

POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ
INSTYTUT TECHNOLOGII MECHANICZNEJ

AUTOREFERAT

DR INŻ. TOMASZ BARTKOWIAK

Spis treści

1.	KWESTIONARIUSZ OSOBOWY	3
2.	INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU	4
3.	WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO	5
	3.1. Tytuł osiągnięcia naukowego	5
	3.2. Zestawienie powiązanych tematycznie prac stanowiących podstawę pracy habilitacyjnej	5
4.	OMÓWIENIE CELU NAUKOWEGO PRACY I OSIĄGNIĘTYCH WYNIKÓW	11
	4.1. Omówienie przesłanek podjęcia tematu pracy	11
	4.2. Cel naukowy	15
	4.3. Omówienie prowadzonych badań i osiągniętych rezultatów	16
5.	WSPÓŁPRACA ZAGRANICZNA Z JEDNOSTKAMI NAUKOWYMI	29
6.	WSPÓŁPRACA ZAGRANICZNA Z INNYMI JEDNOSTKAMI	31
7.	STAŻE, KURSY, SZKOLENIA	32
8.	DZIAŁALNOŚĆ DYDAKTYCZNA	35
9.	DZIAŁALNOŚĆ ORGANIZACYJNA	40
10.	WSKAŹNIKI NAUKOMETRYCZNE	41

1. KWESTIONARIUSZ OSOBOWY

Dane osobowe

Imię i nazwisko: **Tomasz Bartkowiak**

Data urodzenia: 20 października 1988

Posiadane stopnie naukowe

Doktor nauk technicznych w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn

Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Politechnika Poznańska, 2017.

Tytuł rozprawy: Dokładność montażu korpusowych zespołów obrabiarkowych.

Promotor: prof. dr hab. inż. Roman Staniek

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Andrzej Gessner

Posiadane tytuły zawodowe

Magister inżynier mechanik

Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Politechnika Poznańska, 2012.

Promotor: prof. dr hab. inż. Roman Staniek

Inżynier mechatronik

Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Politechnika Poznańska, 2012.

Promotor: dr inż. Grażyna Sypniewska-Kamińska

Inżynier mechanik

Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Politechnika Poznańska, 2011.

Promotor: prof. dr hab. inż. Roman Staniek

2. INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU

2019 – aktualnie	Politechnika Poznańska, adiunkt w Instytucie Technologii Mechanicznej
2021 – aktualnie	ILABO sp. z o. o., analityk (1/2 etatu)
2012 – 2019	Politechnika Poznańska, asystent w Instytucie Technologii Mechanicznej
2012 – 2015	Beiersdorf Manufacturing Poznań sp. z o. o., specjalista ds. controllingu

3. WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO

Osiągnięciem naukowym wynikającym z art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce jest:

- 1) monografia naukową pt.: „**Wybrane metody wieloskalowe w analizie nierówności powierzchni**”, wydana przez Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, które w roku opublikowania monografii w ostatecznej formie było ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 lit. a. oraz
- 2) cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych pod zbiorczą nazwą: „**Zastosowanie metod wieloskalowych do opisu nierówności powierzchni**”, opublikowanych w czasopismach naukowych lub w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych, które w roku opublikowania artykułu w ostatecznej formie były ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 lit. B. Na wskazany cykl publikacji składają się tylko pozycje opracowane po uzyskaniu stopnia naukowego doktora (po 7 lipca 2017 roku).

3.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Tytuł osiągnięcia naukowego: **Wybrane metody wieloskalowe w analizie nierówności powierzchni: teoria i przykłady zastosowań.**

Poniżej zestawiono wykaz najistotniejszych prac własnych powiązanych tematycznie, które stanowią monotematyczny cykl opracowań dotyczących metod wieloskalowych stosowanych w analizie nierówności powierzchni. Każdą z pozycji opisano w zależności od typu publikacji (w nawiasie kwadratowym wskazano typ i odpowiadającą mu liczbę porządkową) oraz podano informację o merytorycznym i procentowym wkładzie własnym w jej powstanie. W poniższym zestawieniu wskaźniki zostały podane na rok, w którym artykuł został opublikowany. Udział własny habilitanta jest potwierdzony oświadczeniami własnymi i współautorów publikacji, załączonymi do wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego w postaci elektronicznej.

3.2. Zestawienie powiązanych tematycznie prac stanowiących podstawę pracy habilitacyjnej

Wykaz oznaczeń:

- [M]** - Monografia
- [A]** - Publikacja w czasopiśmie z bazy JCR (Journal Citation Report) i/lub SCOPUS
- [R]** - Artykuł w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych, indeksowany w bazie Web of Science oraz Scopus

- 1) **[M1] Bartkowiak T.**, Wybrane metody wieloskalowe w analizie nierówności powierzchni, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2021, ISBN 978-83-7775-642-3.

MEiN: **80 pkt.**, udział własny **100 %**

Monografia wprowadza polskiego czytelnika w świat metod wieloskalowych stosowanych w analizie nierówności powierzchni, stanowiąc podsumowanie osiągnięć znakomitych znawców tematu – począwszy od Richardsona, przez Mandelbrota, aż do współczesnych badaczy: Mathia'e, Browna, Xiang, Bigerella, Zahouaniego, Rosena i innych. Ponadto w rozprawie szczegółowo omówiono autorskie rozwiązania dotyczące metod geometrycznych opisujących takie miary, jak np. nachylenie i krzywizna. Podstawą tych metod jest następująca obserwacja: właściwości geometryczne chropowatych powierzchni wyrażone poprzez konkretne miary zmieniają się wraz ze skalą obserwacji lub obliczeń. Dodatkowo wiele zjawisk fizycznych zależy od cech geometrycznych obiektów, które w nich uczestniczą. Impulsem do powstania niniejszej monografii była, rozpoczęta w 2014 roku, współpraca z prof. Brownem, pionierem w dziedzinie metod wieloskalowych, w tym ujętych w normach ISO i ASME tzw. metod fraktalnych.

- 2) **[A1] Bartkowiak, T.**, Brown C. A., A Characterization of Process–Surface Texture Interactions in Micro-Electrical Discharge Machining Using Multiscale Curvature Tensor Analysis, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2018, 140(2), s. 021013-1-021013-7

IF: **2,616**, MEiN: **25 pkt.** (lista 2017-2018) / **100 pkt.** (lista 2019-2021), udział własny **85%**

Artykuł jest pierwszą recenzowaną publikacją w czasopiśmie naukowym dotycząca nowej autorskiej metody pozwalającej na wyznaczenia tensora krzywizny powierzchni w wielu skalach. W pracy przedstawiono opis tej metody i jej zastosowanie do oceny kształtu mikronierówności powstałych w wyniku obróbki mikroelektroerozyjnej o energii wyładowań od kilkunastu nJ do kilkunastu μJ . Przedmiotem badań była stal 316L, a pomiary topografii powierzchni zostały zrealizowane z użyciem mikroskopu konfokalnego. Zastosowanie przedstawionej w pracy metody pozwoliło na określenie korelacji, stosując model liniowy, pomiędzy energią wyładowań a krzywizną nierówności wyrażoną jako średnie wartości krzywizn głównych (κ_1 i κ_2), krzywizny Gaussa (K) i średniej (H). Analiza współczynnika korelacji (R^2) pozwoliła na określenie przedziałów skal, w których oddziaływania pomiędzy parametrem procesu wytwarzania a uzyskaną krzywizną są największe.

- 3) **[A2] Bartkowiak, T.**, Berglund J., Brown C. A., Establishing functional correlations between multiscale areal curvatures and coefficients of friction for machined surfaces, *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2018, 6(3), numer artykułu: 034002

IF: **2,439**, MEiN: **15 pkt.** (lista 2017-2018) / **70 pkt.** (lista 2019-2021), udział własny **70%**

Praca ta jest chronologicznie drugim przykładem zastosowania autorskiej metody wieloskalowej pozwalającym na obliczenia tensora krzywizny jako funkcji skali obserwacji do oceny nierówności powierzchni różnych stalowych narzędzi do walcowania blach. Celem pracy było znalezienie korelacji pomiędzy współczynnikiem tarcia wyznaczonym w teście zginania rozciąganej blachy owiniętej wokół narzędzia w postaci walca. Motywacją do podjęcia badań był fakt, że mechanika kontaktu dwóch chropowatych ciał zależy, m.in., od lokalnej eliptyczności, a więc krzywizn głównych opisujących kształt nierówności będących w styku. W pracy przedstawiono też po raz pierwszy definicje parametrów statystycznych opisujących krzywizny główne, średnią oraz Gaussa. W wyniku analiz pokazano, że krzywizna najwyższych wierzchołków nierówności bardzo dobrze koreluje ze współczynnikiem tarcia. Zaobserwowane korelacje były najsilniejsze, nie w skali tożsamej z oryginalnym próbkowaniem w kierunkach osi x i y , ale kilkukrotnie większych.

- 4) **[A3] Bartkowiak, T.,** Brown C. A., Multiscale 3D Curvature Analysis of Processed Surface Textures of Aluminum Alloy 6061 T6, *Materials*, 2019, 12(2), s. 257-1-257-20

IF: **2,972**, MEiN: **140 pkt.**, udział własny **85 %**

W artykule przedstawiono porównanie dwóch wieloskalowych metod obliczania tensora krzywizny w wielu skalach, których główną różnicą był sposób wyznaczania wektorów normalnych wierzchołków trójkątnych łąt. W pracy pokazano wyniki obliczeń dla dwóch różnych rodzajów powierzchni po śrutowaniu oraz toczeniu. Stwierdzono, że nie ma znaczących różnic pomiędzy metodami jeśli chodzi o jakość uzyskanych wyników przy czym zaobserwowano znaczące różnice w czasie obliczeń. Jako wniosek przedstawiono, że można korzystać z szybszej metody. Analizowane powierzchnie były zmierzone za pomocą mikroskopu konfokalnego. Próbki były wykonane ze stopu aluminium 6061.

- 5) **[A4] Bartkowiak T.,** Berglund J., Brown C. A., Multiscale analysis of surface anisotropy, *Materials*, 2020, 13(13), s. 3028-1-3028-19

IF: **3,623**, MEiN: **140 pkt.**, udział własny **70 %**

W pracy przedstawiono porównanie dwóch metod wieloskalowych pozwalających na wyznaczenie kierunkowości nierówności powierzchni. Opisane zagadnienia dotyczące krzywizny są rozwinięciem autorskiej metody przedstawionej w pozycji [R1]. Dla czterech różnych powierzchni zaprezentowano wizualizację ich (an)izotropii dla różnych skal obserwacji. Stosowanie kierunków głównych krzywizn maksymalnych pozwala na wizualizację lokalnej kierunkowości powierzchni oraz przedstawienie jej w postaci wykresu typu kwiat róży (ang. rose plot) wykonanego po raz pierwszy w 3D. Ma to istotne znaczenie zwłaszcza przy opisie złożonych geometrycznie powierzchni swobodnych będących wynikiem

pomiaru powierzchni próbek wykonanych za pomocą technik przyrostowych z proszków metali, gdzie pomiar jest dokonywany za pomocą metrologicznej tomografii komputerowej.

- 6) **[A5] Bartkowiak T.,** Mendak M., Mrozek K., Wieczorowski M., Analysis of Surface Microgeometry Created by Electric Discharge Machining, Materials, 2020, 13(17), s. 3830-1-3830-28

IF: **3,623**, MEiN: **140 pkt.**, udział własny **35 %**

W artykule przedstawiono rozważania dotyczące analizy geometrii mikronierówności powstałych w wyniku obróbki elektroerozyjnej stali narzędziowej. Praca jest kontynuacją badań przedstawionych w [A1] z tą różnicą, że obrabiany materiał był inny, a obróbka była przeprowadzona z znacznie większymi energiami wyładowań. W pracy do opisu geometrii cech mikronierówności zastosowano oprócz autorskiej wieloskalowej metody tensora krzywizn także analizę motywów. W ramach badań znaleziono silne korelacje pomiędzy energią wyładowań w trakcie obróbki a parametrami opisującymi geometrie kraterów (głębokość, pole powierzchni, średnicę) oraz ich krzywiznami. Zidentyfikowano także skale, w których obróbka najsilniej oddziałuje na kształt uzyskiwanych w jej wyniku mikronierówności.

- 7) **[A6] Serafin D., Bartkowiak T.,** Nowak, W. J., Wierzba B., Influence of microgeometry of iron surface on the oxidation process – A comparison of multiscale geometric methods and their applicability, Applied Surface Science, 2020, 527, s. 146838-1-146838-20.

IF: **6,707**, MEiN: **140 pkt.**, udział własny **30 %**

W artykule skupiono się na porównaniu geometrycznych metod wieloskalowych (krzywizny i długości względnej) do opisu nierówności czystego żelaza i wpływie geometrii tych mikronierówności na proces utleniania. Przedmiotem analiz w przeciwieństwie do pozostałych artykułów i rozdziału w monografii były profile nierówności, a nie topografie. Skutkowało to koniecznością opracowania autorskich dedykowanych do tego rodzaju danych metod pozwalających na obliczenia krzywizny profilu w wielu skalach. W artykule pokazano, że powierzchnie próbek wykonanych różnymi metodami są dobrze rozróżnialne z pomocą geometrycznych parametrów wieloskalowych. Najsilniejsze korelacje pomiędzy tymi parametrami a parametrami opisującymi kinetykę procesu utleniania zaobserwowano dla najniższych skal, co, z kolei, dobrze koreluje z wielkością jonów biorących udział w procesie.

- 8) **[A7] Gogolewski D., Bartkowiak T.,** Kozior T., Zmarzły P., Multiscale Analysis of Surface Texture Quality of Models Manufactured by Laser Powder-Bed Fusion Technology and Machining from 316L Steel, Materials, 2021, 14(11), s. 2794-1-2794-20.

IF: **3,623**, MEiN: **140 pkt.**, udział własny **30 %**

W artykule przedstawiono porównanie dwóch metod wieloskalowych: autorskiej metody pozwalającej na wyznaczenie tensora krzywizny oraz metody korzystającej z transformacji falkowej. Przedmiotem badań był wpływ obróbki mechanicznej próbek wykonanych w technice przyrostowej (Laser Powder-Bed Fusion) dla druku pod różnym kątem. Zastosowanie analiz wieloskalowych pozwoliło na określenie wpływu poszczególnych parametrów technologicznych na uzyskaną topografię powierzchni oraz skali, w których zachodzą silne interakcje.

- 9) **[A8]** Peta, K., **Bartkowiak T.**, Galek P., Mendak M., Contact angle analysis of surface topographies created by electric discharge machining, *Tribology International*, 2021, 163, s. 107139-1-107139-14

IF: **4,872**, MEiN: **200 pkt.**, udział własny **35 %**

W artykule przedstawiono zastosowanie autorskiej metody wieloskalowej do opisu nierówności powierzchni próbek wykonanych ze stopu aluminium 6060 za pomocą obróbki elektroerozyjnej. Obliczone parametry były dalej zastosowane do znalezienia zależności pomiędzy krzywiznami zmierzonych nierówności a zwilżalnością powierzchni. Znaleziono silne korelacje pomiędzy kątem zwilżania a parametrami opisującymi w sposób statystyczne krzywizny maksymalną i minimalną dla skal większych niż oryginalna rozdzielczość próbkowania.

- 10) **[A9]** **Bartkowiak T.**, Grochalski K., Gapiński M., Wieczorowski M., Discrimination of Surface Topographies Created by Two-Stage Process by Means of Multiscale Analysis. *Materials*, 2021, 14(22), s. 7044-1-7044-19.

IF: **3,623**, MEiN: **140 pkt.**, udział własny **50 %**

W artykule skupiono się na porównaniu efektywności czterech różnych metod wieloskalowych do odróżnienia powierzchni stalowych ukształtowanych w wyniku dwuetapowego procesu technologicznego. Do tego celu wyznaczono parametry opisujące zmierzone nierówności dla danej skali a następnie obliczono dla nich wartość p prawdopodobieństwa korzystając z dwuczynnikowej analizy wariancji (two-way ANOVA).

- 11) **[A10]** Brown C.A., Hansen H. N., Jiang, X. J., Blateyron F., Berglund J., Senin N., **Bartkowiak T.**, Dixon B., Le Goïc G., Quinsat Y., Stemp J., Thompson M. K., Ungar P. S., Zahouani H. E., Multiscale analyses and characterizations of surface topographies, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2018, 67(2), s. 839-862

IF: **3,826**, MEiN: **45 pkt.** (lista 2017-2018) / **200 pkt.** (lista 2019-2021), udział własny **10 %**

Praca stanowi podsumowanie dotychczasowych dotyczących analiz wieloskalowych. W artykule usystematyzowano stosowane podejścia i techniki oraz przedstawiono możliwości aplikacyjne danych metod. Opracowanie to powstało jako artykuł przeglądowy na zlecenie International Academy for Production Engineering (z francuskiego CIRP - College International pour la Recherche en Productique) i zostało opublikowane w prestiżowym wolumenie nr 2 czasopisma CIRP Annals – Manufacturing Technology. Mój udział w tej pracy dotyczył metod geometrycznych związanych z krzywizną oraz anizotropią. Zaproszenie do współtworzenia tego artykułu traktuję jako międzynarodowe wyróżnienie mojej pracy dotyczącej metod wieloskalowych.

- 12) **[R1] Bartkowiak T.**, Characterization of 3D Surface Texture Directionality Using Multi-Scale Curvature Tensor Analysis. W: ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 2: Advanced Manufacturing: ASME, 2017, s. 71609-1-71609-8

MEiN: **20 pkt.**, udział własny **100 %**

W pracy przedstawiono możliwość zastosowanie parametrów tensora krzywizny do opisu lokalnej kierunkowości powierzchni. Do tego celu zastosowano kierunki krzywizn głównych obliczanych lokalnie dla każdego fragmentu powierzchni. Wyniki zwizualizowano dla każdej ze skali wyznaczając rozkłady cosinusów kierunkowych krzywizn głównych w formie trzech indywidualnych rozkładów oraz ich par. Wyniki prac stanowiły przyczynek do dalszego rozwoju metody, a aktualny stan prac został opisany w pracy [A4]. Choć rok publikacji jest wcześniejszy niż dla [A1] i [A2], to badania te zostały rozpoczęte dopiero po zakończeniu badań opisanych w powyższych pracach.

4. OMÓWIENIE CELU NAUKOWEGO PRACY I OSIĄGNIĘTYCH WYNIKÓW, O KTÓRYCH MOWA W ART. 219 UST. 1 PKT. 2

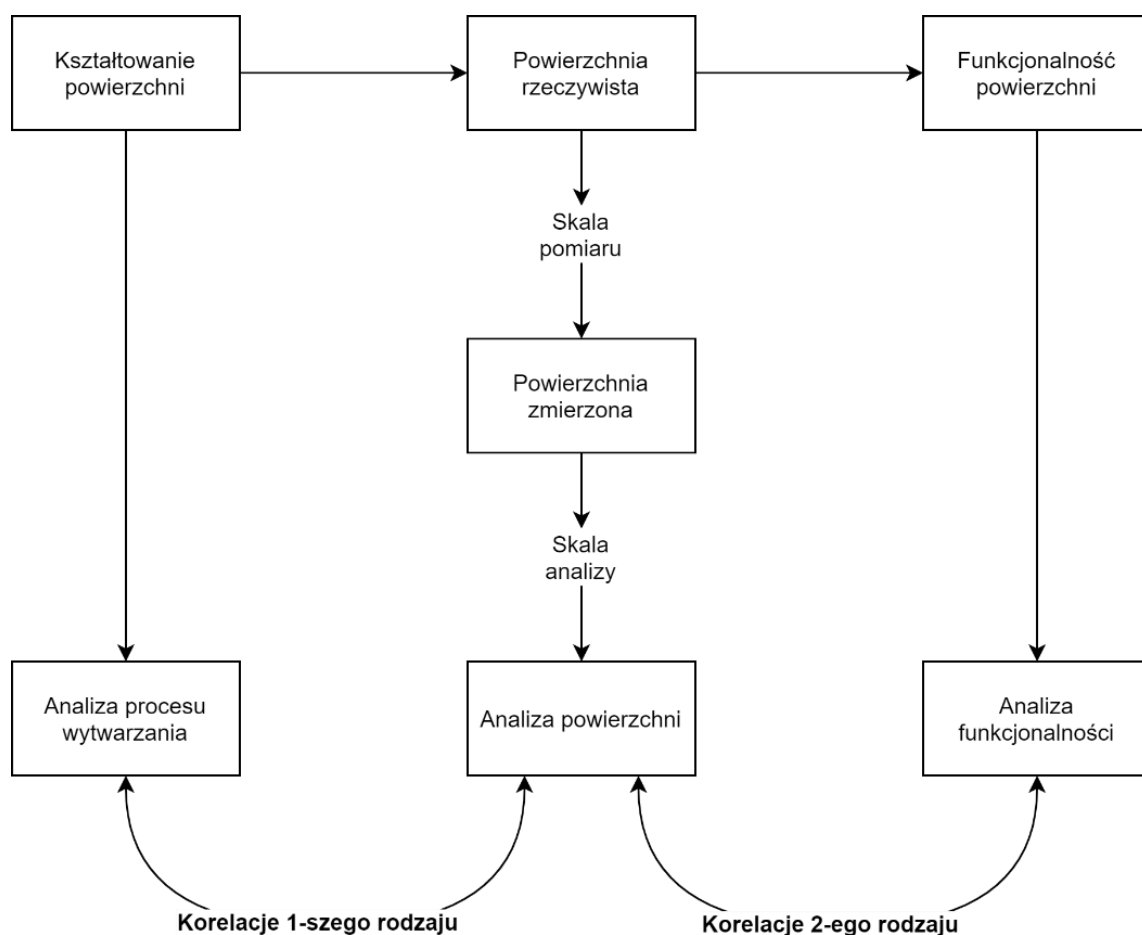
4.1. Omówienie przesłanek podjęcia tematu pracy

Główną motywacją do podjęcia prac związanych z wieloskalową analizą nierówności powierzchni był dysonans pomiędzy mnogością dostępnych parametrów opisujących nierówności powierzchni (zarówno profili nierówności jak i topografii) a modelami analitycznymi zjawisk, które kształtują strukturę geometryczną powierzchni lub których intensywność jest bezpośrednio związana z morfologią powierzchni (np. tarcie, refleksyjność, wymiana ciepła czy zwilżalność). Piękno modeli analitycznych zjawisk fizycznych wyraża się w ich prostej formie i uwzględnieniu miar związanych z geometrią (różniczka powierzchni, różniczka łuku czy promień krzywizny) rozpatrywanych obiektów, które uczestniczą w tych zjawiskach. Natura podpowiada zatem, że powinno się analizować zmierzone powierzchnie w kontekście ich funkcjonalności i stosować takie miary ich opisu, co do których istnieje bezsporne powiązanie z modelami fizycznymi zjawisk determinujących ich cechy użytkowe. Większość szeroko stosowanych parametrów, ujętych w normach ISO i ASME, które określają geometryczną strukturę powierzchni skupia się na wysokościach nierówności lub ich rozstępie. Dodatkowo, niektóre z nich są ze sobą silnie powiązane i nie zawsze uzasadnione jest stosowanie skorelowanych parametrów do opisu tej samej powierzchni. Spotyka się oczywiście modele, które w sposób statystyczny próbują uchwycić zależności pomiędzy powierzchnią a jej cechami funkcjonalnymi. Niemniej jednak takich przykładów w literaturze jest niewiele, a jeśli się zdarzają, to często kluczowym aspektem jest dobór odpowiedniego sposobu filtracji zebranych danych pomiarowych o nierównościach [A10].

Powierzchnie, zwłaszcza te powstałe w wyniku stosowania niekonwencjonalnych technik wytwarzania czy te występujące naturalnie, są tworam skomplikowanymi, trudnymi do jednoznacznego opisanego za pomocą tylko jednego parametru. Uzasadnia to w pewnym stopniu historyczną tendencję do wzrostu liczby stosowanych parametrów. Na początku lat 80-tych Whitehouse wskazując na nonsens istnienia zbyt wielu parametrów nazwał go gorączką parametrową [1]. Niemniej jednak po upływie 40 lat tendencja wzrostowa po tej publikacji nie osłabła, a wręcz przeciwnie wzrosła, wspomagana rosnącymi gwałtownie możliwościami obliczeniowymi i pojawieniem się profesjonalnego oprogramowania, które w szybki sposób oblicza szeroką gamę standardowych parametrów. Dodatkowym motorem tego zjawiska jest coraz powszechniejsze stosowaniem pomiarów topografii a nie tylko samych profili, co skutkuje pełniejszym odwzorowaniem powierzchni i stwarza dodatkowe potrzeby do zgłębionej analizy zmierzonej topografii.

W najnowszej normie ISO pojawiły się grupy parametrów, które parametrycznie opisują cechy geometryczne (ang. *feature parameters*) [2]. Utylitarnym celem powstanie i rozwoju tych parametrów było właśnie poszukiwanie powiązań funkcjonalnych pomiędzy nimi a parametrami opisującymi ich funkcjonalność (choćby ze współczynnikiem tarcia). Niemniej jednak, jak zauważa Brown [3], intensywność zjawisk związanych z interakcją powierzchni z otoczeniem zależy od występowania pewnych cech powierzchni oraz ich kształtu i rozmiaru. Cechy te należy zatem przede wszystkim dostrzec, korzystając z odpowiedniego przyrządu pomiarowego, a następnie właściwie opisać w sposób parametryczny. Parametry opisujące geometrię cech powierzchni mogą silnie korelować z parametrami funkcjonalnymi tylko w odpowiedniej skali obserwacji tych cech lub ich opisu [A10]. Z kolei parametry cech przedstawione w normie ISO 25178 pozwalają na ocenę jedynie w skali nominalnej, tożsamej rozdzielczości pomiarowej zmierzonej topografii, co ogranicza szansę na znalezienie silnych zależności funkcyjnych.

Oprócz poszukiwania zależności opisującej wpływ nierówności powierzchni na jej funkcjonalność, w nauce i technice istotnym jest jeszcze znalezienie powiązań pomiędzy parametrami procesu wytwarzania a uzyskaną strukturą geometryczną powierzchni. W literaturze relacje proces wytwarzania-powierzchnia-funkcja nazywa się korelacjami lub zależnościami funkcyjnymi (ang. *functional correlations*) [4]. Wyróżnia się ich dwa rodzaje co przedstawiono schematycznie na rysunku 1. Wieloskalowa analiza powierzchni ma na celu określenie w jakiej skali obserwacji (pomiaru i/lub analizy) powierzchni zachodzą najsilniejsze zależności pomiędzy parametrami procesu wytwarzania a parametrami opisującymi ukształtowane nierówności powierzchni (korelacje pierwszego rodzaju) oraz pomiędzy parametrami opisującymi nierówności powierzchni a parametrami związanymi z jej funkcjonalnością, np. współczynnik tarcia czy kąt zwilżania (korelacje drugiego rodzaju). Znajomość korelacji pierwszego rodzaju jest szczególnie istotna przy projektowaniu procesów kształtujących powierzchnie [5], analizy mechanizmów zużycia powierzchni narzędzi w archeologii [6], śladów na szklwie zębów w antropologii [7] czy identyfikacji broni w kryminalistyce [8]. Zależności funkcyjne drugiego rodzaju opisują, w jaki sposób topografia wpływa na jej interakcje z otoczeniem. Znajomość tych zależności jest szczególnie istotna przy projektowaniu części maszyn.



Rys. 1. Zależności pomiędzy procesem wytwarzania a uzyskaną powierzchnią a następnie jej funkcjonalnością, opracowanie własne na podstawie [4]

Zauważono, że obszarem badawczym o dużym potencjale poznawczym jest ta część metod wieloskalowych, które skupiają się na analizie cech geometrycznych zmierzonych powierzchni. U podstaw metod geometrycznych leży obserwacja, że właściwości geometryczne chropowatych powierzchni wyrażone poprzez konkretne miary (długość, objętość, pole, nachylenie czy krzywiznę) zmieniają się wraz ze skalą obserwacji lub obliczeń. Do 2014 roku istniały tylko dwie metody geometryczne, za pomocą których opisuje się długość oraz pole obszaru nierówności powierzchni. Pomimo ich niewątpliwego sukcesu w analizie wieloskalowej, nie wyczerpują one geometrycznej złożoności nierówności powierzchni. Stąd potrzeba wprowadzenia nowego rodzaju analizy, gdzie skupiono się przede wszystkim na kształcie nierówności opisanym poprzez krzywiznę, czego dotyczy przedstawione osiągnięcie habilitacyjne.

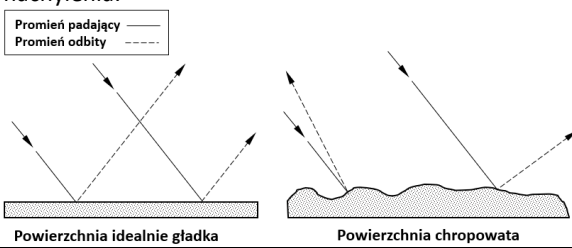
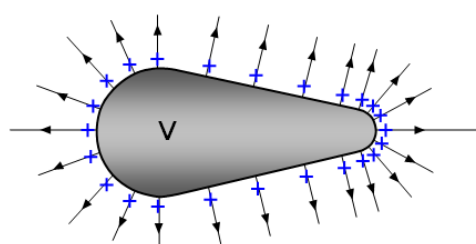
Dodatkową motywacją do podjęcia prac badawczych dotyczących rozwoju metod geometrycznych jest obserwacja, że wiele zjawisk fizycznych zależy od cech geometrycznych obiektów, które w nich uczestniczą (tab. 1), np.: wymiana ciepła odbywa się przez skończoną powierzchnię; ładunek elektryczny ma tendencję do akumulacji w ostro zakrzywionych regionach powierzchni

naładowanego ciała; światło rozprasza się na chropowatych powierzchniach o silnie nachylonych zboczach mikronierówności; kontakt pomiędzy dwoma ciałami stałymi zależy od lokalnej krzywizny stykających się cech ich powierzchni, a w przypadku cyklicznie obciążonych komponentów maszyn naprężenia koncentrują się wokół karbów o wysokiej krzywiznie etc. Opis matematyczny powyższych zjawisk przeważnie określa istotne parametry geometryczne, abstrahując od skali obserwacji, tzn. najczęściej przyjmuje je jako miary nominalne. Oczywiście takie podejście ma całkowite uzasadnienie w skali makro, bowiem różnice wartości pomiędzy rzeczywistymi miarami geometrii obiektów a ich wartościami nominalnymi są na tyle niewielkie, że trudno zmierzyć je same oraz ich wpływ na dane zjawisko fizyczne. Jednakże jeśli interakcje odbywają się w skali mikro lub nano, to wówczas znalezienie odpowiedniej skali obserwacji parametrów geometrycznych staje się kluczowe do ustalenia silnych powiązań funkcjonalnych zachodzących między nimi a zjawiskami fizycznymi, które je uwzględniają. Przykładowo: proces utleniania dyfuzyjnego lub nawęglania zależy od kształtu mikronierówności powierzchni pod warunkiem, że obserwuje się go w możliwie jak najmniejszej skali. Zależności między wybranymi procesami fizycznymi a parametrami geometrycznymi opisującymi morfologię powierzchni przedstawiono w tabeli 1.

Inną kwestią jest obserwacja, że modele matematyczne wywodzące się z fundamentalnych praw fizyki nie zawierają w swojej formie tradycyjnych parametrów opisujących chropowatość powierzchni. Oczywiście istnieją relacje, które w sposób statystyczny, np. za pomocą regresji, wiążą takie parametry jak R_a , S_a , Str , Std z parametrami charakteryzującymi zjawisko fizyczne, np. współczynnik tarcia. Nie wynikają one jednak z naturalnych praw przyrody, a są raczej próbą powiązania zawitych relacji w sposób niejawnny, można by rzec – inżynierski lub praktyczny. Wydaje się jednak, z zastrzeżeniem subiektywności opinii, że piękno świata wyraża się w prostych i naturalnych prawach fizycznych. To właśnie dzięki nim mamy do czynienia z tak dużym potencjałem metod geometrycznych – z każdym rokiem przybywa publikacji i badań, które odkrywają kolejne (czasem intuicyjne, niekiedy oczywiste, lecz wcześniej niepotwierdzone w taki sposób) zależności pomiędzy cechami geometrycznymi a zjawiskami fizycznymi, uwzględniając skalę ich obserwacji.

Opracowane i opisane w monografii oraz w cyklu artykułów metody wieloskalowe mają swoje korzenie w pracach Mandelbrota. Istotnym impulsem do ich powstania była współpraca z prof. Christopherem Brownem, twórcą dwóch ważnych metod wieloskalowych (długości względnej i względnego pola obszaru), nawiązana w 2014 r. w ramach stypendium ufundowanego przez Fundację Kościuszkowską. Owocem tej współpracy są autorskie metody wieloskalowe, stanowiące osiągnięcie habilitacyjne, tj.: krzywizny powierzchni i jej rozszerzenia do analizy anizotropii oraz nachylenia.

Tabela 1. Zależność między procesem fizycznym a parametrem geometrycznym (opracowanie własne)

Zjawisko fizyczne	Parametr geometryczny	Przykład
Wymiana ciepła	pole powierzchni	przewodzenie ciepła zgodnie ze wzorem Fouriera w formie całkowej: $\frac{\partial Q}{\partial t} = -\lambda \oint_A \nabla T \cdot dA,$ gdzie A – powierzchnia wymiany ciepła
Wytrzymałość zmęczeniowa	krzywizna	współczynnik koncentracji naprężeń w karbie zależy od krzywizny karbu zgodnie ze wzorem: $K_t = 1 + 2 \left(\frac{t}{\rho}\right)^{1/2},$ gdzie ρ – promień krzywizny
Refleksyjność światła	nachylenie zbocza	kąt odbicia równy promieniowi padania – dla chropowatych powierzchni skutkuje pojawieniem się efektu rozproszenia zależnym od lokalnego jej nachylenia: 
Mechanika kontaktu	krzywizna (lokalna elipsoidalność powierzchni)	kontakt dwóch ciał o lokalnym kształcie eliptycznym skutkuje pojawieniem się odkształceń i naprężeń normalnych, zależnych od równoważnego promienia krzywizny R_C zgodnie ze wzorem: $R_C = \sqrt{R_A \cdot R_B},$ gdzie R_A i R_B – promienie krzywizn elipsoidy w punkcie styku; krzywizna jest też istotnym parametrem opisującym naturę kontaktu w skali mikro
Elektrostatyka	krzywizna	gęstość ładunku elektrycznego na powierzchni zależy od jej kształtu (wklęsły lub wypukły) oraz od jej lokalnej krzywizny 

4.2. Cel naukowy

Głównym celem naukowym przeprowadzonych badań opisanych w osiągnięciu habilitacyjnym było opracowanie nowych metod wieloskalowych pozwalających na pełniejszą ocenę geometryczną zmierzonych nierówności powierzchni. Skupiono się przede wszystkim na rozwoju parametrów opisujących kształt nierówności, tj. krzywiznie. Miara ta ma tę zaletę, że nie zależy od układu odniesienia, jej znak wskazuje na wklęsłość lub wypukłość nierówności, a kierunki krzywizn głównych

określają oś wokół której nierówności zakrzywiają się najbardziej i najmniej. Zbadanie tej ostatniej właściwości miało na celu pokazanie, że można ją z powodzeniem zastosować jako narzędzie do wieloskalowej oceny kierunkowości nierówności (anizotropii) w trójwymiarowej przestrzeni. Dodatkowym celem prac było znalezienie zależności funkcyjnych pomiędzy zaproponowanymi parametrami statystycznymi opisującymi krzywiznę a parametrami technologicznymi procesów kształtujących strukturę geometryczną powierzchni oraz parametrami funkcjonalnymi związanymi z jej interakcją z otoczeniem w wyniku oddziaływań fizycznych.

4.3. Omówienie prowadzonych badań i osiągniętych rezultatów

Wśród przedstawionych w punkcie 2 Autoreferatu prac można wyodrębnić następujące obszary badań, które łącznie stanowią szeroki zakres zagadnień od rozważań teoretycznych nad opracowanymi autorskimi metodami wieloskalowymi do przykładów ich aplikacji dla konkretnych problemów w naukach technicznych:

- opracowanie metody, która pozwala na określenie tensora krzywizny nierówności powierzchni w danej skali obserwacji; w metodzie tej oryginalna regularna chmura punktów reprezentowana przez funkcję $z_i = z(x_i, y_i)$ jest najpierw dzielona na trójkątne łaty; dla każdego z wierzchołka łaty wyznaczany jest wektor normalny, a następnie dzięki liniowej interpolacji tensor krzywizny Weingartena dla całego trójkąta; wektory własne macierzy tej macierzy są tożsame kierunkom krzywizn główny, a wartości własne krzywiznom głównym: maksymalnej i minimalnej; metodę tę nazwano *wieloskalową analizą krzywizny powierzchni*,
- opracowanie parametrów statystycznych obliczanych dla danej skali, które pozwalają na liczbowy opis krzywizny dla całej analizowanej powierzchni; parametry te dotyczą krzywizny ze znakiem, określającej czy kształt jest wklęsły czy wypukły, jak i bez znaku (określającej tylko magnitudę zakrzywienia),
- aplikacja opracowanej metody do poszukiwania silnych zależności funkcyjnych pomiędzy parametrami procesu wytwarzania a krzywizną ukształtowanych przezeń nierówności (korelacje pierwszego rodzaju),
- aplikacja opracowanej metody do poszukiwania silnych korelacji pomiędzy obliczonymi parametrami statystycznymi opisującymi krzywiznę a parametrami funkcjonalnymi związanymi z jej oddziaływaniem na otoczenie (zależności funkcyjne drugiego rodzaju),
- aplikacja opracowanej autorskiej metody do analizy dyskryminacyjnej powierzchni względem parametrów procesu wytwarzania,

- aplikacja opracowanej autorskiej metody do analizy anizotropii powierzchni w wielu skalach oraz uwzględniając trójwymiarowy charakter topografii,
- opracowanie metody pozwalającej na analizę nachylenia powierzchni w wielu skalach oraz propozycja parametrów statystycznych pozwalających na jego ilościowy opis; nachylenie jest miarą pośrednią pomiędzy długością względną czy względnym polem obszaru a krzywizną.

Omówienia powyższych zagadnień przedstawiono poniżej w kolejności wynikającej z merytoryki a nie chronologii przeprowadzonych prac.

Opracowanie wieloskalowej metody analizy krzywizny powierzchni

Krzywizna jest podstawową wielkością opisującą krzywą lub powierzchnię. W pierwszym przypadku ilościowo określa różnicę między jej kształtem a linią prostą, a w drugim – odchylenie od powierzchni płaskiej. Najbardziej reprezentatywnym przykładem krzywych jest okrąg, którego krzywizna jest stała dla dowolnego leżącego na nim punktu i równa się odwrotności jego promienia r , przy czym im większy promień, tym mniejsza krzywizna (dla prostej wynosi zero). W celu obliczenia krzywizny w punkcie P konieczne jest, aby krzywa była przynajmniej dwukrotnie różniczkowalna w tym punkcie (min. klasa $C^2(\mathbb{R})$). Z punktu widzenia metrologii wynikiem pomiaru są zwykle dyskretne zbiory punktów, a nie ciągłe ich reprezentacje, co wynika z próbkowania, tj. tworzenia sygnału dyskretnego, wyrażającego sygnał ciągły za pomocą ciągu wartości (próbek). Cyfrowa reprezentacja danych pomiarowych wyklucza zatem warunek przynajmniej podwójnej ich różniczkowalności i wymaga stosowania różnic skończonych zamiast pochodnej lub aproksymacji zbioru punktów krzywymi ciągłymi z klasy $C^{2+}(\mathbb{R})$, np. funkcjami wielomianowymi, promieniowymi, krzywymi Béziera lub NURBS. Podobny problem pojawia się przy wyznaczaniu krzywizny powierzchni, przy czym ze względu na jej trójwymiarowy charakter proces jest bardziej złożony. Stosowanie aproksymacji za pomocą ciągłych krzywych lub powierzchni wiąże się z ryzykiem obliczenia krzywizny nie tylko w zmierzonych punktach, ale także uwzględniając nieznane otoczenie między nimi [M1].

W monografii [M1] przedstawiono sposoby obliczania krzywizny dla profili i powierzchni uwzględniające dyskretny charakter danych pomiarowych. Poruszone w tym opracowaniu zagadnienia stanowi podsumowanie starań autora nakierowanych na opracowanie metodyki opisu kształtu nierówności powierzchni w oparciu właśnie o krzywiznę. Historycznie pierwsza publikacja, stanowiąca przyczynek do badań została zaprezentowana w 2015 roku na konferencji ASPE Second Spring Topical Meeting on Achieving Precision Tolerances in Additive Manufacturing w Raleigh w USA [9]. Badania

dotyczyły zastosowania autorskiej metody do oceny mikrogeometrii powierzchni wykonanej w technologii FDM poddanej obróbce wykańczającej w atmosferze acetonu. Ze względów formalnych nie mogła jednak zostać włączona do cyklu publikacji ze względu na brak indeksacji w bazie Web of Science (jest jedynie zindeksowana w bazie Scopus). Ze względu na syntetyczną formę referatu konferencyjnego zdecydowano się na opracowanie kolejnego studium dotyczącego swoją treścią szczegółowego opisu metody oraz dyskusji podejść związanych z aspektami obliczeniowymi [A3].

Problematyka związana z wyznaczeniem krzywizny stanowi obecnie istotne zagadnienie w analizie wieloskalowej. Krzywizna profilu lub powierzchni, tak jak i inne parametry opisujące topografię, zmienia się wraz ze skalą, ale wielkość ta ma tę unikatową cechę, że jej wartość jest niezmienna bez względu na przyjęty układ odniesienia. Krzywizna powierzchni walcowej jest stała bez względu na jej orientację względem powierzchni referencyjnej, czego nie można powiedzieć np. o nachyleniu lub powierzchni, dla których istotne jest właściwe wypoziomowanie danych pomiarowych przed przystąpieniem do obliczeń związanych z nimi parametrów.

Znając wektory normalne wraz z pochodnymi, można skorzystać z dorobku geometrii różniczkowej i wyznaczyć krzywiznę powierzchni. Zmierzoną powierzchnię wyrażoną w postaci chmury punktów dzieli się na trójkątne łaty, traktując je jako obszary gładkie, przynajmniej jednokrotnie różniczkowalne. Tensor krzywizny powierzchni wyznacza się przy pomocy wzoru Weingartena [10], a krzywizny i kierunki główne określa się osobno dla każdej trójkątnej łaty i traktuje jako reprezentacje krzywizny powierzchni dla współrzędnych będących środkiem ciężkości takiego trójkąta. Autorska metoda bazuje na dokonaniach Theisela [10], który uwzględnił w swojej metodzie właśnie wektory normalne wierzchołków każdego rozpatrywanego trójkąta. Sposób wyznaczania wektorów normalnych oraz uzyskanie efektu wieloskalowego był przedmiotem badań opisanych w artykule [A3].

W pracy [M1] skupiono się na krzywiznie profilu oraz powierzchni, którą wyznacza się na podstawie danych pomiarowych charakterystycznych dla metod pomiaru chropowatości powierzchni, a więc profilometrii stykowej i bezstykowej oraz mikroskopii metrologicznej, takiej jak konfokalna, interferometryczna lub różnicowania ogniskowego. Charakterystyczną cechą danych pomiarowych zebranych za pomocą wymienionych wyżej metod jest ich stała rozdzielczość próbkowania w kierunku osi x dla profilu oraz x i y dla powierzchni. Istnieją również inne reprezentacje chmur punktów pomiarowych, w których siatkowanie (ang. meshing) jest nieregularne, nie są one jednak przedmiotem tego opracowania.

Opracowanie parametrów statystycznych opisujących krzywiznę w wielu skalach

Przedstawiona w pracach [M1, A1-A5, A7-A10, R1] metoda pozwala na wyznaczenie tensora krzywizny dla trójkątnej łaty stanowiącej fragment analizowanej w danej skali powierzchni. Wyznaczając parametry tensora krzywizny \mathbf{T} dla każdej z łaty z danej skali możliwe jest zatem wyznaczenie miar opisujących krzywiznę całej powierzchni w funkcji skali. Miary te nazywa się parametrami wieloskalowymi (z ang. *characterization parameters*) [A10]. W publikacji [A2] przedstawiono po raz pierwszy definicje parametrów statystycznych opisujących krzywizny główne, średnią oraz Gaussa. Wprowadzono osiem podstawowych parametrów opisujących w sposób statystyczny krzywiznę powierzchni w danej skali bazując na takich miarach jak wartość średnia oraz odchylenie standardowe:

- średnia krzywizna maksymalna – $\kappa 1a$:

$$\kappa 1a = \sum_{i=1}^n \frac{\kappa_{1i}}{n}, \quad (1)$$

- odchylenie standardowe od średniej krzywizny minimalnej – $\kappa 1q$:

$$\kappa 1q = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\kappa_{1i} - \sum_{i=0}^n \frac{\kappa_{1i}}{n} \right)^2}, \quad (2)$$

- średnia krzywizna minimalna – $\kappa 2a$:

$$\kappa 2a = \sum_{i=1}^n \frac{\kappa_{2i}}{n}, \quad (3)$$

- odchylenie standardowe od średniej krzywizny minimalnej – $\kappa 2q$:

$$\kappa 2q = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\kappa_{2i} - \sum_{i=0}^n \frac{\kappa_{2i}}{n} \right)^2}, \quad (4)$$

- średnia krzywizna średnia – Ha :

$$Ha = \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{n}, \quad (5)$$

- odchylenie standardowe od średniej krzywizny średniej – Hq :

$$Hq = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(H_i - \sum_{i=0}^n \frac{H_i}{n} \right)^2}, \quad (6)$$

- średnia krzywizna Gaussa – Ka :

$$Ka = \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{n}, \quad (7)$$

- odchylenie standardowe od średniej krzywizny Gaussa – Kq :

$$Kq = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(K_i - \sum_{i=0}^n \frac{K_i}{n} \right)^2}. \quad (8)$$

W każdym z powyższych wzorów i jest numerem łaty, a n liczbą wszystkich możliwych trójkątnych łat, dla których można wyznaczyć krzywiznę. Wymienione parametry są wieloskalowe, co oznacza, że przy podawaniu ich wartości wymaga się wskazania skali, dla której zostały obliczone.

W przypadku krzywizny powierzchni nie wyróżnia się krzywizny ze znakiem, tj. parametry wymienione we wzorach (1)-(8) uwzględniają znak krzywizny. Parametry opisujące krzywiznę bez znaku, z oznaczeniem „abs” w indeksie dolnym zaproponowano w publikacji [A5]. Przyjmują one postać:

- średnia bezwzględna krzywizna maksymalna – $\kappa 1a_{\text{abs}}$:

$$\kappa 1a_{\text{abs}} = \sum_{i=1}^n \frac{|\kappa_{1i}|}{n}, \quad (9)$$

- odchylenie standardowe od średniej bezwzględnej krzywizny minimalnej – $\kappa 1q_{\text{abs}}$:

$$\kappa 1q_{\text{abs}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(|\kappa_{1i}| - \sum_{i=0}^n \frac{|\kappa_{1i}|}{n} \right)^2}, \quad (10)$$

- średnia bezwzględna krzywizna minimalna – $\kappa 2a_{\text{abs}}$:

$$\kappa 2a_{\text{abs}} = \sum_{i=1}^n \frac{|\kappa_{2i}|}{n}, \quad (11)$$

- odchylenie standardowe od średniej bezwzględnej krzywizny minimalnej – $\kappa 2q_{\text{abs}}$:

$$\kappa 2q_{\text{abs}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(|\kappa_{2i}| - \sum_{i=0}^n \frac{|\kappa_{2i}|}{n} \right)^2}, \quad (12)$$

- średnia krzywizna średnia – Ha_{abs} :

$$Ha_{\text{abs}} = \sum_{i=1}^n \frac{|H_i|}{n}, \quad (13)$$

- odchylenie standardowe od średniej krzywizny średniej – Hq_{abs} :

$$Hq_{\text{abs}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(|H_i| - \sum_{i=0}^n \frac{|H_i|}{n} \right)^2}, \quad (14)$$

- średnia krzywizna Gaussa – Ka_{abs} :

$$Ka_{\text{abs}} = \sum_{i=1}^n \frac{|K_i|}{n}, \quad (15)$$

- odchylenie standardowe od średniej krzywizny Gaussa – Kq_{abs} :

$$Kq_{\text{abs}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(|K_i| - \sum_{i=0}^n \frac{|K_i|}{n} \right)^2}. \quad (16)$$

Parametry te zostały podsumowane w publikacjach [A7] oraz [A8] a ich przetłumaczony na język polski opis przedstawiono w monografii [M1]. W artykule [A6] przedstawiono definicje parametrów statystyczne dla krzywizny profilu uwzględniając jej znak. Wszystkie opracowane parametry posłużyły dalej do znalezienia korelacji pierwszego i drugiego rodzaju, co zostało opisane dalej w dwóch następnych podrozdziałach tego Autoreferatu.

Korelacje pierwszego rodzaju dla krzywizny powierzchni

Opracowana autorska metoda posłużyła do znalezienia korelacji pomiędzy parametrami procesów wytwarzania a parametrami opisującymi krzywiznę ukształtowanych powierzchni. Prace badawcze skupiły się przede wszystkim na elektrodrążeniu [A1, A5]. Dodatkowo przeprowadzono wstępne badania dla technologii przyrostowej – spiekaniu z proszku metalu [A7].

Praca [A1] jest pierwszą recenzowaną publikacją w czasopiśmie naukowym dotyczącą nowej autorskiej metody pozwalającej na wyznaczenia tensora krzywizny powierzchni w wielu skalach. W pracy przedstawiono opis tej metody i jej zastosowanie do oceny kształtu mikronierówności powstałych w wyniku obróbki mikroelektroerozyjnej o energii wyładowań od kilkunastu nJ do kilkunastu μJ . Przedmiotem badań była stal 316L, a pomiary topografii powierzchni zostały zrealizowane z użyciem mikroskopu konfokalnego. Zastosowanie opracowanej metody pozwoliło na określenie korelacji, stosując model liniowy, pomiędzy energią wyładowań a krzywizną nierówności wyrażoną jako średnie wartości krzywizn głównych (κ_1 i κ_2), krzywizny Gaussa (K) i średniej (H). Analiza współczynnika korelacji (R^2) pozwoliła na określenie przedziałów skal, w których oddziaływania pomiędzy parametrem procesu wytwarzania a uzyskaną krzywizną są największe.

Dalsze rozważania dotyczące analizy geometrii mikronierówności powstałych w wyniku obróbki elektroerozyjnej obróbki elektroerozyjnej stali narzędziowej przedstawiono w artykule [A5]. Praca jest kontynuacją badań przedstawionych w [A1] z tą różnicą, że obrabiany materiał był inny, a obróbka była przeprowadzona z znacznie większymi energiami wyładowań. W pracy do opisu geometrii cech mikronierówności zastosowano oprócz autorskiej wieloskalowej metody tensora krzywizn także analizę motywów. W ramach badań znaleziono silne korelacje pomiędzy energią wyładowań w trakcie obróbki a parametrami opisującymi geometrie kraterów (głębokość, pole powierzchni, średnicę) oraz ich krzywiznami. Zidentyfikowano także skale, w których obróbka najsilniej oddziałuje na kształt uzyskiwanych w jej wyniku mikronierówności.

Skupiono się także na poszukiwaniu zależności pierwszego rodzaju dla powierzchni spiekanych laserowo z proszków metali. W artykule [A7] przedstawiono porównanie dwóch metod wieloskalowych: autorskiej metody pozwalającej na wyznaczenie tensora krzywizny oraz metody korzystającej z transformacji falkowej. Przedmiotem badań był wpływ obróbki mechanicznej próbek wykonanych w technice przyrostowej (Laser Powder-Bed Fusion) dla druku pod różnym kątem. Zastosowanie analiz wieloskalowych pozwoliło na określenie wpływu poszczególnych parametrów technologicznych na uzyskaną topografię powierzchni oraz skali, w których zachodzą silne interakcje. Praca to stanowi przyczynek do dalszych badań i poszukiwania zależności pierwszego rodzaju w powiązaniu z kątem wydruku oraz innymi parametrów technologicznych.

Korelacje drugiego rodzaju dla krzywizny powierzchni

Prace badawcze związane były także z aplikacją opracowanej metody do poszukiwania zależności funkcyjnych pomiędzy obliczonymi parametrami statystycznymi opisującymi krzywiznę a parametrami funkcjonalnymi związanymi z jej oddziaływaniem na otoczenie. Badania były ukierunkowane na trzy obszary: tribologiczny [A2], kinetyka procesu utleniania [A6] oraz zwilżalność [A8].

Praca [A2] ta jest chronologicznie drugim przykładem zastosowania autorskiej metody wieloskalowej pozwalającym na obliczenia tensora krzywizny jako funkcji skali obserwacji do oceny nierówności powierzchni różnych stalowych narzędzi do walcowania blach. Celem pracy było znalezienie korelacji pomiędzy współczynnikiem tarcia wyznaczonym w teście zginania rozciąganej blachy owiniętej wokół narzędzia w postaci walca. Motywacją do podjęcia badań był fakt, że mechanika kontaktu dwóch chropowatych ciał zależy, m.in., od lokalnej eliptyczności, a więc krzywizn głównych opisujących kształt nierówności będących w styku. W pracy przedstawiono też po raz pierwszy definicje parametrów statystycznych opisujących krzywizny główne, średnią oraz Gaussa. W

wyniku analiz pokazano, że krzywizna najwyższych wierzchołków nierówności bardzo dobrze koreluje ze współczynnikiem tarcia. Zaobserwowane korelacje były najsilniejsze, nie w skali tożsamej z oryginalnym próbkowaniem w kierunkach osi x i y, ale kilkukrotnie większych.

W artykule [A6] skupiono się na porównaniu geometrycznych metod wieloskalowych (krzywizny profilu i długości względnej) do opisu nierówności czystego żelaza i wpływie geometrii tych mikronierówności na proces utleniania. Przedmiotem analiz w przeciwieństwie do pozostałych artykułów i rozdziału w monografii były profile nierówności, a nie topografie. Skutkowało to koniecznością opracowania autorskich dedykowanych do tego rodzaju danych metod pozwalających na dokonanie analizy w wielu skalach. W artykule pokazano, że powierzchnie próbek wykonanych różnymi metodami są dobrze rozróżnialne z pomocą geometrycznych parametrów wieloskalowych. Najsilniejsze korelacje pomiędzy tymi parametrami a parametrami opisującymi kinetykę procesu utleniania zaobserwowano dla najniższych skal, co, z kolei, dobrze koreluje z wielkością jonów biorących udział w procesie.

W pracy [A8] przedstawiono zastosowanie autorskiej metody wieloskalowej do opisu nierówności powierzchni próbek wykonanych ze stopu aluminium 6060 za pomocą obróbki elektroerozyjnej. Obliczone parametry były dalej zastosowane do znalezienia zależności pomiędzy krzywiznami zmierzonych nierówności a zwilżalnością powierzchni. Znalaziono silne korelacje pomiędzy kątem zwilżania a parametrami opisującymi w sposób statystyczne krzywizny maksymalną i minimalną dla skal większych niż oryginalna rozdzielczość próbkowania.

Analiza dyskryminacyjna z użyciem krzywizny

Fundamentalną kwestią w metrologii powierzchni jest zdolność oceny czy analizowane powierzchnie są efektem tego samego procesu ich kształtowania lub czy zmiana parametrów procesu wytwarzania powoduje powstanie istotnych różnic w strukturze geometrycznej powierzchni. Zagadnienie to w literaturze określane jest jako analiza dyskryminacyjna (bezpośredni z ang. *discrimination*) [A10].

W artykule [A9] skupiono się na porównaniu efektywności czterech różnych metod wieloskalowych do odróżnienia powierzchni stalowych ukształtowanych w wyniku dwuetapowego procesu technologicznego (walcowania na gorąco i śrutowania), zmierzonych z wykorzystaniem trójwymiarowej profilometrii optycznej. Do tego celu wyznaczono parametry opisujące zmierzone nierówności dla danej skali a następnie obliczono dla nich wartość p prawdopodobieństwa korzystając z dwuczynnikowej analizy wariancji (two-way ANOVA). Wartość ta wskazuje z jaką pewnością można odróżnić analizowane powierzchnie od siebie względem różnych technik wytwarzania i ich

parametrów. Pokazano, że krzywizna jest parametrem, który pozwala na dyskryminację w najmniejszych skalach analizy.

Analiza anizotropii powierzchni w wielu skalach

W metrologii powierzchni, a dokładniej w jej części dotyczącej opisu zmierzonej powierzchni, anizotropia rozumiana jest jako zmiana wartości parametrów ilościowych opisujących całą rozpatrywaną powierzchnię lub jej konkretne cechy w zależności od kierunku obserwacji, pomiaru lub obliczeń. Analizując literaturę przedmiotu, w tym normy, historycznie pierwszym pojęciem dotyczącym poruszanej problematyki jest angielskojęzyczny termin *lay* oznaczający ułożenie albo ukształtowanie powierzchni [11]. Abstrahując od jego matematycznej definicji, najczęściej jest ono intuicyjnie postrzegane jako dominujący kierunek lub kierunki, według których są zorientowane ślady obróbkowe powierzchni. Konwencjonalna obróbka, taka jak szlifowanie lub toczenie wzdłużne, prowadzi do powstania powierzchni z równoległe ułożonymi względem siebie pasmami dolin i wznórz, zaś toczenie poprzeczne daje powierzchnię z okrągłymi lub spiralnymi śladami obróbkowymi. W wyniku procesów, takich jak frezowanie czy honowanie, uzyskuje się złożone kierunkowo wzory, a stosowanie obróbki zgrubnej i wykańczającej może skutkować utworzeniem powierzchni o jeszcze bardziej skomplikowanej morfologii. Powierzchnie wykonane za pomocą metod przyrostowych składają się z wielokierunkowych cech, takich jak pasma wznórz i dolin, pojedyncze izolowane szczyty bądź dołki, a także siodła, których kierunkowości nie da się opisać w dwuwymiarowej rzeczywistości [12]. Powierzchnie swobodnie wytwarzane za pomocą druku 3D stanowią nie lada wyzwanie, jeśli chodzi o opis ich morfologii powierzchni, nie istnieje bowiem jeden układ odniesienia, który pozwalałby w jednoznaczny sposób zastosować konwencjonalne metody [13]. Preferowane są zatem takie, które nie wymagają odniesienia (ang. datum). Jedną z nich bazuje na opisie krzywizny, czyli elementu niezależnego od wybranego układu współrzędnych: krzywizna walca jest przecież taka sama niezależnie od tego, z jakiego kierunku jest on obserwowany lub jak jest zorientowany w przestrzeni. Postępy w mikroobróbce (w tym mikroteksturowaniu za pomocą lasera lub mikrofrezowaniem) polegające na swobodnie programowalnej trajektorii ruchu narzędzia lub wiązki lasera, pozwalają uzyskiwać cechy o dowolnym kształcie.

Autorskim sposobem zmierzenia się z problemem badawczym, o którym była mowa wyżej, tj. znalezienia kierunku lub kierunków anizotropii całej powierzchni lub jej konkretnego rodzaju cech, jest analiza i wizualizacja anizotropii powierzchni za pomocą tensora krzywizny [**M1**, **R1**, **A4**, **A10**]. Kształt cech powierzchni opisują jej krzywizny główne, którym odpowiadają kierunki stanowiące wskaźnik mówiący o tym, jak lokalny kształt jest zorientowany względem układu odniesienia.

Dla przywołanej idealnej powierzchni po toczeniu o współliniowych równoległych do osi układu odniesienia śladach obróbkowych, kierunki krzywizn głównych będą w każdym punkcie tej powierzchni takie same, a ponadto odpowiednio równoległe do jednej osi układu współrzędnych oraz leżeć na płaszczyźnie prostopadłej do tej osi. Naturalnie poza ewentualnymi idealnie płaskimi regionami, dla których krzywizny główne mogą przyjąć dowolny kierunek.

W autorskiej metodzie powierzchnię dzieli się na trójkątne łaty o wymiarach zależnych od skali, dla których oblicza się tensor krzywizny, a kierunki główne \mathbf{k}_1 i \mathbf{k}_2 normalizuje się. Do dalszej analizy korzysta się tylko z jednego z tych dwóch wektorów – \mathbf{k}_1 . Wektor \mathbf{k}_2 jest zawsze tak obrócony względem płaszczyzny normalnej, że iloczyn wektorowy $\mathbf{k}_1 \times \mathbf{k}_2$ równa się wektorowi normalnemu \mathbf{n} tej płaszczyzny. Kierunek krzywizny maksymalnej \mathbf{k}_1 można wyrazić poprzez cosinusy kierunkowe za pomocą wzoru:

$$\mathbf{k}_1 = [\cos \alpha \quad \cos \beta \quad \cos \gamma], \quad (16)$$

gdzie:

α , β i γ – trzy kąty kierunkowe między \mathbf{k}_1 a odpowiadającymi im osiami układu odniesienia (x , y oraz z), w których opisano powierzchnię.

Wyznaczając kąty α , β i γ dla wszystkich trójkątnych łatek można wykreślić w danej skali rozkład wartości danego kąta we współrzędnych biegunowych. W przypadku powierzchni silnie anizotropowej oczekuje się, że w rozkładzie pojawi się wyraźny pik (lub piki) wskazujący dominujący kierunek anizotropii, a w odniesieniu do powierzchni o cechach izotropowych – bardziej równomiernych rozkładów tych parametrów. Uzyskane wyniki można także przedstawić w układzie sferycznym [**M1**, **A4**], albo traktując kąty jako pary współrzędnych α - β , α - γ i β - γ [**R1**].

W pracy [**R1**] przedstawiono po raz pierwszy możliwość zastosowanie parametrów tensora krzywizny do opisu lokalnej kierunkowości powierzchni. Do tego celu zastosowano kierunki krzywizn głównych obliczanych lokalnie dla każdego fragmentu powierzchni. Przedmiotem analiz były powierzchnia po frezowaniu o silnej anizotropii oraz fragment sferycznej powierzchni rubinowej końcówki pomiarowej zmierzone za pomocą mikroskopu konfokalnego. Wyniki zwizualizowano dla każdej ze skali wyznaczając rozkłady cosinusów kierunkowych krzywizn głównych w formie trzech indywidualnych rozkładów oraz ich par. Uzyskane rezultaty potwierdziły poprawność założenia, że kierunki krzywizn głównych są dobrą miarą anizotropii oraz stanowiły przyczynek do dalszego rozwoju metody.

W pracy [**A4**] przedstawiono porównanie dwóch metod wieloskalowych pozwalających na wyznaczenie kierunkowości nierówności powierzchni. Opisane zagadnienia dotyczące krzywizny są rozwinięciem autorskiej metody przedstawionej w pozycji [**R1**]. Dla czterech różnych powierzchni zaprezentowano wizualizację ich (an)izotropii dla różnych skal obserwacji. Stosowanie kierunków

głównych krzywizn maksymalnych pozwoliło na wizualizację lokalnej kierunkowości powierzchni oraz przedstawienie jej w postaci wykresu typu kwiat róży (ang. *rose plot*) wykonanego po raz pierwszy w 3D. Ma to istotne znaczenie zwłaszcza przy opisie złożonych geometrycznie powierzchni swobodnych będących wynikiem pomiaru powierzchni próbek wykonanych za pomocą technik przyrostowych z proszków metali, gdzie pomiar jest dokonywany za pomocą metrologicznej tomografii komputerowej. Przykłady zastosowania autorskiej metody przedstawiono także w monografii [M1] dla trzech rodzajów powierzchni, tzn. poddanych trzem różnym rodzajom obróbki: frezowaniu, szlifowaniu oraz mikropiaskowaniu. Powiązано otrzymane rozkłady kierunków krzywizn głównych z występowaniem danych cech geometrycznych powierzchni dostrzegalnych w rozpatrywanych skalach.

W monografii [M1] i artykule [A4] przedstawiono dyskusję wyników dla omawianych przykładów w kontekście innych metod wieloskalowych pozwalających na analizę anizotropii w wielu skalach, tj. zastosowanie filtru pasmoprzepustowego i parametrów ISO Str i Std oraz metody długości względnej. Stwierdzono, że w przypadku autorskiej metody ilościowe określenie anizotropii dla całej powierzchni za pomocą jednego parametru (analogicznie do Str albo epLsar) staje się nieco trudniejsze, ponieważ wymaga uwzględnienia jej opisu w trójwymiarowej przestrzeni. Zaproponowano rozwiązanie tego problemu poprzez skorzystanie z parametrów opisujących rozkład statystyczny we współrzędnych sferycznych albo określenie, dla jakich kierunków osiąga się dominantę rozkładu. Należy przy tym pamiętać, że rozkład może być multimodalny. Dominantę o najwyższej wartości można następnie odnieść do średniej wartości dystrybuanty.

Nachylenie profilu i powierzchni w wielu skalach

Analogicznie do krzywizny, również nachylenie może być rozpatrywane w funkcji skali obserwacji oraz położenia na analizowanej powierzchni. Do tej pory wielkość ta, poza geologią i oceanografią, nie była stosowana w analizie wieloskalowej topografii powierzchni [14, 15]. W konwencjonalnej analizie topograficznej zgodnej z ISO 25178 stosuje się parametr Sdq , który wyraża wartość skuteczną gradientu powierzchni zapisywany wzorem:

$$Sdq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint \left[\left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy}. \quad (17)$$

Powyższy parametr wyznacza się tylko w jednej skali równej oryginalnej rozdzielczości pomiarowej. Stosując inne metody wieloskalowe, np. filtru pasmowego lub transformacji falkowej, można wyznaczyć wartość Sdq dla innych skal, przy czym każda z tych metod ujmuje pojęcie skali inaczej. Ponadto Sdq wyraża tylko wartość skuteczną, tymczasem istnieją takie parametry statystyczne,

które mogą okazać się lepsze do przeprowadzania analizy zmierzonych powierzchni. Niektóre z nich zostaną przedstawione w dalszej części rozdziału.

W przypadku profili $z = z(x)$ norma ISO 4287 wyróżnia parametr $R\Delta q$ (Rdq) opisujący wartość skuteczną nachylenia, który wyraża się w postaci wzoru:

$$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} \left[\frac{dz(x)}{dx} \right]^2 dx}. \quad (18)$$

Wielkość ta z definicji nie ma charakteru wieloskalowego. Norma ISO 21920 wprowadza także nowe parametry związane z gradientem: Rda – średnią wartość gradientu oraz Rdt – jego maksymalną wartość. Nazewnictwo jest tutaj pewną analogią do podstawowych parametrów związanych z wysokością nierówności czyli Ra oraz Rt . Można byłoby spróbować odnieść te wielkości opisujące w sposób statystyczny gradient także na inne skale za pomocą niegeometrycznych metod wieloskalowych.

W podrozdziale 4.1 normy ISO 25178 opisano długość względną – $RelL$, która uwzględnia nachylenie odcinków złożonych z następujących po sobie punktów wyrażonych przez cosecans kąta ich nachylenia (patrz równanie 3.2). Wielkość ta pozwala wyznaczyć względną długość danego profilu dla różnych skal wynikającą z lokalnych nachyleń jego odcinków – uwzględnia zatem sumę poszczególnych nachyleń względem nachylenia płaskiego poziomego profilu. Parametr $RelL$ jest często stosowany w analizie wieloskalowej, jednak w przeciwieństwie do $R\Delta q$ nie opisuje w wystarczający sposób złożoności nachylenia profilu.

W monografii [M1] przedstawiono nowe podejście do analizy nachylenia powierzchni i profili, tj. metodzie bazującej na wektorach normalnych wyznaczanych dla pewnych obiektów geometrycznych: odcinków (w przypadku profili) oraz trójkątnych łatek (w przypadku powierzchni). Dla topografii zaproponowano dwie metody wyznaczania wektorów normalnych dla różnych skal. Sposób wizualizacji nachylenia polegał na rozkładzie statystycznym we współrzędnych biegunowych lub horyzontalnych. Ponadto zaproponowane zostały parametry statystyczne, które w ilościowy sposób opisują nachylenie dla rozpatrywanej skali. Nachylenie jest brakującą miarą pomiędzy dwoma istotnymi metodami geometrycznymi skupiającymi się na długości i polu powierzchni oraz krzywiznie co przedstawiono w artykule [A10].

Literatura

- [1] Whitehouse DJ (1982) The parameter rash — is there a cure?, *Wear* 83(1):75–78
- [2] Scott PJ (2009) Feature parameters, *Wear* 266(5–6):548–551
- [3] Brown, CA (2018) Specification of surface roughness using axiomatic design and multiscale surface metrology, *Procedia CIRP* 70:7–12
- [4] Brown, CA (2014) Functional Correlation. In: *The International Academy for Production Engineering*, Laperrière L., Reinhart G. (eds) *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [5] Brown CA (2000) Issues in modeling machined surface textures. *Machining Sci Technol* 4(3):539–546
- [6] Stemp WJ, Childs BE, Vionnet S, Brown CA (2009) Quantification and discrimination of lithic use-wear: surface profile measurements and length-scale fractal analysis. *Archaeometry* 51(3):366–382
- [7] Scott RS, Ungar PS, Bergstrom TS, Brown CA, Grine FE, Teaford MF, Walker A (2005) Dental microwear texture analysis within-species diet variability in fossil hominins. *Nature* 436(4):693–695
- [8] Gambino C, McLaughlin P, Kuo L, Kammerman F, Shenkin P, Diaczuk P, Petraco N, Hamby J, Petraco NDK (2011) Forensic surface metrology: tool mark evidence. *Scanning* 33(1–7):272
- [9] Bartkowiak T, Lehner J T, Hyde J, Wang Z, Pedersen D B, Hansen H N, Brown C A (2015) Multi-scale areal curvature analysis of fused deposition surfaces. W: *Proceedings of the ASPE spring topical meeting on achieving precision tolerances in additive manufacturing*, s. 77-82
- [10] Theisel H, Rossl C, Zayer R, Seidel H-P (2004) Normal based estimation of the curvature tensor for triangular meshes. W: *12th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, 2004*. PG 2004. *Proceedings. IEEE*, s. 288–297
- [11] (2009) *ASME Standard, B46.1 Surface Texture, Surface Roughness, Waviness and Lay*
- [12] Townsend A, Senin N, Blunt L, Leach RK, Taylor JS (2016) Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review. *Precision Engineering* 46:34–47. doi: 10.1016/j.precisioneng.2016.06.001
- [13] Lou S, Pagani L, Zeng W, Jiang X, Scott PJ (2020) Watershed segmentation of topographical features on freeform surfaces and its application to additively manufactured surfaces. *Precision Engineering* 63:177–186. doi: 10.1016/j.precisioneng.2020.02.005
- [14] Young GC, Dey S, Rogers AD, Exton D (2017) Cost and time-effective method for multi-scale measures of rugosity, fractal dimension, and vector dispersion from coral reef 3D models. *PLOS ONE* 12:e017534. doi: 10.1371/journal.pone.0175341
- [15] Zhang X, Drake NA, Wainwright J, Mulligan M (1999) Comparison of slope estimates from low resolution DEMs: scaling issues and a fractal method for their solution. *Earth Surface Processes and Landforms* 24:763–779. doi: 10.1002/(SICI)1096-9837(199908)24:9<763::AID-ESP9>3.0.CO;2-J

5. WSPÓŁPRACA ZAGRANICZNA Z JEDNOSTKAMI NAUKOWYMI

2014 – aktualnie

PROFESOR CHRISTOPHER A. BROWN

Worcester Polytechnic Institute, USA

Współpraca z Prof. Christopherem Brownem została nawiązana w ramach przygotowania wniosku stypendialnego na wyjazd stażowy w ramach konkursu zorganizowanego przez Fundację Kościuszkowską. Po przyznaniu stypendium na wyjazd Habilitant spędził 5 miesięcy (od 1.10.2014 r. do 28.02.2015 r.) biorąc czynny udział w pracach badawczych kierowanych przez Profesora Browna w jego Surface Metrology Laboratory. Owoce tej współpracy jest opracowana nowa metoda wieloskalowej analizy nierówności powierzchni skupiająca się na analizie tensora krzywizny. Do momentu złożenia wniosku opublikowano wspólnie z profesorem Brownem 5 współautorskich artykułów [A1-A4, A9] oraz jeden artykuł pokonferencyjny indeksowany w bazie Scopus.

2016 – 2020

DOKTOR JOHAN BERGLUND

RISE Research Institutes of Sweden, Mölndal, Szwecja

Chalmers University of Technology, Goteborg, Szwecja

Współpraca z Doktorem Johanem Berglundem została nawiązana w trakcie konferencji ICSM odbywającej się w Poznaniu w 2016 roku. Przedmiotem współpracy były badania w tematyce powiązania geometrii mikrocech zmierzonych powierzchni a współczynnikiem tarcia oraz opisu wieloskalowego opisu kierunkowości nierówności powierzchni. Wynikiem tej współpracy są trzy współautorskie artykuły naukowe [A2, A4, A9]

2019-teraz

DOKTOR DANIELLE MACDONALD

The University of Tulsa, Tulsa, USA

Współpraca z Doktor Danielle MacDonald dotyczy możliwości zastosowania metod wieloskalowych do opisu krawędzi skrawających narzędzi używanych przez neolitycznych rolników i łowców. W ramach tej współpracy opublikowano jeden artykuł naukowy w Journal of Archaeological Science: Reports. Trwają obecnie prace nad aplikacją metod Habilitanta do opisu narzędzi neolitycznych zebranych w dolinie Olduvai w Tanzanii.

2019-teraz

PROFESOR JAMES W. STEMP

Keene State College, Keene, USA

Współpraca z Profesorem Jamesem Stempem dotyczy możliwości zastosowania metod wieloskalowych do opisu krawędzi skrawających narzędzi używanych przez neolitycznych rolników i łowców. W ramach tej współpracy opublikowano jeden artykuł naukowy w Journal of Archaeological Science: Reports. Trwają obecnie prace nad aplikacją metod Habilitanta do opisu narzędzi neolitycznych zebranych w dolinie Olduvai w Tanzanii.

6. WSPÓŁPRACA ZAGRANICZNA Z INNYMI OŚRODKAMI

2017-teraz

DOKTOR MARTIN UNGER

AniCura Kleintierspezialisten, Augsburg, Niemcy

*Współpraca w ramach badań biomechanicznych implantów weterynaryjnych stosowanych w leczeniu ortopedycznym złamań kości małych zwierząt. Habilitant był zaangażowany w kierowanie prac w zespole naukowców pracujących na Politechnice Poznańskiej oraz opracowaniem metodyki pomiaru i analizy powierzchni kontaktu pomiędzy komponentami połączenia gwintowego śruba- płyta zespalająca z wykorzystaniem mikrotomografii metrologicznej. Wyniki prac zostały opublikowane w dwóch artykułach w czasopiśmie *Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology*. Obecnie realizowane są badania biomechaniczne połączeń tkanek miękkich za pomocą nici chirurgicznych. Główną jednostką finansującą prace była fundacja AniCura Research Fund.*

7. STAŻE, KURSY, SZKOLENIA

Szkolenia

5.02.2021

Szkolenie (8 godzin): **Asertywność kierownika zespołu**

szkolenie zrealizowano ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach Programu Operacyjnego Wiedza Edukacja Rozwój, projekt pozakonkursowy pt. Podniesienie kompetencji kadry akademickiej i potencjału instytucji w przyjmowaniu osób z zagranicy – Welcome to Poland realizowany w ramach Działania określonego we wniosku o dofinansowanie projektu nr POWR.03.03.00-00-PN14/18.

Tematyka:

- Postawy asertywne i nieasertywne
- Wzmacnianie postawy asertywnej kierownika
- 4 osobowości lidera
- Wyrażanie poleceń i odmawianie
- Reagowanie na krytykę
- Dekalog asertywnego menadżera

6.11.2018

Szkolenie (7 godzin): **Analiza MES i symulacja dynamiczna w Inventorze**

Organizator: *BUDIKOM, autoryzowany przedstawiciel oprogramowania Autodesk*

Tematyka:

- Podstawy teoretyczne analizy z wykorzystaniem MES
- Budowa modelu i ustalanie warunków brzegowych
- Symulacja i analiza wyników
- Dobre praktyki w korzystaniu z oprogramowania Autodesk Inventor
- Optymalizacja topologiczna
- Symulacja dynamiczna

10.11.2015-
28.11.2015

Szkolenie (3 tygodnie) **Entrepreneurial Soft Skills and Train the Trainer Program for PhDs and Young Scientists**

Organizator: University of Edmonton, Kanada, w ramach programu MNiSW Transformation.doc

Tematyka:

- Budowanie kompetencji miękkich w biznesie,
- Creative Thinking i Creative Development
- Peer Coaching
- Nowoczesne metody nauczania
- Komunikacja międzykulturowa
- Praca w zespole i budowanie zespołu
- Zarządzenie badaniami i projektami badawczymi

Staż naukowy

10.2014-02.2015

Worcester Polytechnic Institute, USA, Visiting Researcher

Staż naukowy realizowany w ramach grantu Fundacji Kościuszkowskiej.

Wyjazd stanowił impuls badawczy do prac nad metodami wieloskalowymi będącymi przedmiotem osiągnięcia habilitacyjnego.

Staże przemysłowe

01.2022-teraz

ATRES Intralogistics Sp. z o. o., Konstruktor mechanik

Staż przemysłowy realizowany w ramach projektu „Opracowanie inteligentnego, zrobotyzowanego, samowytadowczego wózka logistycznego dla autonomicznego pociągu Logistycznego”. Numer projektu: POIR.01.01.01-00-0270/21

11.2021-teraz

ILABO Sp. z o. o., Analityk

Staż przemysłowy realizowany w ramach projektu „Samoucząca się Fabryka – Silnik rekomendacji oparty na sztucznej inteligencji wsparty wizyjnym rozpoznawaniem zdarzeń na produkcji i bazujący na cyfrowej globalnej bibliotece maszyn i urządzeń produkcyjnych, finansowanego przez NCBiR w ramach POIR. Numer projektu: POIR.01.01.01-00-0542/2.

02.2018-12.2019

Zrembud sp. z o. o., Konstruktor mechanik

Staż przemysłowy realizowany w ramach projektu „Opracowanie automatycznego regału szufladowego, wykorzystującego zmodyfikowane systemy regałów rzędowych odwróconych o 90 stopni, dedykowanych dla

wewnętrznej logistyki magazynowej” finansowanego przez NCBiR w ramach POIR. Numer projektu: POIR.01.01.01-00-0373/17.

04.2017-05.2017

Famor sp. z o. o., Konsultant techniczny

Reprezentowanie firmy podczas instalacji i odbioru systemu dodatkowego zasilania statku. Szkolenie załogi, pośrednictwo pomiędzy firmą a podwykonawcami. Praca realizowana w Port Hueneme, Kalifornia, USA.

10.2012-06.2015

Beiersdorf Manufacturing Poznań, Specjalista ds. Controlling

Controlling produkcyjny obejmujący kosztową stronę działalności produkcyjnej (CAPEX i OPEX), analizy opłacalności projektów inwestycyjnych, nadzorowanie projektów dotyczących oszczędności wynikających z poprawy efektywności procesów.

8. DZIAŁALNOŚĆ DYDAKTYCZNA

Prowadzone zajęcia dydaktyczne na Politechnice Poznańskiej w okresie od 10.2012 do teraz:

Nazwa przedmiotu	Kierunek studiów	Forma studiów	Forma zajęć
Automatyka	Mechanika i Budowa Maszyn	stacjonarne, niestacjonarne	wykład, ćwiczenia, laboratorium
Podstawy automatyki	Zarządzenia i Inżynieria Produkcji	niestacjonarne	wykład, ćwiczenia, laboratorium
	Zarządzenia i Inżynieria Produkcji	stacjonarne	laboratorium
Konstrukcja sprzętu siłowego i rekreacyjnego (przedmiot obieralny)	Inżynieria Biomedyczna	stacjonarne	wykład, projekt
Elektrotechnika	Inżynieria Biomedyczna, Inżynieria Materiałowa	stacjonarne	laboratorium
Maszyny i Urządzenia Technologiczne	Mechanika i Budowa Maszyn, Zarządzanie i Inżynieria Produkcji	stacjonarne, niestacjonarne	laboratorium
Maszyny i Urządzenia Technologiczne	Mechatronika	stacjonarne	laboratorium
Seminarium dyplomowe	Mechanika i Budowa Maszyn	stacjonarne, niestacjonarne	projekt

Promotorstwo prac dyplomowych

Prace inżynierskie (13 prac):

- Konstrukcja hulajnogi elektrycznej przystosowanej do warunków terenowych / Sebastian Skrzypczak (WIM) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Adam Myszkowski, 2021
- Konstrukcja nawijarki CNC do przetworników gitarowych / Michał Sadowski (WIM) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Adam Myszkowski, 2021
- Konstrukcja prostego urządzenia medycznego wspomagającego mięśnie pacjenta w wykonywaniu pracy oddechowej / Piotr Danek (WIM) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Adam Myszkowski, 2021

- Modernizacja układu napędowego w 2-osiowym manipulatorze kartezjańskim / Bartosz Cebernik (WIM) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Andrzej Gessner, 2020
- Analiza kinematyki układu skrętnego typu podwójnego Ackermanna w wózku logistycznym / Paulina Tysiak (WIM) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Adam Myszkowski, 2020
- Badania wytrzymałościowe surogatu kostnego stabilizowanego aparatem Ilizarova z wykorzystaniem MES. / Agata Wojtkowiak (WIM) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Andrzej Gessner, 2020
- Projekt ładowacza do słomy z nastawialnymi widłami / Marcin Michałowski (WIM) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Andrzej Gessner, 2020
- Projekt urządzenia do prostowania blachy z systemem pomiaru płaskości / Mateusz Staszuk (WIM) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Adam Myszkowski, 2020
- Konstrukcja trzykołowego jednoosobowego pojazdu elektrycznego / Tomasz Fibiger (WBMiZ) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Andrzej Gessner, 2019
- Analiza połączenia śrubowego w zespoleniu wewnętrznym złamanej kości małego zwierzęcia z wykorzystaniem tomografii komputerowej / Hanna Jąder (WBMiZ) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Adam Myszkowski, 2019
- Projekt drzwi przestrzennych / Adrianna Laskoś (WBMiZ) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Adam Myszkowski, 2019
- Projekt mini frezarki CNC do obróbki części z PCB / Marcin Skowroński (WBMiZ) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Krzysztof Mrozek, 2019
- Projekt wózka logistycznego z opuszczanymi widłami / Maciej Słomkowski (WBMiZ) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Roman Staniek, 2018

Prace magisterskie (10 prac):

- Automatyzacja linii do pakowania w kartony zbiorcze i paletyzowania pudełek z żywnością / Justyna Gorączkowska (WIM) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Andrzej Gessner, 2020
- Projekt automatycznego systemu załadunku i rozładunku wagonika pociągu logistycznego / Michał Garasz (WIM) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Andrzej Gessner, 2020
- Projekt układu podwieszenia pacjenta w trakcie reedukacji chodu za pomocą robota / Hanna Jąder (WIM) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Andrzej Gessner, 2020
- Projekt automatycznie rozkładanych schodów na poddasze / Adrianna Laskoś (WIM) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Andrzej Gessner, 2020
- Konstrukcja robota do mopowania schodów / Kamila Stochaj (WIM) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Andrzej Gessner, 2020
- Metoda oceny charakteru krzywizny ostrza skrawającego w wielu skalach / Iwona Ziemia (WBMiZ) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Andrzej Gessner, 2019
- Opracowanie konstrukcji niskobudżetowej 3-osiowej frezarki CNC / Mateusz Miłek (WBMiZ) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Andrzej Gessner, 2019
- Opracowanie konstrukcji urządzenia do otwierania i składania kartonów zbiorczych / Michał Kuniec (WBMiZ) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Andrzej Gessner, 2019

- Opracowanie konstrukcji układu zamykania najazdu oraz podnoszenia platformy wózka logistycznego / Tobiasz Abou El Naga (WBMiZ) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Andrzej Gessner, 2018
- Projekt układu kinematycznego pociągu logistycznego typu mleczarz i jego walidacja / Wojciech Paszkowiak (WBMiZ) / prom. Tomasz Bartkowiak, rec. Andrzej Gessner, 2018

Recenzje prac dyplomowych

Prace inżynierskie (5 prac):

- Konstrukcja zawieszki transportowej do drzwi wózków widłowych / Robert Marciniak (WBMiZ) / prom. Andrzej Gessner, rec. Tomasz Bartkowiak, 2019
- Porównanie technologii wykonywania otworów w formach wtryskowych w aspekcie struktury geometrycznej powierzchni / Łukasz Dziesiątkowski (WBMiZ) / prom. Szymon Wojciechowski, rec. Tomasz Bartkowiak, 2019
- Konstrukcja dwugniazdowej formy wtryskowej do produkcji dystansu podłokietnika siedzenia do komunikacji turystycznej / Michał Belau (WBMiZ) / prom. Krzysztof Mrozek, rec. Tomasz Bartkowiak, 2018
- Modernizacja stacji zgrzewu dolnego maszyny pakującej tytoń w worki strunowe / Marcin Mądrzak (WBMiZ) / prom. Andrzej Gessner, rec. Tomasz Bartkowiak, 2017
- Projekt taśmowego transportera do rozdzielania wafli ryżowych na dwie rynny z wykorzystaniem oprogramowania Inventor / Dominik Sadowski (WBMiZ) / prom. Roman Staniek, rec. Tomasz Bartkowiak, 2017

Prace magisterskie (8 prac):

- Deskorolka z napędem elektrycznym / Mateusz Jaskulski (WIM) / prom. Andrzej Gessner, rec. Tomasz Bartkowiak, 2020
- Zagadnienie bezpieczeństwa w pojazdach AGV / Filip Mateuszuk (WBMiZ) / prom. Andrzej Gessner, rec. Tomasz Bartkowiak, 2019
- Analiza systemów produkcyjnych do mikrofrezowania w aspekcie struktury geometrycznej obrobionej powierzchni / Małgorzata Nowek (WBMiZ) / prom. Szymon Wojciechowski, rec. Tomasz Bartkowiak, 2019
- Ocena strategii frezowania powierzchni krzywoliniowej z punktu widzenia efektów technologicznych / Damian Wański (WBMiZ) / prom. Szymon Wojciechowski, rec. Tomasz Bartkowiak, 2019
- Konstrukcja mobilnej betoniarki do pracy w trudnych warunkach terenowych / Szymon Rosiejka (WBMiZ) / prom. Roman Staniek, rec. Tomasz Bartkowiak, 2018
- Konstrukcja formy wtryskowej do produkcji śmigła z konformalnym układem chłodzenia / Mateusz Łochyński (WBMiZ) / prom. Krzysztof Mrozek, rec. Tomasz Bartkowiak, 2018
- Konstrukcja formy wtryskowej wyposażonej w konturowy układ chłodzenia do produkcji kasku ochronnego / Marcin Majewski (WBMiZ) / prom. Krzysztof Mrozek, rec. Tomasz Bartkowiak, 2018

- Konstrukcja urządzenia wspomagającego długotrwałą pracę człowieka w pozycji stojącej / Michał Orsztynowicz (WBMiZ) / prom. Andrzej Gessner, rec. Tomasz Bartkowiak, 2018

Wyróżnienia za pracę dyplomową

Wyróżnienie w 2019 roku za pracę dyplomową w obszarze techniki oraz organizacji produkcji i usług nadane przez Federację Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych NOT Rada w Poznaniu mojego dyplomanta mgr inż. Wojciecha Paszkowiaka. Tytuł pracy: Projekt układu kinematycznego pociągu logistycznego typu mleczarz i jego walidacja, rec. dr hab. inż. Andrzej Gessner.

Opieka nad praktykami ERASMUS

Opiekun praktyk Musy Bilal Tekinkaya, absolwenta studiów drugiego stopnia na kierunku „mechanical engineering” na KTO Karatay University w Turcji. Praktyki są realizowane w ramach programu ERASMUS STUDENT MOBILITY FOR TRAINEESHIPS na rok akademicki 2021/2022.

Aktywowanie studentów do pracy badawczej

Zaangażowanie studentów w prace badawcze realizowane przy współpracy z badaczami z kliniki AniCura Kleintierspezialisten w Augsburgu, także w ramach badań zleconych na Politechnice Poznańskiej. Wyniki prac studentów miały wysoką wartość poznawczą, co przełożyło się na dwie publikacje naukowe:

- Artykuł naukowy z dyplomantką mgr inż. Hanną Jąder, w ramach realizowanej przez studentkę pracy dyplomowej inżynierskiej, który został opublikowany w czasopiśmie z Impact Factorem:

How Do the Locking Screws Lock? A Micro-CT Study of 3.5-mm Locking Screw Mechanism / Jakub Kaczmarek, Tomasz Bartkowiak (WIM), Piotr Paczos (WIM), Bartosz Gapiński (WIM), Hanna Jąder (WIM), Martin Unger // Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology - 2020, vol. 33, no. 05, 100 punktów, IF=1.358

- Artykuł naukowy z dyplomantką inż. Darią Łączną, w ramach realizowanej przez studentkę pracy dyplomowej magisterskiej; praca została wysłana we wrześniu 2021 roku do recenzji w czasopiśmie z Impact Factorem (praca na dzień wysłania wniosku czeka na decyzję po drugiej rundzie recenzji):

What Is the Cost of the Off-Axis Insertion of Locking Screws? A Biomechanical Comparison of 3.5 Fixed- and Variable-Angle Stainless Steel Locking Plate Systems / Jakub Kaczmarek, Tomasz Bartkowiak (WIM), Piotr Paczos (WIM), Paweł Zawadzki (WIM), Daria Łączna

(WIM), Bartosz Gapiński (WIM), // Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology, 100 punktów, IF=1.358

9. DZIAŁALNOŚĆ ORGANIZACYJNA

Kierownik Laboratorium Maszyn Inteligentnych - od 1.01.2020 r. do teraz

Kierowanie pracami badawczymi i dydaktycznymi dziesięcioosobowego zespołu pracowników badawczo-dydaktycznych i dydaktycznych. Laboratorium Maszyn Inteligentnych zostało powołane do życia 1 stycznia 2020 roku w ramach przekształcenia istniejącego w strukturach Instytutu Zakładu Maszyn Technologicznych. Laboratorium jest strukturą niezależną, powołaną przez Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej do realizowania badań dotyczących zastosowania metod sztucznej inteligencji w budowie i sterowaniu maszyn.

Opiekun I roku studiów na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn w latach 2016-2021

Członek Rady Wydziału Inżynierii Mechanicznej od marca do września 2020 roku oraz od listopada 2021 roku do teraz.

Członek komisji rekrutacyjnej na studiach stacjonarnych II stopnia w latach 2017-2019 i 2021 roku.

10. WSKAŹNIKI NAUKOMETRYCZNE

Tabela. 1. Sumaryczne zestawienie kryteriów osiągnięć wnioskodawcy

L.p.	Wykaz osiągnięć, Kryterium według §3 p.4, §4 i §5	Przed doktoratem	Po doktoracie	łącznie
1	Publikacje w czasopismach z bazy JCR	2	19	21
2	Publikacje w czasopismach innych niż znajdujących się w bazie JCR	9	7	16
3	Publikacje w materiałach konferencyjnych lub autorstwo monografii w języku angielskim	7	7	14
4	Udzielone patenty	0	2	2
5	Zgłoszenia patentowe (w trakcie rozpatrywania)	0	3	3
6	Skomercjalizowane wyniki badań i know-how	0	1	1
7	Kierownik w projektach badawczych	1	2	3
8	Wykonawca w projektach badawczych	5	4	9
9	Recenzje w czasopismach naukowych z bazy JCR lub Scopus	2	77	79
10	Międzynarodowe staże naukowe	1	0	1
11	Udział w konferencjach naukowych	8	9	17
12	Wykonane opinie o innowacyjności	1	1	2
13	Zatrudnienie w firmach przemysłowych (umowa o pracę)	1	1	2
14	Nagrody i wyróżnienia za działalność naukową	4	2	6
15	Współpraca zagraniczna	2	4	4
16	Opieka naukowa nad doktorantami - promotor pomocniczy	0	2	1
17	Szkolenia	1	2	3
łącznie liczba spełnionych kryteriów		14	16	17

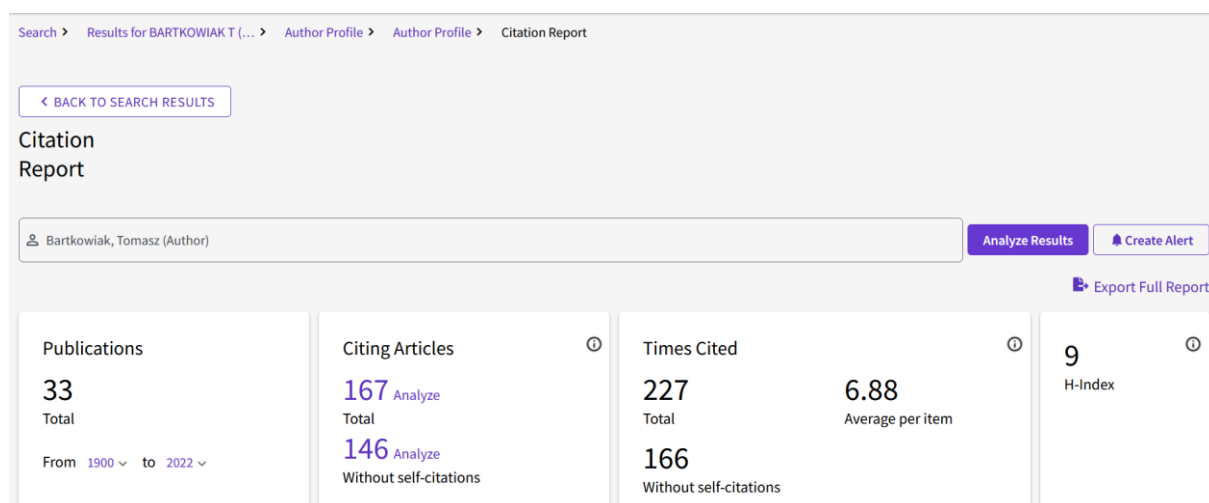
Tabela. 2. Sumaryczne zestawienie kryteriów osiągnięć wnioskodawcy

Wskaźniki oceny dorobku naukowego			
Źródło	Liczba publikacji	Liczba cytowań (bez autocytowań)	Indeks Hirscha (h)
Web of Science (WoS)	33	227 (166)	9
Scopus (Sco)	39	279 (203)	10
Google Scholar (GSch)	58	372	10

Sumaryczny Impact Factor według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodny z rokiem opublikowania: **IF=54,758**

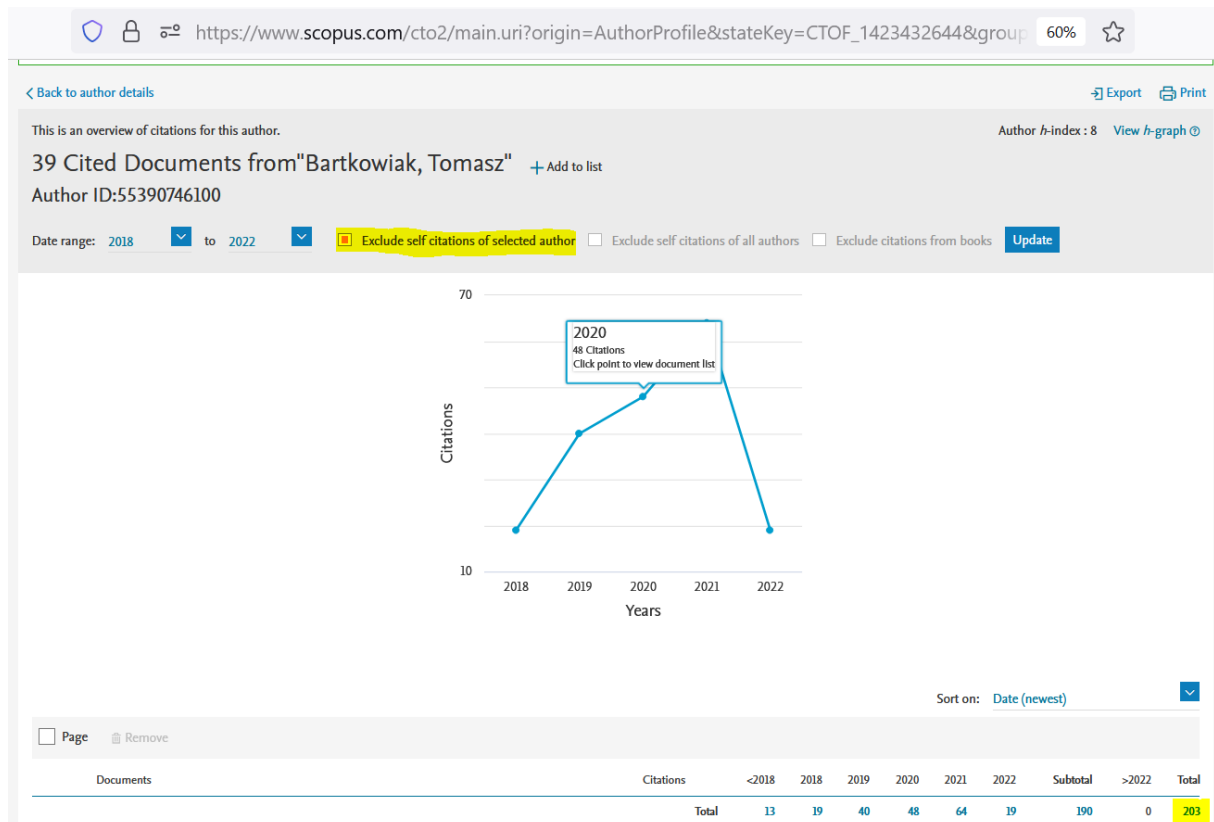
Potwierdzenia z baz bibliometrycznych

WoS



Scopus





Google Scholar

