. Na podstawie parametrów tej nowo powstałej powierzchni obliczałem rzeczywistą pojemność olejową SGP.

W drugiej metodzie obliczania pojemności olejowej (nazwanej w pracy AFR) w celu znalezienia wspomnianego punktu przejścia zaproponowałem procedurę, w ramach której wykres krzywej udziału materiałowego należy obrócić o kąt  $\psi_1$  przeciwnie do ruchu wskazówek zegara. Kąt  $\psi_1$  jest to kąt, pod jakim pochylona jest prosta przechodząca przez pierwszy i ostatni punkt KUM. W tak obróconym wykresie KUM znaleziony i zapamiętany zostaje punkt o największej wartości rzędnej. Następnie KUM obraca się o kąt  $\psi_1$

zgodnie z ruchem wskazówek zegara, a wyznaczony punkt przyjmuje się jako punkt przejścia z obszaru rdzenia do obszaru głębokich dolin.

Trzecia z opracowanych przeze mnie metod obliczania pojemności olejowej (nazwana w pracy MP) ma zastosowanie do powierzchni dwuprosocowych mających losowo-okresowy charakter. Również w przypadku tego typu powierzchni głównym wyzwaniem jest właściwe określenie punktu przejścia z części płaskowierzchołkowej (mającej losowy charakter rozkładu rzędnych) do części dolin (o okresowym charakterze). W przypadku trzeciej metody zaproponowałem wyznaczenie punktu przejścia na podstawie obrócenia dystrybuanty udziału materiałowego o kąt  $\psi_2$  przeciwnie do ruchu wskazówek zegara. Kąt  $\psi_2$  jest zawarty pomiędzy prostą przechodzącą przez pierwszy i ostatni punkt DUM a osią odciętych. Podobnie jak w metodzie AFR, punkt o największej wartości rzędnej w obróconym wykresie DUM został przyjęty i zapamiętany jako punkt przejścia z części płaskowierzchołkowej do części dolin. W obróconym zgodnie z ruchem wskazówek zegara o kąt  $\psi_2$  wykresie DUM punkt ten stanowi punkt przejścia z obszaru plateau do obszaru dolin.

W ostatniej z metod (nazwanej w pracy jako MRC) w celu znalezienia punktu przejścia z obszaru rdzenia do obszaru głębokich dolin zaproponowałem rozwiązanie, w którym krzywa udziału materiałowego zostaje tak przekształcona, aby udział materiałowy znajdował się na osi pionowej, a wysokość powierzchni na osi poziomej (rys. 12 przedstawia wizualizację wyznaczania punktu przejścia z części płaskowierzchołkowej do części dolin).



Rys. 12. Krzywa udziału materiałowego (KUM) (a), krzywa udziału materiałowego z odwróconymi osiami (b), unormowana krzywa udziału materiałowego wraz z wyznaczonym punktem  $P(x_0, y_0)$ , w którym KUM posiada największą krzywiznę (c), krzywa udziału materiałowego z wyznaczonym zgodnie z metodą MRC punktem przejścia z części płaskowierzchołkowej do części dolin (d)

Źródło: opracowanie własne na podstawie [A8].

KUM zostaje znormalizowana, by wartości na obu osiach znajdowały się w przedziale od 0 do 1 (rys. 12c). W tak znormalizowanym wykresie KUM zostaje znaleziony punkt  $P(x_0, y_0)$ , w którym KUM posiada najmniejszy promień krzywizny, a jego współrzędne są zapamiętywane. Następnie KUM przekształcana jest do pierwotnej postaci (rys. 12d), a znaleziony punkt P przyjmowany jest jako punkt przejścia z obszaru rdzenia do obszaru głębokich dolin. Stosując przedstawione metody określania pojemności olejowej, dokonałem analizy kilku różnych powierzchni zawierających kieszenie olejowe. Na podstawie analizy wyników otrzymywanych poszczególnymi metodami stwierdziłem, że standardowa metoda oparta na analizie parametrów z grupy Sk jest najprostszą w użyciu, możliwe są jednak znaczne rozbieżności w wynikach. Wykazałem, że używając tej metody w niektórych przypadkach błędy związane z przeszacowaniem pojemności olejowej mogą sięgać nawet 80%. W przypadku zastosowania przedstawionych w pracy i przebadanych przeze mnie metod błędy oszacowania objętości olejowej nie były wyższe niż 10%, przy czym średnia różnica pomiędzy metodą odniesienia a proponowanymi metodami wynosiła 5%.

Ponieważ podejście polegające na wyznaczeniu minimalnego promienia krzywizny znormalizowanej krzywej udziału materiałowego jest metodą z najlepiej ugruntowanymi podstawami matematycznymi, zostało zaproponowane przeze mnie jako najbardziej odpowiednie do zastosowania w praktyce.

Metoda MP jest najtrudniejsza do wykorzystania. Ponadto można ją stosować tylko w przypadku dwuprocesowej SGP o charakterze losowo-okresowym. Natomiast pozostałe metody można używać do różnych typów powierzchni zarówno dwu-, jak i jednoprocesowych. Zwróciłem również uwagę na to, że stosowanie metod AFR i MP w przypadku powierzchni zawierających indywidualne, odbiegające od pozostałych wzniesień szczyty (wynikające np. z błędów pomiarowych) może dać fałszywe rezultaty, ponieważ punkt o największej wartości rzędnej w obróconym wykresie krzywej udziału materiałowego może być wyznaczony nieprawidłowo. Ważną zaletą proponowanych rozwiązań jest to, że nie wymagają one aproksymacji krzywej udziału materiałowego tak jak metody zaprezentowane w pracach [40],[41],[42]. Związane jest to z tym, że sama aproksymacja KUM może stanowić znaczne źródło błędów. Dodatkową zaletą proponowanych metod obliczania pojemności olejowej powierzchni jest możliwość ich wykorzystania również do powierzchni posiadających połączone ze sobą doliny, czyli np. do powierzchni z siatką krzyżujących się dolin, takich jak powierzchnie tulei cylindrowych po procesie gładzenia płaskowierzchołkowego.

**Opracowanie zaprezentowanych powyżej metod określania pojemności olejowej powierzchni teksturowanych i ich weryfikacja stanowi mój wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna.**

Jak już wspomniano we wstępie, zaplanowane i przeprowadzone przeze mnie badania tribologiczne, oprócz dostarczenia informacji dotyczących transformacji SGP podczas procesu początkowego zużycia dających podstawy do budowy matematycznego modelu pozwalającego na opis powierzchni podczas takiej transformacji, dodatkowo miały wyjaśnić występujące w literaturze rozbieżności dotyczące wpływu kąta gładzenia na właściwości tribologiczne skojarzenia trącego TPC. Między innymi w przeglądowej pracy [43] wykazano, że różni badacze i producenci silników proponują stosowanie różnych kątów gładzenia. Przykładowo, autorzy pracy [44] wskazują, że według literatury wyższy kąt gładzenia, tj. na poziomie  $140^\circ$ , wpływa na zmniejszenie tarcia. Ci sami autorzy w badaniach eksperymentalnych wykazują, że tuleje o kącie gładzenia  $140^\circ$  nie dają jednak żadnej poprawy, jeśli chodzi o zużycie i tarcie w porównaniu z tuleją o kącie gładzenia  $40^\circ$ . Niestety przeprowadzone przez nich badania eksperymentalne uwzględniały jedynie kąty gładzenia  $40^\circ$  i  $140^\circ$ . Autorzy pracy [45] zalecają natomiast kąt gładzenia w przedziale od  $30^\circ$  do  $35^\circ$ . Z kolei Bolander wraz z współautorami [46] opracowali model numeryczny i przeprowadzili badania eksperymentalne w celu zbadania smarowania i tarcia w układzie PC. Ich badania wykazały 25% redukcję współczynnika tarcia, gdy kąt honowania został obniżony z  $90^\circ$  do  $20^\circ$ .



Chciałbym zaznaczyć, że temat ten jest nadal postrzegany jako bardzo istotny – najnowsze badania z 2021 roku zawarte w pracy [47], opublikowane w czasopiśmie Tribology International, nadal zgłębiają wiedzę dotyczącą wpływu kąta gładzenia na tarcie i zużycie tulei cylindrowych. Ponadto analiza literatury przedstawiona w cyklu publikacji [48],[49], jak również wyniki moich własnych prac badawczych [50] nie pozwoliły jednoznacznie określić wpływu liczby procesów obróbkowych formujących ostateczną SGP (powierzchnie jedno- i dwuprocesowe) na wartości współczynnika tarcia. Należy jednak podkreślić, że we wcześniejszych moich badaniach można było dostrzec pewną tendencję wskazującą na to, że powierzchnie jednoprocesowe prowadzą do mniejszych wartości współczynników tarcia niż powierzchnie dwuprocesowe o tej samej wartości parametru Sq. Istotne jest jednak to, że w przypadku pracy [50] powodem braku dokładnego określenia wpływu liczby procesów obróbkowych na wartości oporów ruchu był znaczny rozrzut wyników pomiarów siły tarcia wynikający z konstrukcji testera tribologicznego, którego używałem do realizacji badań. Uzyskane wyniki były jednak o tyle interesujące, że w niektórych kwestiach pozostawały w sprzeczności w porównaniu z rezultatami prezentowanymi w pracach [51],[22]. Niekiedy były one zbliżone do tych, które uzyskano w pracy [49], gdzie powierzchnie o chropowatość 0,5 Rz (lub więcej) wykonane za pomocą pojedynczego procesu gładzenia wykazywały lepsze właściwości, jeśli chodzi o smarowanie hydrodynamiczne niż cylindry po gładzeniu płaskowierzchołkowym.

Aby rozwiązać nurtujące mnie wątpliwości, w ramach pracy [A6] przeprowadzone zostały kompleksowe badania, w których wziąłem pod uwagę szeroki zakres kątów gładzenia od 15.5° do 125°, jak również niektórych cech SGP mogących wynikać bezpośrednio z użytego narzędzia obróbkowego. Badania te miały także dać odpowiedź na temat wpływu, jaki ma SGP jedno- i dwuprocesowych tulei cylindrowych charakteryzujących się tym samym kątem gładzenia na właściwości tribologiczne układu pierścieni tłokowy – tuleja cylindrowa podczas krótkotrwałych testów tribologicznych, pozwalających na wychwycenia istotnych zmian zachodzących w SGP podczas docierania.

Ponieważ w obecnych silnikach istnieje tendencja do zwiększania ciśnienia spalania [52], które bezpośrednio przekłada się na zwiększenie nacisku gazów na pierścienie, aby dostrzec potencjał w badanych próbkach, oprócz typowych obciążeń zastosowane zostały obciążenia przeciwpróbki przekraczające te występujące w standardowych silnikach diesla.

Eksperymenty tribologiczne przedstawione w pracach [A4]–[A6] przeprowadziłem przy użyciu testera tribologicznego Optimol SRV5, pracującego w ruchu posuwisto-zwrotnym w warunkach smarowania olejem mineralnym SAE 15W/40, przy temperaturze 80°C. Zestawy badawcze zostały wycięte z dedykowanych do samochodów ciężarowych tulei cylindrowych zawierających różne rodzaje powierzchni określonych zgodnie z opracowaną przeze mnie specyfikacją. Z przystosowanych do tego typu tulei cylindrowych pierścieni tłokowych zostały wycięte przeciwpróbki. Skok roboczy pierścienia (przeciwpróbki) podczas ruchu posuwisto-zwrotnego wynosił 3 mm. Do pomiarów topografii powierzchni używano interferometru światła białego Talysurf CCI Lite.

W trakcie badań przedstawionych w pracy [A6] przeprowadzono kilka typów testów tribologicznych różniących się parametrami roboczymi. W testach typu A, z których każdy trwał po 32 minuty, czynniki takie jak siła normalna i częstotliwość były zmieniane (co 2 minuty) w trakcie trwania każdego z eksperymentów w celu uwzględnienia różnej dynamiki i kinematyki na przebieg procesu tarcia (siła zmieniała się od 100 N do 500 N, natomiast częstotliwość od 1 do 50 Hz; tab. 1 w pracy [A6] zawiera szczegółowe dane). Przed i po badaniach wykonano pomiary topografii powierzchni tulei cylindrowych.

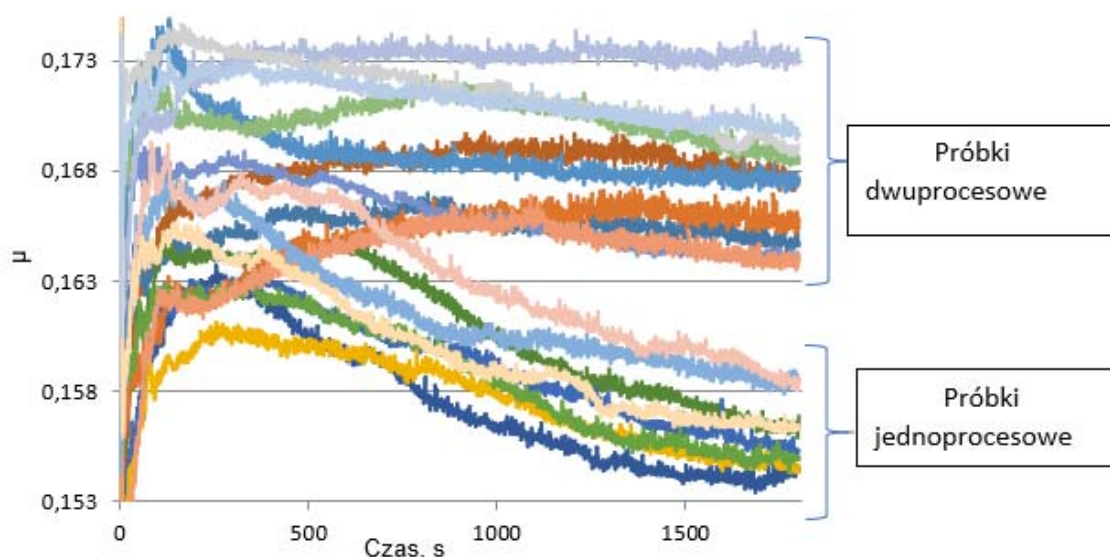
Rozpatrując wyniki otrzymane z testów tribologicznych typu A, zauważyłem pewien trend, mianowicie wzrost kąta gładzenia tuli cylindrowej prowadził do wyższych wartości współczynnika tarcia. Dodatkowo, w testach typu A dostrzegłem tendencję wskazującą, że jednoprocesowe tuleje cylindrowe (wykonane przy użyciu osełek ceramicznych czy też osełek diamentowych) charakteryzujące się dużą

chropowatością początkową ( $S_q$  na poziomie  $1.9\ \mu\text{m}$ – $2.9\ \mu\text{m}$ ), szczególnie przy obciążeniu próbki siłą od 300 N do 500 N i częstotliwości oscylacji 50 Hz, osiągały niższe wartości współczynnika tarcia niż tuleje jednoprosowe o mniejszej chropowatości początkowej. Ponadto wyniki wskazywały, że jednoprosowe powierzchnie prowadzą do mniejszych współczynników tarcia niż powierzchnie dwuprosowe. Potwierdziło to trendy wykazane w trakcie moich wcześniejszych badań [50].

Z dokonanych analiz wynika, że po 30 minutach trwania testów zmniejszenie wysokości chropowatości powierzchni jednoprosowych było większe niż dwuprosowych. W przypadku powierzchni dwuprosowych występował większy spadek wysokości chropowatości wtedy, kiedy charakteryzowały się one mniejszą początkową wartością parametru  $S_{mq}$ .

Szukając związków pomiędzy wynikami pochodzącymi z pomiarów topografii powierzchni z danymi dotyczącymi współczynników tarcia, zauważyłem, że dla dwuprosowych powierzchni zmiany wysokości chropowatości podczas testu tribologicznego typu A były mniejsze, natomiast współczynniki tarcia wyższe, przy czym odwrotna sytuacja była w przypadku tulei jednoprosowych. Dodatkowo zauważyłem, że dla wszystkich badanych powierzchni mniejsze zmiany chropowatości powierzchni odpowiadały wyższym wartościom współczynnika tarcia.

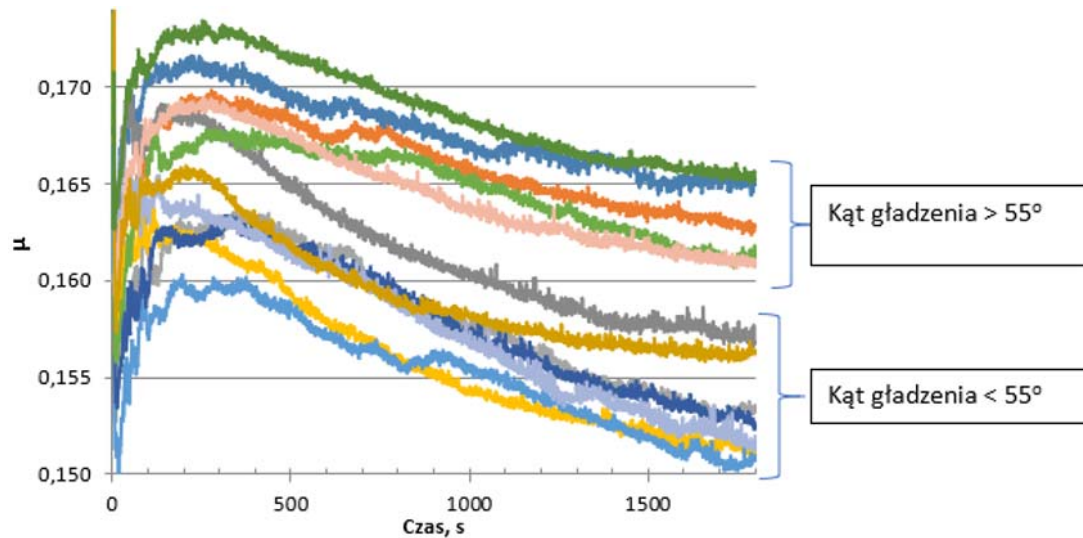
Aby lepiej zweryfikować trendy zaobserwowane podczas testów typu A, zaproponowałem rozszerzenie wstępnie zaplanowanych badań o testy tribologiczne przy stałych parametrach eksploatacyjnych. Testy te, oznaczone w pracy jako B, przeprowadziłem dla stałych parametrów: siła normalna wynosiła 100 N, częstotliwość 10 Hz, a czas trwania testu 30 min. Należy zaznaczyć, że w skojarzeniu ciernym TPC tłok, dochodząc do punktu zwrotnego, zmniejsza swoją prędkość, aż do zatrzymania. W związku z tym w celu odwzorowania zużycia panującego w tym obszarze tulei cylindrowej w czasie badań zastosowałem małą prędkość przeciwpróbki (będącej wycinkiem pierścienia tłokowego), wynikającą z przyjętej częstotliwości oscylacji. Na podstawie przeprowadzonych testów tribologicznych typu B wykazałem, że po 30 minutach testu współczynniki tarcia par ciernych zawierających powierzchnie jednoprosowe były mniejsze (0.154–0.159) niż tych z powierzchniami dwuprosowymi (0.164–0.174), przy czym kąt gładzenia zarówno jedno-, jak i dwuprosowych próbek wynosił  $55^\circ$  (rys. 13).



Rys. 13. Współczynnik tarcia ( $\mu$ ) w funkcji czasu dla SGP jedno- i dwuprosowych o kącie gładzenia  $55^\circ$   
Źródło: opracowanie własne na podstawie [A6].

Ponadto przeprowadzone przeze mnie analizy na podstawie uzyskanych (w testach typu B) danych wykazały, że powierzchnie jednoprosowe o kącie gładzenia większym niż  $55^\circ$  po 30 minutach testów

tribologicznych wpływają na wyższe końcowe wartości współczynników tarcia (0.161–0.166) w porównaniu z powierzchniami o mniejszym kącie gładzenia (0.15–0.157), potwierdzając tym samym tendencje zauważone podczas testów typu A (rys. 14).



Rys. 14. Współczynnik tarcia ( $\mu$ ) w funkcji czasu dla SGP jednoprosesowych o kącie honowania innym niż  $55^\circ$

Źródło: opracowanie własne na podstawie [A6].

Należy również zaznaczyć, że wysokościowe parametry chropowatości powierzchni jednoprosesowych o mniejszym kącie gładzenia zmieniały się bardziej niż powierzchni o większym kącie gładzenia.

Szukając związków pomiędzy danymi dotyczącymi współczynnika tarcia i informacjami otrzymanymi na podstawie analiz parametrów SGP, stwierdziłem, że wysokie tempo spadku współczynnika tarcia (prowadzące w konsekwencji do mniejszych jego wartości), występujące w przypadku par ciernych zawierających powierzchnie jednoprosesowe, odpowiadało dużym zmianom topografii powierzchni, które przekształcały się z jednoprosesowych w dwuprosesowe. O dużych zmianach związanych z przekształcaniem się topografii powierzchni świadczyły m.in. wartości parametru  $S_{mq}$ , który dla testów typu B kształtował się na poziomie 40%–50% (w testach typu A była na poziomie 50–60%) udziału materiałowego, przy czym dla powierzchni o większej chropowatości początkowej w testach typu B znajdował się on na poziomie 30%–35% (w testach typu A na poziomie 40%).

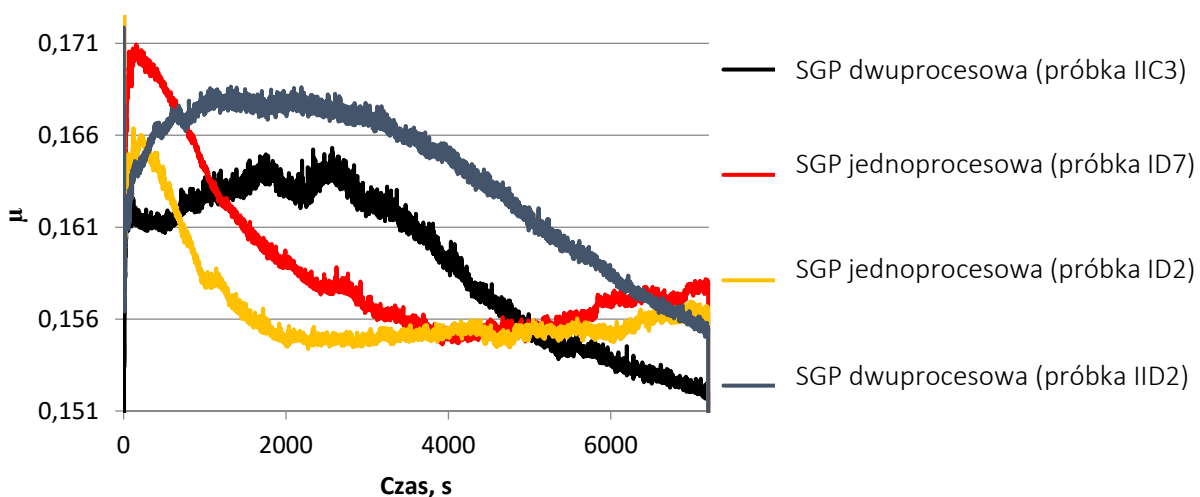
Transformacja topografii jednoprosesowej w dwuprosesową była związana z tworzeniem się części plateau, którą charakteryzował parametr  $S_{pq}$ , kształtujący się w przypadku testów typu A w przedziale od 0.25 do 0.3  $\mu\text{m}$ , przy czym dla próbek charakteryzujących się największą chropowatością w przypadku testów typu A  $S_{pq}$  znajdował się on na poziomie 0.4  $\mu\text{m}$  (w testach typu B parametr  $S_{pq}$  był na podobnym poziomie, czyli od 0.25 do 0.42  $\mu\text{m}$ ).

Przeciwnie zachowanie zauważyłem dla par ciernych zawierających topografie dwuprosesowe. Mianowicie, w przypadku tych powierzchni następowało mniejsze tempo spadku współczynnika tarcia niż miało to miejsce dla powierzchni jednoprosesowych. Również zmiany wysokościowych parametrów chropowatości powierzchni dwuprosesowych były mniejsze niż zmiany tych parametrów zarejestrowane dla powierzchni jednoprosesowych, np. parametry powierzchni próbki IIC5 zarówno przed, jak i po teście tribologicznym typu A zostały przedstawione jako typowe [A6]. W tym przypadku nastąpiła niewielka zmiana parametru  $S_{mq}$ , który zwiększył się jedynie o 8%. Natomiast podczas testów typu B zmiana ta była jeszcze mniejsza, bo na poziomie 1% (tuleja typu IIC3). W wyniku oddziaływania na topografie

dwuprocesowe trzeciego procesu związanego ze zużyciem następowało również zmniejszenie wartości parametru  $S_{pq}$ , który w przypadku testów typu A i B spadał do wartości z przedziału  $0.15\text{--}0.2\ \mu\text{m}$ .

Uogólniając, przegląd wyników otrzymanych z analizy SGP wykazał, że zmiany wysokościowych parametrów chropowatości powierzchni dwuprocesowych były mniejsze od zmian, jakie zachodziły dla tych parametrów w przypadku powierzchni jednoprocesowych. Przeprowadzone analizy wykazały, że zarówno dla testów typu A, jak i B zmniejszenie wysokości chropowatości było proporcjonalne do początkowej wartości parametru  $S_k$ . Porównanie wyników otrzymanych na podstawie testów typu A i B pozwoliło wykazać, że tendencje zmian parametrów chropowatości próbek były podobne – jednak zmiany parametrów chropowatości w testach typu B były mniejsze w porównaniu z testami typu A, co było spowodowane zastosowaniem podczas testów B mniejszej siły normalnej oddziałującej na przeciwpróbkę.

Dodatkowo w celach porównawczych przeprowadziłem testy 2-godzinne (nazwane C1) oraz 24-godzinne (nazwane C2), pozostałe parametry takie jak podczas testów typu B. Wydłużenie czasu trwania testu z 30 do 120 minut spowodowało zmniejszenie współczynników tarcia zespołów ciernych zawierających topografie dwuprocesowe oraz stabilizację i niewielkie wzrosty współczynnika tarcia par ślizgowych z jednoprocesową SGP. W rezultacie po 120 minutach testów topografie dwuprocesowe prowadziły do nieznacznie mniejszych współczynników tarcia niż powierzchnie jednoprocesowe, co zostało zobrazowane na rys. 15.



Rys. 15. Współczynnik tarcia ( $\mu$ ) w funkcji czasu dla SGP jedno- i dwuprocesowych o kącie gładzenia  $5^\circ$  uzyskane w trakcie testów typu C1

Źródło: opracowanie własne na podstawie [A6].

Również podczas eksperymentów typu C1 w początkowym etapie każdego z testów tempo zmiany współczynników tarcia w przypadku skojarzeń ciernych zawierających powierzchnie jednoprocesowe było stosunkowo duże, co było związane, podobnie jak w testach typu A i B, ze znacznymi zmianami SGP z jedno- na dwuprocesową. Należy jednak zaznaczyć, że po 30 minutach zmiany zachodzące w SGP były już na niewielkim poziomie.

Niewielkie początkowe zmiany współczynników tarcia w przypadku tulei cylindrowych z topografią dwuprocesową były prawdopodobnie związane z nieznacznymi zmianami SGP wynikającymi z większej rzeczywistej powierzchni kontaktu (związanej z wysokimi wartościami parametru  $S_{mq}$ ) niż dla tulei jednoprocesowych, dla których w początkowym etapie docierania dopiero formowała się część płaskowierzchołkowa, a więc wartość parametru  $S_{mq}$  była niewielka. Należy zatem przypuszczać, że naciski jednostkowe w przypadku par ciernych zawierających topografie dwuprocesowe w początkowej

fazie docierania były mniejsze w porównaniu z naciskami, jakie występowały dla par ciernych z powierzchniami jednoprosocowymi. W związku z tym proces docierania się skojarzeń ciernych zawierających powierzchnie dwuprosocowe trwał dłużej. Dalsze zmniejszanie się współczynników tarcia powierzchni dwuprosocowych było prawdopodobnie spowodowane ciągłym „upodabnianiem” się współpracującej części plateau powierzchni tulei cylindrowej z powierzchnią pierścienia tłokowego. Natomiast nieznaczne wzrosty współczynnika tarcia powierzchni jednoprosocowych mający miejsce pod koniec testów typu C1 wynikał z tego, że w trakcie procesu docierania następował wzrost wartości parametru  $Smq$ . Część powierzchni pierścienia, która do tej pory nie była w kontakcie z powierzchnią próbki, na pewnym etapie współpracy właśnie na skutek zwiększanie  $Smq$  (powierzchni tuli) dochodziła zatem do kontaktu z powierzchnią tulei, przez co dla tej części współpracujących powierzchni dopiero wtedy rozpoczął się proces docierania.

Zmiany SGP podczas testów C1 były podobne do zmian zachodzących podczas testów typu B. Wydłużenie czasu trwania testu do 24 godzin nie spowodowało znacznych zmian współczynnika tarcia.

Istotnym spostrzeżeniem z przeprowadzonych badań jest fakt, że składowa plateau powierzchni próbek dwuprosocowych podczas testów upodabniała się do powierzchni współpracującego z nią pierścienia, przy czym podobne były parametry nie tylko wysokościowe, ale także horyzontalne. Świadczy to o tym, że SGP pierścienia pozostawia „odcisk palca” na powierzchni próbki. To spostrzeżenie było dla mnie przesłanką do realizacji modelu zaproponowanego w pracach [A2] i [A1].

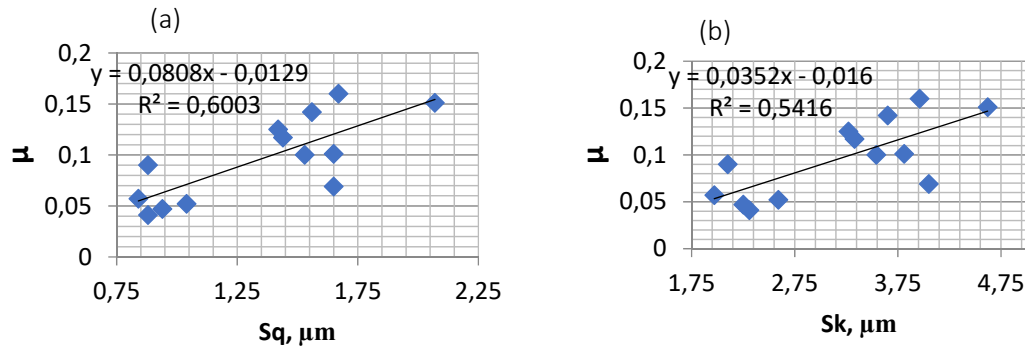
**Dzięki pracy [A6] moim wkładem w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna jest eksperymentalne określenie wpływu SGP tulei cylindrowych na tarcie i zużycie pary cierniej, jaką jest pierścień tłokowy i tuleja cylindrowa podczas krótkotrwałych testów tribologicznych, w tym porównanie właściwości tribologicznych SGP tulei cylindrowych jedno- i dwuprosocowych cechujących się tym samym kątem gładzenia, oraz określenie wpływu kąta gładzenia na właściwości tribologiczne badanych par ciernych zawierających próbki wykonane z tulei cylindrowych o strukturze geometrycznej powierzchni uformowanej w trakcie procesu gładzenia wykańczającego (tzw. jednoprosocowe), a różniące się kątem gładzenia.**

Dodatkowo analiza literatury wykazała, że w większości prac przedstawione są wyniki badań tribologicznych prowadzonych w zakresach temperatur od 20°C do 150°C [53], [54]. Nie znalazłem natomiast informacji o badaniach w ujemnych temperaturach panujących w niektórych krajach zimą. W związku z tym zaproponowałem przeprowadzenie badań eksperymentalnych mających na celu określenie wpływu SGP tulei cylindrowej na tarcie i zużycie pary trącej pierścień–tuleja cylindrowa w temperaturze -20°C. Wyniki tych badań zostały zaprezentowane w artykule [A5].

Podczas badań eksperymentalnych w temperaturze -20°C zostały przyjęte takie same parametry testów tribologicznych, jak podczas eksperymentów typu B przeprowadzonych w pracy A6, tj.: siła docisku przeciwpróbki miała wartość 100 N, częstotliwość oscylacji przeciwpróbki będącej wycinkiem pierścienia tłokowego była równa 10 Hz, skok roboczy pierścienia również wynosił 3 mm. Całkowity czas trwania każdego z testów wynosił 30 minut. W przedstawianych powyżej warunkach przeprowadziłem także kilka testów 24-godzinnych. Dodatkowo dla celów porównawczych zrealizowałem 30-minutowe testy w temperaturze 80°C.

Przeprowadzone przeze mnie analizy wyników wykazały, że w przypadku tulei cylindrowych z początkową topografią jednoprosocową współczynniki tarcia po początkowym gwałtownym wzroście uzyskiwały stałe wartości lub malały, przy czym ostateczne wartości współczynników tarcia mieściły się w szerokim przedziale: 0,036–0,155. Natomiast średni współczynnik tarcia uzyskany w ostatnich 15 minutach dla wszystkich par ciernych zawierających topografie jednoprosocowe wynosił 0,1, przy czym 69% z przebadanych jednoprosocowych próbek osiągało współczynnik tarcia z przedziału od 0,085 do 0,155. Wykazałem również, że istnieje zależność liniowa pomiędzy średnią wartością współczynnika tarcia

a wartością parametru wysokościowego  $S_q$  obliczonego dla par ciernych zawierających topografie jednoprosowe z kątem gładzenia  $55^\circ$ , z tym że podobna zależność istnieje również dla parametru  $Sk$ . Należy jednak zaznaczyć, że w wypadku  $S_q$  jest ona nieco silniejsza, gdyż współczynnik determinacji wskazuje, że 60% zmian wartości współczynnika tarcia zostaje wyjaśnione przez oszacowaną funkcję regresji. Zależności te zostały zobrazowane na rys. 16.



Rys. 16. Zależność między wysokością nierówności tulei cylindrowej opisaną parametrami  $S_q$  (a) i  $Sk$  (b) a średnim współczynnikiem tarcia z ostatnich 15 minut w testach krótkotrwałych w temperaturze  $-20^\circ\text{C}$  dla par ciernych zawierających tuleje jednoprosowe z kątem gładzenia  $55^\circ$

Źródło: opracowanie własne na podstawie [A5].

W przypadku testów 30-minutowych po transformacji powierzchni jednoprosowych w dwuprosowe wartości parametru  $Smq$  były poniżej 40%. Przy wydłużeniu czasu trwania testów do 24 godzin w przypadku niektórych próbek wartości tego parametru dochodziła nawet do 58%. Po 30 minutach testów parametr  $Spq$  mieścił się zwykle w przedziale od 0.3 do 0.4  $\mu\text{m}$ . Należy zaznaczyć, że parametr  $Svq$  po teście tribologicznym uzyskiwał wartość na podobnym poziomie, jak parametr  $Sq$  powierzchni jednoprosowych mierzonych przed testami tribologicznymi.

Tuleje cylindrowe posiadające powierzchnie dwuprosowe charakteryzowały się węższym zakresem końcowego współczynnika tarcia (0,036–0,115) w porównaniu z topografią jednoprosową. Współczynnik tarcia po początkowym gwałtownym wzroście powoli malał, jego zmiany były zwykle mniejsze w porównaniu z zachowaniem par ciernych z topografią jednoprosową. Średni współczynnik tarcia uzyskany z ostatnich 15 minut testów wynosił 0.06. Należy jednak podkreślić, że aż 74% przebadanych dwuprosowych próbek osiągało końcowy współczynnik tarcia w przedziale od 0.0355 do 0.085.

Dla par ślizgowych, w których próbki posiadały powierzchnie dwuprosowe, współczynnik tarcia był proporcjonalny do wartości początkowych parametrów wysokościowych, takich jak  $S_q$ ,  $Spq$  i  $Sk$  oraz odwrotnie proporcjonalny do parametru  $Smq$ . Korelacje te nie były jednak silne. Natomiast liniowa zależność występowała pomiędzy wartościami początkowymi parametru  $S_q$  i  $Sk$  a wartościami współczynnika tarcia uzyskanymi w ostatnich 15 minutach testów dla wszystkich badanych par (zarówno z jedno-, jak i dwuprosowymi SGP tulei cylindrowych). Współczynnik tarcia był również proporcjonalny do wartości początkowych parametru  $S_q$  dla topografii jednoprosowych i parametru  $Spq$  dla topografii dwuprosowych.

Rozpatrując informacje uzyskane z analizy wyników pomiarów topografii powierzchni, stwierdziłem, że w przypadku tulei z topografią noszącą ślady dwu procesów obróbkowych nieznacznym spadkiem współczynnika tarcia w miarę postępu badań tribologicznych towarzyszyły niewielkie zmiany zachodzące w topografii tych powierzchni. Dla powierzchni dwuprosowych parametr  $Smq$  wzrastał podczas testów, jednak jego zmiany były niewielkie, do kilku procent. Zmniejszył się również parametr  $Spq$ , przy czym jego

zmiany również były bardzo małe, do 0.03  $\mu\text{m}$ . Uogólniając, zmiany w topografii powierzchni dwuprocesowych były niewielkie.

Porównując wyniki otrzymane zarówno z 30-minutowych, jak i 24 godzinnych testów tribologicznych prowadzonych w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$ , stwierdziłem pewną tendencję dotyczącą wartości współczynnika tarcia – był on zazwyczaj wyższy dla tulei cylindrowych charakteryzujących się większą wysokością chropowatości w każdym z analizowanych przypadków, współczynnik tarcia po początkowym gwałtownym wzroście powoli się zmniejszał wraz z upływem czasu. Z przeprowadzonych przeze mnie analiz wynika, że zmiany współczynnika tarcia były zwykle mniejsze dla par ciernych zawierających powierzchnie dwuprocesowe w porównaniu z zachowaniem skojarzeń trących z powierzchniami jednoprocesowymi. Podobnie jak w badaniach przedstawionych w pracy [A6], zmniejszanie współczynnika tarcia było związane ze zmianami topografii powierzchni tulei cylindrowej podczas zużycia, które były wyższe w przypadku powierzchni jednoprocesowych. Ze względu na mniejszy początkowy opór ruchu występujący w ujemnych temperaturach dwuprocesowe powierzchnie tulei cylindrowych prowadziły do mniejszego końcowego współczynnika tarcia niż topografie jednoprocesowe. Powierzchnie dwuprocesowe dawały również bardziej stabilne wartości współczynnika tarcia zarówno w testach 30-minutowych, jak i 24-godzinnych.

Podsumowując, można stwierdzić, że topografie dwuprocesowe badane w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$  charakteryzowały się mniejszym końcowym współczynnikiem tarcia (biorąc pod uwagę jego uśrednioną wartość) w porównaniu z powierzchniami jednoprocesowymi. Przeciwnie wyniki uzyskano w wysokiej temperaturze. Badania wykazały, że zmiany topografii powierzchni próbek dwuprocesowych były mniejsze niż jednoprocesowych.

Wzrost temperatury prowadził do wzrostu zużycia i oporów ruchu par ciernych. Było to związane ze spadkiem lepkości oleju, przez co zwiększało się prawdopodobieństwo wystąpienia oddziaływań pomiędzy wierzchołkami topografii powierzchni elementów par ciernych współpracujących w warunkach smarowania mieszanego. Badania przeprowadzone w temperaturze  $80^{\circ}\text{C}$  pozwoliły stwierdzić, że topografie jednoprocesowe prowadziły do wyższych spadków współczynników tarcia i większych zmian SGP niż powierzchnie dwuprocesowe. Z powodu większych spadków współczynnika tarcia podczas testów pary cierne z powierzchniami jednoprocesowymi osiągały mniejsze końcowe wartości współczynnika tarcia. Wyniki te potwierdziły badania przeprowadzone w pracy [A6]. Również zmiany w temperaturze  $80^{\circ}\text{C}$  zarówno jedno-, jak i dwuprocesowych tulei cylindrowych wynikające z zużycia były większe niż w temperaturze ujemnej. Dla wyjściowych powierzchni jednoprocesowych wytworzyły się topografie dwuprocesowe o stosunkowo wysokim parametrze  $S_{mq}$ , który kształtował się w granicach 55–72%, w związku z czym nastąpiła znaczna zmiana kształtu krzywej udziału materiałowego. Pozostałe parametry charakteryzujące wysokość powierzchni uległy większym zmianom, np. parametr  $S_k$  zmniejszył się od 1,7 do 2,2 razy. Stosunkowo duże były również zmiany topografii powierzchni dwuprocesowych tulei cylindrowych w porównaniu ze zmianami, jakie zachodziły w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$ . Parametr  $S_{pq}$  zmniejszył się o co najmniej 0.08  $\mu\text{m}$ , a przyrost  $S_{mq}$  był większy niż 2%. Podobnie jak w przypadku badań w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$ , w wyniku zachodzących w węźle ciernym procesów tribologicznych nastąpiło zmniejszenie gęstości szczytów  $S_{pd}$  i skośności  $S_{sk}$ . Zmiana parametru  $S_z$  była proporcjonalna do jego wartości początkowej.

Reasumując, przez badania zrealizowane w ramach pracy [A5] mój wkład w rozwój dyscypliny *inżynieria mechaniczna* polega na eksperymentalnym wykazaniu, że powierzchnie dwuprocesowe podczas pracy wężła ciernego w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$  wpływają na uzyskanie mniejszego końcowego współczynnika tarcia w porównaniu z powierzchniami jednoprocesowymi, przeciwstawne wyniki uzyskuje się w temperaturze  $80^{\circ}\text{C}$ . Ponadto wykazałem, że zmiany wysokościowych parametrów struktury



**geometrycznej powierzchni tulei cylindrowych i siły tarcia w temperaturze -20°C są mniejsze niż podczas testów przeprowadzonych w temperaturze 80°C.**

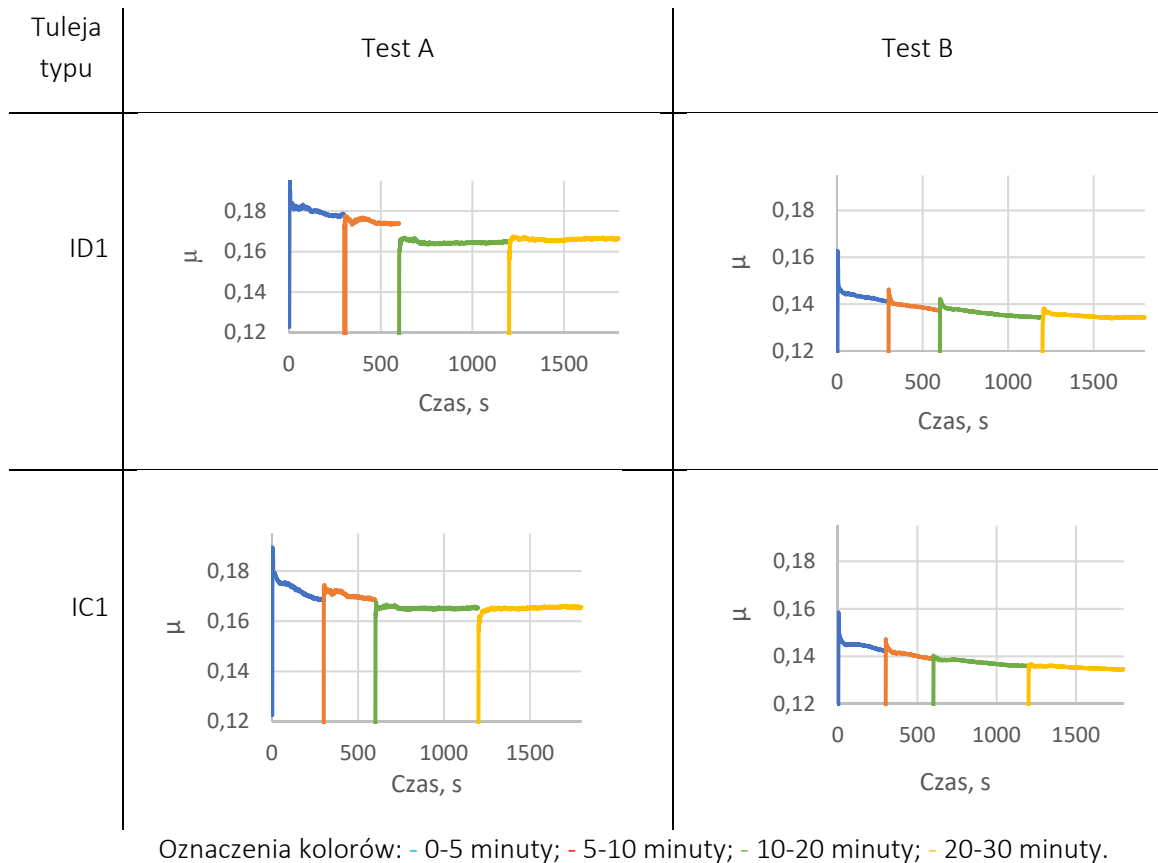
Proces docierania odgrywa znaczącą rolę, jeśli chodzi o długoterminowe funkcjonowanie układu TPC. W związku z tym, że w początkowym okresie docierania następują największe zmiany SGP, niezmiernie istotne jest poznanie i określenie tych zmian. Szczególnie ważne jest to w przypadku SGP tulei cylindrowych gładzonych płaskowierzchołkowo ze względu na szerokie zastosowania procesu gładzenia, dlatego w tej materii trwają ciągle badania [55]. Brakuje jednak w literaturze wyników obrazujących jak zmienia się SGP tulei cylindrowych po procesie gładzenia i gładzenia płaskowierzchołkowego w poszczególnych początkowych fazach procesu docierania. Aby zbadać, jak zachowuje się skojarzenie pierścień tłokowy – tuleja cylindrowa na poszczególnych etapach procesu docierania, zaplanowałem eksperyment tribologiczny, w którym 30-minutowy test (stosowany w poprzednich pracach, tj. [A5], [A6]) został podzielony na krótsze przedziały czasowe, w trakcie których następowały testy tribologiczne oraz pomiary SGP. Pierwszym zaplanowanym celem badań była analiza zmian współczynnika tarcia i struktury geometrycznej powierzchni tulei cylindrowej w krótkich interwałach czasowych w 30-minutowych testach tribologicznych. Drugim celem było zbadanie wpływu wzrostu normalnego obciążenia na wydajność trybologiczną pary trącej pierścień tłokowy – tuleja cylindrowa.

Zestawy badawcze zawierające pierścienie i próbki będące wycinkami z tulei cylindrowych, przygotowanych zgodnie z określoną przeze mnie specyfikacją dotyczącą SGP, poddane zostały dwóm typom testów. Parametry testów tribologicznych, takie jak częstotliwość oscylacji, skok roboczy przeciwpróbki oraz siła normalna obciążająca próbkę, były takie same, jak w testach typu B realizowanych w ramach badań, których wyniki przedstawiono w pracy [A6], jak również w 30-minutowych testach tribologicznych prowadzonych w ramach badań, których wyniki zaprezentowane zostały w pracy [A5]. Dla testów typu A siła normalna obciążająca próbkę wynosiła 100 N, natomiast dla testów typu B – 300 N. W trakcie trwania testów typu A dla przebiegów współczynnika tarcia w czasie charakterystyczne było to, że w pierwszym przedziale czasowym, tj. od momentu rozpoczęcia testu do 5 minuty, dla par ciernych zawierających tuleje cylindrowe z dwuprocesowymi topografiami powierzchni współczynnik tarcia po ostrym wzroście zwykle powoli malał. W następnych częściach badań, po demontażu i pomiarze topografii powierzchni próbek, charakter zmian współczynnika tarcia w czasie był podobny do tych w pierwszym etapie testów, jednak początkowe jego wahania były mniejsze. Z przeprowadzonych przeze mnie analiz danych uzyskanych w trakcie badań wynika, że dla siły normalnej wynoszącej 100 N (testy typu A) w przypadku próbek dwuprocesowych największy spadek współczynnika tarcia miał miejsce w pierwszym etapie testów, czyli w pierwszych 5 minutach każdego z testów. Małe spadki współczynnika tarcia stwierdzono pomiędzy 10 a 20 minutą, a szczególnie w ostatniej części badań, tj. po 20 minucie.

W przypadku badań par ciernych z jednoprocesowymi powierzchniami, których wyniki zamieszczono na rys. 17, początkowy gwałtowny wzrost współczynnika tarcia był większy niż dla par ślizgowych z próbkami dwuprocesowymi, szczególnie w pierwszej (0–5 minuta) i drugiej części testów (5–10 minuta). Jednak, podobnie jak w pracach [A6] i [A5], zaobserwować można wyższe tempo spadku współczynnika tarcia (mające miejsce po początkowym jego wzroście) niż miało to miejsce dla topografii powierzchni dwuprocesowych. Podobnie jak przypadku testów typu B opisanych w pracy [A6], również w tych badaniach wysokie tempo spadku współczynnika tarcia odpowiadało większym zmianom parametrów wysokościowych topografii jednoprocesowych w porównaniu z topografiami dwuprocesowymi. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdziłem, że szczególnie w pierwszych 5 minutach trwania testów (pierwszy etap badań) powierzchnie jednoprocesowe zmieniły się w większym stopniu niż powierzchnie dwuprocesowe.



Występujące niekiedy nieciągłości pomiędzy wartościami współczynnika tarcia w poszczególnych częściach badań wynikały głównie z problemów z dopasowaniem par ciernych podczas ponownego montażu po przerwach na pomiar. W trakcie testów typu A w kilku przypadkach w ostatnich etapach zaobserwowano niewielki wzrost oporów ruchu w miarę postępu badań. Wzrost ten spowodowany był prawdopodobnie miejscowym wzrostem temperatury prowadzącym do zmniejszenia lepkości oleju. Uogólniając, można przyjąć, że w testach typu A zarówno dla par z topografią jedno- jak i dwuprocesową stabilizacja współczynnika tarcia miała miejsce po 5-10 minutach od rozpoczęcia testu.



Rys. 17. Zmiany współczynnika tarcia w czasie otrzymane w trakcie testów typu A i B dla wybranych tulei cylindrowych posiadających jednoprocusowe topografie  
Źródło: opracowanie własne na podstawie [A4]<sup>1</sup>.

Wzrost siły obciążającej przeciwpróbkę z 100 do 300 N powodował większy spadek współczynnika tarcia w czasie zarówno dla topografii dwu-, jak i jednoprocusowych. Tempo zmian współczynnika tarcia w czasie zależało zatem w dużej mierze od zastosowanego obciążenia normalnego. W przypadku przebiegów współczynnika tarcia w czasie trwania poszczególnych etapów testów typu B dla topografii dwuprocusowych charakterystyczne było to, że współczynnik tarcia po początkowym wzroście zmniejszył się zarówno w pierwszej, drugiej, jak i trzeciej części badania. Jednak dla niektórych próbek (IIC2, IIC4 i IC1) dalszy spadek lub stabilizacja oporów ruchu (próbki IID1, IIC1 ID1) nastąpiła w ostatnim etapie testów. Z obserwacji wynika, że w przypadku zastosowania wyższego obciążenia normalnego o wartości 300 N współczynnik tarcia stabilizował się później (po 10–20 minutach) niż w przypadku testów A, co

<sup>1</sup> Rys. 17 zawiera poprawki dotyczące wyników otrzymanych w teście B.

prawdopodobnie było spowodowane silniejszymi interakcjami zachodzącymi pomiędzy nierównościami stykających się powierzchni próbki i przeciwpróbki.

Na podstawie zmian współczynnika tarcia w czasie można wnioskować, że proces docierania zachodził najbardziej intensywnie w ciągu pierwszych 5 minut trwania testów typu A, natomiast podczas testów typu B najbardziej intensywnie zachodził on w niektórych przypadkach do 10, a w innych do 20 minuty trwania testów.

Zmiany wysokości chropowatości podczas testów typu A były mniejsze niż w przypadku testów typu B. W trakcie trwania testów tribologicznych, w związku z wystąpieniem ścinania wierzchołków będących w kontakcie, nastąpił spadek średniego arytmetycznego pochylenia nierówności powierzchni oraz większości parametrów wysokościowych. Z przeprowadzonych przeze mnie analiz wynika, że charakter zmian parametrów  $S_k$ ,  $S_q$  i  $S_p$  nie był zależny od zastosowanego obciążenia normalnego. Największe zmiany tych parametrów wystąpiły w pierwszej części testów, następnie w drugiej, trzeciej i czwartej. Wykazałem również, że podczas testów typu A istnieje liniowa zależność pomiędzy spadkami współczynnika tarcia ( $\Delta\mu$ ) a spadkami parametrów wysokościowych  $S_q$ ,  $S_k$  i  $S_p$ . Należy jednak zaznaczyć, że w wypadku spadku  $S_p$  zależność ta była nieco silniejsza niż przy spadku  $S_q$  i  $S_k$ . Współczynnik determinacji w przypadku zależności pomiędzy  $\Delta S_p$  i  $\Delta\mu$  wskazywał, że prawie 61% zmian wartości zmiennej objaśnianej, czyli  $\Delta\mu$ , zostało wyjaśnione przez oszacowaną funkcję regresji. Jednak, gdy siła normalna była większa (testy typu B), pomiędzy zmianą współczynnika tarcia a spadkami wysokości chropowatości tulei cylindrowych nie występowała tego typu zależność. Z przeprowadzonych obliczeń i analiz wynika, że silniejsza zależność liniowa pomiędzy zmianą wysokości SGP próbki a początkową amplitudą SGP ma miejsce w pierwszym etapie testów (o czasie trwania 5 minut), w kolejnych etapach związek ten uległ osłabieniu. Mniejsza zależność pomiędzy amplitudą SGP tulei a jej spadkiem w czasie kolejnych etapów testu niezależnie od przyłożonego obciążenia wynikała z lepszego dopasowania współpracujących powierzchni ślizgowych.

Zarówno w testach typu A, jak i B parametr  $S_p$  powierzchni dwuprocesowych uległ zmniejszeniu, natomiast parametr  $S_m$  zwiększeniu, przy czym parametr  $S_v$  pozostawał praktycznie bez zmian w trakcie testów typu A. Świadczy to o tym, że następowało usunięcie materiału. Należy zaznaczyć, że zmiana tych parametrów była największa podczas pierwszego etapu badań.

Powierzchnie jednoprocesowe zostały przekształcane w powierzchnie dwuprocesowe już po pierwszych 5 minutach testu. Wartości parametru  $S_m$  po tym czasie kształtowały się od 28% do 75%, natomiast parametru  $S_p$  na poziomie od 0.39  $\mu\text{m}$  do 0.47  $\mu\text{m}$  dla wszystkich analizowanych przypadków. Należy zaznaczyć, że większe obciążenie normalne wpływało na większe zmiany parametru  $S_p$  i  $S_m$  w trakcie trwania testu. Przy większym obciążeniu można było zauważyć również wzrost parametru  $S_v$ , który mógł być związany z deformacją plastyczną powierzchni.

W wyniku docierania na podstawie wizualnej i ilościowej oceny następowało wygładzenie powierzchni, skośność ( $S_{sk}$ ) zmniejszyła się. Po teście tribologicznym na powierzchniach gładzi tulei cylindrowych można było zauważyć nowe dodatkowe ukierunkowanie powierzchni, wynikające z kierunku ruchu pierścienia tłokowego. To nowe ukierunkowanie potwierdził również wzrost parametrów  $S_{tr}$  i  $S_{pd}$ . Zauważone podczas badań większe zmiany parametrów wysokościowych tulei cylindrowych charakteryzujących się większą chropowatością powierzchni powiązałem z mniejszą rzeczywistą powierzchnią styku próbki i przeciwpróbki, a tym samym większym naciskiem jednostkowym w porównaniu z topografią dwuprocesową. Stwierdziłem, że zwiększanie promieni zaokrąglenia wierzchołków SGP współpracujących elementów mające miejsce w trakcie poszczególnych etapów badań bez wątpienia przyczyniało się do wzrostu rzeczywistej powierzchni styku, a tym samym do zmniejszenia nacisków jednostkowych, co skutkowało spadkiem siły tarcia w miarę postępu testów.

Podczas badań stwierdzono, że zużycie SGP pierścieni tłokowych było pomijalnie małe. Wyniki te stanowią potwierdzenie, uzupełnienie oraz rozszerzenie wyników uzyskanych w pracach [A6] i [A5].

**Podsumowując, dzięki badaniom zawartym w pracy [A4] moim wkładem w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna jest wykazanie związków pomiędzy zmianami zachodzącymi w SGP tulei cylindrowych a zmianami współczynnika tarcia w początkowych etapach docierania pary ciernej pierścieni tłokowy – tuleja cylindrowa, jak również wykazanie wpływu rosnącego obciążenia normalnego na właściwości tribologiczne tego typu skojarzenia cierne.**

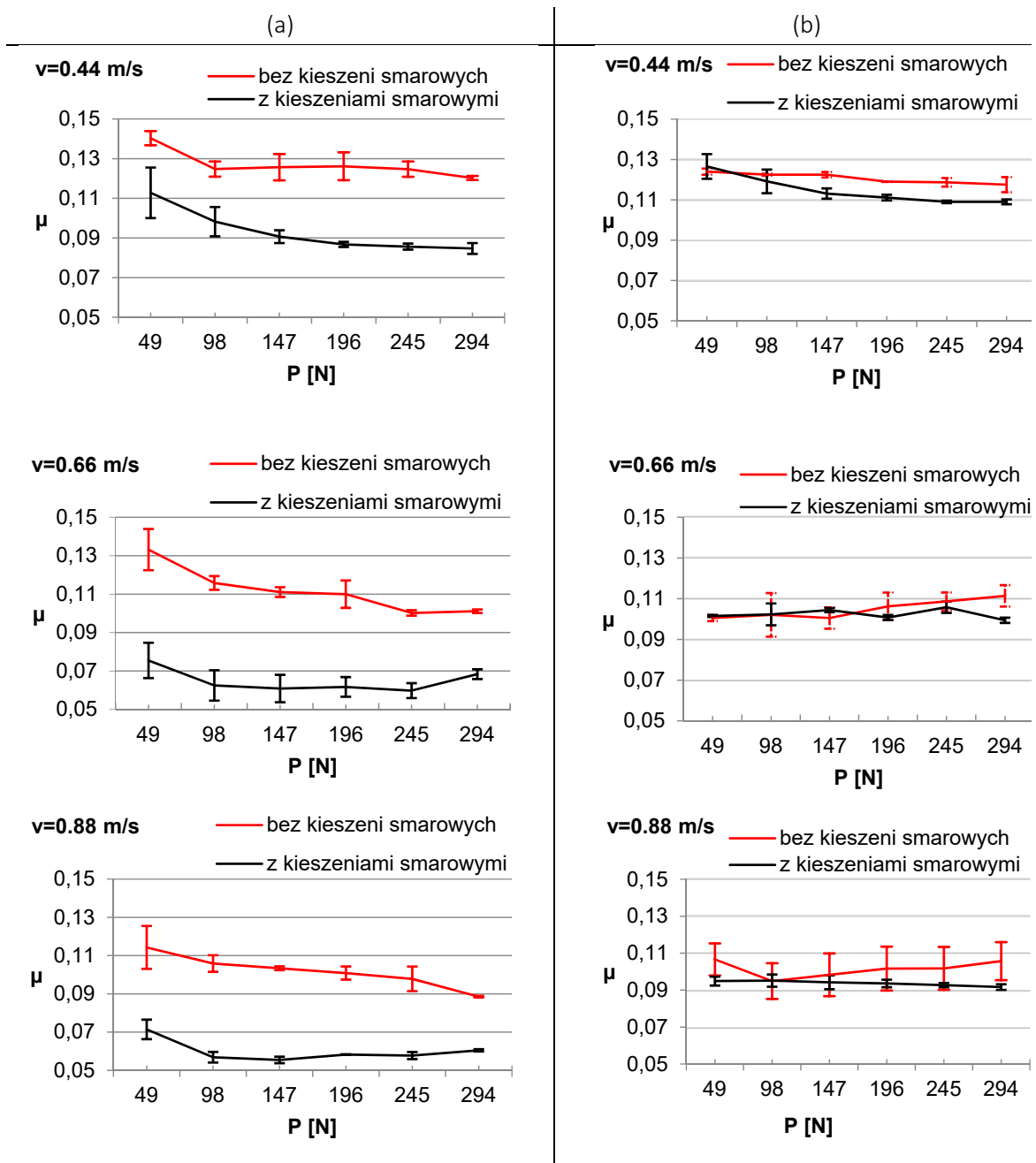
W prowadzonych przeze mnie pracach badawczych, których wyniki zostały zaprezentowane w artykule [50], nie udało się uzyskać jednoznacznej odpowiedzi odnośnie wpływu mikrokieszeni smarowych na wartość współczynnika tarcia w parze ciernej, jaką stanowi pierścień tłokowy i tuleja cylindrowa. Związane było to głównie z tym, że konstrukcja testera tribologicznego użytego do realizacji badań wpływała na znaczny rozrzut wyników pomiarów siły tarcia. Ponadto w literaturze istnieją sprzeczne informacje dotyczące wpływu mikrokieszeni smarowych na zjawisko tarcia. W związku z tym weryfikacja doświadczalna wpływu struktury geometrycznej powierzchni teksturowanych noszących ślady trzech procesów obróbkowych stała się dla mnie kolejnym tematem do badań. Aby przeprowadzić tego typu badania udoskonaliłem (będący na wyposażeniu Katedry Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Rzeszowskiej) tester tribologiczny, eliminując jego wcześniejszą wadę wpływającą na rozrzut wyników siły tarcia. Do badań zostały wykorzystane tuleje cylindrowe zawierające dodatkowe mikrokieszenie smarowe wykonane przez dr. hab. inż. Waldemara Koszelę zgodnie z opracowaną przez niego metodą teksturowania powierzchni.

Głównym celem badań zawartych w pracy [A9] było porównanie zachowania tribologicznego gładzonych płaskowierzchołkowo tulei cylindrowych z dodatkowymi mikrokieszeniami smarowymi i bez nich, czyli powierzchni noszących ślady trzech procesów obróbkowych i powierzchni noszących ślady dwóch procesów. Dodatkowo badania te umożliwiły analizę procesu zużycia powierzchni noszących ślady wielu procesów obróbkowych, która była niezbędna w celu budowy modelu matematycznego umożliwiającego opis zużycia topografii wieloprocessowych. Powierzchnie z dodatkowymi mikrokieszeniami smarowymi charakteryzowały się większą wysokością chropowatości i większą o 50% pojemnością olejową niż próbki gładzone płaskowierzchołkowo użyte w celach porównawczych. Dla każdej z próbek przed testem zasadniczym przeprowadziłem docieranie, które realizowane było z siłą 49 N, stanowiącą obciążenie pierścienia tłokowego i prędkością poślizgu 0,44 m/s. Docieranie realizowane było w warunkach smarowania. Badania zasadnicze przeprowadziłem przy trzech prędkościach poślizgu: 0,44 m/s, 0,66 m/s oraz 0,88 m/s. Podczas badań zastosowane były różne obciążenie normalne próbki, przy czym badania rozpoczynałem przy obciążającej układ siły normalnej (P) równej 49 N, co 2 minuty zwiększając ją o kolejne 49 N, aż do uzyskania 294 N. Temperatura oleju podczas testów tribologicznych oscylowała między 22°C a 25°C.

Opierając się na otrzymanych wynikach z przeprowadzonych przez mnie badań tribologicznych, dowiodłem, że obecność mikrokieszeni smarowych na powierzchni tulei cylindrowych skutkuje zmniejszeniem współczynnika tarcia w porównaniu z powierzchniami tulei cylindrowych gładzonych płaskowierzchołkowo. Wykazałem, że korzystny wpływ mikrokieszeni smarowych był widoczny głównie w warunkach lepszego smarowania (rys. 18a), kiedy współczynnik tarcia zmniejszył się prawie dwukrotnie, przy czym efekt ten był większy przy wyższych prędkościach poślizgu i obciążeniach od 98 N do 147 N.

Wyniki te sugerują, że wpływ zwiększonej pojemności olejowej SGP ma istotne znaczenie w obniżeniu współczynnika tarcia. Dlatego też tak istotne są prace dotyczące właściwego określania pojemności olejowej, które przedstawiłem w artykule [A8], zawartym w cyklu jednotematycznych publikacji.

Wykazałem również, że pozytywny wpływ kieszeni smarowych wykonanych na powierzchni tulei cylindrowych na opory ruchu w gorszych warunkach smarowania był mniejszy (rys. 18b).



Rys. 18. Wpływ siły normalnej  $P$  na współczynnik tarcia  $\mu$  dla różnych prędkości poślizgu w warunkach pełnego smarowania (a) oraz w warunkach smarowania niedostatecznego (b)

Źródło: opracowanie własne na podstawie [A9].

Z badań wynika, że największy względny spadek współczynnika tarcia spowodowany mikrokieszeniami smarowymi wyniósł blisko 10% dla najmniejszej i średniej prędkości poślizgu oraz około 15% dla największej prędkości poślizgu. Wzrost prędkości poślizgu powodował spadek współczynnika tarcia, zwłaszcza dla próbek zawierających kieszenie smarowe. Dzięki przeprowadzonym przeze mnie analizom danych wykazałem, że rozrzuty siły tarcia były największe dla najmniejszego obciążenia, niezależnie od prędkości poślizgu, zarówno dla próbek teksturowanych, jak i nieteksturowanych.

W ramach pracy przeanalizowane zostały również zmiany SGP zachodzące w tym samym miejscu zarówno przed, jak i po testach tribologicznych. Wykazały one, że zmniejszyły się statystyczne parametry amplitudowe, takie jak  $S_a$  i  $S_q$  powierzchni teksturowanych. Skośność  $S_{sk}$  zmniejszyła się, natomiast kurtoza  $S_{ku}$  wzrosła. Zwiększyła się również wartość parametru przestrzennego  $S_{al}$ . Najważniejszą zmianą jest spadek wartości parametru  $S_{pk}$ , zwykle powyżej 50%. Duży był również spadek parametru  $S_p$ . W trakcie testów tribologicznych usunięte zostały wypłytki występujące na teksturowanych powierzchniach, co znalazło odzwierciedlenie w dużym spadku parametru  $S_{pk}$ . Wypłytki były lepiej usuwane podczas pracy w reżimie niedostatecznego smarowania niż przy pełnym smarowaniu. Zużycie gładzonych powierzchni osiągnęło obszar rdzenia, o czym świadczył spadek wartości parametru  $S_k$ . Również wysokość topografii powierzchni pierścieni tłokowych zmniejszyła się na skutek zużycia.

Jak wykazałem w pracy [A9], jednym z istotnych tribologicznie aspektów SGP jest pojemność olejowa, a niewłaściwe jej oszacowanie podczas projektowania smarowanego węzła ciernego pracującego w warunkach tarcia ślizgowego może doprowadzić do jego zatarcia. Uwzględniając powyższe oraz wzrost roli powierzchni teksturowanych w zastosowaniach inżynierskich, poruszona w pracy [A8] tematyka związana z prawidłowym obliczaniem pojemności olejowej tego typu powierzchni wydaje się być niezmiernie istotna.

**Dzięki pracy [A9] autorski wkład w rozwój dyscypliny *inżynieria mechaniczna* polega na wykazaniu, że obecność mikrokieszeni smarowych na powierzchni tulei cylindrowych gładzonych płaskowierzchołkowo pracujących w warunkach dobrego smarowania skutkuje zmniejszeniem współczynnika tarcia w porównaniu z powierzchniami tulei cylindrowych nie poddanych dodatkowemu procesowi teksturowania. Ponadto, wykazałem, mniejszy pozytywny wpływ kieszeni smarowych wykonanych na powierzchni tulei cylindrowych na opory ruchu w gorszych warunkach smarowania.**

### IV.3. Podsumowanie

Znajdujące się w przedstawionym do oceny jednotematycznym cyklu publikacji zrealizowane przeze mnie prace badawcze stanowią dwa przenikające się nurty. Jeden z nich dotyczy badań wpływu SGP na właściwości tribologiczne węzła ciernego, jakim jest układ TPC, drugi bezpośrednio wynika z tego pierwszego, gdyż jest związany z dostarczeniem metod pozwalających na opis istotnych z punktu widzenia tribologicznego parametrów SGP oraz z modelowaniem procesu tworzenia oraz początkowego zużycia SGP wieloprocessowych.

W przypadku analizy wpływu SGP na właściwości funkcjonalne par ciernych niezmiernie istotny i przydatny okazuje się właściwy opis jej cech przy użyciu odpowiednich parametrów. Prawidłowy opis SGP jest bardzo ważny zarówno na poziomie produkcji, jak i podczas okresu eksploatacji. W pierwszym przypadku daje informacje o jakości produktów, w drugim umożliwia otrzymanie informacji o procesach zachodzących w okresie eksploatacji (wynikających ze zmian zachodzących w SGP), które są cenne dla projektanta i badacza. Na podstawie tych informacji można oszacować np. poziom zużycia SGP, jak również określić kierunki, w których należy zmierzać w celu poprawy właściwości funkcjonalnych SGP.

Należy zaznaczyć, że powierzchnie tulei cylindrowych po gładzeniu płaskowierzchołkowym są szeroko stosowane w przemyśle motoryzacyjnym, natomiast nie ma jeszcze systematycznej i właściwej metody pozwalającej na charakterystykę rozkładu rzędnych tych powierzchni, która uwzględniałaby poszczególne składniki SGP w początkowym okresie zużycia. Co więcej, wykorzystanie istniejących standardów może prowadzić do otrzymania niedokładnych wyników, co zostało podkreślone w przedstawionym do oceny cyklu publikacji. Wydaje się więc, że do opisu rozkładu wysokości rzędnych tego typu SGP zaproponowany przeze mnie model nazwany trójgaussowskim może być bardzo przydatny.

Możliwość zastosowania tego modelu do opisu rozkładu gęstości rzędnych powierzchni gładzonych płaskowierzchołkowo na etapie początkowego zużycia została potwierdzona w pracy [A2], wchodzącej w skład cyklu publikacji. Wykazałem, że zastosowanie tego modelu do analizy powierzchni dwuprosocowych w okresie docierania dostarcza cennych informacji o funkcjonalności powierzchni, procesie wytwarzania powierzchni, a także o procesie zużycia. Informacje dostarczane przez model mogą być wykorzystane do lepszego zrozumienia procesu docierania powierzchni dwuprosocowych i procesu początkowego zużycia, dzięki czemu możliwe będzie ustalenie właściwej równowagi pomiędzy metodami generowania części plateau i doliny.

Dodatkowym istotnym osiągnięciem jest zaproponowanie oryginalnej metody analizy SGP płaszczy tłoków zarówno przed, jak i w trakcie eksploatacji. Rozwiązanie to pozwala na matematyczny opis krzywej udziału materiałowego wykreślonej na siatce rozkładu normalnego oraz na precyzyjny opis i analizę poszczególnych składowych SGP (tj. części płaskowierzchołkowej i części dolin), łącznie z wyodrębnieniem ich udziałów. Wykazałem, że możliwa jest również rekonstrukcja krzywej udziału materiałowego oraz rozkładu rzędnych pierwotnej niezżytej SGP płaszcza tłoka, pozwalająca na określenie liniowego zużycia tej powierzchni oraz określenie wpływ procesu zużycia na udział poszczególnych składowych, czyli części dolin i części plateau. Możliwe jest także odtworzenie informacji o procesach, które miały wpływ na ostateczny kształt SGP, przy czym jeden z nich to proces wytwarzania, a drugi to proces zużycia. Informacje dostarczone przez model mogą być zatem wykorzystane do lepszego zrozumienia procesu początkowego zużycia. Zastosowanie zaproponowanego sposobu analizy SGP pozwoliło wykazać, że SGP powierzchni płaszcza tłoka podczas procesu zużycia eksploatacyjnego zmienia swój charakter od wyraźnie okresowej, przez okresowo-losową występującą na etapie początkowego zużycia, do postaci prawie całkowicie zużytej, która ma w niektórych przypadkach raczej dwugausowski charakter rozkładu rzędnych. Należy zaznaczyć, że zaproponowany opis KUM może być stosowany do analizy i modelowania procesu wytwarzania oraz zużycia nowo opracowanych i przedstawionych w pracy [8] powierzchni MUFU. Ten sposób opisu SGP umożliwia określenie odchylenia standardowego danych występujących w części plateau, która odpowiedzialna jest w tego typu powierzchniach za zjawiska kontaktowe.

Ponadto do istotnych i oryginalnych osiągnięć naukowo-badawczych wynikających z przedstawionego do oceny cyklu publikacji należy zaliczyć:

- wykrycie przyczyn powstawania błędów związanych z wyznaczaniem parametrów określonych w normie ISO 13565-3 i opracowanie alternatywnych rozwiązań pozwalających na zmniejszenie tych błędów,
- wprowadzenie rozwiązań pozwalających na wyodrębnienie części zwanej płaskowierzchołkową z profilu zawierającego ślady dwóch procesów obróbkowych, należy zaznaczyć, że zaproponowane przeze mnie rozwiązania umożliwiają analizę powierzchni mających losowo-losowy, losowo-okresowy oraz okresowo-okresowy charakter; w przypadku profili o charakterze losowo-losowym i losowo-okresowym zaproponowane przeze mnie rozwiązania pozwalają dodatkowo na określenie poziomu przejścia z każdej z dolin do części płaskowierzchołkowej, dzięki czemu możliwe jest określenie liczby dolin oraz ich średniej szerokości,
- opracowanie metod określania pojemności olejowej powierzchni o warstwowych właściwościach funkcjonalnych i ich weryfikacja,
- eksperymentalne określenie wpływu SGP tulei cylindrowych na tarcie i zużycie pary cieiernej, jaką jest pierścień tłokowy i tuleja cylindrowa podczas krótkotrwałych testów tribologicznych, w tym porównanie właściwości tribologicznych SGP tulei cylindrowych jedno- i dwuprosocowych cechujących się tym samym kątem gładzenia, oraz określenie wpływu kąta gładzenia na właściwości tribologiczne badanych par cieiernych zawierających próbki wykonane z tulei cylindrowych o strukturze geometrycznej

powierzchni uformowanej w trakcie procesu gładzenia wykańczającego (tzw. jednoprosowe), a różniące się kątem gładzenia,

- eksperymentalne wykazanie, że powierzchnie dwuprosowe podczas pracy wężła ciernego w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$  wpływają na uzyskanie mniejszego końcowego współczynnika tarcia w porównaniu z powierzchniami jednoprosowymi, przeciwstawne wyniki uzyskuje się w temperaturze  $80^{\circ}\text{C}$ , jak również wykazanie, że zmiany wysokościowych parametrów struktury geometrycznej powierzchni tulei cylindrowych i siły tarcia w temperaturze  $-20^{\circ}\text{C}$  są mniejsze niż podczas testów przeprowadzonych w temperaturze  $80^{\circ}\text{C}$ ,
- wykazanie związków pomiędzy zmianami zachodzącymi w SGP tulei cylindrowych a zmianami współczynnika tarcia w początkowych etapach docierania pary cierniej pierścieni tłokowy – tuleja cylindrowa, jak również wykazanie wpływu rosnącego obciążenia normalnego na właściwości tribologiczne tego typu skojarzenia ciernego,
- wykazanie, że obecność mikrokieszeni smarowych na powierzchni tulei cylindrowych gładzonych płaskowierzchołkowo pracujących w warunkach dobrego smarowania skutkuje zmniejszeniem współczynnika tarcia w porównaniu z powierzchniami tulei cylindrowych nie poddanych dodatkowemu procesowi tekstuowania, jak również wykazanie mniejszego pozytywny wpływ kieszeni smarowych wykonanych na powierzchni tulei cylindrowych na opory ruchu w gorszych warunkach smarowania.

Kierunki dalszych badań:

- ocena zmian poszczególnych składowych SGP dwuprosowych na etapie początkowego zużycia przy wykorzystaniu zaproponowanego trójgaussowskiego modelu,
- określenie związków pomiędzy zmianami poszczególnych składowych SGP opisanych modelem trój-gaussowskim a zmianami współczynnika tarcia podczas procesu docierania SGP dwuprosowych,
- analiza korelacji między parametrami dostarczonymi przez model trójgaussowski i parametrami z normy ISO 13565-2 i ISO 13565-3,
- wykorzystanie opracowanego modelu trójgaussowskiego do obliczania liniowego zużycia powierzchni dwuprosowych,
- określenie wpływu ukierunkowania porowatości SGP nowoczesnych warstw odpornych na ścieranie natrykiwanych termicznie do zastosowań w motoryzacji na właściwości tribologiczne par ciernych.

#### IV.4. Literatura

- [1] Erdemir A.: Review of engineered tribological interfaces for improved boundary lubrication. Tribol. Int. 2005, 38: 249–56, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2004.08.008>.
- [2] 3-D Characterization, Optimization, and Classification of Textured Surfaces | SpringerLink n.d. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11249-008-9354-x> (accessed June 10, 2021).
- [3] Holmberg K., Erdemir A.: Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. Friction 2017, 5:263–84, <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>.
- [4] Bruzzone A.A.G., Costa H.L., Lonardo P.M., Lucca D.A.: Advances in engineered surfaces for functional performance. CIRP Ann 2008, 57:750–69, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.003>.
- [5] Williams J.A.: Engineering tribology. New York: Cambridge University Press, 2005.
- [6] Greenwood J.A., Tripp J.H.: The Contact of Two Nominally Flat Rough Surfaces. Proc. Inst. Mech. Eng. 1970, 185:625–33, [https://doi.org/10.1243/PIME\\_PROC\\_1970\\_185\\_069\\_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1970_185_069_02).
- [7] Leefe S.E.: “Bi-Gaussian” representation of worn surface topography in elastic contact problems. Tribol. Ser. 1998, 34:281–90.

- [8] Godi A., Grønbaek J., Mohaghegh K., Klit P., De Chiffre L.: A New Rig for Testing Textured Surfaces in Pure Sliding Conditions. *Tribol. Lett.* 2013, 50:397–405, <https://doi.org/10.1007/s11249-013-0137-7>.
- [9] Krzyzak Z., Pawlus P.: 'Zero-wear' of piston skirt surface topography. *Wear* 2006, 260:554–61, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.03.038>.
- [10] Meng X., Hu Y., Xie Y.: Modeling of the cylinder liner "zero-wear" process by two-scale homogenization technique. *Wear* 2016, 368–369, 408–22, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.10.018>.
- [11] Pawlus P.: *Struktura geometryczna powierzchni cylindrów podczas eksploatacji silnika spalinowego*. Rzeszów, 1999.
- [12] Pawlus P., Michalski J.: Simulation of cylinder 'zero-wear' process. *Wear* 2009, 266:208–13, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.06.015>.
- [13] Pawlus P., Reizer R., Wieczorowski M.: Functional Importance of Surface Texture Parameters. *Materials* 2021, 14:5326, <https://doi.org/10.3390/ma14185326>.
- [14] Pettersson U., Jacobson S.: Friction and Wear Properties of Micro Textured DLC Coated Surfaces in Boundary Lubricated Sliding. *Tribol. Lett.* 2004, 17:553–9, <https://doi.org/10.1023/B:TRIL.0000044504.76164.4e>.
- [15] Zum Gahr K.-H., Wahl R., Wauthier K.: Experimental study of the effect of microtexturing on oil lubricated ceramic/steel friction pairs. *Wear* 2009, 267:1241–51, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.12.108>.
- [16] Sellgren U., Björklund S., Andersson S.: A finite element-based model of normal contact between rough surfaces. *Wear* 2003, 254:1180–8, [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00332-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00332-6).
- [17] Graboń W.: Wielomodalne podejście do opisu struktury geometrycznej powierzchni. *Sci Lett Rzesz Univ Technol-Mech* 2018, 29–46, <https://doi.org/10.7862/rm.2018.03>.
- [18] Pawlus P., Dzierwa A., Lenart A.: Surface Topography and Its Functional Importance. In: Pawlus P., Dzierwa A., Lenart A., editors. *Dry Gross Fretting Rough Surf. Influ. Parameters*, Cham: Springer International Publishing 2020, p. 1–16. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-31563-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-31563-4_1).
- [19] Richardson D.E.: Review of Power Cylinder Friction for Diesel Engines. *J. Eng. Gas Turbines Power* 2000, 122:506–19, <https://doi.org/10.1115/1.1290592>.
- [20] Wong V.W., Tung S.C.: Overview of automotive engine friction and reduction trends – Effects of surface, material, and lubricant-additive technologies. *Friction* 2016, 4:1–28, <https://doi.org/10.1007/s40544-016-0107-9>.
- [21] Holmberg K., Andersson P., Erdemir A.: Global energy consumption due to friction in passenger cars. *Tribol. Int.* 2012, 47:221–34, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.11.022>.
- [22] Söderfjäll M., Herbst H.M., Larsson R., Almqvist A.: Influence on friction from piston ring design, cylinder liner roughness and lubricant properties. *Tribol. Int.* 2017, 116:272–84, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.07.015>.
- [23] Bussas M., Michelberger B., Kröger B.: Neue Ansätze zur Rückführung von Oberflächenmesswerten auf das Verhalten von zwei Zylinderlaufbahnen am Realhubtribometer. In: Liebl J, editor. *Expert.-Forum Powertrain Reib. Antr. Fahrz.* 2020, Berlin, Heidelberg: Springer, 2021, p. 97–125, [https://doi.org/10.1007/978-3-662-63608-4\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-662-63608-4_7).
- [24] Sunnen | Sunnen Products Company | Naszą wizją jest precyzja n.d., <https://pl.sunnen.com/> (accessed November 19, 2021).
- [25] Pašečko M.Ĺ., Kindačuk M.V., Labunec' V.F., Dziedzic K., Rad'ko O.V., Korbut Ê.V.: *Tribologia*. Lublin: Politechnika Lubelska, 2017.
- [26] Zhmud B., Tomanik E., Grabon W., Schorr D., Brodmann B.: *Optimizing the Piston/Bore Tribology: The Role of Surface Specifications, Ring Pack, and Lubricant*. Warrendale, PA: SAE International, 2020.
- [27] Stout K.J., Spedding T.A.: The characterization of internal combustion engine bores. *Wear* 1982, 83:311–26, [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(82\)90186-7](https://doi.org/10.1016/0043-1648(82)90186-7).
- [28] King T., Watson W., Stout K.: Modelling the micro-geometry of lubricated wear. *Proc. 4th Leeds-Lyon Symp. Tribol.* 1978, 333–43.
- [29] Hu S., Huang W., Shi X., Peng Z., Liu X., Wang Y.: Multi-Gaussian Stratified Modeling and Characterization of Multi-process Surfaces. *Tribol. Lett.* 2018, 66:117, <https://doi.org/10.1007/s11249-018-1071-5>.



- [30] ISO 13565-3:1998 - Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method; Surfaces having stratified functional properties - Part 3: Height characterization using the material probability curve. 1998.
- [31] Contact of nominally flat surfaces. *Proc. R Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Sci.* 1966, 295:300–19, <https://doi.org/10.1098/rspa.1966.0242>.
- [32] Mansouri S.H., Wong V.W.: Effects of Piston Design Parameters on Piston Secondary Motion and Skirt - Liner Friction. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part. J. J. Eng. Tribol.* 2005, 219:435–49, <https://doi.org/10.1243/135065005X34026>.
- [33] Godi A., Kühle A., Chiffre L.D.: A new procedure for characterizing textured surfaces with a deterministic pattern of valley features. *Meas. Sci. Technol.* 2013, 24:085009, <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/8/085009>.
- [34] Szadkowski J., Jakubiec W., Płonka S., Rus T.: Analiza struktury geometrycznej powierzchni o warstwowych właściwościach funkcjonalnych. IX Konf. Nauk.-Tech. „Metrologia W Tech. Wytw. Masz.” 2001, 2:309–18.
- [35] Johansson S., Nilsson P.H., Ohlsson R., Anderberg C., Rosén B.-G.: New cylinder liner surfaces for low oil consumption. *Tribol. Int.* 2008, 41:854–9, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.02.012>.
- [36] Mezghani S., Demirci I., El Mansori M., Yousfi M.: Mutual influence of cross hatch angle and superficial roughness of honed surfaces on friction in ring-pack tribo-system. *Tribol. Int.* 2013, 66:54–9, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.04.014>.
- [37] Pawlus P.: Effects of honed cylinder surface topography on the wear of piston-piston ring-cylinder assemblies under artificially increased dustiness conditions. *Tribol. Int.* 1993, 26:49–55, [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(93\)90038-3](https://doi.org/10.1016/0301-679X(93)90038-3).
- [38] Korzyński M., Koszela W.: Kształtowanie reliefów na powierzchniach łożysk ślizgowych metodami nagniatania. *Problemy Niekonwencjonalnych Układów Łożysk* 1999, 5.
- [39] Grabon W., Pawlus P., Galda L., Dzierwa A., Podulka P.: Problems of surface topography with oil pockets analysis. *J. Phys. Conf. Ser.* 2011, 311:012023, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/311/1/012023>.
- [40] Augustyn W.: Metoda opisu struktury geometrycznej powierzchni honowanych cylindrów. *Rozprawa doktorska*, 1985.
- [41] Michalski J., Pawlus P.: Description of the bearing length curve of the inner surface of piston engine cylinders. *Wear* 1994, 207–14.
- [42] Michalski J., Pawlus P.: Description of honed cylinders surface topography. *Int. J. Mach. Tools Manufact* 1994, 34:199–210.
- [43] Barylski A., Sender P.: The Proposition of an Automated Honing Cell with Advanced Monitoring. *Machines* 2020, 8:70, <https://doi.org/10.3390/machines8040070>.
- [44] Johansson S., Nilsson P.H., Ohlsson R., Anderberg C., Rosén B.-G.: New cylinder liner surfaces for low oil consumption. *Tribol. Int.* 2008, 41:854–9, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.02.012>.
- [45] Sadizade B., Araee A., Bavi Oliaei S.N., Farshi V.R.: Plateau honing of a diesel engine cylinder with special topography and reasonable machining time. *Tribol. Int.* 2020, 146:106204, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106204>.
- [46] Bolander N.W., Sadeghi F.: Deterministic Modeling of Honed Cylinder Liner Friction. *Tribol. Trans.* 2007, 50:248–56, <https://doi.org/10.1080/10402000701309471>.
- [47] Baby A.K., Rajendrakumar P.K., Lawrence K.D.: Influence of Honing Angle on Tribological Behaviour of Cylinder Liner – Piston Ring Pair: Experimental Investigation. *Tribol. Int.* 2021, 107355, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107355>.
- [48] Spencer A., Avan E.Y., Almqvist A., Dwyer-Joyce R.S., Larsson R.: An experimental and numerical investigation of frictional losses and film thickness for four cylinder liner variants for a heavy duty diesel engine. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. J. Eng. Tribol.* 2013, 227:1319–33, <https://doi.org/10.1177/1350650113491244>.
- [49] Sato O., Takiguchi M., Takayuki A., Seki Y., Fujimura K., Tateishi Y.: Improvement of Piston Lubrication in a Diesel Engine By Means of Cylinder Surface Roughness. Warrendale, PA: SAE International, 2004, <https://doi.org/10.4271/2004-01-0604>.

- [50] Grabon W., Pawlus P., Sep J.: Tribological characteristics of one-process and two-process cylinder liner honed surfaces under reciprocating sliding conditions. *Tribol. Int.* 2010, 43:1882–92, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.02.003>.
- [51] Srivastava D.K., Agarwal A.K., Kumar J.: Effect of liner surface properties on wear and friction in a non-firing engine simulator. *Mater. Des.* 2007, 28:1632–40. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.01.034>.
- [52] Gruszka J.: Technologiczne kształtowanie cech funkcjonalnych warstwy wierzchniej tulei cylindrowych. Poznań, 2012.
- [53] Çavdar B.: Effect of temperature, substrate type, additive and humidity on the boundary lubrication in a linear perfluoropolyalkylether fluid. *Wear* 1997, 206:15–23, [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(96\)07342-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(96)07342-5).
- [54] Yuan C.Q., Peng Z., Zhou X.C., Yan X.P.: Effects of temperature on sliding wear process under contaminated lubricant test conditions. *Wear* 2004, 257:812–22, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.05.014>.
- [55] Zhmud B., Tomanik E., Grabon W., Schorr D., Brodmann B.: *Optimizing the Piston/Bore Tribology: The Role of Surface Specifications, Ring Pack, and Lubricant*. Warrendale, PA: SAE International, 2020, <https://doi.org/10.4271/2020-01-2167>.

## **V. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej**

Moja aktywność naukowa dotyczy współpracy z krajowymi i zagranicznymi ośrodkami naukowymi oraz co jest z tym związane z przedstawicielami przemysłu zarówno krajowego, jak i zagranicznego. Nawiązanie tej współpracy było możliwe dzięki mojemu czynnemu uczestnictwu w międzynarodowych konferencjach naukowych oraz wyjazdach w ramach programu Erasmus. Podczas tych wyjazdów oprócz realizacji zadań dydaktycznych uczestniczyłem również w seminariach naukowych, w ramach których miałem możliwość prezentacji wyników swoich prac badawczych, zachęcając tym samym innych do współpracy.

Uzyskanie w 2010 roku tytułu laureata konkursu organizowanego przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej umożliwiło mi wyjazd na międzynarodową konferencję „10th International Symposium on Measurement and Quality Control”, która odbywała się Japonii na Uniwersytecie w Osace. Uczestnicząc w tej konferencji, poznałem profesora Thomasa Mathiego, pracującego wówczas w C.N.R.S., Ecole Centrale de Lyon we Francji. Nawiązana znajomość z prof. Mathia zaowocowała podjęciem współpracy naukowej. Wspólna realizacja badań dotyczących wpływu SGP na tarcie i zużycie, ze szczególnym uwzględnieniem tribologii połączeń gwintowych, rozpoczęła się po moim stażu odbytym w 2013 w firmie KOELNER (która obecnie występuje na rynku pod nazwą Rawlplug). Wyniki wspólnych badań prezentowaliśmy m.in. na takich międzynarodowych konferencjach, jak:

- 5th International Conference on Surface Metrology, Poznań, 4–7 maja 2016, prezentacje pod tytułami:
  - „Surfaces morphology of threaded fasteners”,
  - „Estimations of surface morphologies evolutions via cumulative distribution function of height's asperity's”,
- 43th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, 6–9 września 2016 r., prezentacja pod tytułem: „Friction of threaded fasteners”.

Ponadto wybrane wyniki naszych badań zrealizowanych przy współpracy z firmą KOELNER zostały zawarte w artykule pod tytułem:

**‘Friction of threaded fasteners’,**

autorstwa:

Graboń W.A. <sup>1)</sup>, Osetek M. <sup>2)</sup>, Mathia T.G. <sup>3)</sup>.

Afiliacje występujące w tej pracy są następujące:

<sup>1)</sup> Rzeszów University of Technology, **Rzeszow, Poland,**

<sup>2)</sup> Koelner Łańcucka Fabryka Śrub Sp. z o. o., Ul. Podzwierzyniec 41, 37-100 **Łańcut, Poland,**

<sup>3)</sup> C.N.R.S., Ecole Centrale de Lyon, 36 Avenue Guy de Collongue, 69134 **Ecully, France.**

Praca ta została opublikowana w czasopiśmie Tribology International w 2018 roku (posiadającym wówczas IF na poziomie 3,517, liczba punktów MNiSW dla tego czasopisma obecnie wynosi 200 pkt) i stanowi załącznik nr VII.1.

Należy również podkreślić, że szereg wyników z przeprowadzonych prac badawczych realizowanych wspólnie z profesorem Mathia dla firmy Koelner nie mogło zostać opublikowanych ze względu na ich utajniony charakter.

W 2016 roku podczas mojego pobytu na Politechnice Poznańskiej nawiązałem współpracę z profesorem Michałem Wieczorkowskim w dziedzinie badań nad wpływem SGP tulei cylindrowych na tarcie i zużycie układu TPC. Wynikiem tej współpracy są następujące publikacje (zawarte w przedstawionym do oceny cyklu publikacji):

[A4] Grabon W., Pawlus P., Wos S., Koszela W., Wieczorowski M.: Evolutions of cylinder liner surface texture and tribological performance of piston ring-liner assembly. Tribology International, vol. 127 (2018), 545–556, IF 3,517, MNiSW 35 pkt (Załącznik V.4)

[A5] Grabon W., Pawlus P., Wos S., Koszela W., Wieczorowski M.: Effects of cylinder liner surface topography on friction and wear of liner-ring system at low temperature. Tribology International, vol. 121 (2018), 148–160, IF 3,517, MNiSW 35 pkt (Załącznik V.5)

[A6] Grabon W., Pawlus P., Wos S., Koszela W., Wieczorowski M.: Effects of honed cylinder liner surface texture on tribological properties of piston ring-liner assembly in short time tests. Tribology International, vol. 113 (2017), 137–148, IF 3,246, MNiSW 35 pkt (Załącznik V.6).

W 2018 roku odbyłem miesięczny staż naukowy (od 12 czerwca 2018 do 11 lipca 2018 r.) na Uniwersytecie Technicznym w Koszycach, w Katedrze Technologii i Materiałów Mechanicznych Wydziału Mechanicznego. Podczas stażu zapoznałem się z zapleczem badawczym oraz aktywnie uczestniczyłem w badaniach z zakresu zjawisk trybologicznych w węzłach tarcia, w szczególności wpływu struktury geometrycznej powierzchni na właściwości funkcjonalne tych węzłów. W trakcie stażu realizowałem również badania i przygotowywałem treści zawarte w wchodzącym w zakres jednotematycznego cyklu publikacji artykule [A1] pod tytułem ‘Surface as a carrier of information about the tribological proces’, opublikowanym w czasopiśmie Tribology International (vol. 149, (2020)). Załącznik VI.1 jest dokumentem stanowiącym potwierdzenie realizacji stażu.

Przez cały czas dążyłem do rozszerzenia utworzonego przeze mnie zespołu zajmującego się wpływem struktury geometrycznej powierzchni na właściwości tribologiczne połączeń gwintowych.

W trakcie mojego pobytu na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), zlokalizowanym w Ouro Preto w Brazylii, na seminarium naukowym przedstawiłem wyniki prac dotyczących tribologii łączników gwintowych. Pracami tymi zainteresowali się profesorowie Adilson Rodriges Costa i Igor Cezar Pereira. Natomiast podczas mojego pobytu w Leeds w Anglii zainteresowałem tą tematyką również pracującego na University of the West of England, Bristol doktora Jerzego Bakunowicza. W związku z tym zaproponowałem firmie Rawlplug rozszerzenie dotychczasowego zespołu badającego połączenia gwintowe o nowych członków. W wyniku tej współpracy w rozszerzonym zespole: W.A. Graboń (Politechnika Rzeszowska), J. Bakunowicz (University of the West of England), A.R. Da Costa (UFOP), I.C. Pereira (UFOP), M. Osetek (Koelner Rawplug IP Company – Łańcucka Fabryka Śrub), J. Mucha (Politechnika Rzeszowska), T.G. Mathia (C.N.R.S., Ecole Centrale de Lyon), zaproponowaliśmy na konferencję PRO-TECH-MA 2019, odbywającą się od 15–17 września 2019 r., Košice – ÚVZ Herľany, prezentację pod tytułem The effect of repetitive tightening on the functional properties of threaded fasteners.

W 2018 roku odbyłem w ramach programu Erasmus wizytę na Uniwersytecie w Messynie. Oprócz zrealizowanych zgodnie z programem Erasmus wykładów dla studentów studiów doktoranckich brałem również udział w seminarium naukowym, na którym przedstawiłem wyniki swoich prac badawczych. Na seminarium zostali zaproszeni także przedstawiciele przemysłu, którzy zwrócili uwagę na problemy tribologiczne występujące w produkowanych przez nich urządzeniach. W ramach dyskusji naukowej zdecydowaliśmy się na podjęcia przez nas kroków w kierunku realizacji wspólnych prac badawczych nad przedstawionymi w ramach seminarium problemami. Osobą odpowiedzialną ze strony uniwersytetu w Messynie za realizację badań została profesor Gabriella Epasto, z którą prowadziłem prace badawcze dotyczące zmniejszenia tarcia w przekładni bezstopniowej. W zakresie tej współpracy zrealizowałem badania, w ramach których przeprowadziłem m.in. eksperymenty trybologiczne oraz pomiary i analizę struktury geometrycznej powierzchni, jak również symulację zjawisk zachodzących w analizowanym skojarzeniu ciernym. Załącznik VIII.2 zawiera informacje dotyczące realizowanych wspólnie badań. Należy zaznaczyć, że mój wkład w te badania został doceniony przez kadrę naukową Uniwersytetu w Messynie, w rezultacie czego zostałem powołany do roli recenzenta w jednej z prac doktorskich realizowanych na uniwersytecie w Messynie. W związku z prowadzeniem wspólnych badań naukowych zostałem również zaproszony przez profesor Epasto do udziału w rankingu QS World University Ranking (Załącznik VIII.3 zawiera wspomniane zaproszenie).

Ponadto podczas naszych prac zdalnych profesor Epasto zainteresowała się przedstawionymi przeze mnie wynikami badań dotyczącymi tarcia w połączeniach gwintowych. Zaproponowałem więc profesor Epasto dołączenie do zespołu tribologicznego zajmującego się tarciami w łącznikach gwintowych.

Profesor A.R. Costa, z UFOP w Brazylii, w ramach zacieśnienia naszej współpracy, zaproponował mi odbycie stażu naukowego w 2020 roku na Uniwersytecie w Ouro Preto w celu realizacji zaplanowanych przez nas prac. Jednak w związku z panującą pandemią COVID-19 mój wyjazd się nie odbył. Wychodząc naprzeciw wyzwaniom, w których znajdował się świat, złożyłem wniosek o realizację zdalnego stażu naukowego na Uniwersytecie w Ouro Preto, który został pomyślnie zaaprobowany przez władze obu uczelni. Od 1 października 2020 do 31 grudnia 2020 r. odbyłem zdalny staż na Uniwersytecie w Ouro Preto (Załącznik VI.2 zawiera potwierdzenia odbycia stażu). Głównym celem naukowym stażu była realizacja wspólnych badań dotyczących zjawisk trybologicznych w węzłach tarcia, w szczególności wpływu powierzchni na właściwości funkcjonalne tych węzłów. W ramach stażu kontynuowaliśmy również rozpoczęte wspólne badania dotyczące tribologii łączników gwintowych.

Należy zaznaczyć, że moimi pracami dotyczącymi łączników gwintowych zainteresował się również mgr inż. Mingpo Zheng, doktorant z Beijing University of Technology w Pekinie, który poprosił mnie o możliwość realizacji pod moim kierownictwem stażu na Politechnice Rzeszowskiej (Załącznik VIII.4

zawiera zaproszenie na realizację stażu). Niestety ze względu na panującą sytuację pandemiczną zdecydowaliśmy się na zdalną współpracę. Pan Zheng dołączył do utworzonego przeze mnie zespołu zajmującego się tribologią połączeń śrubowych. W ramach współpracy członków zespołu została opracowana i zgłoszona na światowy kongres tribologiczny w Lyonie (7th World Congress, WTC 2021 September 5-10, 2021, Lyon, France – na wskutek pandemii konferencja została przełożona na 20022r.) praca pod tytułem:

**‘The influence of coatings and cycle tightening on the performance of threaded fasteners’.**

Autorstwa: W.A. Grabon (corresponding author)<sup>1)</sup>, A.R. Da Costa<sup>2)</sup>, G. Epasto<sup>3)</sup>, J. Bakunowicz<sup>4)</sup>, M. Zheng<sup>5)</sup>, I.C. Pereira<sup>2)</sup>, M. Osetek<sup>6)</sup>, T.G. Mathia<sup>7)</sup>.

**Afiliacje członków zespołu są następujące:**

<sup>1)</sup> Rzeszow University of Technology, **Rzeszow, Poland,**

<sup>2)</sup> Universidade Federal de Ouro Preto, **Ouro Preto, Brazil,**

<sup>3)</sup> University of Messina, **Messina, Italy,**

<sup>4)</sup> University of the West of England, **Bristol, United Kingdom,**

<sup>5)</sup> Beijing University of Technology, **Beijing, China,**

<sup>6)</sup> Koelner Rawlplug IP Company- Łańcucka Fabryka Śrub, **Łańcut, Poland,**

<sup>7)</sup> C.N.R.S., Ecole Centrale de Lyon, 36 Avenue Guy de Collongue, 69134 **Ecully, France.**

Praca ta została zaakceptowana i zakwalifikowana jako wystąpienie ustne (*oral presentation*) (Załącznik VIII.5 zawiera wiadomość email z potwierdzeniem przyjęcie pracy). Artykuły pokonferencyjne mogą być opublikowane w czasopiśmie Tribology International.

Po zakończeniu stażu w UFOP profesor Costa zaproponował mi od 21 stycznia 2021 roku rozpoczęcie kolejnego etapu stażu, tym razem półrocznego. W ramach tego stażu kontynuowaliśmy wspólne prace badawcze w obrębie tribologicznych zagadnień dotyczących łączników gwintowych, jak również tribologicznych właściwości skojarzenia trącego pierścieni tłokowy tuleja cylindrowa, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu chropowatości powierzchni na tarcie i zużycie tego zespołu (Załącznik VI.3 stanowi dokument będący potwierdzeniem odbycia stażu).

Aby w pełni zrealizować zaplanowane prace badawcze, konieczne było przeprowadzenie dodatkowych badań. Zrealizowałem je w ramach odbytych przeze mnie staży na Politechnice Poznańskiej i na Uniwersytecie w Messynie.

Krajowy staż naukowy na Politechnice Poznańskiej w Zakładzie Metrologii i Systemów pomiarowych prowadzonym przez profesora Wieczorowskiego odbywał się od 28 czerwca 2021 do 11 lipca 2021 roku (Załącznik VI.4 stanowi dokument potwierdzający odbycie stażu). W czasie stażu zajmowałem się następującymi zagadnieniami:

- pomiar topografii powierzchni z wykorzystaniem metod stykowych,
- badanie wpływu filtracji na wyniki pomiarów topografii powierzchni obrabianych i eksploatowanych,
- badanie wpływu punktów niemierzonych na wyniki pomiarów topografii powierzchni obrabianych i eksploatowanych,
- badanie wpływu rozdzielczości pionowej na wyniki pomiarów topografii powierzchni obrabianych i eksploatowanych,
- pomiar, opis i analiza topografii powierzchni obrabianych i eksploatowanych oraz określenie poziomu zużycia na podstawie tych danych pomiarowych,
- opracowanie publikacji naukowych.

Badania rozpoczęte w Zakładzie Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Poznańskiej na przełomie czerwca i lipca 2021 roku były kontynuowane podczas kolejnego stażu realizowanego w tej jednostce od 6 września 2021 do 10 września 2021 roku (Załącznik VI.5 stanowi dokument potwierdzający odbycie stażu). W czasie stażu zajmowałem się następującymi zagadnieniami:

- pomiar topografii powierzchni próbek zawierających powłoki o zwiększonej odporności na ścieranie do zastosowań w silnikach samochodowych i lotniczych oraz powierzchni tulei cylindrowych po eksploatacji z wykorzystaniem metod stykowych,
- opis i analiza topografii powierzchni oraz określenie poziomu zużycia na podstawie danych pomiarowych,
- opracowanie publikacji naukowych.

Od 27 września 2021 r. do 2 października 2021 roku odbyłem zagraniczny staż naukowy na Uniwersytecie w Mesynie, w ramach którego przeprowadzałem z profesorem Epasto wspólne badania dotyczące zjawisk tribologicznych zachodzących w węzłach tarcia, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu powierzchni na właściwości funkcjonalne tych węzłów (Załącznik VI.6 stanowi dokument potwierdzający odbycie stażu). W tym okresie zrealizowaliśmy m.in. ocenę badanych próbek za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) oraz analizę za pomocą spektroskopii rozpraszania energii (EDS). Podczas stażu pracowaliśmy także nad zagadnieniami związanymi z opisem topografii powierzchni.

Wspólna współpraca realizowana w ramach odbytych przeze mnie staży naukowych na Uniwersytecie w Ouro Preto, jak również na Uniwersytecie w Mesynie i na Politechnice Poznańskiej zaowocowała przygotowaniem na „7th World Tribological Congress” artykułu prezentującego nowy model pozwalający na ocenę zużycia powierzchni o charakterze wieloprocessowym pod tytułem:

#### **“New Model Allowing Estimate the Wear of Stratified Surfaces”**

autorstwa:

W.A. Grabon (corresponding author)<sup>1)</sup>, A.R. Da Costa<sup>2)</sup>, G. Epasto<sup>3)</sup>, K. Grochalski<sup>4)</sup>, T. Góral<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Rzeszow University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics, **Rzeszów, Poland,**

<sup>2)</sup> Universidade Federal de Ouro Preto, School of Mines, **Ouro Preto, Brazil,**

<sup>3)</sup> University of Messina, Department of Engineering, **Messina, Italy,**

<sup>4)</sup> Poznan University of Technology, Institute of Mechanical Technology, **Poznan, Poland.**

Należy zaznaczyć, że praca ta jest rozszerzeniem teorii zawartych w artykułach [A1] i [A2], wchodzących w skład osiągnięcia naukowego poddanego ocenie. Załącznik VIII.6 zawiera treść wiadomości email potwierdzającej przyjęcie referatu na konferencję.

Ponadto ustaliliśmy zakres przyszłych badań, które planujemy wykonać w 2022 roku.

W 2018 roku na konferencji w Leeds, podczas której zaprezentowałem między innymi podstawy teoretyczne dotyczące wykorzystania zaproponowanego przeze mnie w pracy [A2] modelu trójgausowskiego do modelowania zużycia powierzchni dwuprocessowych, słuchacze wykazali zainteresowanie moimi wynikami badań i w rezultacie wspólnych rozmów nawiązałem współpracę z przedstawicielami firmy Nagel Maschinen und Werkzeuge GmbH oraz pracownikami uniwersytetu w Sao Paulo. Podjęte wspólne badania dotyczyły tribologicznych aspektów nowoczesnych warstw odpornych na ścieranie natryskiwanych cieplnie do zastosowania w motoryzacji. Efektem tej współpracy był wspólny referat pod tytułem:

**“Effect of the Coated Bore Pores on the Piston Ring Tribology through Deterministic Simulation”**

autorstwa:

E. Tomanik<sup>1)</sup>, W. Graboń<sup>2)</sup>, F. Profito<sup>1)</sup>, M. Bussas<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> University of Sao Paulo, **Sao Paulo, Brazil,**

<sup>2)</sup> Rzeszow University of Technology, **Rzeszow, Poland,**

<sup>3)</sup> Nagel Maschinen- und Werkzeugfabrik GmbH, **Nurtingen, Germany.**

Referat został zaprezentowany na konferencji 22nd International Colloquium Tribology, odbywającej 28–30 stycznia 2020 roku w Niemczech. Podczas pobytu w Niemczech zostałem zaproszony przez firmę NAGEL do Stuttgartu na spotkanie pod roboczym tytułem Sensitive Machining and Surface Evolution during Load Impact (machining or run-in). Na spotkaniu przedstawiłem moją koncepcję związaną z opisem struktury geometrycznej powierzchni tulei cylindrowych natryskiwanymi termicznie pozwalającym na określenie jej istotnych aspektów tribologicznych oraz zmian zachodzących podczas docierania. Zostałem również zaproszony na spotkanie do firmy HELLER, by uczestniczyć w dyskusji pod roboczym tytułem Pores in coated bores. Podczas tego spotkania wraz z kilkoma innymi uczestnikami zaplanowaliśmy dalsze wspólne badania, które zostały zaprezentowane w artykule [26] (Załącznik VII.2):

**“Optimizing the Piston/Bore Tribology: The Role of Surface Specifications, Ring Pack, and Lubricant”**

Autorswa: B. Zhmud <sup>1)</sup>, E. Tomanik <sup>2)</sup>, W. Graboń <sup>3)</sup>, D. Schorr <sup>4)</sup>, B. Brodmann<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup> Applied Nano Surfaces, **Uppsala, Sweden,**

<sup>2)</sup> University of Sao Paulo, **Sao Paulo, Brazil,**

<sup>3)</sup> Rzeszow University of Technology, **Rzeszow, Poland,**

<sup>4)</sup> Steinbeis Transfer Centre Tribology, **Karlsruhe, Germany,**

<sup>5)</sup> OptoSurf GmbH, **Ettlingen, Germany.**

Ponadto w ramach współpracy z przedstawicielem firmy Applied Nano Surfaces, profesorem Borsisem Shmudem z University of Lund, Sweden, podczas jego pobytu na Politechnice Rzeszowskiej związanego z zainteresowaniem moimi pracami dotyczącymi układu TPC opracowaliśmy prezentację, która została przedstawiona 23 maja 2019 roku na konferencji 74th STLE Annual Meeting and Exhibition w Nashville (USA) przy współudziale przedstawiciela firmy Sunnen Products, St. Louis (USA) pana Davida Chobany. Tytuł referatu: Mastering the Art of Honing (Załącznik VIII.7 zawiera wydruk z przewodnika po programie i harmonogramie konferencji).

Współpracuję również z dr. hab. Rafałem Reizerem z Uniwersytetu Rzeszowskiego w kwestiach związanych z opisem struktury geometrycznej powierzchni. Efektem naszej wspólnej współpracy są następujące publikacje:

[A8] **Graboń W.**, Pawlus P., Koszela W., Reizer R.: Proposals of methods of oil capacity calculation. Tribology International, vol. 75 (2014), 117–22. (Załącznik V.8)

Reizer R., Pawlus P., Gałda L., **Graboń W.**, Dzierwa A.: Modeling of worn surface topography formed in a low wear process. Wear, 2012, 278–279, 94–100. (Załącznik VII.3)

Dzierwa A., Reizer R., Pawlus P., **Graboń W.**: Variability of areal surface topography parameters due to the change in surface orientation to measurement direction. Scanning, 2014, 36, 170–83. (Załącznik VII.4)

Pawlus P., **Graboń W.**, Reizer R., Górka S.: A study of variations of areal parameters on machined surfaces. Surf. Topogr: Metrol. Prop., 2015, 3, 025003. (Załącznik VII.5)

W dniach 20–24 września 2021 roku odbyłem konsultacje naukowe w Wojskowej Akademii Technicznej (WAT) w Warszawie. Mój pobyt związany był z uzgodnieniem możliwości przeprowadzenia szczegółowych badań materiałowych, tribologicznych i stanowiskowych silnikowych w Instytucie Techniki Lotniczej WAT dotyczących zjawisk tarcia mieszanego i płynnego. Podczas wizyty zostałem zapoznany z zakresem badań realizowanych w Laboratorium Zakładu Budowy i Eksploatacji Statków Powietrznych Instytutu Techniki Lotniczej WAT. Ponadto opracowane zostały wspólne tematy badawcze dające możliwość realizacji na ich podstawie wspólnych publikacji do czasopism ze wskaźnikiem IF znajdujących się w bazie Web of Science (Załącznik VI.7).

Pełnię rolę edytora pomocniczego Associate Editor (AE) w „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science” wydawnictwa SAGE, współpracuję z naukowcami z całego świata w kwestii oceny jakości merytorycznej nadsyłanych do wydawnictwa artykułów naukowych. W szczególności do moich zadań należy wstępna ocena jakości i oryginalności nadsyłanych manuskryptów, tak aby w ręce recenzentów dostawały się tylko prace spełniające wysokiej jakości kryteria, przy czym odrzucenie pracy już podczas oceny przez AE i niewysłanie jej od recenzji musi być oparte wyłącznie na udowodnieniu niskiej jakości naukowej nadesłanej pracy. Ponadto zobligowany jestem m.in. do uczestnictwa w posiedzeniach zarządu, doradztwa w zakresie bieżącej działalności badawczej, która może być przedmiotem zainteresowania czasopisma, sugerowania tematów wydań specjalnych, autorów lub potencjalnych redaktorów gościnnych oraz pełnienia funkcji ambasadora czasopisma na swoim terytorium.

W dowód uznania mojego zaangażowania w podnoszenie jakości czasopisma **Tribology International (200 pkt. MNiSW, IF: 4.872)** przez mój istotny wkład w proces recenzowania został mi przyznany we wrześniu 2018 roku przez wydawnictwo ELSEVIER certyfikat: Certificate of outstanding contribution in reviewing (Załącznik VIII.8).

## **VI. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę**

### • Osiągnięcia dydaktyczne

Pracując na Politechnice Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza w latach 2001–2021, prowadziłem zajęcia dydaktyczne z następujących przedmiotów:

- Modelowanie procesów produkcyjnych,
- Technologia informacyjna,
- Informatyka,
- Programowanie w zagadnieniach inżynierskich,
- Bazy danych,
- Informatyka techniczna,
- Wprowadzenie do technologii informacyjnych.

Ponadto prowadzę zajęcia dla studentów zagranicznych w ramach programu Erasmus. Są to zajęcia z przedmiotów:

- Computational methods for optimization,



- Computer programming for engineering applications,
- Systems of artificial intelligence,
- Management information system,
- Computer graphic in automatic,
- Quality control systems,
- Simulation of dynamical systems in Matlab and Simulink,
- Computer programming,
- Software measurement systems ,
- Computer networks,
- Programming in C++,
- Numerical methods in aircrafts design.

Jestem współautorem opublikowanych w 2013 roku przez Oficynę Wydawniczą Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza dwóch materiałów pomocniczych:

- Przewodnik po zagadnieniach z przedmiotu informatyka,
- Przewodnik po zagadnieniach z przedmiotu technologia informacyjna.

Jestem inicjatorem podpisania umowy o współpracę w ramach programu Erasmus+ pomiędzy Politechniką Rzeszowską a Polytechnic School of the University of São Paulo. W związku z tym otrzymałem nominację na wyjazd w ramach programu Erasmus+ na serię wykładów na Polytechnic School of the University of São Paulo, który miał się odbyć w maju 2020 roku, jednak z powodów pandemii wyjazd ten musiał być przełożony na późniejszy termin.

W ramach programu Erasmus+ przeprowadziłem także wiele wykładów w języku angielskim dotyczących wpływu powierzchni na właściwości tribologiczne połączeń ciernych w następujących uczelniach zagranicznych:

- University degli studi di Messina (Włochy, 2018),
- Universidade Federale de Ouro Preto (Brazylia, 2019r),
- Universidad Politecnica de Valencia (Hiszpania, 2019r),
- University degli studi di Messina (Włochy, 2021r).

W ramach programu Erasmus+ mam zaplanowane na rok 2022 wyjazdy do następujących ośrodków:

- Polytechnic School of the University of São Paulo,
- Universite de Poitiers (Francja).

Jako promotor sprawowałem opiekę naukową nad 38 studentami, w tym pełniłem funkcję promotora 30 prac inżynierskich oraz 8 prac magisterskich. Jestem również promotorem pomocniczym w jednym przewodzie doktorskim.

- **Osiągnięcia organizacyjne oraz popularyzujących naukę lub sztukę**

Od stycznia 2021 roku pełnię rolę Associate Editor w „Proceedings of IMechE. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science” (Impact Factor za 2020 rok: 1.762; Category Quartile Q2).

W czasopiśmie „Materials” (140 pkt MNiSW, Impact Factor za 2020 rok: 3.623) prowadzę wraz z dr T.G. Mathia i dr hab. inż. M. Góralem dwa wydania specjalne o następujących tytułach:

- Surface Topography Description as a Determinant of Quality and Functionality,
- Research on Tribological Properties of Materials and Coatings.

Jestem członkiem Komisji Egzaminów Prac Dyplomowych na Wydziale Budowy Maszy i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza. W latach 2011–2021 brałem udział w 59 komisjach egzaminów dyplomowych.

Od 22 marca 2021 roku jestem członkiem Wydziałowej Komisji ds. Kontraktów z Przemysłem na Wydziale Budowy Maszy i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza. Na tym też wydziale pełniłem funkcję koordynatora do spraw systemu USOS, jak również funkcję koordynatora do spraw systemu KRK.

Poza artykułami przedstawionymi do osiągnięć naukowych stanowiących cykl publikacji opublikowałem 20 artykułów naukowe w wydawnictwach krajowych i zagranicznych oraz 5 rozdziałów w monografiach naukowych.

Dwukrotnie byłem organizatorem na Politechnice Rzeszowskiej wydarzenia kulturalnego pod tytułem „Wieczór z kulturą Japońską” (po powrocie z konferencji w Osace w Japonii i nawiązaniu współpracy z Centrum Kultury Japońskiej w Przemyślu).

W Brzozowskiej świetlicy dla dzieci i młodzieży zorganizowałem przy wsparciu władz Gminy Brzozów „Spotkanie z nauką techniką i nauka”.

## **VII. Oprócz kwestii wymienionych w pkt 1-6 wnioskodawca może podać inne informacje ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej**

Sumaryczny Impact Factor czasopism, w których zostały opublikowane artykuły mojego autorstwa lub współautorstwa wynosi: 40,254.

Cytowania artykułów, których jestem autorem lub współautorem, na dzień 28 grudnia 2021 roku wynoszą:

według Web of Science (WoS): wszystkie/bez autocytowań	433/403
według Scopus: wszystkie/bez autocytowań	536/489

Ponadto przez edytorów czasopisma Tribology International został mi nadany certyfikat za jeden z najczęściej cytowanych artykułów opublikowanych w Tribology International w latach 2014–2016.

Indeks Hirscha w zależności od bazy danych (z dnia 31 grudnia 2021 roku):

według Web of Science (WoS):	11
według Scopus:	11

Za osiągnięcia naukowe przed uzyskaniem stopnia doktora otrzymałem według punktacji MNiSW 25 punktów, a po uzyskaniu stopnia doktora 461.83 punkty, w tym 208.5 punktów według punktacji do 2018 roku i 253.33 punkty według punktacji od 2019 r.

Za działalność naukową zostałem wyróżniony następującymi nagrodami:

- Nagorda Rektora Politechniki Rzeszowskiej za autorstwo publikacji z grupy A (MNiSW) pt. „Surface as a carrier of information about the tribological process” – 2021 rok,
- Nagorda Rektora Politechniki Rzeszowskiej (indywidualna II stopnia) za cykl artykułów naukowych opublikowanych głównie w czasopismach naukowych zamieszczonych w części A wykazu czasopism MNiSW o zasięgu międzynarodowym – 2019 rok,
- Nagorda Rektora Politechniki Rzeszowskiej za autorstwo publikacji z grupy A (MNiSW) pt. „Effects of honed cylinder liner surface texture on tribological properties of piston ring-liner assembly in short time tests” – 2018 rok,
- Nagorda Rektora Politechniki Rzeszowskiej (indywidualna III stopnia) za uzyskanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn – 2010 rok.

Byłem także laureatem konkursu „Stypendia Konferencyjne 2010 – II Edycja Wiosenna” ufundowanego przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej. W ramach stypendium otrzymałem wsparcie finansowe na wyjazd do Japonii na międzynarodowe sympozjum: „10th International Symposium on Measurement and Quality Control (ISMQC-2010)”, September 5-9, 2010, Convention Center, Osaka University, Japan, w celu wygłoszenia dwóch referatów (Załącznik VIII.9).

Oprócz przedstawionego w cyklu publikacji nurtu badawczego realizuję dodatkowo badania związane z tribologią połączeń śrubowych przy współpracy z firmą Koelner. W firmie tej odbyłem również czteromiesięczny staż. Efektem badań przeprowadzonych w ramach stażu było wdrożenie w przedsiębiorstwie Koelner zaproponowanych przeze mnie rozwiązań pozwalających na zmniejszenie rozrzutu momentu, z jakim należy dokręcać śruby (Załącznik VIII.10 – oświadczenie firmy o zrealizowanym wdrożeniu wyników badań do praktyki przemysłowej).

  
(podpis wnioskodawcy)

