

Załącznik nr 3 do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

Autoreferat

Dr inż. Grzegorz Ziółkowski

Katedra Zaawansowanych Technik Wytwarzania

Wydział Mechaniczny

Politechnika Wrocławska

ul. Łukasiewicza 5, 50-371 Wrocław

1. Imię i nazwisko:

Grzegorz Jan Ziółkowski

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

2016 – doktor nauk technicznych, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny Dyscyplina: Budowa i Eksploatacja Maszyn

Specjalność: badania nieniszczące, techniczna tomografia komputerowa

Tytuł rozprawy:

“Analiza i ocena dokładności pomiarów cech geometrycznych obiektów technicznych z wykorzystaniem tomografii komputerowej”

Promotor: *prof. dr hab. inż. Edward Chlebus, prof. dr hab. inż. Jan Misiewicz*

2010 – magister inżynier, Politechnika Wrocławska, Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Kierunek: Fizyka techniczna

Specjalność: Inżynieria Biomedyczna/Aparatura elektromedyczna

Tytuł pracy:

„Analiza MES odkształceń w polimerowym scaffoldzie uzupełniającym ubytek kości długiej”

Promotor: *dr inż. Jarosław Filipiak*

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

Zatrudnienie w jednostkach naukowych:

Miejsce	Stanowisko	Okres zatrudnienia
Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Katedra Zaawansowanych Technik Wytwarzania	adiunkt	01.06.2025 - trwa
	adiunkt	01.10.2016 - 31.05.2025
Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Katedra Technologii Laserowych, Automatykacji i Organizacji	asystent	01.10.2015 - 30.09.2016
	starszy referent techniczny	01.07.2015 - 30.09.2015
	starszy referent techniczny	03.07.2014 - 30.06.2015
Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji	starszy referent techniczny	22.11.2012 - 31.05.2014
	starszy referent techniczny	4.10.2011 - 30.09.2012
	asystent	17.05.2010 - 1.10.2011

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz.U. z 2024 r. poz. 1571 z późn. zm.)

Podstawę wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego pt.

„Metodyczne i aplikacyjne podstawy rozwoju ilościowych strategii pomiarowych w technicznej tomografii komputerowej (XCT)”

stanowią dwa osiągnięcia, w tym **osiągnięcie naukowe [ON]** w rozumieniu art. 219 ust. 1 pkt 2 lit. b, tj.:

Cykl ośmiu powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach ujętych w wykazie, 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 (wg stanu na 30.01.2026 r.: łącznie **1290** punktów ministerialnych oraz sumaryczny Impact Factor **37,9**), w których:

- w czterech artykułach jestem pierwszym autorem oraz autorem korespondencyjnym,
- w trzech artykułach jestem drugim autorem, odpowiadającym za implementację metod tomograficznych,
- w jednym artykule jestem ostatnim autorem (tzw. *senior author*).

W Załączniku nr 5 do wniosku przedstawiono publikacje wchodzące w skład cyklu, natomiast w Załączniku nr 6 – oświadczenia współautorów. Dodatkowo wykazuję spełnienie przesłanki określonej w art. 219 ust. 1 pkt 2 lit. c poprzez osiągnięcie nr 2, tj.:

Zrealizowane oryginalne osiągnięcie projektowe [OP] (zgodnie z art. 219 ust. 1 pkt 2 lit. c ustawy) obejmuje opracowanie, implementację, walidację oraz wdrożenie zintegrowanych metod pomiarowych z wykorzystaniem technicznej tomografii komputerowej (XCT). Osiągnięcie to redefiniuje proces kontroli wytwarzania (w tym technik przyrostowych – *Additive Manufacturing*) oraz proces walidacji wyrobów gotowych poprzez wprowadzenie autorskiego, spójnego łańcucha postępowania: od zaawansowanej akwizycji danych i rekonstrukcji wolumetrycznej, przez segmentację i analizę geometryczną, aż po standaryzację danych 3D do postaci „*AI-ready*”. Metodyka ta, uzupełniona o autorskie metryki i reguły decyzyjne, umożliwia w pełni ilościową ocenę geometrii oraz zapewnia wysoką porównywalność wyników pomiarowych. Osiągnięcie to zostało zweryfikowane w trzech komplementarnych obszarach zastosowań (OP1–OP3), udokumentowane zastosowaniami przemysłowymi i klinicznymi, w tym wdrożeniami pilotażowymi [W2], [W3] oraz potwierdzone publikacjami w prestiżowych czasopismach naukowych [B5, B8, B11, B14].

4.1. Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych zgodnie z art. 219 ust. 1 pkt 2 lit. b:

Poniżej przedstawiono cykl powiązanych publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego [ON]:

[A1] Grzegorz Ziółkowski (autor korespondencyjny), Joanna B. Pach, Dariusz Pyka, Tomasz Kurzynowski, Krzysztof Jamroziak.: X-ray computed tomography for the development of ballistic composite, *Materials*. 2020, vol. 13, nr 23, art. 5566, s. 1-19.

[A2] Grzegorz Ziółkowski (autor korespondencyjny), Emilia Grochowska, Dawid Kęszycki, Piotr Gruber, Viktoria Hoppe, Patrycja Szymczyk-Ziółkowska, Tomasz Kurzynowski.: Investigation of porosity behavior in SLS polyamide-12 samples using ex-situ X-ray computed tomography, *Materials Science-Poland*. 2021, vol. 39, nr 3, s. 436-445.

[A3] Grzegorz Ziółkowski (autor korespondencyjny), Konrad Gruber, Emilia Tokarczyk, Robert Roszak, Matthias Ziegenhorn.: X-ray Computed Tomography for the ex-situ mechanical testing and simulation of additively manufactured IN718 samples, *Additive Manufacturing*. 2021, vol. 45, art. 102070.

[A4] Konrad Gruber, Grzegorz Ziółkowski, Andrzej P. Pawlak, Tomasz Kurzynowski: Effect of stress relief and inherent strain-based pre-deformation on the geometric accuracy of stator vanes additively manufactured from Inconel 718 using laser powder bed fusion, *Precision Engineering*, 2022, vol. 76, s. 360-376.

[A5] Piotr Gruber, Grzegorz Ziółkowski, Michał Olejarczyk, Emilia Grochowska, Viktoria Hoppe, Patrycja Szymczyk-Ziółkowska, Tomasz Kurzynowski: Influence of bioactive metal fillers on microstructural homogeneity of PA12 composites produced by polymer Laser Sintering, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2022, vol. 22(3), art. 117, s. 1-15.

[A6] Patrycja Szymczyk-Ziółkowska, Grzegorz Ziółkowski, Viktoria Hoppe, Małgorzata Rusińska, Karol A. Kobiela, Marcin Madeja, Robert Dziedzic, Adam Junka, Jerzy Detyna: Improved quality and functional properties of Ti-6Al-4V ELI alloy for personalized orthopedic implants fabrication with EBM process, *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, vol. 76, s. 175-194.

[A7] Tomasz Płonka, Marcin Diakowski, Joanna Krupa-Kurzynowska, Viktoria Hoppe, Grzegorz Ziółkowski. Application of computed tomography to the study of Mesolithic portable

art: Results, interpretations and expectations - The case of an ornamented roe deer antler harpoon from Police, north-west Poland. *Archaeometry*. 2024, vol. 66, nr 1, s. 219-237.

[A8] Grzegorz Ziolkowski (autor korespondencyjny), Experimental and simulation analyses of the impact of X-ray tube acceleration voltage on dimensional accuracy in X-ray computed tomography. *Measurement (London)*. 2025, vol. 256, pt. D, art. 118439, s. 1–21.

Tabela 1 Cykl publikacji wchodzący w skład osiągnięcia naukowego

Kod	Czasopismo (rok)	IF	Punkty MNIŚW	Cytowania Scopus/WoS*		Q
				Scopus	WoS	
A1	<i>Materials</i> (2020)	3,6	140	21(18)	20(19)	Q2
A2	<i>Materials Science-Poland</i> (2021)	1,6	70	6(4)	6(4)	Q3
A3	<i>Additive Manufacturing</i> (2021)	11,6	200	29(20)	29(27)	Q1
A4	<i>Precision Engineering</i> (2022)	3,6	200	15(12)	13(13)	Q1
A5	<i>Archives of Civil and Mechanical Engineering</i> (2022)	4,4	140	8(6)	7(6)	Q1
A6	<i>Journal of Manufacturing Processes</i> (2022)	6,8	140	46(38)	37(36)	Q1
A7	<i>Archaeometry</i> (2024)	1,5	200	5(3)	3(3)	Q1
A8	<i>Measurement</i> (2025)	5,6	200	0(0)	0(0)	Q1
Suma:		37,9	1290	130(101)	115(110)	

*stan na dzień 30.01.2026r – w nawiasach bez autocytowań.

Zakres tematyczny, cele oraz kluczowe rezultaty cyklu publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego [ON], a także szczegółowy wkład autora z uwzględnieniem jego roli w ich powstaniu, przedstawiono odpowiednio w rozdziałach 4.5–4.6 oraz w Załączniku nr 4.

4.2. Zrealizowane oryginalne osiągnięcie projektowe [OP] zgodnie z art. 219 ust. 1 pkt 2 lit. c:

Poniżej przedstawiono trzy komplementarne obszary zastosowania zintegrowanego ujęcia procesu tomografii komputerowej (XCT), oznaczone jako OP1–OP3, które łącznie tworzą osiągnięcie projektowe [OP]. Na potrzeby niniejszego opracowania przyjęto następujące definicje:

- **Metody** – rozumiane jako jednoznacznie określone sekwencje czynności realizowane na poszczególnych etapach łańcucha XCT (akwizycja – rekonstrukcja – segmentacja – analiza).
- **Aplikacje** – rozumiane jako odniesienie do konkretnych klas zadań badawczych oraz zdefiniowanych celów pomiarowych.

- **Strategie** – rozumiane jako autorskie protokoły decyzyjne, stanowiące uporządkowany i powtarzalny sposób postępowania integrujący poszczególne procedury w spójny schemat. Obejmują one zasady, narzędzia oraz reguły doboru parametrów, ściśle dostosowane do zadania pomiarowego i charakterystyki obiektu, co zapewnia powtarzalność oraz założoną jakość wyników.

4.2.1. [OP1] Opracowanie i wdrożenie metod XCT ilościowej kontroli procesów przyrostowych i wyrobów medycznych

Osiągnięcie zostało zrealizowane w latach 2019–2022 w ramach projektu BIOAddMed (LIDER/NCBiR) [P12], ukierunkowanego na opracowanie kompleksowej technologii wytwarzania personalizowanych wyrobów farmaceutycznych i medycznych, w tym nośników leków oraz struktur medycznych o złożonej geometrii wewnętrznej i określonych cechach biomechanicznych.

Wyzwania i autorskie rozwiązania: Kluczowym problemem w analizie materiałów polimerowych oraz materiałów farmaceutycznych, w tym kompozytów zawierających substancje czynne (API) jest niska absorpcja promieniowania X, a także niewielki kontrast między fazą stałą a porami. Tradycyjne metody progowania (tzw. *global thresholding*) generowały nieakceptowalne błędy w estymacji mikroporowatości. W odpowiedzi na to wyzwanie:

- Zaimplementowałem algorytmy segmentacji lokalnej oraz podejście oparte na regionach zainteresowania (ROI), co umożliwiło precyzyjne rozróżnienie porowatości otwartej i zamkniętej.
- Wykazałem, że precyzyjna ocena połączeń kanałów (*connectivity*) na poziomie mikrometrycznym jest kluczowa dla modelowania kinetyki uwalniania substancji czynnej – transformując XCT z narzędzia wizualizacyjnego w wiarygodne narzędzie predykcyjne.

Uniwersalność metodyczna: Metodykę tę zaimplementowałem do oceny elementów wytwarzanych różnymi technikami przyrostowymi:

- *Material Extrusion* (MEX/FFF): Opracowałem system wskaźników oceny porowatości, integrując dane XCT z planowaniem eksperymentu (DoE) oraz analizą wariancji (ANOVA). Pozwoliło to na obiektywne powiązanie parametrów procesu wytwarzania z jakością struktury wewnętrznej [B8].
- *Binder Jetting* (BJ): Rozwinąłem procedury w kierunku trójwymiarowej analizy połączeń porów otwartych i zamkniętych, co umożliwiło wykazanie korelacji między parametrami

procesu (np. gęstością proszku, warunkami suszenia) a profilem dyfuzji leku w tabletkach bioresorbowalnych [B13].

- *Powder Bed Fusion* (PBF/DBLS): Potwierdziłem uniwersalność opracowanej metodyki na przykładzie kompozytów PLA/HAp [B10].

Zastosowania przemysłowe [W2]: Zwieńczeniem osiągnięcia było wdrożenie opracowanych procedur w firmie USP Zdrowie (US Pharmacia sp. z o.o.), w ramach którego mój udział (50%) obejmował:

- implementację protokołów ilościowej analizy XCT dla surowców oraz wyrobów gotowych;
- integrację XCT ze skaningową mikroskopią elektronową SEM jako metodą weryfikacyjną;
- stworzenie podstaw do podejmowania decyzji o zwalnianiu partii produkcyjnych lub korygowaniu parametrów procesu w oparciu o wyniki analiz tomograficznych XCT.

4.2.2. [OP2] Opracowanie i implementacja systemu kontroli jakości XCT w rozproszonej produkcji komponentów medycznych w warunkach kryzysowych

Osiągnięcie zostało zrealizowane w ramach projektu Virtual AM Storage Covid-19 (Szpitale Jednoimienne/NCBiR) [P9]. Istotą tego osiągnięcia było stworzenie systemu nadrzędnej kontroli jakości dla technik przyrostowych (AM) funkcjonujących w modelu rozproszonym, wykorzystywanych do szybkiego wdrażania wyrobów w warunkach kryzysowych oraz przerwanych łańcuchów dostaw.

Innowacja systemowa i metodyczna: Kluczowym wkładem było zdefiniowanie XCT jako nadrzędnego arbitra jakości, zapewniającego porównywalność wyników pomiarowych między różnymi centrami wytwórczymi oraz heterogenicznymi systemami wytwórczymi. Opracowałem protokół walidacji w relacji materiał–proces–wyrób. Główne elementy rozwiązania to:

- **Kategoryzacja obiektów:** Opracowałem procedury klasyfikacji komponentów pod kątem ich przydatności do analizy XCT. Procedury te uwzględniają gabaryty obiektów, energię promieniowania oraz przenikalność materiału, dzieląc obiekty na: kwalifikowane do pełnej analizy (geometria 3D), analizy częściowej (tzw. próbki świadkowie) oraz obiekty wyłączone z kontroli tomograficznej ze względów fizycznych.
- **Zintegrowana ścieżka walidacji:** Opracowane procedury objęły pełną inspekcję produktu – od ilościowej analizy jakości surowców (materiałów wsadowych [B5, D7]), przez weryfikację

geometrii wyrobów gotowych [D2], aż po inżynierię odwrotną i tworzenie cyfrowych kopii geometrii rzeczywistej obiektów na potrzeby zastosowań medycznych [B4].

- **Zastosowania kliniczne [W3]:** Rozwiązania oparte na wyrobach wytwarzanych przyrostowo zostały pilotażowo wdrożone w Wojewódzkim Szpitalu Specjalistycznym im. J. Gromkowskiego we Wrocławiu. Opracowany system nadrzędnej kontroli jakości stanowił narzędzie wspierające proces wdrożenia, umożliwiając bezpieczne odtworzenie łańcucha dostaw kluczowych części zamiennych oraz środków ochrony indywidualnej (ŚOI) w warunkach pandemii. Współtwórcy rozwiązania uczestniczyli w jego opracowaniu w porównywalnym zakresie, przy czym mój udział (12,5%) obejmował implementację zintegrowanych procedur kontrolnych XCT w środowisku rozproszonym.

Nagroda: Prace zrealizowane w ramach projektu Virtual AM Storage Covid-19 zostały uhonorowane Nagrodą II stopnia Wrocławskiej Rady FS NOT za wybitne osiągnięcia w dziedzinie techniki (2021).

4.2.3. [OP3] Opracowanie metod standaryzacji danych geometrycznych XCT użytecznych w aplikacjach sztucznej inteligencji (standard „AI-ready”)

Osiągnięcie zostało zrealizowane w ramach projektów OPUS (NCN) [P11, P3], we współpracy z Instytutem Archeologii Uniwersytetu Wrocławskiego. Jako kierownik zadań badawczych po stronie Politechniki Wrocławskiej, opracowałem autorską ścieżkę przetwarzania danych XCT, umożliwiającą ich integrację z systemami sztucznej inteligencji (AI/ML).

Istota problemu i rozwiązanie: Głównym wyzwaniem w wykorzystaniu modeli 3D pochodzących z tomografii komputerowej (XCT) w uczeniu maszynowym jest zmienność techniczna surowych danych (wolumenów oraz chmur punktów). Różnice w parametrach akwizycji, rozdzielczości oraz obecność artefaktów (np. *beam hardening*, *ring artifacts*) powodują, że algorytmy sztucznej inteligencji mogą uczyć się cech technicznych aparatury pomiarowej zamiast cech morfologicznych obiektu. W odpowiedzi na to opracowałem standard „AI-ready” [D1], obejmujący:

- **Normalizację topologii i reprezentacji powierzchni:** zastosowanie stałego próbkowania oraz stabilnych deskryptorów lokalnych, zapewniających statystyczną spójność zbiorów danych.
- **Redukcję szumu technicznego:** implementację procedur kontrolowanego odszumiania oraz korekcji artefaktów rekonstrukcyjnych, bez utraty mikroreliefu istotnego z punktu widzenia analizy technologicznej [B7].

- **Rejestrację wieloskalową:** ujednolicenie skali i orientacji obiektów, umożliwiające bezpośrednie porównywanie ornamentyki oraz śladów obróbki (tzw. biografii artefaktu) w dużych zbiorach danych.

Zastosowanie i rozwój: Metodyka ta umożliwiła przejście od subiektywnej oceny wizualnej do ilościowej, zautomatyzowanej analizy obiektów o złożonej strukturze powierzchniowej.

- **Archeometria:** Skutecznie zaimplementowałem standard do analizy ornamentyki mezołitycznej i magdaleńskiej, co stało się fundamentem do rozwoju narzędzi AI/ML klasyfikujących procesy wytwarzania oraz użytkowania artefaktów.
- **Uniwersalność:** Opracowane podejście ma charakter interdyscyplinarny – standard „AI-ready” jest skalowalny i może być adaptowany w inżynierii mechanicznej do badania dowolnych struktur o wysokim stopniu złożoności geometrycznej.

4.3. Interpretacja i synteza osiągnięć projektowych w ujęciu ilościowej analizy danych XCT

Realizacja prac badawczych w ramach opisanych projektów umożliwiła mi wypracowanie kompetencji w zakresie doboru parametrów oraz metod analizy danych XCT, ukierunkowanych na uzyskanie powtarzalnych wyników niezależnie od specyfiki badanego obiektu [OP2]. W obszarze analitycznym skoncentrowałem się na wyznaczaniu metryk porowatości i morfologii struktur przeznaczonych do zastosowań medycznych oraz farmaceutycznych [OP1]. Na etapie przetwarzania końcowego danych [OP3] opracowałem procedury standaryzacji danych, obejmujące normalizację geometrii oraz ujednolicenie łańcucha przetwarzania danych, co umożliwiło prowadzenie wiarygodnych analiz porównawczych oraz efektywne trenowanie modeli uczenia maszynowego. Osiągnięcia te tworzą spójną metodykę wykorzystania XCT, integrującą wszystkie etapy procesu – od akwizycji, przez rekonstrukcję, po zaawansowaną segmentację i analizę geometryczną.

Wspólnym mianownikiem opracowanych metod jest dążenie do powiązania wyników pomiarowych z referencyjną skalą pomiarową poprzez kalibrację systemów zgodnie z wytycznymi **VDI/VDE 2630-1.3**¹. Standard ten umożliwia wyznaczenie błędu granicznego (**MPE**) dla systemów współrzędnościowych wyposażonych w sensor XCT, co w praktyce zapewnia kontrolę poprawności odwzorowania skali (powiększenia). Należy jednak zauważyć,

¹ VDI/VDE 2630 Blatt 1.3:2011-12. *Computed tomography in dimensional measurement – Guideline for the application of DIN EN ISO 10360 for coordinate measuring machines with CT-sensors*. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2011.

że procedura wyznaczania zadaniowej niepewności pomiaru oraz oceny przydatności procesu (*process suitability*) zgodnie z wytycznymi **VDI/VDE 2630-2.1**², choć fundamentalna z punktu widzenia metrologii, jest trudna do rutynowego stosowania w dynamicznym środowisku badawczym. Wynika to z konieczności stosowania dedykowanych wzorców referencyjnych przy każdej zmianie konfiguracji procesu pomiarowego. Z tego względu kluczowe staje się opracowanie możliwie uniwersalnych procedur doboru parametrów pomiaru, w maksymalnym stopniu niezależnych od badanego obiektu i konkretnego systemu pomiarowego. Pierwsze elementy takiego podejścia zostały przeze mnie zaimplementowane w przedstawionych osiągnięciach.

Synteza doświadczeń wynikających z [OP] prowadzi do wniosku, że obecne podejścia normalizacyjne (m.in. seria VDI/VDE 2630) koncentrują się przede wszystkim na parametrach dokładności wymiarowej systemu (MPE). W ograniczonym stopniu obejmują one natomiast ocenę jakości etapów specyficznych dla XCT, które determinują precyzję odtwarzania granicy materiałowej – w szczególności rekonstrukcji i segmentacji. Tymczasem literatura przedmiotu (m.in. Dewulf³ i in.) wskazuje na konieczność wielowarstwowej analizy czynników wpływających na wynik pomiaru, rozdzielając wpływy sprzętowe, środowiskowe oraz decyzje operatora związane z przetwarzaniem danych. Przyjęta przeze mnie perspektywa procesowa umożliwia analizę jakości i niepewności nie tylko na poziomie wyniku końcowego, lecz także na etapie poszczególnych ogniw łańcucha pomiarowego oraz występujących pomiędzy nimi sprzężeń.

4.4. Hierarchiczne podejście do jakości w XCT – od niepewności zadaniowej do spójnego modelu procesu

Ograniczenia podejść normatywnych, koncentrujących się na parametrach systemowych, oraz praktyczna trudność wyznaczania zadaniowej niepewności pomiaru w warunkach dużej zmienności czynników pomiarowych wskazują na konieczność przyjęcia ujęcia procesowego. Ujęcie to umożliwia dekompozycję łańcucha XCT (akwizycja – rekonstrukcja – segmentacja – analiza) oraz identyfikację udziału poszczególnych etapów w całkowitej odchyłce wyniku, co z

² VDI/VDE 2630 Blatt 2.1:2015-06. Computed tomography in dimensional measurement – Determination of the uncertainty of measurement and the test process suitability of coordinate measurement systems with CT sensors. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2015.

³ Dewulf, W.; Bosse, H.; Carmignato, S.; Leach, R. *Advances in the metrological traceability and performance of X-ray computed tomography*. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 71(2), 2022, 693–716. DOI: 10.1016/j.cirp.2022.05.001.

kolei pozwala na ich celową i ukierunkowaną optymalizację. W tym celu sformułowalem koncepcję **hierarchicznego modelu procesu XCT** jako struktury trójpoziomowej (Rys. 1):

- **Warstwa metod:** porządkuje zdefiniowane procedury realizowane na poszczególnych etapach procesu oraz przypisane im miary jakości i porównywalności danych.
- **Warstwa aplikacji:** wiąże te procedury z kontekstem materiałowym oraz celem pomiaru, w tym z konkretnymi wymaganiami metrologicznymi (tolerancje, kryteria akceptacji).
- **Warstwa strategii:** obejmuje autorskie protokoły decyzyjne integrujące metody w powtarzalny schemat postępowania (dobór – kryteria – iteracja). Celem tej warstwy jest stabilizacja wyników i minimalizacja odchyłek w zadanej aplikacji.

W tak zdefiniowanej strukturze kontrola jakości wykracza poza aspekt systemowy (MPE). Obejmuje ona aktywną kontrolę etapów determinujących **lokalizację granicy materiałowej** – od planowania akwizycji (widmo, filtracja, geometria), przez stabilizację segmentacji, aż po reguły zapewniające porównywalność danych (spójne ROI, rejestracja). Proponowany model stanowi rozwinięcie dwóch komplementarnych paradygmatów metrologii współrzędnościowej:

- Ujęcia proceduralno-normatywnego⁴: opartego na testach odniesienia oraz parametrach systemowych (odniesienie globalne).
- Ujęcia punktowego⁵: koncentrującego się na lokalnej niepewności odtwarzania punktu pomiarowego (np. elipsoida niepewności).

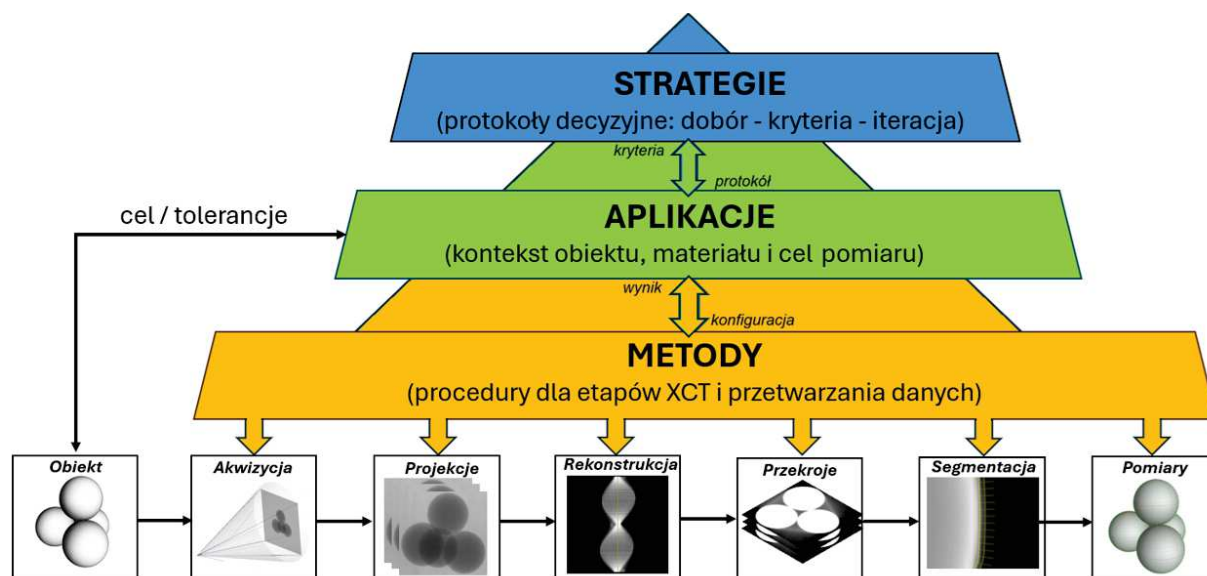
W tomografii komputerowej XCT, w której położenie punktów powierzchni jest pochodną procesów cyfrowych, takich jak rekonstrukcja i segmentacja, oba ujęcia muszą się przenikać. Pierwsze z nich zapewnia poprawność odwzorowania skali, drugie natomiast umożliwia izolację wkładów procesowych w bilansie niepewności.

Przyjęty model hierarchiczny stanowi ramę porządkującą dla całego **cyklu publikacji A1–A8**. W publikacjach tych wykazuję, w jaki sposób usystematyzowana kontrola procesu akwizycji i postprocessingu danych pomiarowych przekłada się na realizację celów w zróżnicowanych aplikacjach. Punktem kulminacyjnym tego podejścia jest sformułowanie **strategii materiałowo-**

⁴ Weckenmann, A. (Hrsg.). *Koordinatenmesstechnik: Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen*. 2., vollständig überarb. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2012. ISBN (print): 978-3-446-40739-8; eISBN: 978-3-446-42947-5. DOI: 10.3139/9783446429475.

⁵ Śladek, J. A. *Coordinate Metrology: Accuracy of Systems and Measurements*. Berlin–Heidelberg: Springer, 2016. (Springer Tracts in Mechanical Engineering). DOI: 10.1007/978-3-662-48465-4. ISBN (print): 978-3-662-48463-0.

widmowej [A8], w której decyzje dotyczące parametrów średniej energii widma są bezpośrednio powiązane z właściwościami materiałowymi obiektu oraz dążeniem do minimalizacji odchylek wymiarowych.



Rys. 1 Hierarchiczny model procesu technicznej tomografii komputerowej XCT.

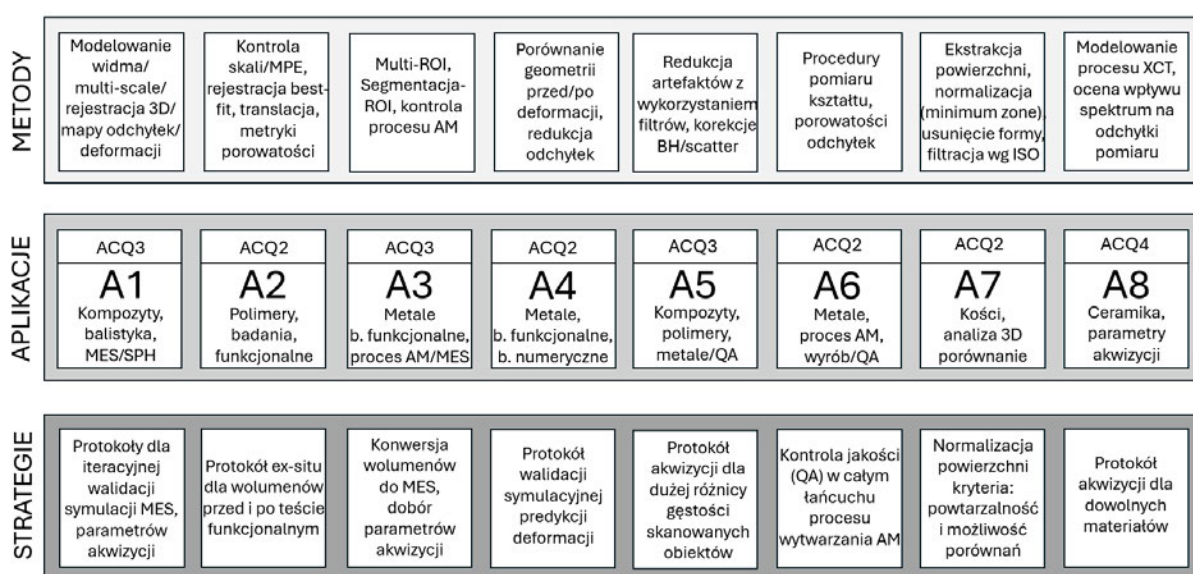
4.5. Struktura i zakres cyklu publikacji naukowych [ON] na tle hierarchicznego modelu pomiarów XCT

Cykl publikacji [A1–A8] stanowi spójny ciąg prac, w których techniczna tomografia komputerowa (XCT) traktowana jest nie jako technika obrazowania, lecz jako zaawansowany proces pomiarowy. Proces ten wymaga świadomego doboru procedur, obiektywnych kryteriów jakości oraz precyzyjnie zdefiniowanych reguł decyzyjnych. Na rysunku 2 zestawiono dorobek cyklu na tle zaproponowanego wcześniej (rys.1) modelu hierarchicznego (metody–aplikacje–strategie).

Klasyfikacja poziomów formalizacji akwizycji (ACQ): Kluczowym elementem spajającym cykl jest autorska klasyfikacja poziomów formalizacji doboru parametrów akwizycji (ACQ1–ACQ4). Została ona wprowadzona, w celu ujednolicenia sposobu raportowania ustawień skanowania oraz zapewnienia odtwarzalności wyników – aspektu często pomijanego w literaturze przedmiotu.

- **ACQ1 (Procedura empiryczna):** Ustawienia oparte na intuicji operatora lub ogólnych zaleceniach producenta, bez jawnie zdefiniowanych kryteriów jakościowych.

- **ACQ2 (Odniesienie systemowe):** Minimalny poziom formalizacji metrycznej; obejmuje korekcję skali oraz kontrolę poprawności odwzorowania (np. weryfikacja błędu granicznego MPE). Zapewnia porównywalność wyników w czasie.
- **ACQ3 (Dobór dedykowany klasie obiektu):** Parametry dobierane na podstawie jawnych kryteriów jakości danych (np. współczynników CNR, SNR oraz minimalizacji konkretnych artefaktów).
- **ACQ4 (Uogólniona procedura fizyczna):** Najwyższy poziom formalizacji; dobór parametrów oparty na regułach fizycznych (widmo–tłumienie–transmisja). Pozwala na transfer procedur pomiarowych pomiędzy różnymi systemami XCT oraz klasami materiałów.



Rys. 2 Hierarchiczny opis procesu XCT w cyklu publikacji A1–A8: metody–aplikacje–strategie oraz przypisane im poziomy formalizacji doboru parametrów akwizycji (ACQ2–ACQ4).

Logika rozkładu publikacji w cyklu: Rozkład poziomów ACQ w przedstawionych pracach nie ma charakteru chronologicznego, lecz wynika z wymagań stawianych przez konkretne zadania badawcze:

- **A2, A4, A6, A7 (Poziom ACQ2):** prace skoncentrowane na stabilności metrycznej oraz porównywalności wyników (np. analizy *pre/post*), w których nadrzędnym celem była kontrola skali.
- **A1, A3, A5 (Poziom ACQ3):** prace wymagające opracowania specyficznych metod dla materiałów trudnych, takich jak materiały: o niskim kontraście faz (aramid/żywica [A1]), wysokiej gęstości (Inconel 718 [A3]) czy dużej różnicy gęstości faz (metal–polimer [A5]).

W tym przypadku kluczowe było świadome zarządzanie kompromisem pomiędzy transmisją promieniowania przez obiekt a rozdzielczością pomiaru.

- **A8 (Poziom ACQ4):** praca stanowiąca kulminację cyklu, wprowadzająca **strategię materiałowo-widmową**, w której energia widma jest bezpośrednio powiązana z właściwościami tłumienia obiektu w celu minimalizacji błędów lokalizacji granicy materiałowej. Jest to autorska próba uogólnienia doboru parametrów w formie reguły przenośnej, wypełniająca istotną lukę w obowiązujących wytycznych metrologicznych.

4.6. Szczegółowy opis cyklu publikacji

4.6.1. [A1] X-ray computed tomography for the development of ballistic composite, Materials. 2020, vol. 13, nr 23, art. 5566, s. 1-19. MNiSW: 140, IF: 3.6.

Problem i cel pracy

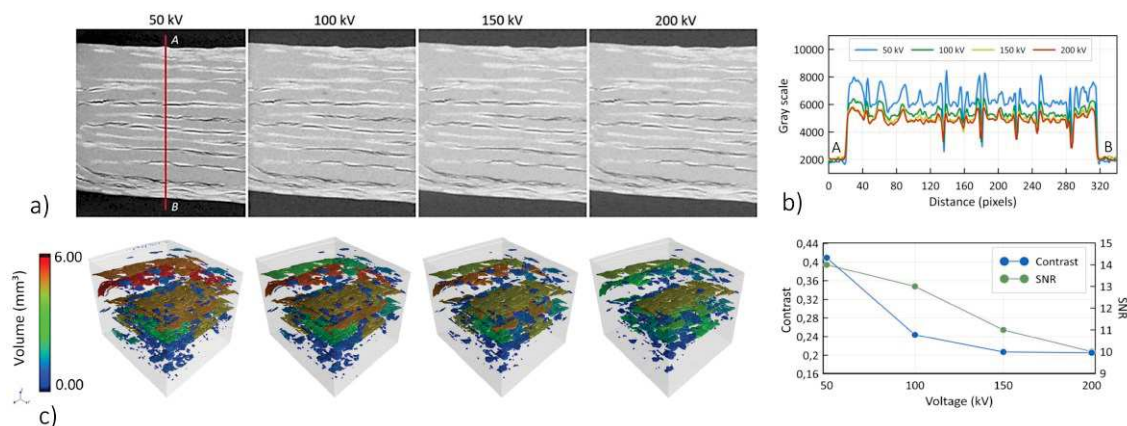
W pracy [A1] rozwiązałem praktyczny problem walidacji symulacji zjawisk balistycznych w kompozytach PMC, polegający na braku powtarzalnej procedury, która pozwalałaby bezpośrednio porównać wyniki obliczeń numerycznych z rzeczywistą geometrią oraz uszkodzeniami zarejestrowanymi po teście. W dostępnych podejściach porównanie wyników symulacji z danymi XCT bywa ograniczane do oceny jakościowej lub do analizy wybranych przekrojów, co utrudnia obiektywną kalibrację modeli numerycznych. Zaproponowałem strategię, w której dane XCT są wykorzystywane: (i) do budowy modeli numerycznych w skali mikro (RVE i homogenizacja) oraz (ii) do walidacji wyników symulacji MES/SPH poprzez dopasowanie geometrii w jednym układzie odniesienia oraz analizę map odchyłek powierzchniowych po teście balistycznym.

Mój wkład w powstanie pracy w warstwie metod obejmował:

- Wykazałem ilościowy wpływ napięcia przyspieszającego lampy rentgenowskiej na kontrast rekonstrukcji, stosunek sygnału do szumu SNR oraz na wyznaczaną porowatość, rozumianą jako udział objętościowy porów, w analizie 3D.

Rysunek 3 przedstawia wpływ napięcia lampy (50–200 kV) na jakość i informacyjność danych XCT dla kompozytu PMC. W części (a) zestawiono przekroje 2D dla kolejnych napięć, a linia A–B definiuje odcinek, wzdłuż którego wyznaczono profil poziomów szarości (b, górny wykres), stanowiący podstawę do obliczenia kontrastu oraz SNR (b, dolny wykres) w funkcji napięcia. W części (c) pokazano trójwymiarową analizę porowatości: rekonstrukcje 3D dla

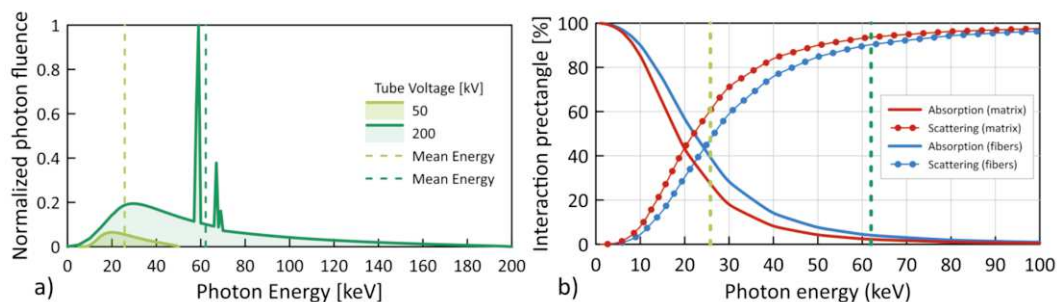
różnych napięć wraz ze skalą barwną odpowiadającą objętości porów, co ilustruje zmianę (spadek) wyznaczanej porowatości wraz ze wzrostem napięcia.



Rys. 3 Wyniki eksperymentu dla zmiennych napięć przyspieszających w postaci a) przekrojów 2D, b) wykresów dla zmian skali szarości, kontrastu i SNR, c) widoków porowatości w 3D [A1].

- Zbudowałem model widma promieniowania dla różnych wartości napięcia lampy, wyznaczyłem odpowiadające im energie średnie oraz powiązałem je z procentowym udziałem składowych tłumienia promieniowania – efektu fotoelektrycznego i rozpraszania Comptona – wykazując większą różnicę między tymi składowymi dla niższych napięć, co wyjaśnia obserwowany wzrost kontrastu rekonstrukcji.

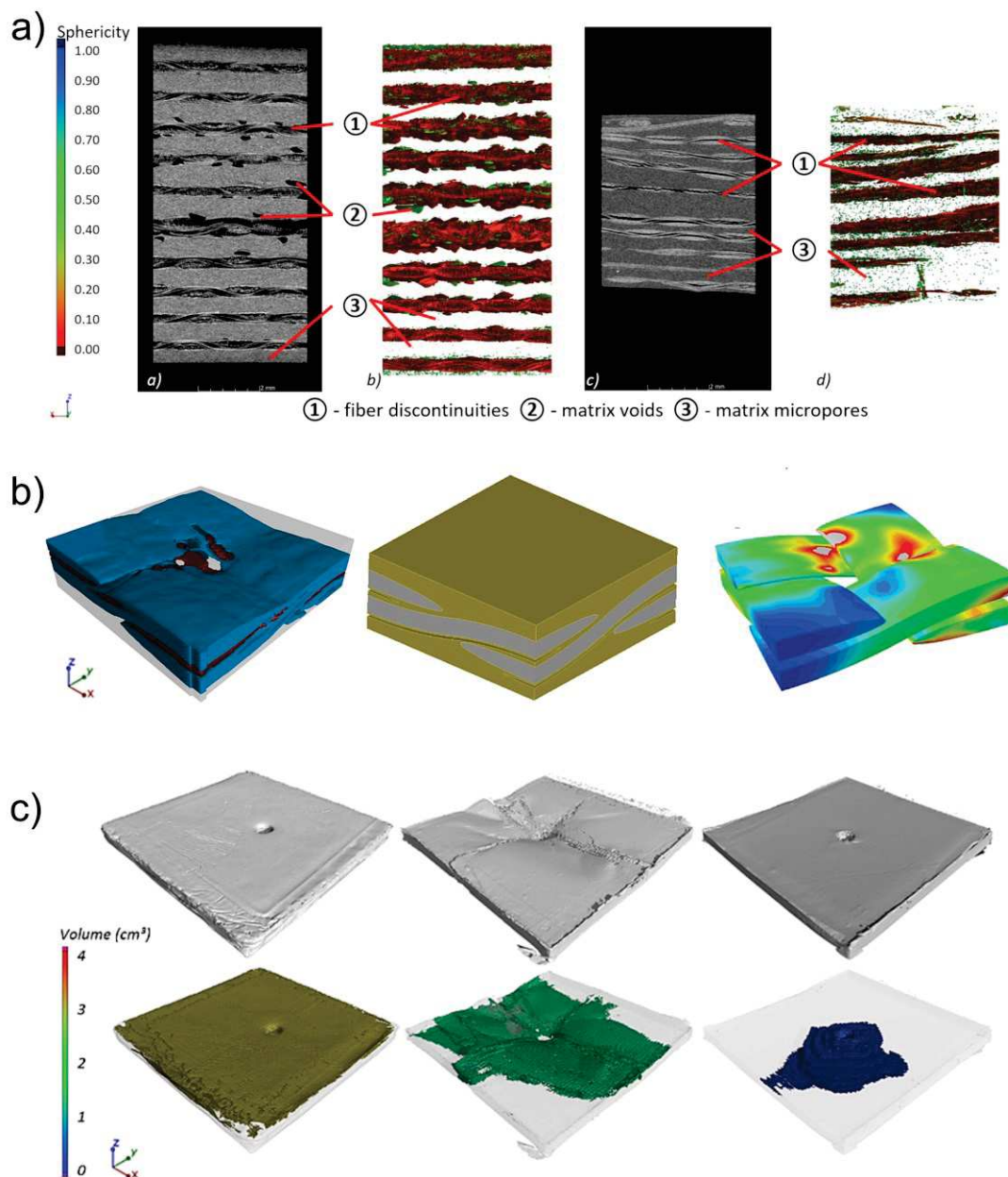
Rysunek 4 przedstawia interpretację widmową wpływu napięcia lampy na kontrast rekonstrukcji w kompozytach PMC. W części (a) pokazałem zamodelowane widma promieniowania (*SpekCalc*) dla dwóch skrajnych napięć (50 i 200 kV) wraz z zaznaczonymi średnimi energiami widma, co ilustruje przesunięcie rozkładu energii fotonów wraz ze wzrostem napięcia. W części (b) przedstawiony został procentowy udział dominujących mechanizmów oddziaływania promieniowania z materiałem – pochłaniania fotoelektrycznego i rozpraszania Comptona – osobno dla faz kompozytu (matrycy i włókien) w funkcji energii fotonów; linie pionowe odpowiadają średnim energiom z (a).



Rys. 4 Wpływ spektrum promieniowania na średnie energie dla napięć lampy 50 i 200 kV a) i procentowy udział pochłaniania (efekt fotoelektryczny) oraz rozpraszania (rozpraszanie Comptona) w matrycy PP i włóknach aramidowych. Linie pionowe oznaczają średnie energie widma [A1].

Zestawienie (a–b) pokazuje, że dla niższych napięć (niższych średnich energii) różnice udziału efektu fotoelektrycznego i rozpraszania Comptona pomiędzy fazami są większe, co przekłada się na lepszą separację faz i obserwowany wzrost kontrastu rekonstrukcji.

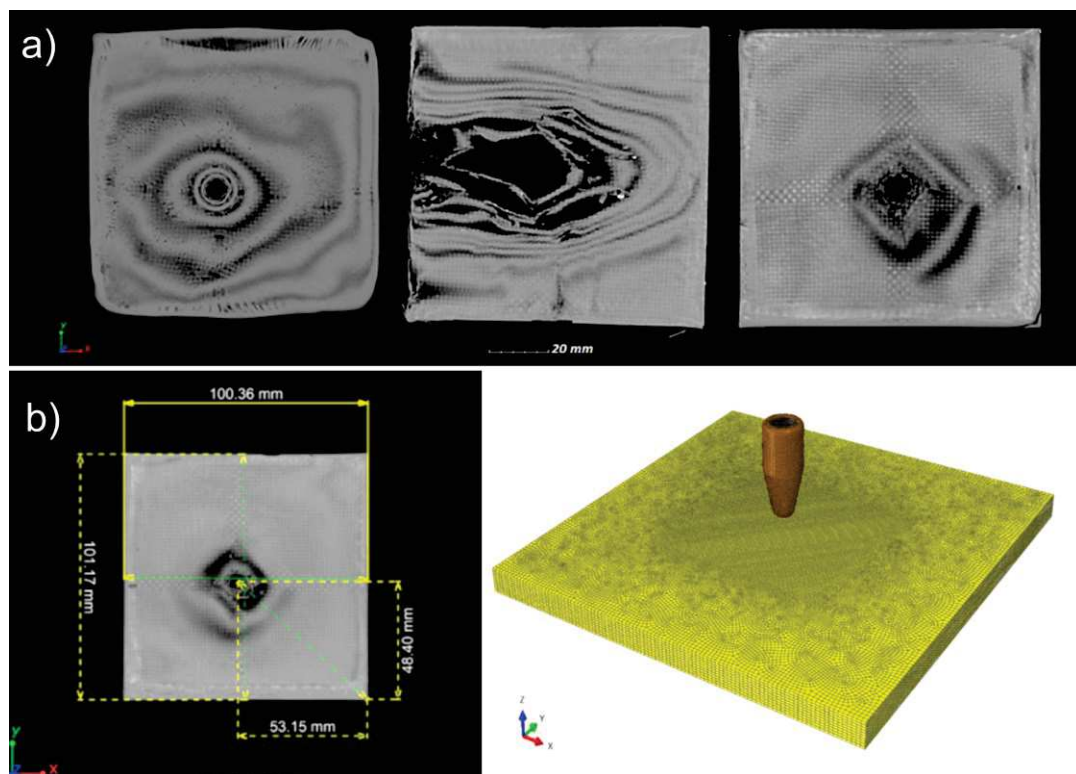
- Opracowałem wieloskalową (*multi-scale*) procedurę pozyskiwania i rekonstrukcji danych XCT, obejmującą skany mikro (woksel $\sim 10\ \mu\text{m}$) do identyfikacji reprezentatywnego elementu objętościowego (RVE) oraz homogenizacji właściwości materiału, a także skany w skali makro (woksel $\sim 135\ \mu\text{m}$) do analizy geometrii paneli przed i po teście balistycznym.



Rys. 5 Wewnętrzna struktura kompozytów PMC: (a) widok próbek w mikroskali, (b) przejście od modelu XCT do RVE, (c) widok 2D próbki PP, (d) widok 3D całych paneli w makroskali [A1].

Na rysunku 5 w części (a) przedstawiłem obrazowanie mikro-XCT umożliwiające identyfikację cech mikrostruktury kompozytu istotnych dla budowy RVE, w tym nieciągłości włókien, pustek w matrycy oraz mikroporów (wraz z wizualizacją parametrów ich kształtu, np. sferyczności). Część (b) przedstawia przejście od danych mikro-XCT do modelu obliczeniowego: ekstrakcję reprezentatywnego elementu objętościowego, jego idealizację/rekonstrukcję w postaci modelu geometrycznego oraz wykorzystanie do analiz numerycznych (homogenizacji). W części (c) pokazany został makro-XCT paneli przed i po teście balistycznym oraz rekonstrukcję/segmentację obszarów uszkodzeń w skali całej próbki, co stanowi podstawę do ilościowej oceny zmian geometrii i porównania z wynikami symulacji.

- Wprowadziłem procedurę mapowania warunków brzegowych eksperymentu balistycznego do modelu numerycznego, integrując geometrię płytek wyznaczoną na podstawie danych XCT oraz współrzędne trajektorii i punktu uderzenia pocisku, aby wiarygodnie odtworzyć rzeczywistą konfigurację eksperymentu oraz umożliwić bezpośrednie porównanie wyników symulacji z geometrią stanu obiektu po eksperymencie w tym samym układzie odniesienia.



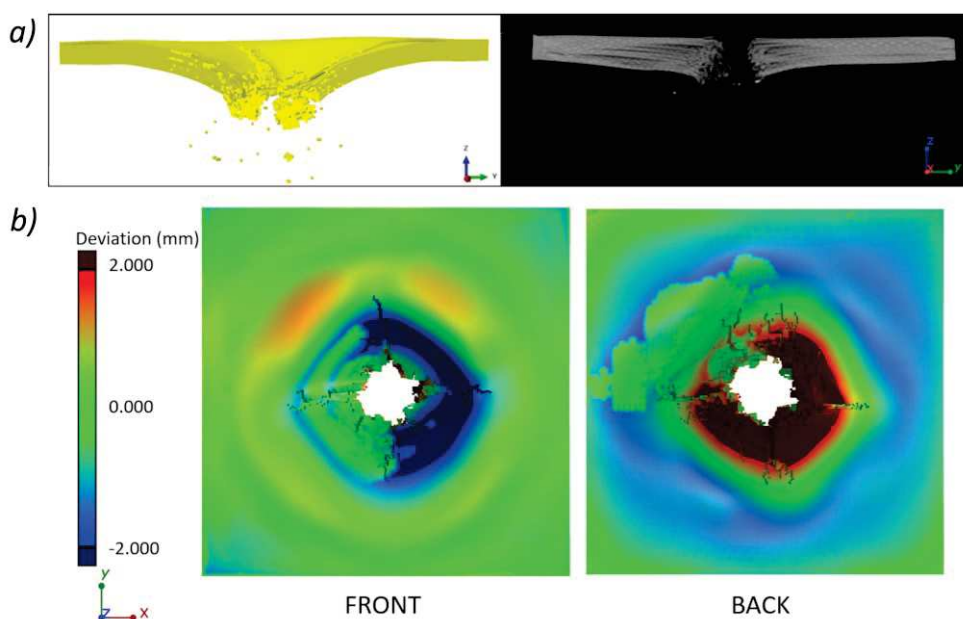
Rys. 6 Mapowanie warunków eksperymentu do symulacji numerycznej a) widok paneli po przebicciu pociskiem, b) zwymiarowany model wolumetryczny i odpowiadający mu model numeryczny [A1].

W części (a) na rysunku 6 przedstawiłem obrazy XCT paneli po teście balistycznym, które stanowią podstawę do odtworzenia geometrii płytek oraz lokalizacji strefy uszkodzeń. Część (b) pokazuje mapowanie konfiguracji testu do modelu numerycznego: wyznaczenie punktu

uderzenia i trajektorii pocisku w układzie współrzędnych próbki oraz ich odwzorowanie w modelu 3D. Takie odwzorowanie umożliwia zdefiniowanie spójnych warunków brzegowych w symulacji oraz bezpośrednią, ilościową walidację wyników obliczeń względem geometrii zarejestrowanej w danych XCT.

- Zaproponowałem ilościową procedurę oceny deformacji i uszkodzeń w eksperymencie oraz symulacji, polegającą na dopasowaniu modeli w jednym układzie współrzędnych oraz analizie map odchyłek 3D jako narzędzia porównania wyników po teście.

Rysunek 7 ilustruje opracowaną procedurę ilościowej walidacji deformacji i uszkodzeń poprzez bezpośrednie porównanie geometrii uzyskanej z symulacji numerycznej oraz z danych XCT po teście balistycznym. W części (a) zestawilem zdeformowaną geometrię panelu z modelu numerycznego (po lewej) oraz odpowiadający jej przekrój/obraz uzyskany z rekonstrukcji XCT (po prawej), co umożliwia weryfikację kształtu strefy zniszczenia i ugięcia.



Rys. 7 Ilościowa ocena geometrii eksperyment-symulacja, a) wprowadzenie tego samego układu współrzędnych, b) porównanie geometrii w postaci mapy kolorów [A1].

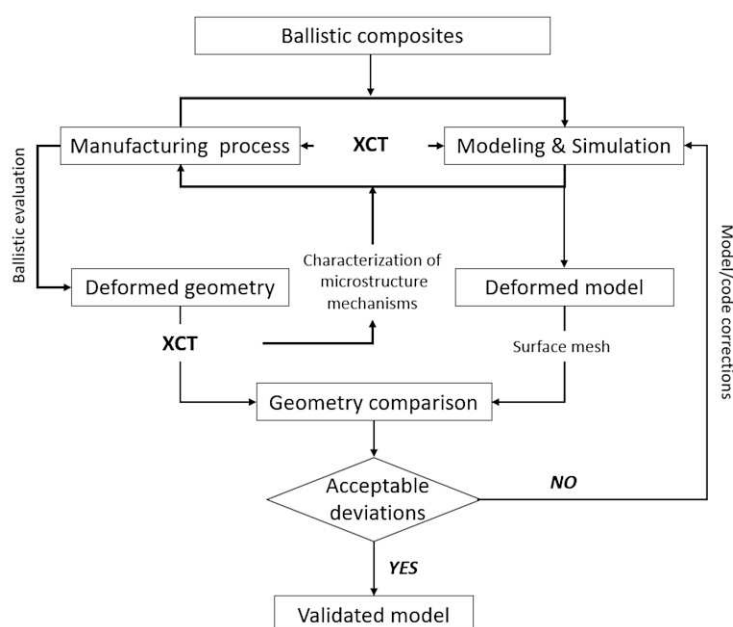
W części (b) przedstawione zostały mapy odchyłek na powierzchniach 3D, wyznaczone po dopasowaniu modeli w jednym układzie współrzędnych; rozkład odchyłek stanowi podstawę do ilościowej oceny zgodności eksperyment–symulacja oraz identyfikacji obszarów wymagających korekty modelu.

Mój wkład w powstanie pracy w warstwie strategii:

- Opracowałem iteracyjny protokół walidacji symulacji MES/SPH, w którym dane XCT z różnych poziomów rozdzielczości (mikrostruktura i geometria makroskopowa) są

integrowane z modelem numerycznym, a zgodność deformacji i uszkodzeń oceniana jest ilościowo poprzez dopasowanie modeli w jednym układzie współrzędnych oraz analizę map odchyłek po teście eksperymentalnym i symulacyjnym.

Rysunek 8 przedstawia iteracyjny schemat walidacji modeli numerycznych kompozytów balistycznych, w którym XCT łączy etap eksperymentalny z modelowaniem i symulacją. Dane XCT dostarczają zarówno geometrii zdeformowanej po teście (*deformed geometry*), jak i informacji o mechanizmach mikrostruktury, które wspierają parametryzację modelu. Wynik symulacji (*deformed model/mesh*) jest porównywany z geometrią pozyskaną metodą XCT; jeśli odchyłki przekraczają poziom akceptowalny, uruchamiana jest iteracyjna pętla korekt modelu/kodu obliczeniowego, prowadzona do momentu uzyskania wymaganej dokładności modelu.



Rys. 8 Iteracyjna architektura walidacji modeli MES/SPH z wykorzystaniem danych XCT: pętla eksperyment–symulacja–porównanie geometrii z doбором kryterium akceptowalnych odchyłek [A1].

Poziom formalizacji akwizycji (ACQ):

W publikacji [A1] zrealizowałem dobór parametrów akwizycji na poziomie **ACQ3**: ustawienia skanowania uzasadniłem jawnymi kryteriami jakości danych na podstawie wyznaczonego wpływu napięcia na kontrast/SNR oraz wymaganiami aplikacyjnymi związanymi z zapewnieniem odpowiedniej transmisji dla całego panelu, zamiast opierać je na empirycznych „ustawieniach wynikających z doświadczenia operatora”.

Efekt i znaczenie mojego wkładu w publikację [A1]:

Opracowana strategia przekształca tomografię komputerową (XCT) z narzędzia obrazowania jakościowego w ilościowy system walidacji symulacji numerycznych. Dzięki zastosowaniu rejestracji modeli metodą *best-fit* w spójnym układzie współrzędnych oraz analizie map odchyłek 3D, wyeliminowano subiektywizm towarzyszący porównaniom opartym na przekrojach. Uzyskane metryki geometryczne stanowią obiektywną podstawę do iteracyjnej kalibracji parametrów modeli MES/SPH w zadaniach balistycznych, co istotnie zwiększa ich wiarygodność predykcyjną.

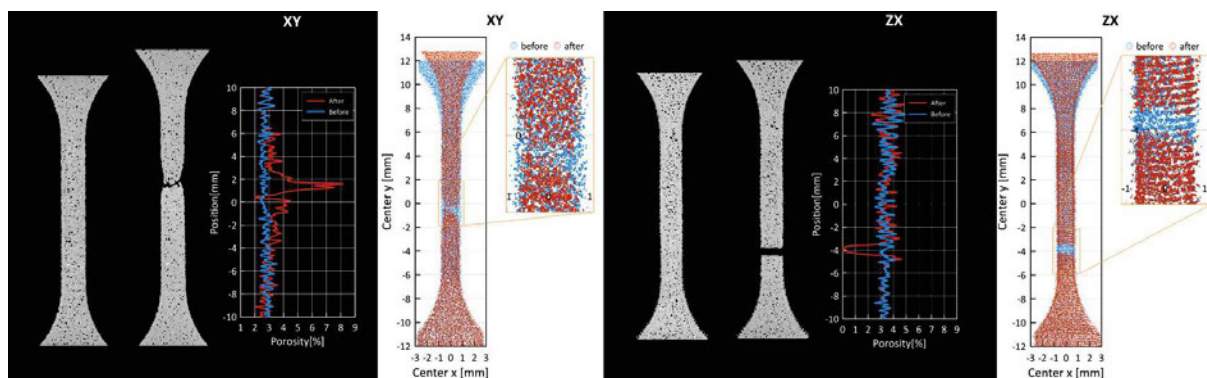
4.6.2. [A2] Investigation of porosity behavior in SLS polyamide-12 samples using ex-situ X-ray computed tomography, Materials Science-Poland. 2021, vol. 39, nr 3, s. 436-445. MNiSW: 70, IF: 1.6.

Problem i cel pracy

W pracy [A2] rozwiązałem problem wiarygodnego, ilościowego śledzenia zmian porowatości w próbkach PA12 wytwarzanych techniką przyrostową (PBF/SLS) podczas testu rozciągania, w podejściu *ex situ*. Kluczowe było nie tylko określenie porowatości, przed i po teście statycznego rozciągania z wykorzystaniem zewnętrznej maszyny wytrzymałościowej, ale przygotowanie procedury ilościowego porównania geometrii w tym samym układzie odniesienia gwarantującym nie tylko możliwość obserwacji ewolucji porów ale również ich przemieszczenia w przestrzeni pomiarowej.

Mój wkład w powstanie pracy w warstwie metod:

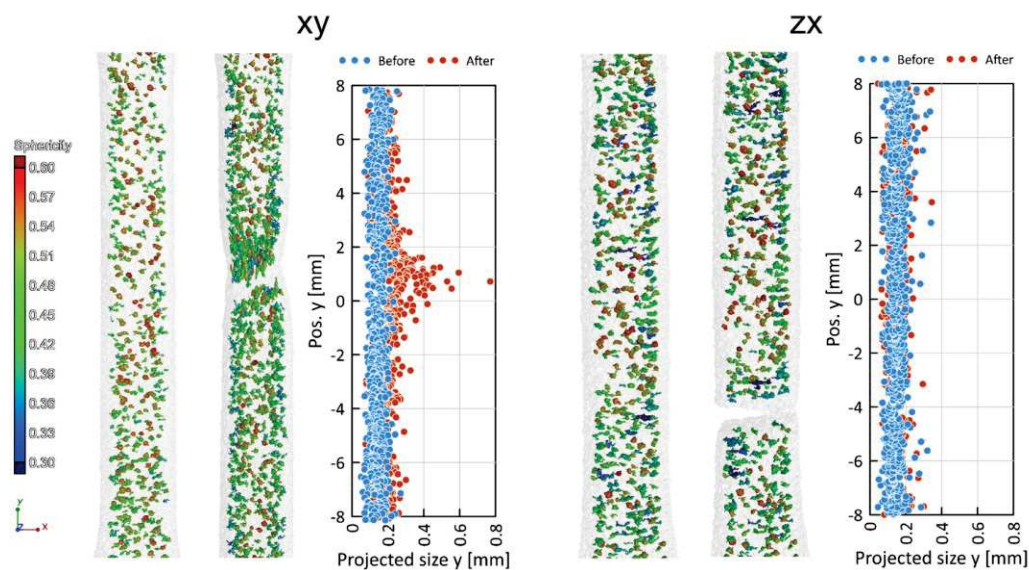
- Opracowałem procedurę rejestracji (dopasowania) geometrii próbek przed i po teście wytrzymałościowym, obejmującą dopasowanie modeli w jednym układzie współrzędnych oraz kontrolowaną translację wybranej części próbki o wartość wydłużenia bezwzględnego, co zapewnia reprodukowalność pomimo zerwania i występowania lokalnych przemieszczeń.



Rys. 9 Wynik rejestracji geometrii próbek uzyskany w procedurze *ex situ* XCT z przedstawionymi możliwościami prezentacji wyników dla próbek wytwarzanych w płaszczyznach XY i ZX [A2]

Rysunek 9 przedstawia wynik strategii *ex situ* XCT dla próbek PA12 wytworzonych w dwóch orientacjach (XY i ZX), obejmującej porównanie stanu przed i po teście rozciągania w tym samym układzie współrzędnych. Dla każdej orientacji pokazane zostały rekonstrukcje 3D próbki przed i po teście oraz odpowiadający im profil porowatości wzdłuż osi próbki (*porosity* w funkcji położenia), co umożliwia bezpośrednią ocenę zmian lokalnych w obszarze zniszczenia. Dodatkowo przedstawiłem mapy położenia centrów porów (projekcja przestrzenna/rozkład centroidów) dla stanu przed (*before*) i po (*after*) teście, z powiększeniem obszaru przewężenia/zerwania, co ilustruje wpływ rejestracji *pre/post* na możliwość porównywania lokalnej koncentracji defektów mimo przemieszczeń i zerwania próbki. Kolory odpowiadają stanowi przed testem (niebieski) i po teście (czerwony).

- Zdefiniowałem zestaw metryk porowatości do porównań *ex situ* przed i po teście (porowatość objętościowa, liczba porów, rozkład średnic/wielkości, sferyczność) oraz jednolity sposób raportowania zmian tych parametrów wzdłuż osi próbki.



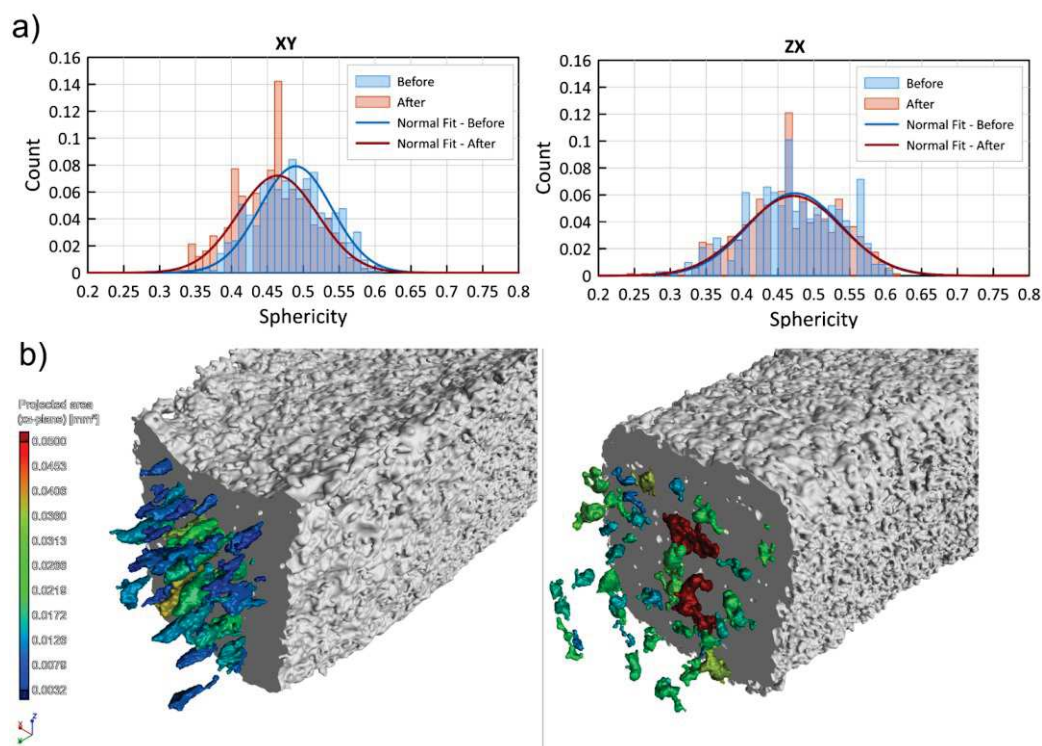
Rys. 10 Przykład prezentacji wyników w badaniu *ex situ* przedstawiający rozkład sferyczności i wielkości porów dla próbek wytwarzanych w płaszczyznach XY i ZX [A2].

Rysunek 10 przedstawia przestrzenną charakterystykę porów w próbkach PA12 (SLS) w orientacjach XY i ZX, z rozróżnieniem stanu przed (*Before*) i po (*After*) teście rozciągania. Wizualizacje 3D pokazują rozkład porów w objętości próbki, przy czym kolor odpowiada sferyczności porów (skala po lewej). Wykresy punktowe zestawiają dla każdego poru jego położenie wzdłuż osi próbki (Pos. y [mm]) oraz jego wielkość wyrażoną jako „*projected size*” [mm], umożliwiając porównanie zmian rozkładu wielkości porów oraz ich koncentracji w określonych strefach próbki. Zestawienie projekcji XY i ZX pokazuje, w jaki sposób metryki

porowatości (wielkość i sferyczność porów oraz ich lokalizacja) mogą być raportowane w sposób porównywalny w analizie *ex situ*.

- Opracowałem procedurę interpretacji wyników analizy porowatości, w której pory największe (o średnicach > 20 wokseli, tj. $> 200 \mu\text{m}$) analizowane są oddzielnie, tak aby wnioski dotyczące zmian kształtu nie były zdominowane przez artefakty dyskretyzacji małych defektów.

W części (a) rys.11 przedstawione zostały histogramy sferyczności porów dla próbek XY i ZX przed oraz po teście, wraz z dopasowaniem rozkładu normalnego, co umożliwia porównanie zmian kształtu porów w ujęciu statystycznym. W części (b) pokazana została wizualizacja największych porów w analizowanym obszarze, przy czym kolor odpowiada ich wielkości (*projected area*), ilustrując zasadę selekcji defektów o rozmiarach wyraźnie przekraczających granicę rozdzielczości. Zestawienie (a–b) uzasadnia wydzielenie dużych porów jako kroku ograniczającego wpływ dyskretyzacji/segmentacji na interpretację zmian sferyczności.



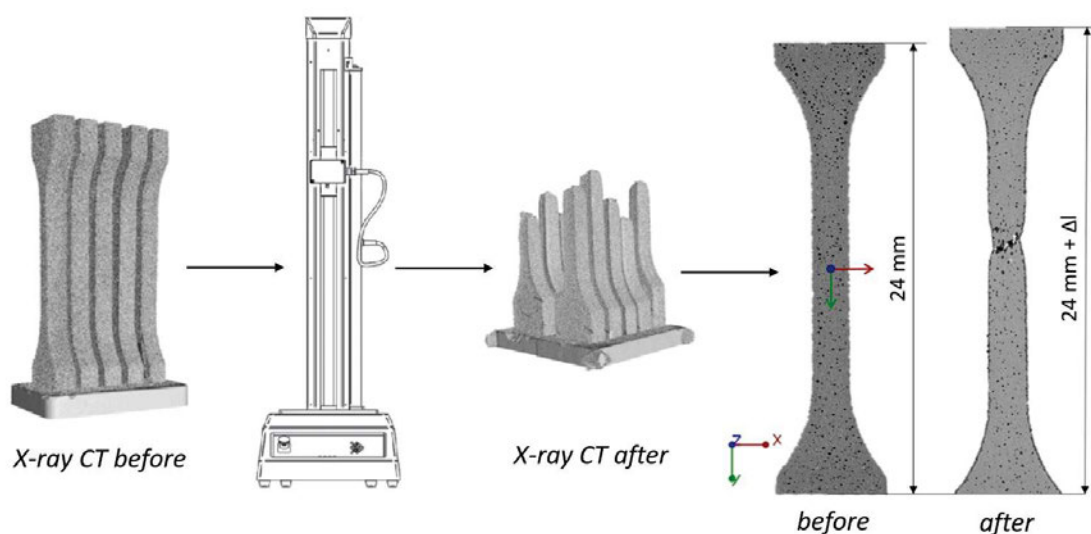
Rys. 11 (a) Rozkłady sferyczności porów w próbkach XY i ZX przed i po teście rozciągania oraz (b) wizualizacja największych porów w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku działania siły w okolicy przełomu [A2].

Mój wkład w powstanie pracy w warstwie strategii:

- Opracowałem protokół rejestracji skanów *ex situ* (*before/after*) do wspólnego układu odniesienia z kompensacją wydłużenia Δl , co umożliwia reprodukowalne porównanie

geometrii i porów oraz jednolite, powtarzalne raportowanie wyników, pomimo zerwania próbki i występowania lokalnych przemieszczeń.

Rysunek 12 przedstawia strategię *ex situ* XCT zastosowaną do próbek PA12: skanowanie próbki przed testem rozciągania, wykonanie próby na maszynie wytrzymałościowej oraz ponowne skanowanie po teście. Po prawej stronie zilustrowano ideę rejestracji modeli „before/after” w tym samym układzie współrzędnych oraz kompensacji wydłużenia próbki przez uwzględnienie przyrostu długości Δl . Taka procedura umożliwia bezpośrednie, lokalne porównywanie geometrii i rozkładu porów w analizie *ex situ*.



Rys. 12 Schemat protokołu *ex situ* XCT: skan XCT próbki przed i po teście rozciągania oraz rejestracja modeli „before/after” z kompensacją wydłużenia Δl [A2].

Poziom formalizacji akwizycji (ACQ)

W publikacji [A2] przyjąłem **ACQ2**: akwizycja pełni rolę odniesienia systemowego i porównywalności metrycznej dla strategii *ex situ* bez optymalizacji ustawień jakości akwizycji dla próbek PA12.

Efekt i znaczenie mojego wkładu w publikację [A2]:

Zaproponowany protokół badawczy przekształca statyczną analizę XCT w narzędzie diagnostyki ewolucji uszkodzeń w ujęciu *ex situ*. Dzięki autorskiej metodzie rejestracji wolumenów z kompensacją wydłużenia Δl , możliwe staje się ilościowe śledzenie kinematyki porów obejmujące ich przemieszczenia oraz zmiany morfologii, bez ograniczeń gabarytowych i sprzętowych charakterystycznych dla kosztownych systemów *in situ*. Wykazałem istotną anizotropię mechanizmów niszczenia w procesie SLS: w orientacji XY zniszczenie ma charakter lokalny i jest skorelowane z gwałtownym przyrostem mikroporowatości w strefie zerwania

(wzrost lokalny do ok. 8%), natomiast w orientacji ZX pory wykazują stabilność, a zniszczenie przebiega poprzez pękanie międzywarstwowe, bez wyraźnej pre-ewolucji defektów.

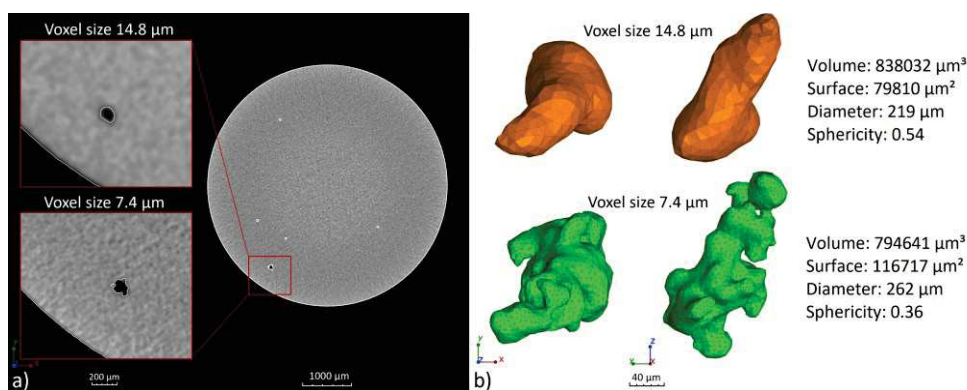
4.6.3. [A3] X-ray Computed Tomography for the ex-situ mechanical testing and simulation of additively manufactured IN718 samples, Additive Manufacturing. 2021, vol. 45, art. 102070. MNiSW: 200, IF: 11.6.

Problem i cel pracy

W publikacji [A3] rozwiązałem problem braku spójnego, ilościowego wykorzystania tomografii komputerowej (XCT) do oceny całego łańcucha procesu wytwarzania przyrostowego (LPBF) dla materiału o wysokiej gęstości (Inconel 718) — od kontroli jakości proszku, przez ocenę porowatości próbek w różnych orientacjach budowy, po analizę zmian geometrii po teście rozciągania oraz przygotowanie danych wejściowych do obliczeń numerycznych MES. Celem pracy było przedstawienie podejścia opartego na XCT do ilościowej oceny procesu oraz zaproponowanie nowej metody walidacji wyników symulacji na podstawie analizy odchyłek geometrii próbki po rozciąganiu.

Mój wkład w powstanie pracy w warstwie metod

- Opracowałem procedurę doboru parametrów akwizycji XCT dla stopu o wysokiej gęstości (Inconel 718), stosując wysokie napięcie lampy przy niskim natężeniu prądu w celu zapewnienia odpowiedniej transmisji oraz ograniczenia wielkości plamki ogniskowania (nieostrości geometrycznej), co umożliwiło rekonstrukcję próbek z wysoką rozdzielczością.

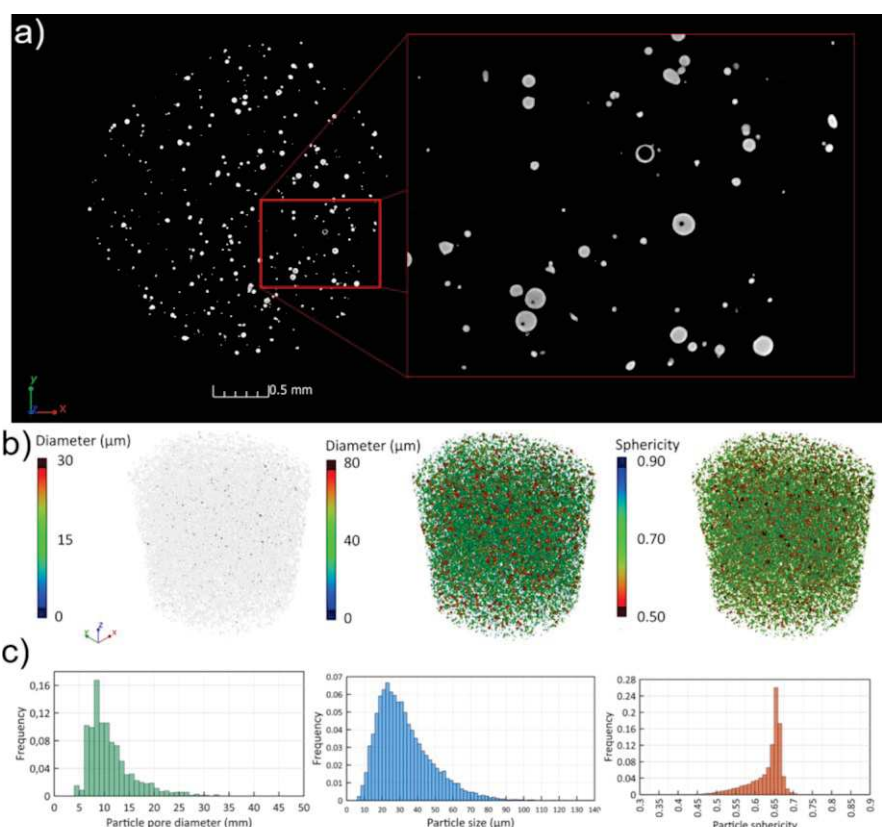


Rys. 13 Wpływ rozdzielczości XCT (woksel 14,8 μm vs 7,4 μm) na detekcję porów dla stopu Inconel 718 (przekroje 2D i modele pojedynczego pora 3D) [A3].

Rysunek 13 przedstawia wpływ rozdzielczości akwizycji na detekcję i odwzorowanie morfologii pojedynczego defektu w stopie Inconel 718. W części (a) pokazany został przekrój 2D tego samego obszaru zrekonstruowany dla dwóch rozdzielczości (woksel 14,8 μm i 7,4 μm), wskazując różnice w wykrywalności i kształcie pora. W części (b) przedstawiono odpowiadające

modele 3D pora oraz porównanie wyznaczonych parametrów geometrycznych (objętość, pole powierzchni, średnica ekwiwalentna i sferyczność), co potwierdza, że zwiększenie rozdzielczości prowadzi do dokładniejszego odwzorowania nieregularnej geometrii defektu i zmiany wynikowych metryk kształtu.

- Wprowadziłem procedurę skanowania XCT materiału wsadowego w postaci proszku, polegającą na unieruchomieniu ziaren w żywicy epoksydowej, co umożliwiło pełną trójwymiarową analizę geometrii cząstek oraz detekcję porów wewnętrznych bez ich kontaktu i przemieszczeń podczas akwizycji.

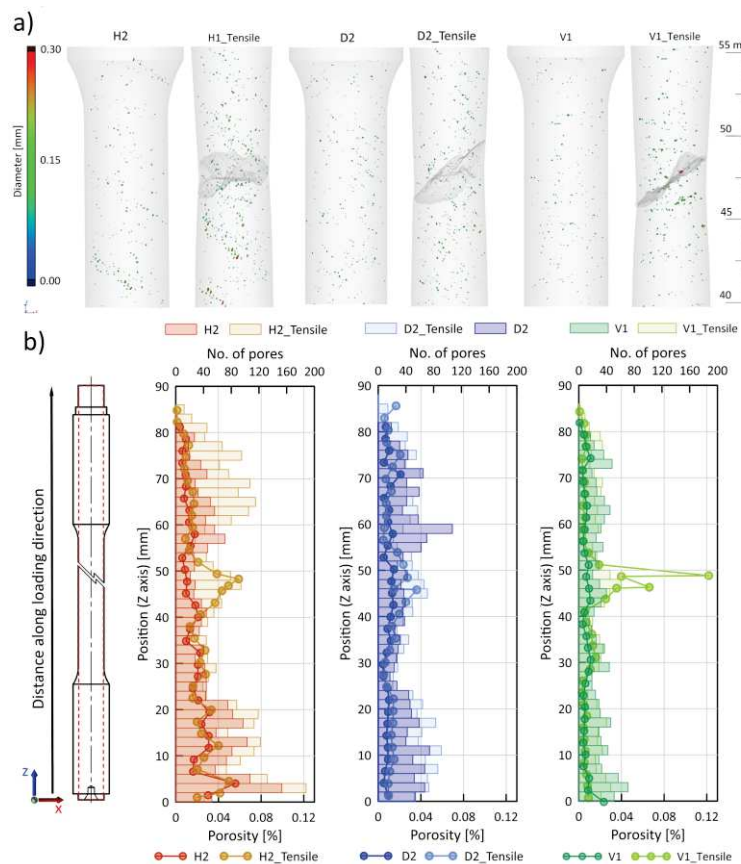


Rys. 14 XCT proszku Inconel 718 unieruchomionego w żywicy epoksydowej: (a) przekrój z widocznymi cząstkami i porami wewnętrznymi, (b) mapy 3D średnic i sferyczności cząstek/porów, (c) rozkłady średnic porów, średnic cząstek i sferyczności [A3].

Rysunek 14 przedstawia opracowaną procedurę tomograficznej charakterystyki proszku Inconel 718, unieruchomionego w żywicy epoksydowej, jako materiału wsadowego procesu LPBF. W części (a) pokazany został przekrój 2D objętości pomiarowej z rozmieszczonymi przestrzennie cząstkami proszku oraz powiększenie wybranego fragmentu, ujawniające zarówno granice cząstek, jak i mikropory występujące wewnątrz niektórych ziaren. Zatopienie proszku w żywicy zapewnia stabilne położenie cząstek oraz zapobiega ich kontaktowi mechanicznemu, co ogranicza ryzyko powstawania artefaktów segmentacji i umożliwia wiarygodne rozdzielanie

sąsiadujących ziaren w analizie trójwymiarowej. W części (b) przedstawiłem wyniki segmentacji i analizy wolumetrycznej w postaci trójwymiarowej obejmujące: rozkład średnic porów wewnętrznych, rozkład średnic cząstek oraz ich sferyczność (kolor odpowiada wartości analizowanej cechy), co umożliwia jednoczesną ocenę jednorodności morfologii proszku oraz występowanie defektów wewnętrznych. W części (c) zestawiałem histogramy odpowiadające analizowanym parametrom, które umożliwiają ilościową ocenę statystyczną proszku (rozkład wielkości porów, rozkład wielkości cząstek i rozkład sferyczności) oraz stanowią dane wejściowe do kontroli jakości materiału wsadowego w kontekście dalszych etapów procesu LPBF.

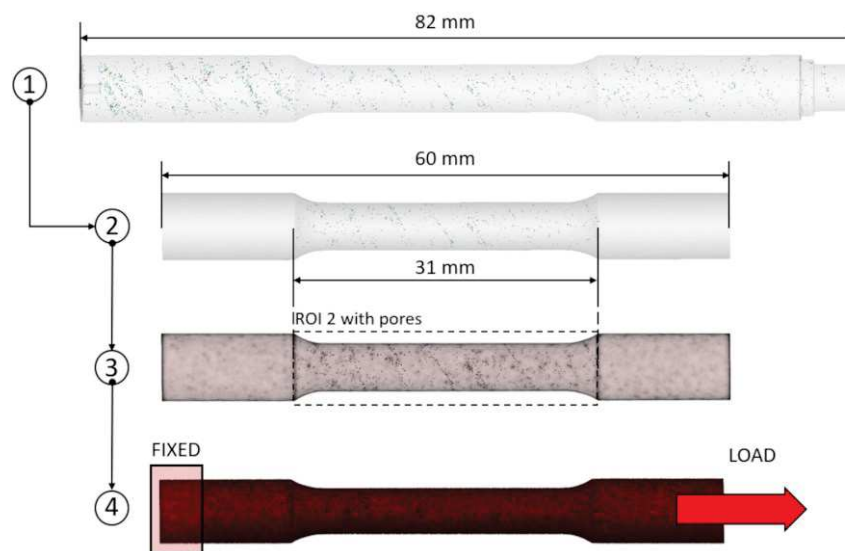
- Zaproponowałem sposób raportowania przestrzennych zmian porowatości w badaniu *ex situ* wzdłuż osi obciążenia, oparty na analizie cylindrycznego regionu zainteresowania (ROI) w osi próbki oraz podziale tego obszaru na subwolumeny. Tak zdefiniowana analiza umożliwiła porównywanie serii próbek w sposób powtarzalny, przy jednoczesnym ograniczeniu wpływu warstwy przypowierzchniowej, krawędzi oraz obróbki powierzchniowej.



Rys. 15 Raportowanie porowatości wzdłuż osi obciążenia: (a) rozkład porów przed/po teście, (b) lokalna porowatość i liczba porów wyznaczone w cylindrycznym ROI podzielonym na subwolumeny [A3].

Rysunek 15 przedstawia opracowaną metodę przestrzennego raportowania porowatości w próbkach IN718 w badaniu *ex situ* przed i po próbie rozciągania dla trzech orientacji budowy (H2, D2, V1). W części (a) pokazany został rozkład porów w objętości próbki wraz z porównaniem stanu przed testem i po teście (*Tensile*), przy czym kolor odpowiada średnicy pora. W części (b) zilustrowano zasadę analizy wzdłuż osi obciążenia: zdefiniowanie cylindrycznego ROI w osi próbki oraz podział na kolejne odcinki (subwolumeny), dla których wyznaczono lokalną porowatość (linie) oraz liczbę porów (słupki) w funkcji położenia. Zestawienie umożliwia bezpośrednie porównanie przestrzennej ewolucji porowatości wzdłuż próbki oraz identyfikację stref o zwiększonym przyroście defektów po obciążeniu.

- Opracowałem metodę konwersji danych wolumetrycznych XCT do siatki elementów skończonych, opartą na doborze regionów zainteresowania (ROI), umożliwiającą budowę modelu MES z rzeczywistą geometrią oraz rzeczywistym rozmieszczeniem porów w sekcji pomiarowej (*gauge section*) próbki.

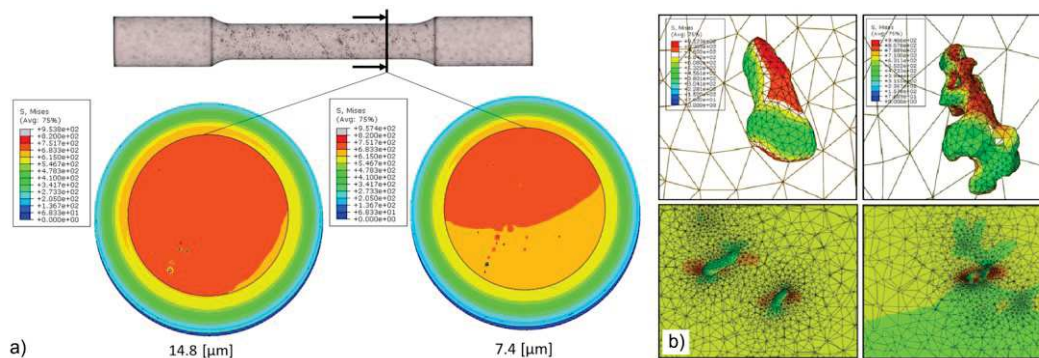


Rys. 16 Przygotowanie danych XCT do symulacji MES: wybór ROI w sekcji pomiarowej (*gauge section*), ekstrakcja porów i budowa modelu z warunkami brzegowymi rozciągania [A3].

Rysunek 16 przedstawia etapy przygotowania danych XCT do symulacji MES z wykorzystaniem ROI: (1) rekonstrukcja pełnej próbki z rozkładem porów, (2) wydzielenie części pomiarowej (*gauge section*) jako ROI o zdefiniowanej długości, (3) ekstrakcja porów w ROI i przygotowanie geometrii wejściowej do siatkowania, (4) definicja warunków brzegowych modelu MES (utwierdzenie i obciążenie rozciągające). Takie podejście pozwala odwzorować rzeczywistą mikrogeometrię porów w strefie krytycznej, ograniczając jednocześnie koszty obliczeń względem modelowania całej próbki.

- Wykazałem wpływ rozdzielczości danych XCT na wyniki symulacji MES, w szczególności na lokalny rozkład naprężeń zredukowanych (von Mises) w otoczeniu porów, wynikający z różnic w odwzorowaniu geometrii defektów.

Rysunek 17 przedstawia wpływ rozdzielczości danych XCT na wyniki symulacji numerycznej MES, ze szczególnym uwzględnieniem lokalnych koncentracji naprężeń w otoczeniu porów. W części (a) zestawiałem wyniki symulacji rozciągania dla modeli zbudowanych na podstawie dwóch poziomów rozdzielczości (woksel 14,8 μm i 7,4 μm), pokazując mapy naprężeń zredukowanych (von Mises) w przekroju próbki w obszarze części pomiarowej. Porównanie ujawnia, że zmiana rozdzielczości danych wejściowych wpływa na szczegółowość odwzorowania defektów oraz na rozkład pól naprężenia, w tym na lokalizację oraz intensywność stref podwyższonych naprężeń.

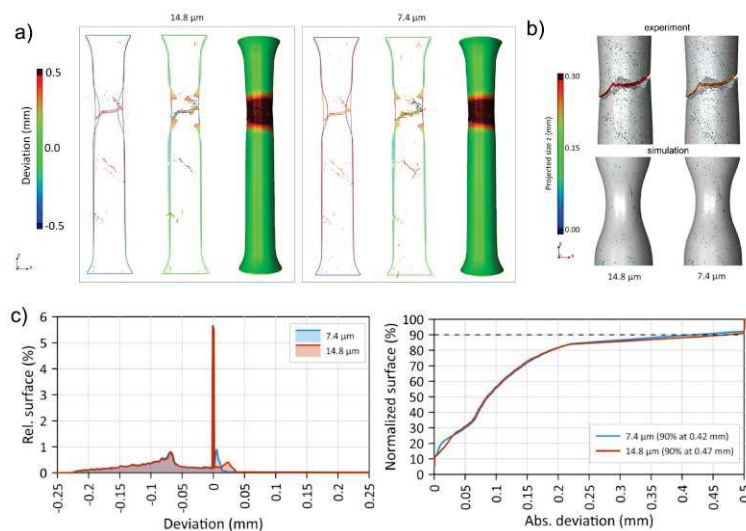


Rys. 17 Wpływ rozdzielczości XCT (14,8 μm vs 7,4 μm) na wynik symulacji MES: rozkład naprężeń von Mises w przekroju próbki oraz lokalne pola naprężeń w otoczeniu porów [A3].

W części (b) przedstawiłem przykład lokalnej analizy pojedynczego defektu, obejmujący siatkę elementów skończonych w otoczeniu pora oraz odpowiadający rozkład naprężeń na powierzchni/ w sąsiedztwie defektu dla obu rozdzielczości. Dla danych o wyższej rozdzielczości widoczne są bardziej nieregularne kontury pora i lokalne gradienty naprężeń, wynikające z dokładniejszego odwzorowania geometrii (wkłusień i przewężeń), które mogą być wygładzone lub pominięte przy niższej rozdzielczości. Zestawienie (a–b) pokazuje, że rozdzielczość XCT nie tylko determinuje wykrywalność małych defektów, ale również wpływa na wiarygodność predykcji lokalnych pól naprężenia w symulacjach MES opartych na rzeczywistej mikrogeometrii.

- Wykazałem wpływ rozdzielczości danych XCT na ilościowe odchyłki geometrii pomiędzy eksperymentem a symulacją MES, analizując mapy odchyłek, histogramy oraz krzywe skumulowane odchyłek powierzchniowych jako kryterium walidacji modelu.

Rysunek 18 przedstawia wpływ rozdzielczości danych wejściowych z XCT na ilościową walidację symulacji MES poprzez porównanie geometrii próbki po rozciąganiu. W części (a) pokazałem mapy odchyłek powierzchniowych pomiędzy geometrią eksperymentalną a geometrią uzyskaną z symulacji dla dwóch poziomów rozdzielczości rekonstrukcji (14,8 μm oraz 7,4 μm). Zestawienie umożliwia ocenę zgodności globalnej deformacji oraz lokalizację obszarów o największych różnicach, szczególnie w rejonie przewężenia i pęknięcia.



Rys. 18 Wpływ rozdzielczości XCT (14,8 μm vs 7,4 μm) na walidację geometrii eksperyment–MES: (a) mapy odchyłek powierzchniowych, (b) porównanie porowatości eksperyment/symulacja, (c) histogramy i krzywe skumulowane odchyłek [A3].

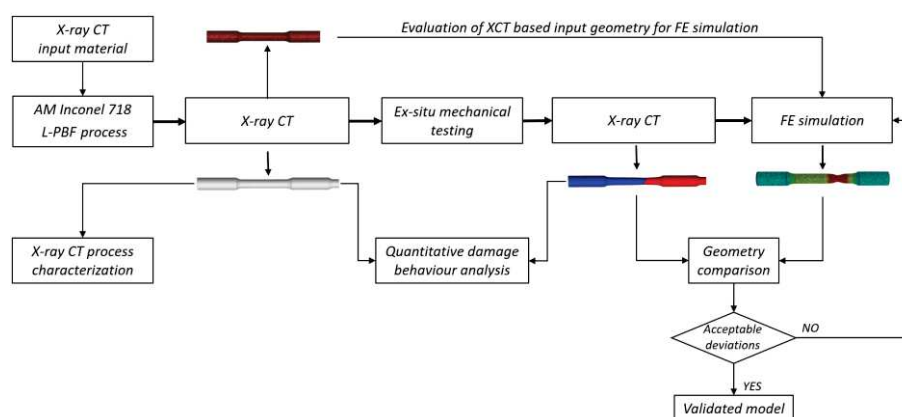
W części (b) przedstawiłem porównanie struktury porowatości w wybranym obszarze dla danych eksperymentalnych oraz dla wyników symulacji, osobno dla obu rozdzielczości (kolor odpowiada wielkości porów), co przedstawia wpływ rozdzielczości na odwzorowanie defektów w modelu oraz na zgodność ich rozkładu po obciążeniu. W części (c) zaprezentowana została metryczna ocena odchyłek: histogram względnego udziału powierzchni w funkcji odchyłki oraz krzywe skumulowane pozwalające wyznaczyć poziomy tolerancji walidacyjnej (np. 90% powierzchni w granicy odchyłki). Taki zestaw miar stanowi obiektywne kryterium porównania jakości walidacji geometrii dla modeli opartych na danych XCT o różnej rozdzielczości.

Mój wkład w powstanie pracy w warstwie strategii

- Opracowałem protokół ilościowej oceny łańcucha procesu LPBF z wykorzystaniem XCT, obejmujący: (1) kontrolę materiału wsadowego (proszku), (2) kontrolę próbek po wytworzeniu (charakterystykę defektów/porowatości), (3) analizę *ex situ* „before/after” po próbie rozciągania, (4) przygotowanie geometrii wejściowej z danych XCT do symulacji MES

oraz (5) walidację wyników symulacji MES poprzez porównanie geometrii i kryterium akceptowalnych odchylek.

Rysunek 19 przedstawia opracowany protokół integrujący XCT z etapami procesu LPBF oraz z walidacją MES, w którym dane z XCT pełnią rolę danych wejściowych do przygotowania geometrii dla symulacji, a następnie — po teście *ex situ* i ponownym skanowaniu — służą do geometrycznego porównania wyników eksperymentu i symulacji w iteracyjnej pętli walidacyjnej, prowadzonej do spełnienia kryterium akceptowalnych odchylek.



Rys. 19 Protokół XCT–MES dla LPBF: kontrola proszku i próbek, analiza *ex situ before/after* oraz walidacja symulacji przez porównanie geometrii i kryterium akceptowalnych odchylek [A3].

Poziom formalizacji akwizycji (ACQ)

W publikacji [A3] zrealizowałem dobór parametrów akwizycji na poziomie **ACQ3**: ustawienia skanowania zostały uzasadnione jawnymi kryteriami jakości oraz ograniczeniami fizycznymi charakterystycznymi dla materiału o wysokiej gęstości (tj. transmisja promieniowania, nieostrość geometryczna związana z rozmiarem plamki ogniskowania oraz redukcja artefaktów), co pozwoliło na rekonstrukcję próbek Inconel 718 z rozdzielczością 14,8 μm oraz 7,4 μm .

Efekt i znaczenie mojego wkładu w publikację [A3]

Dzięki opracowanemu przeze mnie podejściu XCT uzyskano spójny, ilościowy opis łańcucha procesu LPBF dla stopu IN718 — od kontroli materiału wsadowego (proszek; porowatość $\leq 0.20\%$), przez ocenę wpływu orientacji budowy na porowatość próbek, aż po analizę jej ewolucji po próbie rozciągania. Kluczowym elementem było wprowadzenie walidacji MES opartej na metrycznych odchylekach geometrii. W analizie skumulowanej 90% powierzchni symulowanej mieściło się w granicy odchyłki 0,42 mm (dla danych o rozdzielczości 7,4 μm) oraz 0,47 mm (dla danych o rozdzielczości 14,8 μm) względem geometrii eksperymentalnej. Zapewnia to jednoznaczne, ilościowe kryterium zgodności modelu, zastępujące porównania o charakterze jakościowym.

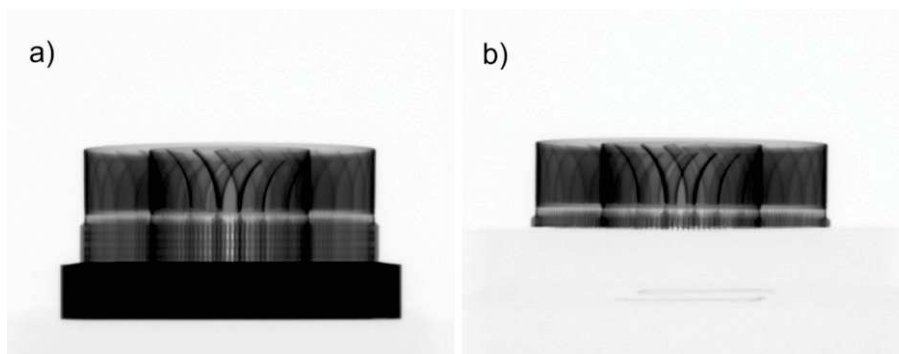
4.6.4.[A4] Effect of stress relief and inherent strain-based pre-deformation on the geometric accuracy of stator vanes additively manufactured from Inconel 718 using laser powder bed fusion, Precision Engineering, 2022, vol. 76, s. 360-376. MNiSW: 200, IF: 3.6.

Problem i cel pracy

W publikacji [A4] rozwiązałem problem opracowania ilościowej metody walidacji predykcyjnych modeli deformacji (w tym modelu *inherent strain*) dla cienkościennych komponentów lotniczych wytwarzanych metodą LPBF ze stopu Inconel 718, z wykorzystaniem danych XCT. Kluczową trudnością w tym przypadku jest wysoka gęstość stopu IN718, która wymusza odpowiedni dobór parametrów skanowania, a także konieczność rejestracji geometrii elementów w stanie *as-built*, wraz ze strukturami podporowymi oraz płytą roboczą. Takie podejście jest niezbędne, ponieważ istotna część deformacji ujawnia się dopiero po odcięciu detalu od płyty roboczej (relaksacja naprężeń własnych), a standardowe metody kontroli geometrii nie zapewniają spójnego, porównywalnego odniesienia dla pomiarów przed i po odcięciu platformy. Celem pracy było opracowanie ilościowego protokołu XCT umożliwiającego ocenę: (i) zmian geometrii przed i po odcięciu, (ii) wpływu odprężania cieplnego (*stress relief*), oraz (iii) skuteczności predykcji i kompensacji geometrii z wykorzystaniem modelu *inherent strain*.

Mój wkład w powstanie pracy w warstwie metod

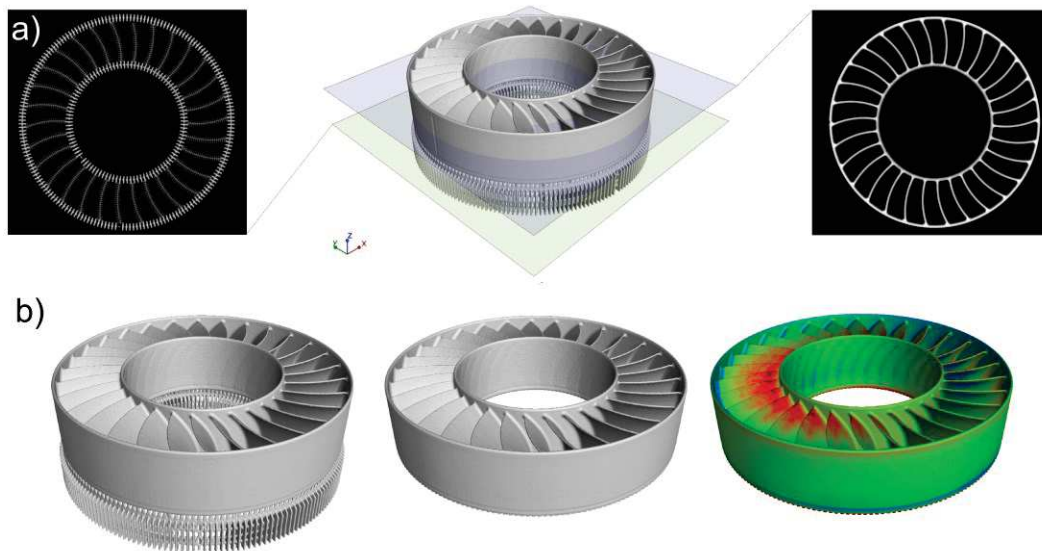
- Opracowałem ilościową procedurę akwizycji XCT łopatek typu *stator vanes* ze stopu Inconel 718, obejmującą rejestrację geometrii w stanie *as-built* wraz z platformą roboczą (Rys. 20a) oraz ponowną rejestrację po odcięciu od płyty roboczej (rys. 20b), co umożliwiło ilościową ocenę relaksacji naprężeń własnych.



Rys. 20 Projekcje uzyskane dla łopatek typu *stator vanes* a) z platformą roboczą oraz strukturami podporowymi, b) po odcięciu platformy roboczej (opracowanie własne).

Rysunek 20 przedstawia dwa stany geometrii rejestrowane w ramach opracowanej procedury XCT dla elementów LPBF ze stopu Inconel 718: (a) skan w stanie *as-built*, tj. z detalem połączonym z platformą roboczą oraz strukturami podporowymi, oraz (b) skan po odcięciu detalu od płyty roboczej (*cut-off*). Zestawienie projekcji ilustruje konieczność prowadzenia pomiarów w obu stanach, ponieważ istotna część deformacji wynika z relaksacji naprężeń własnych i ujawnia się dopiero po odcięciu. Procedurę pomiarową realizowałem w kontrolowanych warunkach temperaturowych 20 ± 1 °C i obejmowała ona wyznaczenie oraz kompensację błędu skali przy użyciu wzorca sferyczno-płytkowego (*ruby/plate*) zgodnie z metodyką VDI/VDE 2630. Akwizycja prowadzona była przy napięciu 270 kV, z zastosowaniem filtracji 0,5 mm Cu + 2,5 mm Sn, w celu zapewnienia transmisji przez materiał o wysokiej gęstości oraz ograniczenia efektu utwardzania wiązki. Dobór parametrów akwizycji oraz łańcucha przetwarzania danych (korekcje rekonstrukcji i segmentację) umożliwił ograniczenie wpływu rozpraszania promieniowania pochodzącego z platformy roboczej oraz zapewnił stabilne odtworzenie wolumetryczne geometrii łopatek wraz ze strukturami podporowymi.

- Wprowadziłem łańcuch przetwarzania danych XCT obejmujący korekcje rekonstrukcji, segmentację, rejestrację geometrii oraz wirtualne odcinanie struktur podporowych, umożliwiające uzyskanie porównywalnych modeli trójwymiarowych przeznaczonych do analizy odchyłek geometrycznych oraz walidacji modeli deformacji.



Rys. 21 Wynik rekonstrukcji łopatek typu *stator vanes*, a) przekroje 2D i model wolumetryczny, b) proces analizy danych [A4].

W ramach procedury zastosowałem korekcje rekonstrukcji ograniczające artefakty pomiarowe (m.in. korekcję *beam hardening* oraz artefaktów pierścieniowych), a następnie segmentację umożliwiającą odwzorowanie cienkościennej geometrii łopatek i struktur podporowych.

Rysunek 21 przedstawia opracowany łańcuch przygotowania danych wolumetrycznych do porównań ilościowych. W części (a) pokazane zostały przykładowe przekroje oraz model 3D po rekonstrukcji, potwierdzające uzyskanie stabilnej jakości obrazu i czytelnych krawędzi cienkościennej geometrii łopatek mimo obecności suportów i platformy roboczej w czasie skanowania. W części (b) przedstawiłem kolejne etapy przygotowania danych porównawczych: model po segmentacji z widocznymi strukturami podporowymi, model po ich wirtualnym odcięciu oraz wynikową mapę odchyłek geometrii z modelem referencyjnym, stanowiącą podstawę dalszej ilościowej oceny deformacji oraz walidacji modeli predykcyjnych.

Mój wkład w powstanie pracy w warstwie strategii

- Opracowałem protokół walidacji oparty na danych XCT, umożliwiający ilościowe porównanie predykcji deformacji z modelu *inherent strain* z geometrią rzeczywistą, a także spójne zestawienie wyników eksperymentalnych zarejestrowanych przed i po odcięciu detalu od platformy roboczej (*cut-off*), w celu oceny relaksacji naprężeń własnych.

Poziom formalizacji akwizycji (ACQ)

W publikacji [A4] dobór i realizację akwizycji XCT prowadziłem na poziomie **ACQ2**: procedura była oparta o jawne odniesienie systemowe (korekcja skali, kalibracja i deklarowana dokładność wg VDI/VDE 2630) oraz kontrolowane warunki pomiaru, tak aby uzyskane modele trójwymiarowe mogły stanowić wiarygodny punkt odniesienia dla walidacji symulacji deformacji.

Efekt i znaczenie mojego wkładu w publikację [A4]

Opracowany przeze mnie protokół XCT oraz procedury trójwymiarowych porównań umożliwiły ilościową ocenę skuteczności strategii redukcji naprężeń własnych i walidację predykcji deformacji dla elementów typu *stator vane* wytwarzanych techniką przyrostową LPBF. Wykazałem, że tomografia komputerowa (XCT) może pełnić rolę kluczowego narzędzia walidacyjnego dla modeli procesowych wytwarzanych metodą LPBF. Dane wolumetryczne umożliwiają przejście od jakościowego opisu deformacji do ich ilościowej analizy przestrzennej w trzech wymiarach.

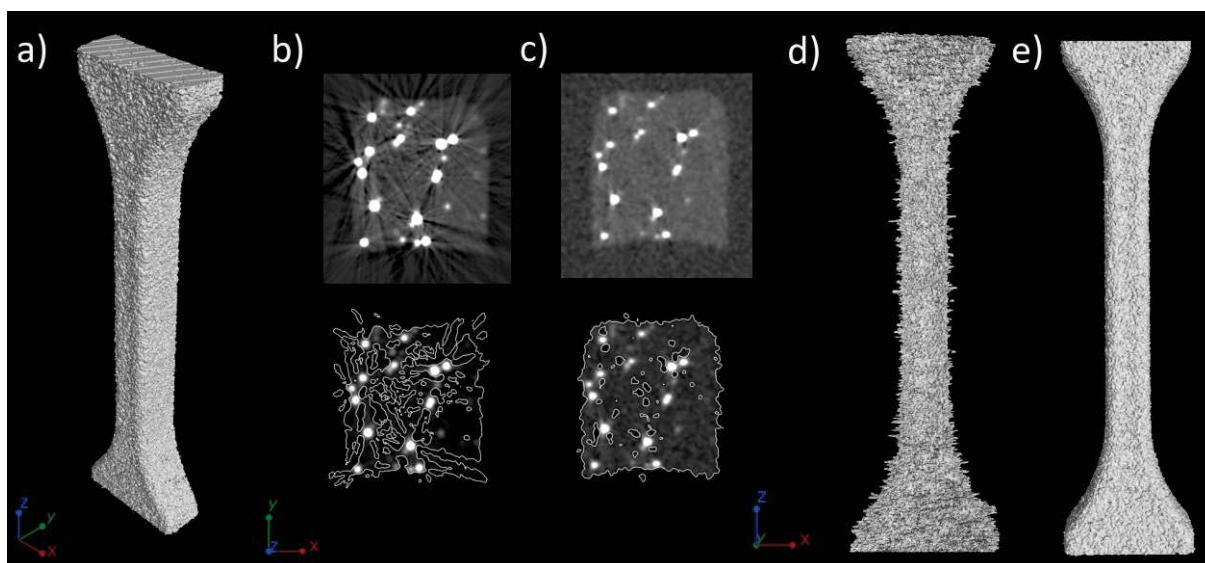
4.6.5.[A5] Influence of bioactive metal fillers on microstructural homogeneity of PA12 composites produced by polymer Laser Sintering, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2022, vol. 22(3), art. 117, s. 1-15. **MNiSW: 140, IF: 4.4.**

Problem i cel pracy

W publikacji [A5] rozwiązałem problem uzyskania wiarygodnych, ilościowych danych XCT dla kompozytów PA12 wytwarzanych metodą przyrostową pLS/SLS z bioaktywnymi wypełniaczami metalicznymi (Ag, Cu), w których duża różnica gęstości faz generuje silne artefakty (m.in. rozproszenie promieniowania i utwardzanie wiązki), istotnie utrudniające segmentację porów i cząstek oraz porównywanie wyników pomiędzy seriami próbek. Celem pracy było opracowanie dwupoziomowego protokołu XCT (*low-resolution / high-resolution*) oraz procedury analitycznej umożliwiającej ilościową ocenę: (i) porowatości i rozkładu porów, (ii) geometrii cząstek (średnica, sferyczność) oraz (iii) rzeczywistej zawartości i jednorodności dystrybucji wypełniacza w próbkach po procesie pLS, z uwzględnieniem orientacji budowy.

Mój wkład w powstanie pracy w warstwie metod

- Opracowałem i wdrożyłem procedurę doboru parametrów akwizycji XCT dla kompozytów polimer–metal o wysokim kontraście gęstości, obejmującą dobór napięcia lampy i filtracji widma w celu ograniczenia artefaktów utwardzania wiązki i rozpraszania na granicach faz, co zapewniło możliwość wiarygodnej segmentacji danych wolumetrycznych.

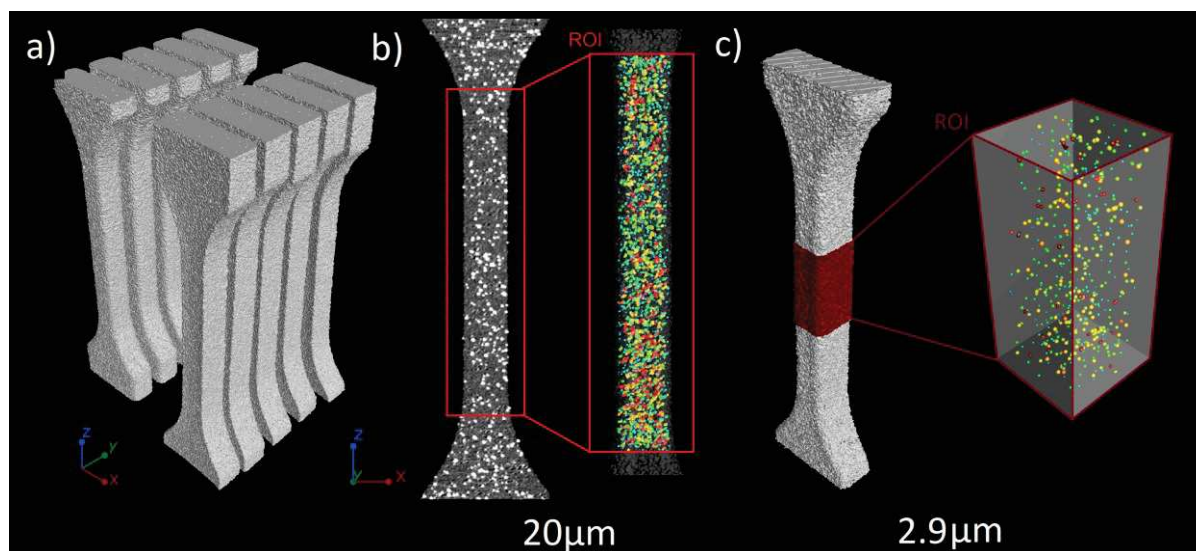


Rys. 22 Wpływ filtracji widma na jakość rekonstrukcji i segmentacji XCT w kompozytach polimer–metal: (a) rekonstrukcja 3D próbki, (b) przekrój 2D bez filtracji (artefakty rozpraszania), (c) przekrój 2D po filtracji, (d) segmentacja wolumetryczna bez filtracji spektrum, (e) segmentacja po filtracji [A5].

Rysunek 22 przedstawia wpływ doboru parametrów akwizycji (energia i filtracja widma) na jakość rekonstrukcji oraz możliwość segmentacji danych XCT w kompozytach polimerowo–metalicznych o dużej różnicy gęstości faz. W części (a) pokazałem przykładową rekonstrukcję 3D jednej z badanych próbek. Część (b) przedstawia przekrój 2D uzyskany bez zastosowania filtracji, w którym widoczne są silne artefakty utwardzania wiązki oraz smugi (*streaking*) wokół

cząstek metalicznych. Zjawiska te prowadzą do sztucznego pogrubienia granic faz (tzw. efekt poświaty) oraz niejednoznacznej lokalizacji granic faz. W części (c) zaprezentowany został przekrój 2D po zastosowaniu filtracji widma, gdzie obserwuje się ograniczenie artefaktów i stabilizację skali szarości, co poprawia rozdział faz metal–polimer. W części (d) pokazany został wynik segmentacji danych wolumetrycznych wykonanej na danych bez filtracji – z widocznymi błędami separacji faz i niestabilną detekcją granic. Część (e) przedstawia wynik segmentacji danych po zastosowaniu filtracji, wskazujący na spójne odwzorowanie geometrii próbki oraz cząstek, co umożliwia przeprowadzenie wiarygodnych analiz ilościowych, w tym oceny porowatości.

- Wprowadziłem procedurę wielorozdzielczą (*multi-resolution*) dla badań seryjnych i wysokorozdzielczych, umożliwiającą powtarzalną i ilościową ocenę porowatości oraz morfologii cząstek w kompozytach polimerowo–metalicznych.



Rys. 23 Procedura *multi-resolution* w XCT dla kompozytów polimer–metal: (a) skanowanie seryjne próbek (low-res), (b) ROI i ilościowa ocena porowatości w danych 3D dla rozdzielczości 20 µm, (c) analiza ROI w rozdzielczości 2.9 µm umożliwiającą identyfikację i charakterystykę cząstek w 3D [A5].

Rysunek 23 ilustruje opracowaną przeze mnie procedurę *multi-resolution* łączącą akwizycję seryjną *low-resolution* z analizą *high-resolution* w ROI. W części (a) przedstawiono konfigurację pomiarową umożliwiającą jednoczesne skanowanie serii próbek w trybie przeglądowym, co pozwala na statystyczną ocenę porowatości w skali całej serii próbek. W części (b) przedstawiłem przekrój 2D próbki zeskanowanej z rozdzielczością 20 µm oraz zdefiniowany region ROI, w którym porowatość jest wyznaczana ilościowo na podstawie danych wolumetrycznych 3D (wizualizacja porów w ROI). Część (c) przedstawia próbkę z wyznaczonym ROI oraz przykład analizy wysokorozdzielczej (*high-resolution*) o rozdzielczości 2,9 µm, umożliwiającej trójwymiarową identyfikację i charakterystykę cząstek

(morfologia, rozmieszczenie) w wybranym wolumenie. Zestawienie potwierdza, że połączenie obu poziomów rozdzielczości zapewnia powtarzalne porównania ilościowe: porowatości w skali próbki oraz cech geometrycznych cząstek w skali mikro.

Mój wkład w powstanie pracy w warstwie strategii

- Opracowałem dwupoziomowy protokół XCT dla kompozytów polimerowo-metalicznych, łączący dobór napięcia i filtracji w celu redukcji artefaktów oraz zapewnienia wiarygodnej segmentacji z pomiarami wielorozdzielczymi (*multi-resolution*): niskorozdzielczymi (*low-resolution*) do oceny porowatości oraz wysokorozdzielczymi (*high-resolution*) do analizy cząstek i wtrąceń. Rozwiązanie to zapewniło powtarzalną, ilościową analizę struktury wewnętrznej oraz morfologii cząstek w postaci wypełniaczy w badanych próbkach.

Poziom formalizacji akwizycji (ACQ)

W publikacji [A5] dobór parametrów akwizycji zrealizowałem na poziomie **ACQ3**: ustawienia skanowania (energia widma, filtracja Cu, geometria i rozdzielczość) zostały uzasadnione jawnymi kryteriami jakości danych, adekwatnymi do układu o dużym kontraście gęstości, w szczególności w kontekście możliwości detekcji porów oraz oceny morfologii cząstek proszku.

Effekt i znaczenie mojego wkładu [A5]

Dzięki opracowanemu przeze mnie protokołowi XCT możliwe było przejście od obserwacji jakościowej do porównywalnej analizy ilościowej kompozytów PA12 z wypełniaczami Ag/Cu. Umożliwiło to stabilne wyznaczanie porowatości i rozkładu porów oraz rzeczywistej zawartości i jednorodności rozmieszczenia wypełniacza metalicznego w próbkach po procesie pLS, mimo występowania silnych artefaktów charakterystycznych dla układów polimer-metal. Wykazałem m.in. zależność porowatości od orientacji budowy dla próbek referencyjnych (rzędu kilku procent, z istotnymi różnicami między orientacjami) oraz brak jednoznacznej zależności porowatości od udziału wypełniacza w badanym zakresie. Jednocześnie ujawniłem zjawiska procesowe o istotnym znaczeniu technologicznym, takie jak utrata frakcji drobnej ($<20\ \mu\text{m}$) dla wypełniaczy sferycznych oraz rozbieżności pomiędzy zawartością projektowaną a zmierzoną (*designed vs measured*), szczególnie widoczne w orientacjach charakteryzujących się małą powierzchnią przekroju warstwy w płaszczyźnie budowy.

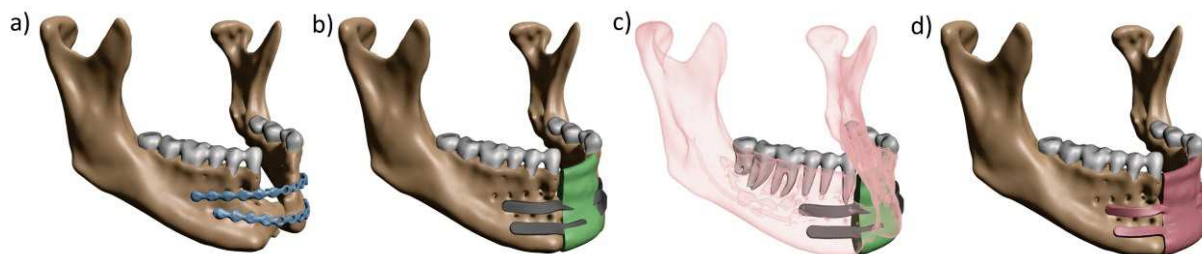
4.6.6.[A6] Improved quality and functional properties of Ti-6Al-4V ELI alloy for personalized orthopedic implants fabrication with EBM process, Journal of Manufacturing Processes, 2022, vol. 76, s. 175-194. MNiSW: 140, IF: 6.8.

Problem i cel pracy

W publikacji [A6] rozwiązałem problem ilościowej kontroli jakości procesu przetwarzania stopu Ti-6Al-4V ELI, przeznaczonego do zastosowań medycznych, metodą przyrostową (PBF/EBM) w którym standardowe etapy oceny jakości są rozproszone pomiędzy kolejnymi fazami procesu (materiał wejściowy: proszek – próbki testowe – wyrób gotowy: implant) i trudne do bezpośredniego porównania przy użyciu jednolitej metryki. Celem pracy było opracowanie spójnego protokołu XCT umożliwiającego porównywalną analizę trójwymiarową: (i) jakości proszku, (ii) porowatości próbek walidacyjnych, (iii) wpływu obróbki HIP i modyfikacji powierzchni na porowatość, a także (iv) zgodności geometrycznej wyrobu gotowego (implantu) względem modelu CAD.

Mój wkład w powstanie pracy w warstwie metod

- Zaprojektowałem geometrię implantu typu „*custom-made*” dopasowanego do ubytku pacjenta na podstawie danych tomograficznych (CT) pochodzących z obrazowania medycznego.

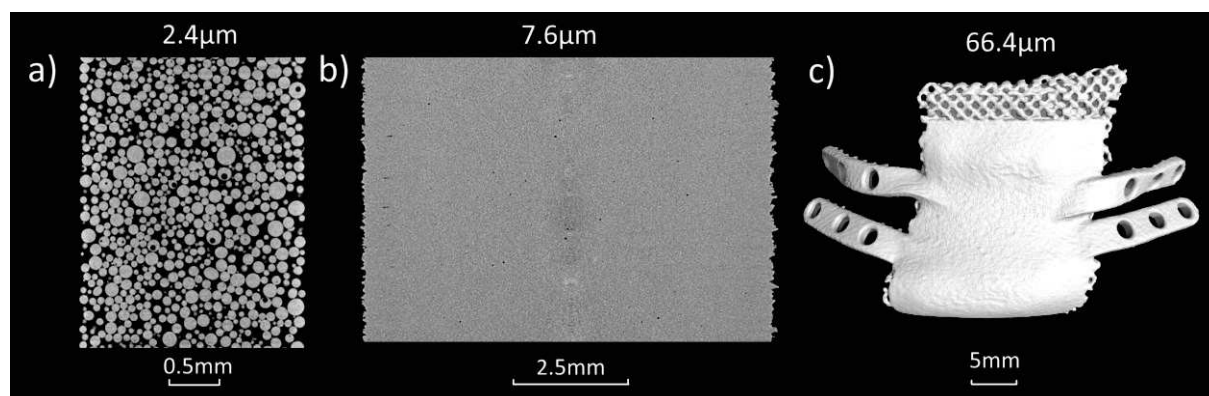


Rys. 24 Etapy projektowania spersonalizowanej geometrii implantu żuchwy na podstawie danych CT: (a) stan pacjenta z elementami stabilizującymi, (b) dopasowanie do geometrii zewnętrznej kości, (c) dopasowanie do geometrii wewnętrznej w strefie ubytku, (d) końcowy model implantu [B4].

Rysunek 24 przedstawia kolejne etapy opracowanego przeze mnie procesu projektowania spersonalizowanej geometrii implantu dopasowanego do anatomii pacjenta na podstawie danych CT. W części (a) pokazano stan wyjściowy – geometrię żuchwy pacjenta wraz z elementami stabilizującymi (płytki). W części (b) zilustrowano dopasowanie projektowanego implantu do geometrii zewnętrznej kości żuchwy (powierzchnie kontaktu/pozycjonowanie w przestrzeni anatomicznej). W części (c) przedstawiłem etap dopasowania do geometrii wewnętrznej w obszarze ubytku (kontrola przylegania i ciągłości powierzchni w strefach krytycznych). Część (d) pokazuje końcowy model implantu po integracji warunków dopasowania, gotowy do wytwarzania przyrostowego oraz późniejszej walidacji metrologicznej metodą XCT.

- Zaproponowałem wieloskalową procedurę pomiarów XCT obejmującą trzy poziomy kontroli procesu wytwarzania implantów z wykorzystaniem metody EBM: materiał wsadowy – próbki testowe – wyrób gotowy.

Rysunek 25 przedstawia zaproponowaną przeze mnie wieloskalową procedurę pomiarów XCT zastosowaną do ilościowej kontroli procesu przyrostowego wytwarzania wyrobów medycznych na przykładzie personalizowanego implantu żuchwy. Część (a) obrazuje skan materiału wsadowego (proszku Ti-6Al-4V ELI) wykonany z wysoką rozdzielczością (woksel $2,4\ \mu\text{m}$), umożliwiającą trójwymiarową identyfikację pojedynczych cząstek oraz analizę ich morfologii i porowatości wewnętrznej. W części (b) przedstawiłem skan próbek testowych (geometria walidacyjna) z rozdzielczością pośrednią (woksel $7,6\ \mu\text{m}$), dobraną tak, aby wiarygodnie wykrywać pory i defekty procesu przyrostowego wytwarzania (EBM) w reprezentatywnej objętości, przy zachowaniu adekwatnego pola widzenia.

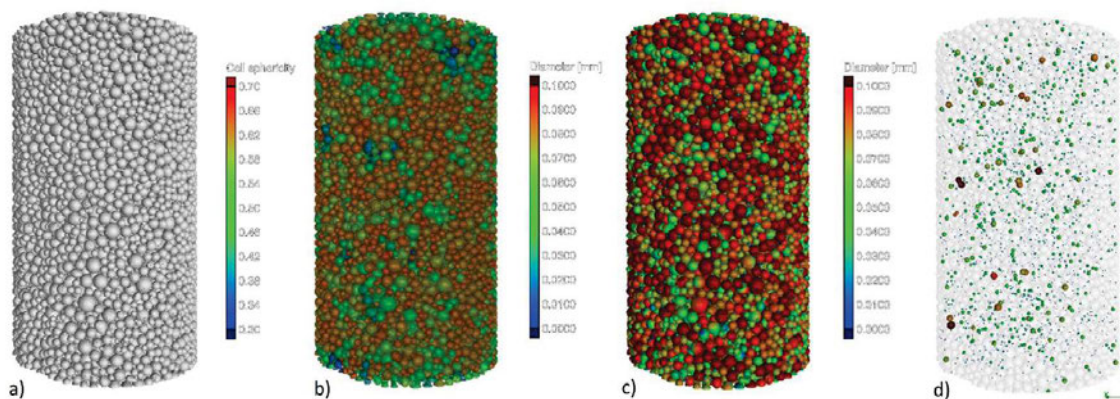


Rys. 25 Wieloskalowa procedura XCT w kontroli procesu EBM: (a) proszek Ti-6Al-4V ELI (woksel $2,4\ \mu\text{m}$), (b) próbka testowa po wytworzeniu (woksel $7,6\ \mu\text{m}$), (c) implant końcowy (woksel $66,4\ \mu\text{m}$) [A6].

W części (c) zaprezentowany został skan wyrobu gotowego w postaci implantu wykonany z rozdzielczością dostosowaną do gabarytów wyrobu (woksel $66,4\ \mu\text{m}$), umożliwiającą ocenę porowatości w skali makro oraz kontrolę geometrii elementów funkcjonalnych, w tym stref mocowania i struktur kratowych. Zestawienie to przedstawia logikę doboru rozdzielczości i pola widzenia w zależności od celu pomiaru, zapewniając spójny, ilościowy opis jakości na poziomie materiału wsadowego, próbek walidacyjnych oraz wyrobu gotowego.

- Wdrożyłem procedurę ilościowej analizy materiału wejściowego w postaci proszku metodą XCT, obejmującą segmentację i wydzielenie pojedynczych ziaren, wyznaczenie ich metryk geometrycznych (średnica ekwiwalentna, sferyczność) oraz identyfikację i pomiar porowatości wewnętrznej ziaren.

Rysunek 26 przedstawia wyniki opracowanej przeze mnie procedury analizy proszku stopu Ti-6Al-4V ELI na podstawie danych XCT o wysokiej rozdzielczości (woksel 2,4 μm). W części (a) pokazany został model wolumetryczny proszku z wydzielonymi ziarnami. Część (b) przedstawia mapę sferyczności ziaren (z kodowaniem kolorystycznym według wartości metryki), natomiast część (c) mapę średnicy ekwiwalentnej ziaren. W części (d) zaprezentowano zidentyfikowaną porowatość wewnętrzną ziaren (pory wydzielone i zwizualizowane w objętości proszku).



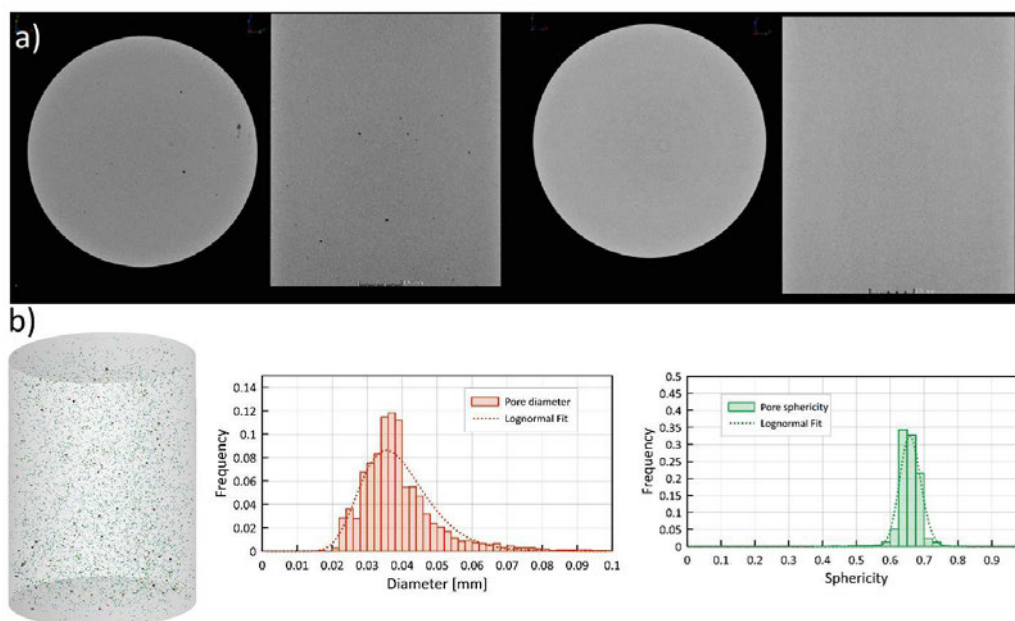
Rys. 26 Rysunek przedstawia a) widok wolumetryczny proszku stopu tytanu z rozdzielczością 2,4 μm . b) sferyczność ziaren, c) średnica ziaren, średnice porów wewnątrz ziaren [A6].

Ze względu na wysoką sferyczność ziaren oraz rozdzielczość pomiaru, zastosowałem dedykowany algorytm detekcji i separacji ziaren, który umożliwił automatyczne wydzielenie populacji cząstek bez konieczności zatapiania proszku w żywicy/osnowie. Uprościło to przygotowanie próbki i skróciło czas procedury, przy zachowaniu możliwości ilościowego wyznaczenia metryk ziaren i porów wewnętrznych. Uzyskane charakterystyki potraktowałem jako punkt odniesienia do interpretacji porów obserwowanych następnie w elementach wytworzonych metodą EBM, umożliwiającą weryfikację potencjalnego transferu defektów z materiału wsadowego.

- Zdefiniowałem porównywalny sposób raportowania porowatości próbek w stanie *as-built* (AB) oraz po obróbce HIP, oparty na analizie porów w stałym ROI i wspólnym zestawie metryk (udział objętościowy, rozkłady średnic oraz kształtu porów), co umożliwiło metryczne wykazanie skuteczności przeprowadzonej obróbki HIP.

W części (a) zaprezentowane zostały przykładowe przekroje tomograficzne 2D (widok w płaszczyźnie przekroju poprzecznego oraz w przekroju prostokątnym) dla próbki przed jak i po obróbce HIP, zarejestrowane w porównywalnych warunkach akwizycji. Zestawienie to umożliwia bezpośrednią, wizualną ocenę zmian liczby i wielkości defektów objętościowych oraz

stanowi punkt wyjścia do analizy ilościowej prowadzonej na stałym regionie zainteresowania (ROI). Część (b) przedstawia przykład analizy ilościowej porowatości dla stanu *as-built* (AB).



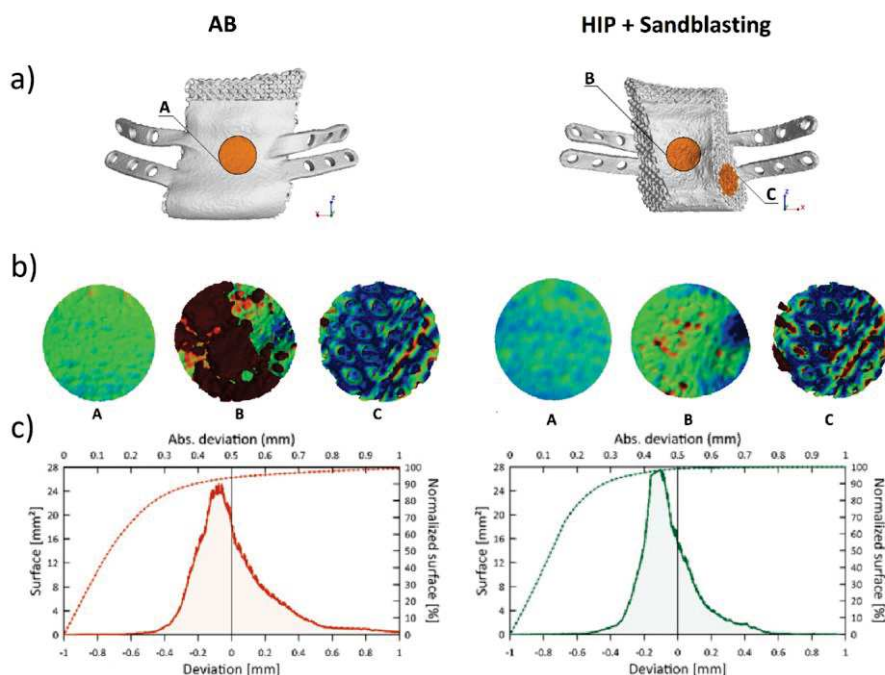
Rys. 27 Ocena porowatości próbek Ti-6Al-4V ELI przed i po HIP na podstawie XCT: (a) przekroje 2D próbki w stanie AB (bez HIP) oraz po HIP (ten sam wariant pomiaru), (b) przykład analizy porowatości dla stanu AB – wizualizacja 3D porów oraz histogramy średnic i sferyczności (z dopasowaniem lognormalnym) [A6].

Po segmentacji porów w zdefiniowanym ROI wykonano wizualizację 3D porowatości oraz obliczono zestaw metryk opisujących defekty: rozkład średnic ekwiwalentnych porów oraz rozkład sferyczności porów. Histogramy uzupełniono dopasowaniem rozkładu (*lognormal*), co umożliwia porównywanie populacji porów między wariantami procesu (AB vs HIP) w sposób metryczny, a nie jakościowy. Wprowadzenie stałego ROI i wspólnego zestawu metryk pozwala na bezpośrednią ocenę skuteczności HIP poprzez porównanie zmian udziału objętościowego porowatości oraz zmian charakterystyki populacji porów (wielkości i kształtu), przy zachowaniu spójności warunków analizy.

- Wprowadziłem ilościową ocenę geometrii implantu metodą *actual–nominal* (XCT vs CAD), raportując zgodność w postaci krzywych skumulowanych udziału powierzchni w funkcji dopuszczalnej odchyłki (np. 90%/95%/98% powierzchni). Pozwoliło to na ilościowe porównanie stanu *as-built* AB oraz stanu po obróbce HIP oraz modyfikacji powierzchni w ramach jednego, jednoznacznego kryterium porównawczego.

Rysunek 28 przedstawia procedurę porównania geometrii implantu z modelem nominalnym CAD w wariantach: *as-built* AB oraz HIP + modyfikacja powierzchni (*sandblasting*). W części (a) pokazałem model implantu po rekonstrukcji XCT, z zaznaczonymi obszarami A–C

wybranymi do szczegółowej oceny (regiony reprezentatywne i/lub funkcjonalnie krytyczne), zapewniającej porównywalność analizy pomiędzy stanami technologicznymi. Część (b) przedstawia wyniki analizy *actual–nominal* w obszarach A–C w postaci map odchyłek (z kodowaniem kolorystycznym według wartości *abs. deviation* [mm]), co umożliwia przestrzenną identyfikację stref lokalnych odchyłek oraz ocenę wpływu procesów obróbki HIP oraz modyfikacji powierzchni na kształt lokalny. W części (c) zaprezentowane zostały wyniki ilościowe dla tych samych obszarów w postaci histogramów rozkładu odchyłek oraz krzywych skumulowanych (znormalizowany udział powierzchni w funkcji progu odchyłki). Taki sposób raportowania pozwala porównać zgodność z modelem CAD w sposób metryczny (np. poprzez odczyt progów odpowiadających 90% lub 98% powierzchni) oraz bezpośrednio zestawzić stan AB z wariantem po HIP i modyfikacji powierzchni.



Rys. 28 Ilościowa ocena geometrii implantu metodą *actual–nominal* dla stanów AB oraz HIP + modyfikacja powierzchni (*sandblasting*): (a) obszary A–C wybrane do analizy, (b) mapy odchyłek *actual–nominal* w tych obszarach, (c) rozkłady odchyłek i krzywe skumulowane udziału powierzchni w funkcji progu odchyłki [A6].

Mój wkład w powstanie pracy w warstwie strategii

- Opracowałem protokół kontroli jakości oparty o XCT, integrujący wyniki z trzech skal: materiału wejściowego (proszek), próbek testowych oraz wyrobu gotowego (implant), w jeden porównywalny schemat decyzyjny. Protokół ten został wykorzystany do: (i) oceny jakości proszku (metryki ziaren i porów), (ii) walidacji procesu wytwarzania oraz operacji

poprocesowych (HIP) na próbkach testowych oraz (iii) weryfikacji wyrobu gotowego (implantu).

Poziom formalizacji akwizycji (ACQ)

W pracy [A6] zrealizowałem dobór parametrów akwizycji na poziomie **ACQ2**: akwizycja pełni rolę odniesienia systemowego i porównywalności metrycznej dla kontroli jakości całego łańcucha wytwarzania, bez uprzedniej optymalizacji parametrów jakości akwizycji XCT dla próbek wytwarzanych metodą EBM.

Efekt i znaczenie mojego wkładu w publikację [A6]

Dzięki opracowanemu przeze mnie podejściu XCT uzyskano ciągły, ilościowy obraz jakości procesu EBM – od materiału wsadowego po wyrób końcowy. Wprowadzone metryki umożliwiły jednoznaczne wykazanie skuteczności obróbki HIP w redukcji porowatości próbek oraz ilościowe wskazanie, że pozostała po obróbce HIP porowatość koncentruje się głównie w strefach przypowierzchniowych istotnych dla planowania obróbki końcowej.

W skali implantu wykazałem ilościowo, że zastosowany post-processing prowadzi zarówno do redukcji porowatości (obróbka HIP) oraz poprawia zgodność geometryczną względem modelu CAD (modyfikacja powierzchni). Efekt ten został udokumentowany metrycznie, z wykorzystaniem skumulowanych progów udziału powierzchni mieszczącej się w zadanej tolerancji. W konsekwencji praca dostarczyła transferowalnego protokołu XCT do walidacji procesu EBM w zastosowaniach medycznych, w których kluczowe znaczenie mają mikrodefekty materiałowe oraz zgodność geometryczna wyrobu w skali makro.

4.6.7. [A7] Application of computed tomography to the study of Mesolithic portable art:

Results, interpretations and expectations - The case of an ornamented roe deer antler harpoon from Police, north-west Poland. Archaeometry. 2024, vol. 66, nr 1, s. 219-237.
MNiSW: 200, IF: 1.5.

Problem i cel pracy

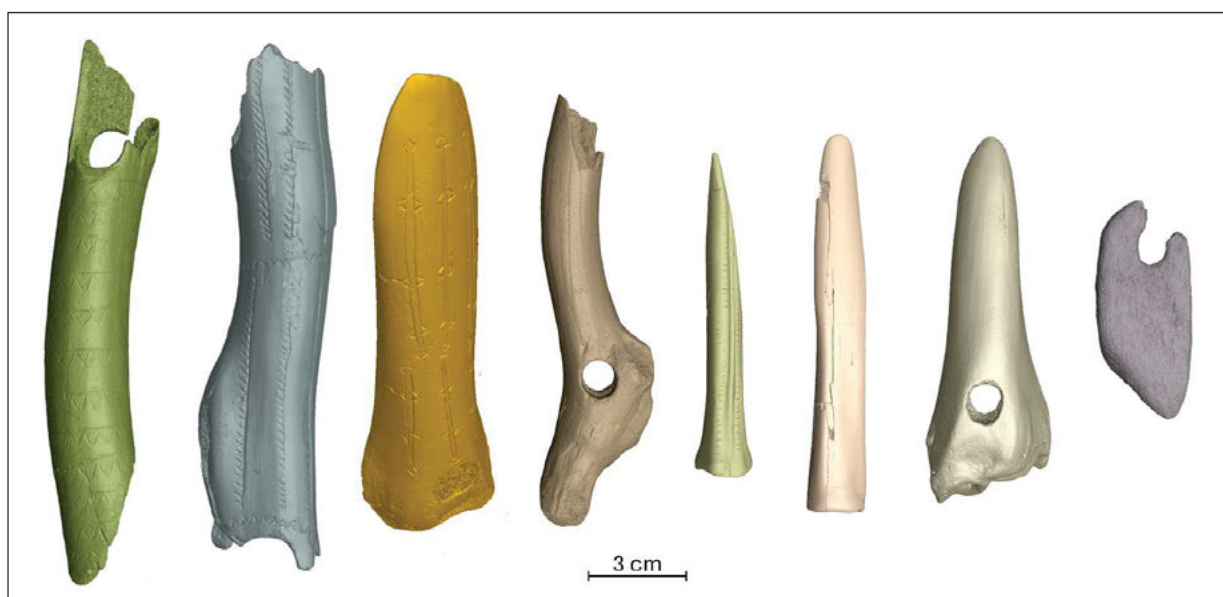
Istotnym problemem w analizie zabytków kostnych jest uzyskanie wiarygodnej, ilościowej charakterystyki nacięć, niezbędnej do rozróżnienia intencjonalnego znakowania od śladów powstałych w wyniku procesów tafonomicznych lub przypadkowych uszkodzeń. Sam opis jakościowy oraz obrazowanie mikroskopowe (2D/3D) nie zapewniają porównywalnej metryki, ponieważ kluczowe różnice dotyczą mikrogeometrii nacięć (profil, głębokość, kąt rozwarcia), a ich pomiar jest dodatkowo utrudniony przez swobodną, złożoną geometrię kości oraz

zanieczyszczenia i lokalne zmiany materiałowe zaburzające odwzorowanie rzeczywistej geometrii nacięć.

W odpowiedzi na te problemy, w pracy [A7] po raz pierwszy zaproponowałem i wdrożyłem protokół oparty na XCT jako źródle danych 3D, obejmujący: skanowanie z korekcją systemową i kontrolą artefaktów, ilościową transformację powierzchni (usunięcie formy i falistości) oraz standaryzację opisu nacięć poprzez serię przekrojów i jednoznaczne metryki profilu. Celem było uzyskanie porównywalnych parametrów liczbowych dla nacięć – zarówno pomiędzy obiektami, jak i względem prób eksperymentalnych – umożliwiających wnioskowanie o technice wykonania na podstawie danych metrologicznych.

Mój wkład w powstanie pracy w warstwie metod

- Zaprojektowałem i wdrożyłem kompletną procedurę XCT ukierunkowaną na pomiary geometrii nacięć na zabytkach kostnych.

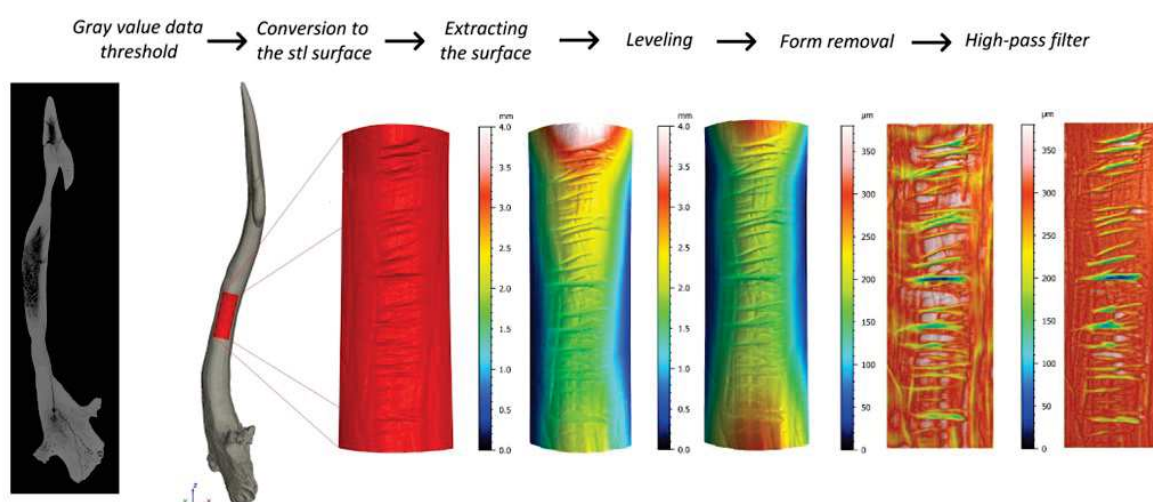


Rys. 29 Przykłady zabytków kostnych rekonstruowanych zgodnie z zaproponowaną procedurą XCT, pozwalającą na rekonstrukcję obiektów o różnej wielkości w tej samej skali (opracowanie własne).

Wykonałem skanowanie fragmentów kości na różnych wysokościach i scalałem dane w trybie *multiscan* do jednego wolumenu o rozdzielczości $\sim 20\mu\text{m}$, tak aby uzyskać stabilną bazę do pomiaru mikroprofilu nacięć. Parametry akwizycji dobrałem i zweryfikowałem pod kątem redukcji artefaktów fizycznych, ograniczenia efektu *beam hardening* oraz zapewnienia wysokiej jakości wolumenów, umożliwiających prowadzenie porównywalnych analiz metrycznych nacięć w tej samej skali (rys. 29). Następnie wykonałem segmentację metodą lokalną, przekonwertowałem wybrane ROI do modelu powierzchniowego STL, przygotowując dane do dalszej analizy topografii i profili w standardzie metrologicznym.

- Wdrożyłem metrologiczną transformację powierzchni ROI obejmującą poziomowanie przez aproksymację kształtu wielomianem i jego usunięcie z zastosowaniem filtracji górnoprzepustowej, w celu odcięcia składowych długofalowych (falistości i formy) uzyskując w efekcie płaską powierzchnię referencyjną, umożliwiającą porównywalną analizę nacięć.

Na rys. 30 przedstawiłem kompletną sekwencję przekształceń stosowanych w celu przejścia od danych XCT do znormalizowanej powierzchni referencyjnej, umożliwiającą porównywalny pomiar mikrogeometrii nacięć.



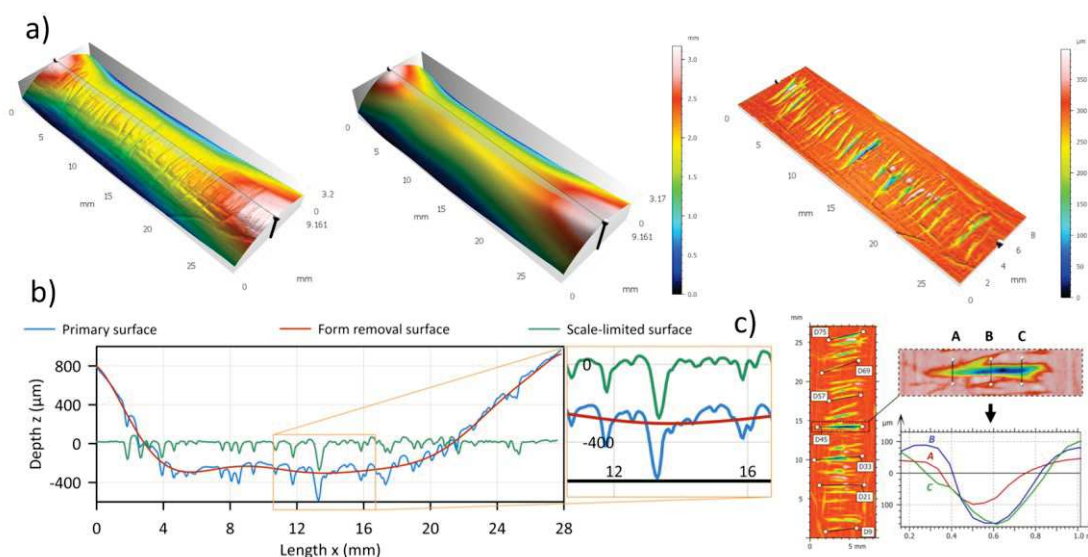
Rys. 30 Procedura zastosowana do analizy grawerowanego ornamentu w wybranym obszarze ROI [A7].

Proces analizy danych wolumetrycznych rozpoczynałem od segmentacji progowej i konwersji wyselekcjonowanego obszaru zainteresowania (ROI) do modelu powierzchniowego (STL). Tak uzyskaną geometrię poddawałem normalizacji metrologicznej, która obejmowała poziomowanie powierzchni oraz stabilizację jej orientacji. Kluczowym krokiem było zastosowanie procedury usuwania formy (*detrendingu*) poprzez aproksymację makrokształtu wielomianem i jego odjęcie od sygnału wejściowego.

W celu ostatecznego wyizolowania cech mikrotopografii nacięć stosowałem filtrację górnoprzepustową (zgodnie z ISO 16610), co pozwoliło na skuteczne odcięcie składowych długofalowych (falistości). Efektem końcowym jest znormalizowana powierzchnia referencyjna, na której sygnał topograficzny opisuje wyłącznie mikrostrukturę ornamentu, a nie globalną anatomię kości. Takie podejście gwarantuje pełną porównywalność metryk profilu (szerokość, głębokość, kąt rozwarcia) oraz uniezależnia wyniki od lokalnych krzywizn podłoża czy arbitralnego ułożenia artefaktu w przestrzeni pomiarowej.

Mój wkład w powstanie pracy w warstwie strategii

- Zaprojektowałem powtarzalny, metrologicznie ustandaryzowany protokół analizy nacięć na podstawie danych XCT, w którym region zainteresowania (ROI) jest przekształcany do powierzchni odniesionej poprzez rozdział formy/falistości (ISO 3274) oraz ograniczenie skali/filtrację (ISO 16610). Następnie profile są próbkowane w sposób jednoznaczny, zawsze prostopadłe do osi nacięcia, co zapewnia porównywalność metryk pomiędzy nacięciami oraz ich niezależność od globalnej geometrii kości i arbitralnej orientacji ROI.



Rys. 31 Wizualizacja standaryzacji powierzchni ROI i próbkowania profili dla porównywalnej metryki nacięć [A7].

Na rys. 31 przedstawiłem protokół powtarzalnej, ilościowo porównywalnej analizy nacięć na podstawie danych XCT. Po wyznaczeniu obszaru ROI obejmującego sekwencję nacięć wykonywane jest poziomowanie powierzchni w celu ustabilizowania orientacji odniesienia (rys. 31a), a następnie usunięcie składowej formy (makrokształtu) poprzez aproksymację trendu powierzchni i jego odjęcie. Pozwala to na rozdzielenie globalnej geometrii kości od sygnału mikrogeometrii nacięć (rys. 31a–b). Kolejnym krokiem jest ograniczenie skali poprzez filtrację górnoprzepustową zgodną z normą ISO 16610, co prowadzi do odcięcia składowych długofalowych odpowiadających falistości i pozostawienia topografii opisującej mikrogeometrię nacięć (rys. 31b). W efekcie realizowany jest rozdział formy/falistości od składowych istotnych dla oceny mikrogeometrii, zgodnie z intencją normy ISO 3274. Na tak znormalizowanej powierzchni wyznaczana jest oś każdego nacięcia, a następnie wykonywane są przekroje zawsze prostopadłe do tej osi, co zapewnia niezależność metryk profilu od przypadkowej orientacji modelu (rys. 31c). Następnie profile są próbkowane w sposób ustandaryzowany w przekrojach A/B/C, a na ich podstawie wyznaczany jest profil średni, z którego obliczane są parametry

geometryczne nacięć (np. WIS/D/OA). Pozwala to na uzyskanie zestawu wyników porównywalnych pomiędzy nacięciami oraz możliwych do konfrontacji z próbami eksperymentalnymi (rys. 31c).

Poziom formalizacji akwizycji (ACQ)

W pracy [A7] dobieierałem parametry akwizycji XCT na poziomie **ACQ2**: akwizycja pełni rolę odniesienia systemowego i porównywalności metrycznej bez optymalizacji parametrów jakości akwizycji XCT dla każdej rekonstrukcji artefaktów kostnych.

Efekt i znaczenie mojego wkładu w publikację [A7]

Efektem mojego wkładu było opracowanie powtarzalnego, metrologicznie ustandaryzowanego łańcucha pomiarowego obejmującego kolejne etapy: od danych XCT, poprzez transformację powierzchni w obrębie ROI (usunięcie formy/falistości), aż po standaryzację profili i wyznaczanie metryk nacięć. Rozwiązanie to przenosi analizę ornamentacji z poziomu opisu jakościowego do porównywalnej metryki liczbowej. Zastosowana normalizacja powierzchni (zgodna z ISO 3274/ISO 16610) oraz wymuszenie orientacji profili prostopadłe do osi nacięcia uniezależniły parametry profilu (WIS/D/OA) od globalnej geometrii kości oraz arbitralnego ustawienia ROI. Dzięki temu nacięcia mogą być porównywane między sobą oraz jednoznacznie konfrontowane z próbami eksperymentalnymi. Uniwersalność opracowanego rozwiązania polega na tym, że protokół jest transferowalny na inne artefakty kostne o swobodnej geometrii i zmiennej jakości powierzchni. Kluczowym elementem protokołu nie jest estetyczne odwzorowanie modelu lecz metrologicznie zdefiniowana powierzchnia odniesiona oraz ustandaryzowany sposób próbkowania profili. W praktyce protokół umożliwia analizę danych o rozdzielczości rzędu 20 μm , przy czym wyznaczane metryki profilu obejmowały głębokości nacięć rzędu $\sim 46\text{--}119\text{ }\mu\text{m}$ (wartości średnie) oraz do $\sim 287\text{ }\mu\text{m}$ (wartości maksymalnie), co stanowi bezpośredni dowód użyteczności procedury w analizie śladów o amplitudzie sięgającej setek mikrometrów.

4.6.8. [A8] Experimental and simulation analyses of the impact of X-ray tube acceleration voltage on dimensional accuracy in X-ray computed tomography. Measurement (London). 2025, vol. 256, pt. D, art. 118439, s. 1–21. **MNiSW: 200, IF: 5.6.**

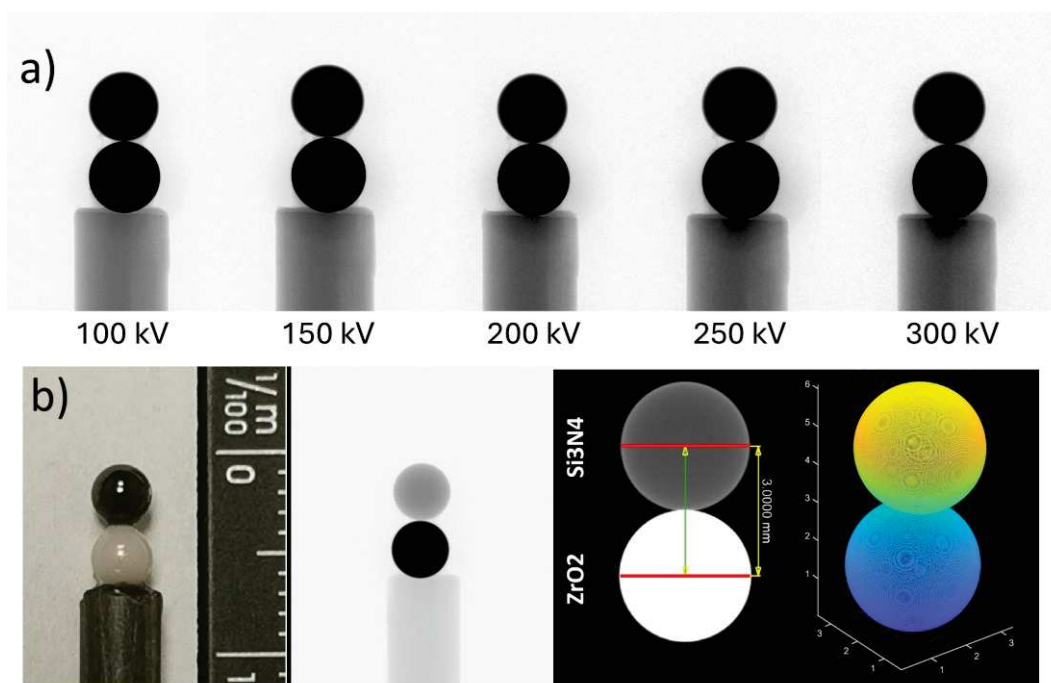
Problem i cel pracy

W pracy [A8] podjąłem problem braku ustandaryzowanej metody doboru napięcia przyspieszającego lampy rentgenowskiej (kV) w technicznej tomografii komputerowej (XCT). W praktyce napięcie dobiera się empirycznie, a typowe wskaźniki jakości obrazu (takie jak

transmisja, CNR, itp.) nie gwarantują minimalizacji błędu wyznaczenia krawędzi oraz odchyłek wymiarowych. Celem pracy było zidentyfikowanie fizycznych przyczyn dwukierunkowych odchyłek wymiarowych obserwowanych przy zmianie napięcia lampy oraz zaproponowanie reguły doboru napięcia opartej na właściwościach materiałowych (charakterystykach osłabienia promieniowania), a nie na subiektywnej ocenie jakości obrazu.

Mój wkład w powstanie pracy w warstwie metod

- Zaprojektowałem kontrolowany eksperyment akwizycji danych dla obiektu dwumateriałowego (dwie ceramiczne kule), umożliwiający izolację wpływu napięcia lampy rentgenowskiej w zakresie od 100 do 300 kV na odchyłki lokalizacji krawędzi, przy jednoczesnym ograniczeniu zakłóceń wynikających z geometrii układu pomiarowego.



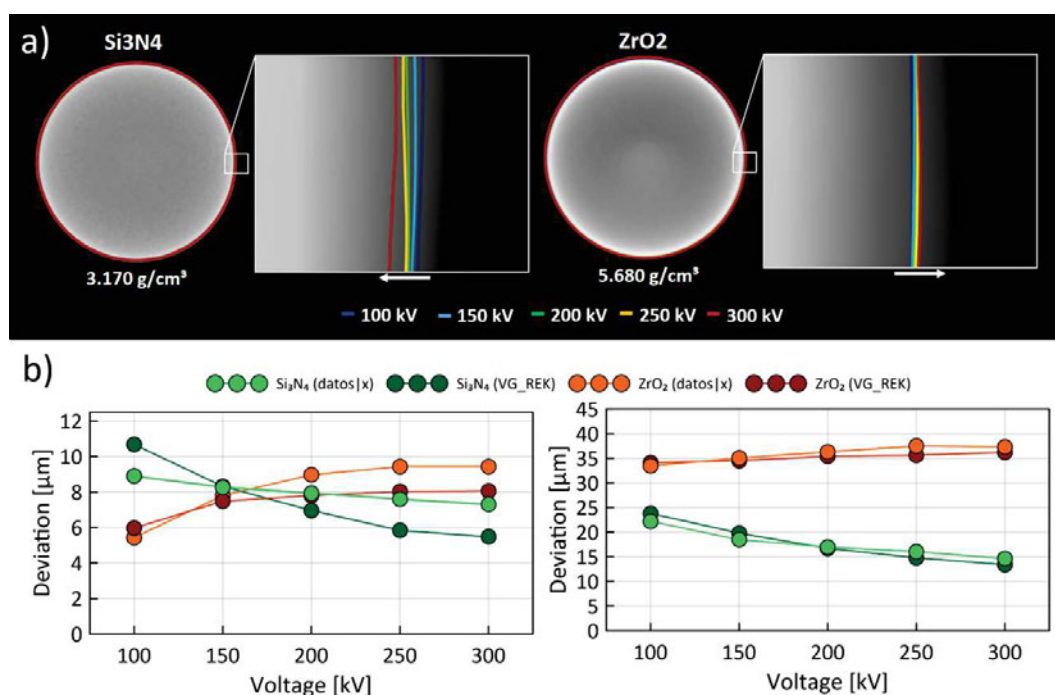
Rys. 32 Dwumateriałowy obiekt referencyjny oraz warunki wyznaczania krawędzi, a) wpływ zmiany napięcia lampy na rejestrowany sygnał, b) weryfikacja odległości między sferami w celu korekcji skali [A8].

Zaprojektowałem kontrolowany eksperyment akwizycji XCT dla obiektu dwumateriałowego złożonego z dwóch ceramicznych kul (Si_3N_4 i ZrO_2), w celu oceny wpływu napięcia lampy w zakresie 100–300 kV na warunki wyznaczania krawędzi i wynikającą z tego odchyłkę wymiarową, przy minimalizacji zakłóceń geometrycznych (systemowych). W trakcie eksperymentu utrzymywana była stała konfiguracja układu oraz zastosowana została korekta odległości pomiędzy sferami jako odniesienie geometryczne do porównań między skanami. Pozwoliło to przypisać obserwowane zmiany efektom energetycznym (m.in. rozpraszaniu promieniowania i efektowi *beam hardening*, a nie przypadkowym różnicom ustawienia obiektu.

Na rys. 32a przedstawiłem przykładowe projekcje dla kolejnych wartości napięcia lampy z celowo dobranym kontrastem uwidaczniającym zmiany składowej tła związanej z rozpraszaniem promieniowania wraz ze wzrostem napięcia, co bezpośrednio wpływa na lokalizację krawędzi w obrazie. Na rys. 32b zaprezentowałem badany obiekt, jego projekcję oraz element kontroli geometrii w postaci weryfikacji odległości pomiędzy sferami, zapewniający porównywalność danych w całym planie pomiarowym i stanowiący podstawę do dalszej analizy przesunięć krawędzi w funkcji napięcia lampy.

- Wykazałem materiałowo zależną korelację pomiędzy napięciem lampy (100–300 kV), a wartością odchyłek średnicy: dla Si_3N_4 odchyłki maleją wraz ze wzrostem napięcia, natomiast dla ZrO_2 wykazują tendencję rosnącą. Zależność ta była obserwowana niezależnie od środowiska rekonstrukcji, co wskazuje na konieczność doboru parametrów akwizycji w oparciu o charakterystykę materiałowo-widmową obiektu.

Na rys. 33 wskazałem, że wpływ napięcia lampy rentgenowskiej na odchyłki wymiarowe w XCT ma charakter materiałowo zależny i dwukierunkowy.



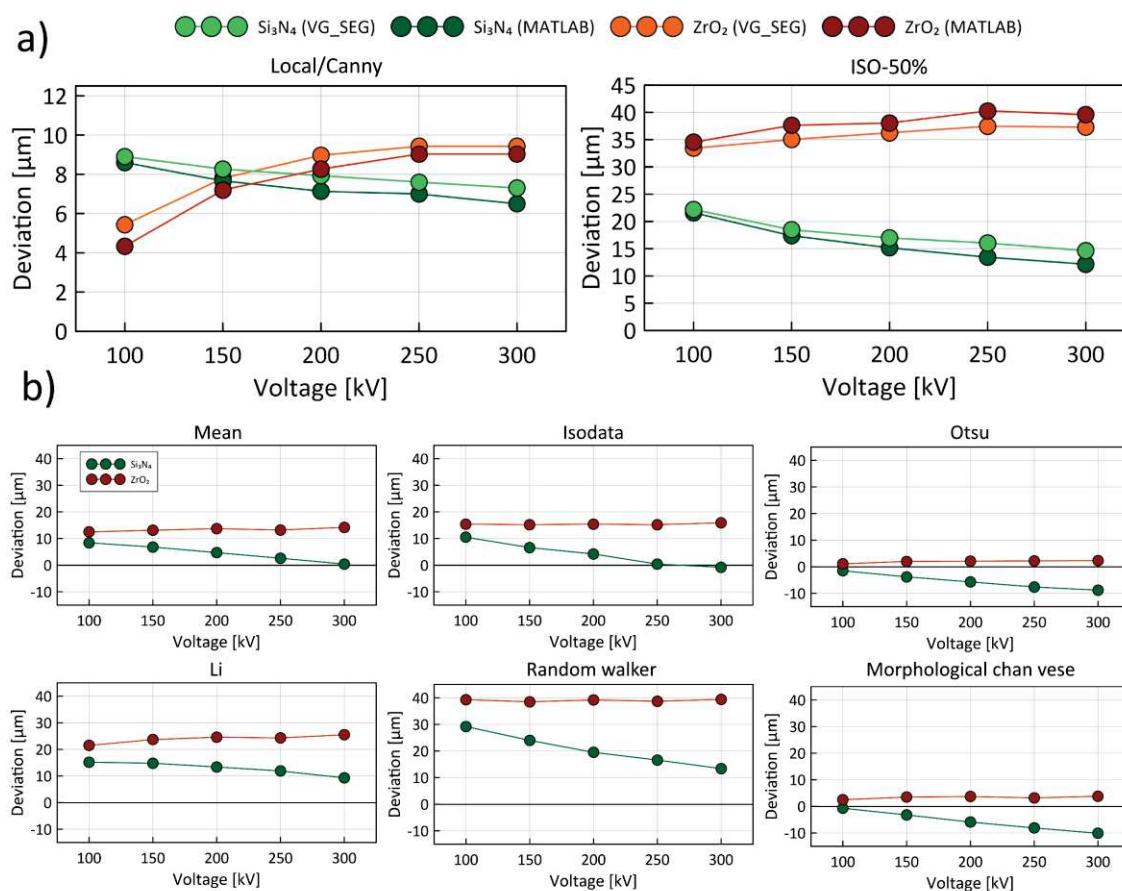
Rys. 33 Materiałowo zależny trend odchyłek średnicy w funkcji napięcia lampy (100–300 kV); a) dla Si_3N_4 – odchyłki maleją, ZrO_2 – odchyłki rosną; b) efekt jest niezależny od środowiska rekonstrukcji [A8].

Analizując pozycję krawędzi na przekrojach dla napięć w zakresie 100–300 kV (rys. 33a), wykazałem, że wraz ze wzrostem napięcia odchyłki średnicy dla kuli o niższej gęstości (Si_3N_4) systematycznie maleją, natomiast dla kuli o wyższej gęstości (ZrO_2) wykazują tendencję rosnącą. Zależność ta, choć nieintuicyjna, jednoznacznie wynika z danych. Fakt, że obserwowany trend

został potwierdzony w dwóch niezależnych środowiskach rekonstrukcji (datos|x oraz VG_REK, rys. 33b), wskazuje, że nie on artefaktem algorytmicznym, lecz konsekwencją fizyki oddziaływania widma promieniowania z materią o określonej charakterystyce tłumienia. Na tej podstawie sformułowałem wniosek, że dobór optymalnego napięcia ekspozycji nie może opierać się na uniwersalnych schematach, lecz powinien wynikać z podejścia materiałowo-widmowego, ukierunkowanego na minimalizację przesunięcia krawędzi.

- Zweryfikowałem wpływ metody segmentacji na wynik wymiarowy, porównując rozwiązania komercyjne z własnymi podejściami progowania lokalnego (Canny/MATLAB) i globalnego (ISO-50%) oraz sześcioma metodami zaimplementowanymi w środowisku Python (*scikit-image*). Wykazałem rozrzut odchyłek w zakresie od $-10\ \mu\text{m}$ do $40\ \mu\text{m}$, co potwierdza, że wybór algorytmu segmentacji stanowi krytyczny element łańcucha metrologicznego XCT.

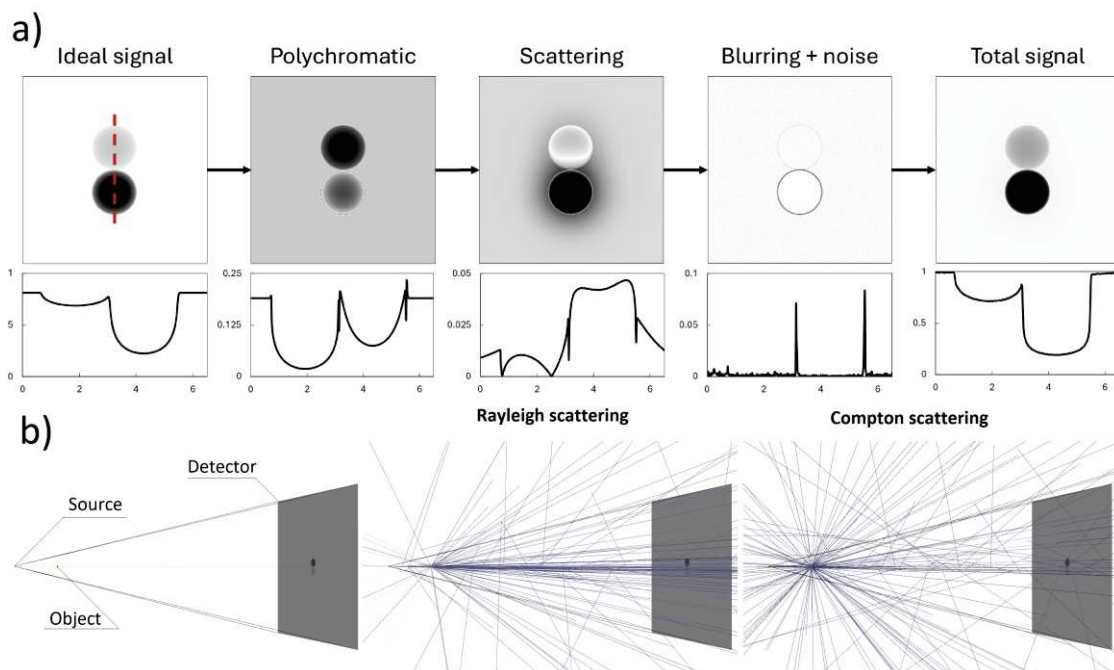
Na rys. 34 pokazałem, że wybór segmentacji jest krytycznym elementem łańcucha metrologicznego XCT, ponieważ może zmieniać poziom odchyłki wymiarowej w skali dziesiątek mikrometrów.



Rys. 34 Wpływ metody segmentacji (lokalna vs globalna oraz metody Python/*scikit-image*) na odchyłkę wymiarową w funkcji napięcia 100–300 kV dla Si₃N₄ i ZrO [A8].

Na rys. 34a porównałem dwie klasy podejść: segmentację lokalną (Local/Canny) oraz globalne progowanie ISO-50%, zestawiając implementacje komercyjne (VG_SEG) i własne (MATLAB). Wyniki wskazują, że metody lokalne zapewniają niższy i bardziej stabilny poziom odchyłek wymiarowych w całym zakresie napięć 100–300 kV, podczas gdy progowanie ISO-50% generuje większe odchyłki oraz silniejszą zależność od materiału. Jednocześnie zachowany jest materiałowo zależny trend zmian wynikający ze zmiany napięcia lampy (dla Si_3N_4 odchyłki maleją, a dla ZrO_2 rosną), co pokazuje, że segmentacja wpływa przede wszystkim na poziom odchyłek, lecz nie eliminuje fizycznego mechanizmu zależnego od energii widma. Na rys. 34b przedstawiłem rozszerzoną analizę obejmującą sześć metod progowania dostępnych w środowisku Python (*scikit-image*; m.in. Mean, Isodata, Otsu, Li, Random walker, Morphological Chan–Vese), uzyskując szeroki rozrzut wyników w zakresie od ok. $-10\text{ }\mu\text{m}$ do $40\text{ }\mu\text{m}$ w zależności od zastosowanej metody i ustawień. To ilościowo potwierdza, że „algorytm segmentacji” i jego parametryzacja stanowią istotne źródło zmienności wyniku i muszą być traktowane jako element formalnie kontrolowany w procedurze metrologicznej.

- Opracowałem i zwalidowałem realistyczny model symulacyjny XCT w aRTist, odtwarzający kompletny sygnał (polichromatyczność, rozpraszanie, rozmycie oraz szum), który umożliwia rozdzielenie wkładu poszczególnych zjawisk fizycznych w powstawanie odchyłek wymiarowych. Uzyskana zgodność symulacja–eksperyment, z maksymalną różnicą $2,5\text{ }\mu\text{m}$, potwierdziła predykcyjną użyteczność modelu do analizy odchyłek pomiarowych.



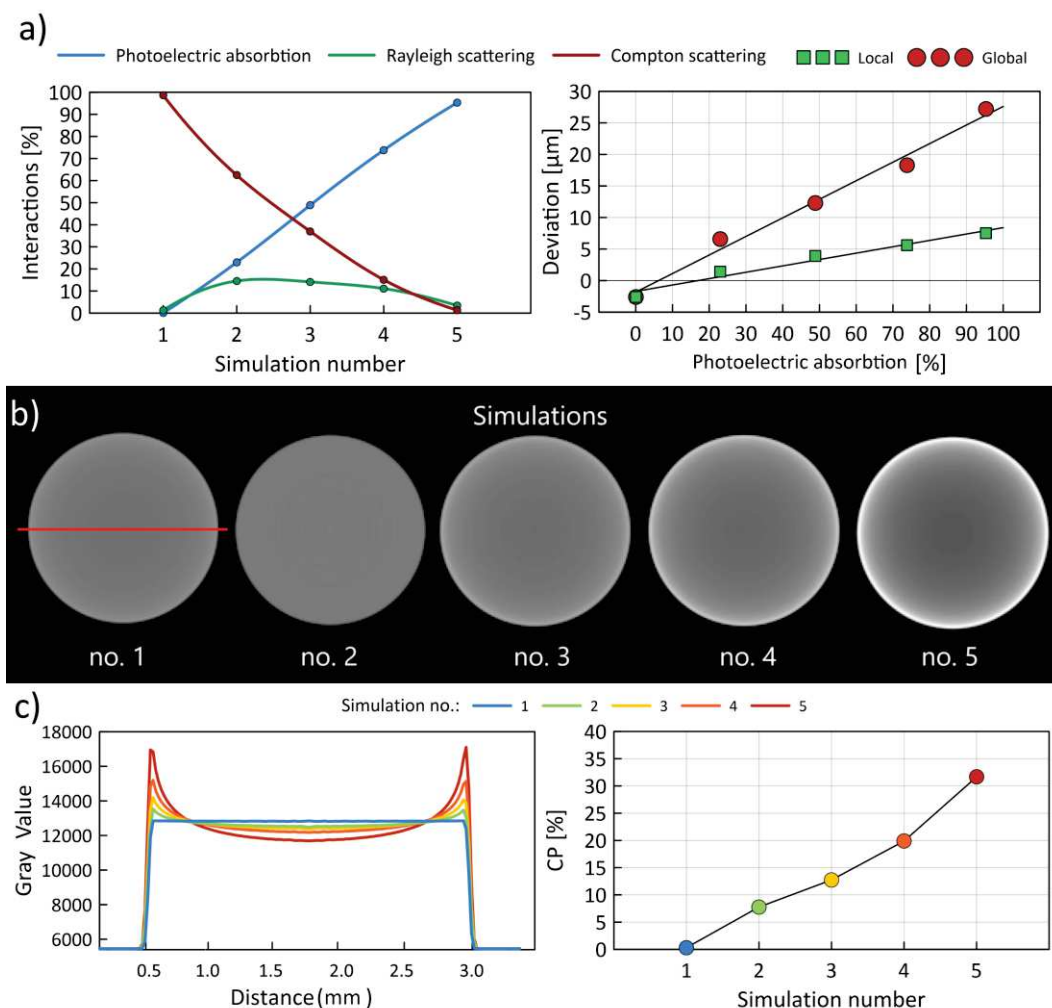
Rys. 35 Składowe realistycznego sygnału XCT w modelu aRTist oraz wizualizacja ścieżek rozpraszania (Rayleigh i Compton) wpływających na odchyłki (opracowanie własne).

Na rys. 35 przedstawiłem sposób budowy modelu symulacyjnego XCT w środowisku aRTist, zaprojektowanego nie jako idealizowana projekcja, lecz jako realistyczny odpowiednik sygnału rejestrowanego w tomografii komputerowej (XCT). Na rys. 35a rozdzieliłem sygnał na składowe, które w praktyce determinują przesunięcie krawędzi i odchyłki wymiarowe: od sygnału idealnego, poprzez wpływ polichromatyczności widma (źródło nieliniowości związanych z utwardzaniem wiązki), następnie wkład rozpraszania, aż po rozmycie geometryczne i szum, prowadzące do sygnału całkowitego odpowiadającego projekcjom eksperymentalnym. Profile intensywności zestawione pod obrazami ilustrują, w jaki sposób każda ze składowych zmienia kontrast oraz kształt przejścia na krawędzi. Na rys. 35b zwizualizowałem mechanizmy rozpraszania Rayleigha i Comptona w geometrii źródło–obiekt–detektor, co umożliwiło ilościową interpretację zmian udziału promieniowania rozproszonego wraz ze zmianą energii widma oraz ich wpływu na odchyłki pomiarowe. Zbudowany w ten sposób model zwalidowałem poprzez bezpośrednie porównanie wyników symulacji z eksperymentem, uzyskując maksymalną różnicę $2,5\ \mu\text{m}$, co potwierdziło jego przydatność do predykcyjnej analizy odchyłek oraz planowania parametrów akwizycji.

- Powiązałem kierunek i poziom odchyłek wymiarowych z fizyką oddziaływania promieniowania z materią, wykazując na podstawie symulacji, że wzrost udziału efektu fotoelektrycznego prowadzi do nasilenia efektu *beam hardening*, co skutkuje przesunięciem krawędzi w stronę tła i w konsekwencji zawyżeniem średnicy przy segmentacji progowej.

Na rys. 36 przedstawiłem mechanizm, który ilościowo wyjaśnia, dlaczego wraz ze zmianą energii promieniowania odchyłki wymiarowe mogą rosnąć lub maleć w zależności od materiału. Na rys. 36a zestawiałem udziały dominujących oddziaływań (efekt fotoelektryczny, rozpraszanie Rayleigha i Comptona) w kolejnych wariantach symulacji, wykazując, że odchyłka wymiarowa rośnie wraz ze wzrostem udziału efektu fotoelektrycznego – zarówno dla segmentacji globalnej, jak i lokalnej, przy czym podejście globalne wykazuje wyraźnie większą wrażliwość. Na rys. 36b. pokazałem, w jaki sposób rosnący udział efektu fotoelektrycznego zmienia rozkład intensywności w przekroju kuli – narasta efekt *cuppingu* oraz nieliniowość tonalna typowa dla efektu *beam hardening*, co bezpośrednio deformuje obszar przejścia na krawędzi. Na rys. 36c przedstawiłem profile intensywności wzdłuż średnicy oraz wzrost miary *cuppingu* (CP) w kolejnych symulacjach, domykając związek przyczynowy: większy udział efektu fotoelektrycznego powoduje silniejszy efekt *beam hardening/cupping*, co powoduje przesunięcie krawędzi w stronę tła i zawyżenie średnicy przy progowaniu. Na tej podstawie sformułowałem fizycznie uzasadnione kryterium doboru napięcia lampy: minimalizację udziału efektu

fotoelektrycznego dla danego materiału, zamiast optymalizacji akwizycji wyłącznie w oparciu o heurystyczne wskaźniki jakości obrazu.

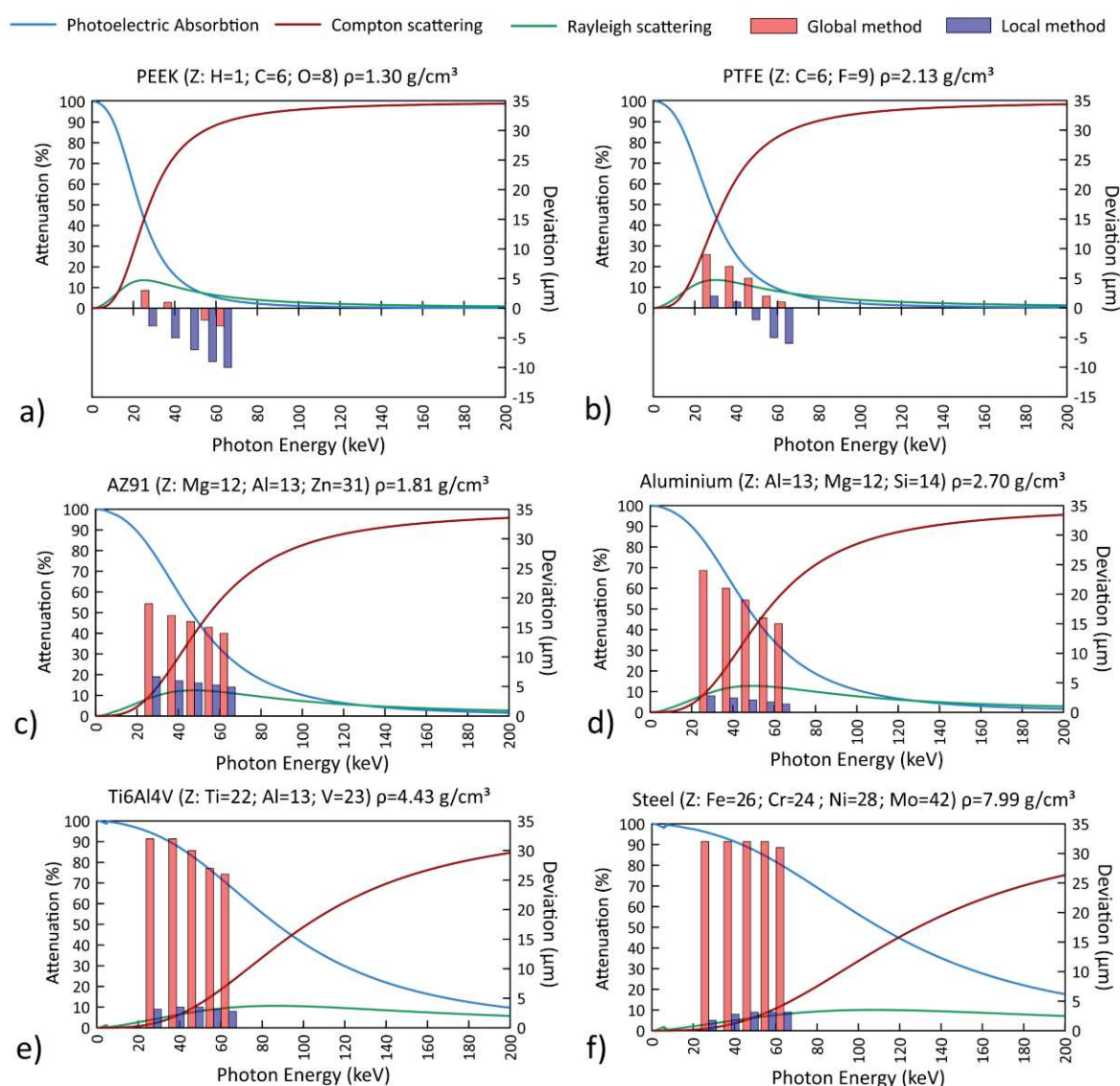


Rys. 36 Zależność odchyłek (a) i efektu *beam hardening* od udziału efektu fotoelektrycznego (b): wzrost fotoeffektu zwiększa *cupping* (c) i przesuwa krawędź, co zawyża średnicę [A8].

- Uogólniłem wyniki symulacji na klasy materiałów, wykazując nieliniową, materiałowo zależną („cykliczną”) zależność odchyłek wymiarowych od energii widma, wynikającą ze zmiany dominacji efektu fotoelektrycznego oraz rozpraszania (Compton/Rayleigh). Na tej podstawie wskazałem praktyczne okna wartości napięć jako punkt wyjścia do doboru napięcia dla danej klasy materiału.

Na rys. 37 pokazałem mechanizm umożliwiający przełożenie fizyki tłumienia promieniowania na praktyczny dobór napięcia lampy. Dla kolejnych klas materiałów (PEEK, PTFE, AZ91, Al, Ti-6Al-4V, stal) zestawiałem krzywe udziału fotoeffektu oraz rozpraszania Comptona i Rayleigha w funkcji energii fotonów, a poniżej odpowiadające im odchyłki średnicy wyznaczone metodą segmentacji globalnej i lokalnej. Wyniki pokazują, że wraz ze wzrostem „ciężkości” materiału

(Z , ρ), cały zakres równowagi oddziaływań przesuwają się w stronę średnich energii widma o wyższej wartości, to samo okno energii, które minimalizuje odchyłki dla polimerów, dla stopów tytanu i stali przestaje być optymalne, a minimum odchyłek pojawia się dopiero przy wyższych energiach. Opisaną zależność określiłem „cykliczną” co oznacza, że przy zmianie napięcia (energii wiązki) błąd wymiarowy maleje lub rośnie w zależności od gęstości obiektu, zamiast zmieniać się stale w jednym kierunku. Dzieje się tak, ponieważ w kolejnych zakresach energii inne zjawiska dominują w kształtowaniu sygnału na krawędzi obiektu: *beam hardening* związany z efektem fotoelektrycznym lub rozpraszanie, które wpływa na rejestrowaną intensywność tła.



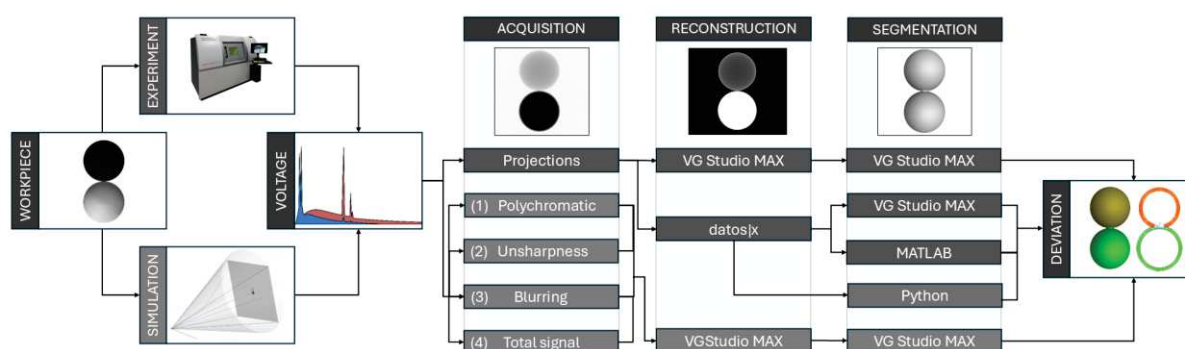
Rys. 37 Cykliczna zależność odchyłek wymiarowych od energii widma dla klas materiałów: od materiałów polimerowych po stal – zestawiona z udziałami efektu fotoelektrycznego oraz rozpraszania (Rayleigh/Compton) oraz wynikami dla segmentacji globalnej i lokalnej [A8].

W konsekwencji rysunek 37 przedstawia zależności spektralne, umożliwiające wskazanie realistycznych okien napięć dla poszczególnych klas materiałów w analizowanej konfiguracji pomiarowej – takich, które lokują widmo w obszarze możliwie zrównoważonych mechanizmów tłumienia, minimalizując przesunięcie krawędzi, zamiast opierać się na „uniwersalnym” napięciu lub pojedynczym wskaźniku jakości obrazu.

Mój wkład w powstanie pracy w warstwie strategii

- Zaprojektowałem zintegrowany protokół eksperymentalno-symulacyjny, w którym decyzja o doborze napięcia lampy rentgenowskiej nie opiera się na jakościowych wskaźnikach obrazu, lecz na ilościowo wyznaczonej odchyłce wymiarowej oraz jej fizycznym wyjaśnieniu w oparciu o model tłumienia promieniowania (udział efektu fotoelektrycznego i rozpraszania) i wynikający z niego mechanizm przesunięcia krawędzi.

Na rys. 38 przedstawiłem schemat wdrożonego protokołu, umożliwiającego przejście od empirycznego ustalania wartości napięcia przyspieszającego lampy rentgenowskiej do decyzji opartej na metryce i fizyce zjawiska. Punktem wyjścia jest kontrolowany obiekt referencyjny oraz plan pomiarowy obejmujący zakres napięć 100–300 kV, którego wynikiem są projekcje odzwierciedlające rzeczywisty sygnał XCT. Następnie przeprowadziłem rekonstrukcję w dwóch niezależnych środowiskach (datos|x i VG Studio MAX), aby ograniczyć ryzyko przypisania obserwowanych trendów artefaktom pojedynczej procedury rekonstrukcji. Kolejnym etapem było równoległe przetwarzanie segmentacyjne (metody komercyjne oraz implementacje w MATLAB i Python), co pozwoliło rozdzielić wpływ doboru progu segmentacji od wpływu energii widma.



Rys. 38 Zintegrowany protokół eksperymentalno-symulacyjny doboru napięcia lampy w XCT [A8]. Kluczowym elementem protokołu jest blok symulacyjny (aRTist), w którym odtwarzam składowe sygnału (polichromatyczność widma, rozpraszanie, rozmycie geometryczne, szum) oraz wiążę je z mechanizmem przesunięcia krawędzi, tak aby obserwowane trendy odchyłek

miały jednoznaczną interpretację fizyczną, a nie wyłącznie charakter empiryczny. W efekcie dobór napięcia w tej strategii jest wynikiem pętli: **napięcie - sygnał - krawędź - odchyłka - wyjaśnienie fizyczne**, co stanowi formalizację **ACQ4**.

- Wykazałem, że popularne kryteria „optymalizacji akwizycji” (transmisja, CNR, CP, SF) nie są wystarczające do minimalizacji odchyłek wymiarowych, ponieważ mimo ich monotonicznych zmian wraz ze wzrostem napięcia nie uzyskuje się jednoznacznej ani transferowalnej korelacji z odchyłką średnicy ani z przesunięciem krawędzi.

W pracy przeanalizowałem klasyczne wskaźniki jakości projekcji i rekonstrukcji stosowane do „optymalizacji” akwizycji w XCT, tj. transmisję, CNR, miarę *cuppingu* (CP) oraz udział rozpraszania (SF), zestawiając je bezpośrednio z odchyłką średnicy i obserwowanym przesunięciem krawędzi. Wykazałem, że choć wskaźniki te wraz ze wzrostem napięcia często zmieniają się konsekwentnie w jednym kierunku (rosną lub maleją), to nie przekłada się to na jednoznaczne minimum odchyłki wymiarowej: ten sam „korzystny” poziom transmisji lub maksymalizacja CNR mogą skutkować różnymi odchyłkami w zależności od materiału i dominującego mechanizmu tłumienia. Oznacza to, że wskaźniki te opisują ogólną jakość sygnału, nie lecz nie stanowią kryterium metrologicznego doboru napięcia, ponieważ nie gwarantują minimalizacji odchyłek wyznaczenia krawędzi. Na tej podstawie uzasadniłem, że dobór napięcia w strategii **ACQ4** powinien wynikać z metryki odchyłki wymiarowej oraz modelu fizycznego (udział efektu fotoelektrycznego i rozpraszania wpływający na *beam hardening* i tło, determinujące przesunięcie krawędzi), a nie z prostych heurystyk jakości obrazu.

Poziom formalizacji akwizycji (ACQ)

W pracy [A8] opracowałem transferowalną, fizycznie uzasadnioną regułę doboru napięcia lampy rentgenowskiej, opartą na modelu tłumienia promieniowania i minimalizacji efektu *beam hardening* jako źródła przesunięcia krawędzi, co umożliwia realizację akwizycję na poziomie ACQ4 zamiast empirycznych ustawień zależnych od operatora.

Efekt i znaczenie mojego wkładu w publikację [A8]

W publikacji [A8] opracowałem kompletną, autorską strategię ACQ4 doboru napięcia lampy rentgenowskiej w XCT, w której decyzja o wartości napięcia wynika z metryki odchyłki wymiarowej oraz jej fizycznego wyjaśnienia, a nie z jakości obrazu. Kluczowym rezultatem jest wykazanie, że wraz ze wzrostem napięcia w zakresie 100–300 kV odchyłki wymiarowe mogą zmieniać się dwukierunkowo w zależności od materiału (Si_3N_4 – maleją, ZrO_2 – rosną), co obala koncepcję „uniwersalnego napięcia” i uzasadnia podejście materiałowo-widmowe. Jednocześnie

wykazałem, że obserwowane trendy są niezależne od środowiska rekonstrukcji, natomiast wybór segmentacji może istotnie zmieniać poziom odchyłek w szerokim zakresie (ok. –10 do 40 μm), co oznacza, że segmentacja musi być traktowana jako formalnie kontrolowany element procedury metrologicznej. Uzupełnieniem strategii jest predykcyjny model symulacyjny aRTist, zwalidowany względem eksperymentu do poziomu 2,5 μm , stanowiący praktyczne narzędzie do planowania akwizycji i minimalizacji odchyłek „u źródła” przez dobór widma, zamiast późniejszej kompensacji artefaktów.

4.6.9. Podsumowanie osiągnięć projektowych i naukowych

W ramach zrealizowanego oryginalnego osiągnięcia projektowego [OP] opracowałem spójne, procesowe podejście do problemu ilościowych pomiarów z wykorzystaniem technicznej tomografii komputerowej (XCT), w której **łączę metody** (jednoznacznie zdefiniowane sekwencje kroków: akwizycja–rekonstrukcja–segmentacja–analiza), **aplikacje** (konkretne cele pomiarowe i klasy zadań inżynierskich) oraz **strategie** (powtarzalne protokoły decyzyjne: dobór–kryteria–iteracja), tak aby wynik pomiaru nie był „ładnym obrazkiem”, lecz **metrologicznie porównywalnym rezultatem ilościowym**. W konsekwencji proponowany sposób postępowania umożliwia podejście do **standaryzacji przetwarzania danych XCT do postaci formatu „AI-ready”**, umożliwiając wykorzystanie danych tomograficznych w systemach automatycznej analizy i uczenia maszynowego, przy jednoczesnym ograniczeniu wpływu zmienności technicznej danych. Wspólnym mianownikiem osiągnięcia projektowego [OP] jest **stabilizacja wyniku na granicy materiałowej** (na etapie rekonstrukcji i segmentacji) oraz **powiązanie wyniku ze skalą odniesienia** (poprzez kontrolę skali i odniesienie systemowe). Tak zdefiniowany proces **tworzy metrologiczne ramy** dla wprowadzania **metrycznych kryteriów walidacji symulacji numerycznych**, rozwijanych i wykorzystywanych w osiągnięciu naukowym [ON], opartych na bezpośrednim porównaniu geometrii rzeczywistej (XCT) i symulowanej w tym samym układzie odniesienia.

Jednocześnie, w osiągnięciu naukowym [ON], na przykładzie **cyklu publikacji A1–A8**, wykazuję, że **sama kontrola dokładności systemowej (MPE)** nie jest wystarczająca do zapewnienia jakości pomiarów XCT. Prowadzi to do formalizacji doboru parametrów akwizycji na **poziomach ACQ1–ACQ4**, porządkujących relację pomiędzy odniesieniem systemowym, jakością danych oraz fizyką oddziaływania promieniowania z materiałem, a w pracy kulminacyjnej **A8** – do **sformułowania strategii materiałowo-widmowej**, w której dobór napięcia lampy rentgenowskiej wynika z **metryki odchyłki wymiarowej oraz jej wyjaśnienia fizycznego** (udział efektu fotoelektrycznego i rozpraszania), a nie z heurystycznych wskaźników jakości

obrazu. Podejście to umożliwia przenoszenie procedur pomiarowych pomiędzy systemami XCT i klasami materiałów. Całość tworzy **transferowalny i audytowalny schemat postępowania**, integrujący akwizycję, przetwarzanie i analizę danych w **jeden spójny proces pomiarowy XCT**, odpowiadający wymaganiom współczesnej inżynierii mechanicznej.

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

W ramach prowadzonej działalności badawczej wykazuję się istotną aktywnością naukową realizowaną we współpracy z krajowymi i zagranicznymi ośrodkami naukowymi. Poniżej przedstawiam wykaz ośrodków, z którymi prowadzona współpraca zaowocowała wspólnymi projektami badawczymi, publikacjami naukowymi, doniesieniami konferencyjnymi oraz wizytami w ośrodkach partnerskich.

5.1. Współpraca międzynarodowa

5.1.1. Massachusetts Institute of Technology (MIT)

Okres współpracy: 2022–obecnie

Naukowcy z którymi współpracuję: Prof. Wojciech Matusik

Zakres i efekt współpracy:

Moja współpraca z zespołem prof. Matusika, dotyczy wykorzystania metod uczenia maszynowego i głębokiego uczenia w obszarze technicznej tomografii komputerowej (XCT), w szczególności implementacji metod wyjaśnialnej sztucznej inteligencji (XAI) do predykcji parametrów pomiarowych oraz doskonalenia etapów akwizycji, rekonstrukcji, korekcji i segmentacji danych wolumetrycznych. Celem tych działań jest zwiększenie wiarygodności współrzędnościowych pomiarów tomograficznych realizowanych z wykorzystaniem XCT. Zrealizowana wizyta badawcza oraz wypracowane w jej trakcie koncepcje badawcze umożliwiły przygotowanie dokumentacji aplikacyjnej oraz skuteczne pozyskanie finansowania w ramach programu FIRST TEAM FENG (Fundacja na rzecz Nauki Polskiej, środki programu *Fundusze Europejskie dla Nowoczesnej Gospodarki – FENG*), w którym prof. Matusik pełni rolę partnera naukowego projektu. Wniosek składałem dwukrotnie – w 2024 r. oraz 2025 r. – przy czym w drugiej edycji uzyskałem ocenę pozytywną na wszystkich etapach oceny.

- **2024-2028** – FENG.02.02-IP.05-001/23, FNP FIRST TEAM: *Segmentacja obrazów tomograficznych z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji do zastosowań metrologicznych* – brak finansowania.
- **2025-2029** – FENG.02.02-IP.05-001/24, FNP FIRST TEAM: *Inteligentny system wsparcia współrzędnościowych pomiarów tomograficznych – AiSSIST* – **finansowanie przyznane (4 000 000 PLN).**

Wizyty badawcze:

- 14–31.07.2023 – wizyta badawcza (*research visit*) w *Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory (CSAIL), Massachusetts Institute of Technology (MIT, USA)*. W trakcie pobytu prowadziłem prace badawcze nad integracją technik przyrostowych, przemysłowej tomografii komputerowej (XCT) oraz metod sztucznej inteligencji, ukierunkowanych na analizę i predykcję parametrów procesów wytwórczych. Opracowałem założenia wykorzystania metod uczenia maszynowego w łańcuchu pomiarowym XCT, obejmujące plan eksperymentów, procedury przetwarzania danych oraz koncepcję integracji algorytmów ML/DL ze środowiskiem pomiarowym. Wizyta była realizowana w ramach projektu „*Self-Optimizing Additive Manufacturing*”, finansowanego ze środków programu MIT-Poland Lockheed Martin Seed Fund w ramach inicjatywy MISTI – MIT Global Experiences, prowadzonego wspólnie przez MIT oraz Politechnikę Wrocławską.

5.1.2. Brandenburg University of Technology (BTU)

Okres współpracy: 2019–obecnie

Naukowcy z którymi współpracuję: Prof. Matthias Ziegenhorn, dr. hab. Robert Roszak, dr Daniela Schob

Zakres i efekt współpracy:

Moja współpraca z zespołem prof. Ziegenhorna koncentruje się na wykorzystaniu nieniszczących badań tomograficznych (XCT) do wsparcia oraz walidacji procedur symulacyjnych rozwijanych i stosowanych przez zespół BTU. W ramach tych prac integrowałem podejście eksperymentalne (XCT) z modelowaniem numerycznym oraz wynikami uzyskiwanymi w procesach wytwarzania przyrostowego, tak aby umożliwić spójne porównanie danych pomiarowych i obliczeniowych oraz podnieść wiarygodność modeli. Efektem współpracy są wspólne publikacje naukowe, m.in. w czasopiśmie *Additive Manufacturing* oraz *Materials*, w których przedstawiliśmy wdrożone i zweryfikowane rozwiązania dotyczące

przetwarzania stopów na bazie niklu (Inconel 718) oraz aluminium (AlSi7Mg0.6) z wykorzystaniem techniki przyrostowej LPBF. Istotną częścią współpracy było przygotowanie wniosków projektowych realizowanych z udziałem partnerów międzynarodowych. W tych działaniach pełniłem funkcję kierownika zespołu po stronie Politechniki Wrocławskiej oraz odpowiadałem za koordynację wkładu merytorycznego, w szczególności w obszarze technicznej tomografii komputerowej (XCT) oraz powiązania badań eksperymentalnych z walidacją modeli numerycznych.

- **2020–2022** – Wspólne projekty badawcze Polska–Niemcy (NAWA 2020): *Zaawansowane metody obrazowania i obliczeń numerycznych w technologiach przyrostowych (L-PBF)*, nr rej.: PPN/BDE/2020/1/00021 – brak finansowania.
- **2021–2024** – OPUS LAP (Polska–Niemcy): *Badanie addytywnie wytwarzanego stopu Scalmalloy skorelowane z analizami XCT w warunkach in situ/ex situ, badaniami mechanicznymi i modelowaniem materiałowym*, nr rej.: 2020/39/I/ST8/02847 – brak finansowania (rekomendacja po stronie PL, brak DE).
- **2022–2025** – OPUS LAP (Polska–Niemcy): *Badania eksperymentalne i numeryczne wytwarzanego przyrostowo wysokowytrzymałego stopu aluminium wraz z ilościową oceną 3D-XCT w warunkach pomiaru in situ/ex situ*, nr rej.: 2021/43/I/ST8/02123 – brak finansowania.
- **2022–2024** – Wspólne projekty badawcze Polska–Niemcy (NAWA 2022): *Zastosowanie funkcjonalnej wysokorozdzielczej tomografii komputerowej w symulacjach numerycznych i badaniach mechanicznych wytwarzanych przyrostowo stopów aluminium*, nr rej.: BPN/BDE/2022/1/00013 – **finansowanie przyznane (24 250 PLN)**.
- **2025–2029** – HORIZON-EIC-2025-PATHFINDEROPEN: *Overcoming Vapour-Expansion Restrictions in Two-Phase Systems* (Belgia, Dania, Niemcy, Polska, Ukraina, Włochy), nr rej.: 101257638 – brak finansowania.

Wizyty badawcze:

- 12-14.11.2019 – wizyta badawcza obejmująca prace nad koncepcją wykorzystania przemysłowej tomografii komputerowej (XCT) jako narzędzia walidacji wyników symulacji numerycznych realizowanych przez zespół prof. Ziegernhorna. Pobyt był powiązany z wydarzeniem *Brandenburg Mechanics Colloquium: Construction/Material/ Simulation*. W jego trakcie opracowałem procedurę badawczą łączącą analizę XCT z modelowaniem

numerycznym, która została następnie opublikowana w pracy dotyczącej analizy próbek wykonanych ze stopu Inconel 718, z uwzględnieniem rzeczywistej mikroporowatości w symulacjach. Efektem wizyty było zdefiniowanie, a następnie rozwinięcie spójnego protokołu porównawczego XCT–MES (kryteria przygotowania danych, odwzorowania porowatości oraz oceny zgodności wyników), który stał się podstawą dalszych prac i publikacji w tym obszarze.

- 30.05-2.06.2023 – wizyta badawcza ukierunkowana na określenie zakresu badań symulacyjnych oraz definicję warunków brzegowych na podstawie wyników eksperymentalnych. Spotkanie stanowiło start merytoryczny projektu NAWA: wspólnie z zespołem uzgodniliśmy aktualne kierunki badań, strukturę zadań oraz koncepcje metodyczne realizowane w kolejnych dwóch latach trwania projektu. Efektem wizyty było przygotowanie uzgodnionych założeń do planu prac, obejmujących dobór przypadków badawczych, parametryzację modeli oraz zasady porównania wyników symulacji z danymi eksperymentalnymi.
- 11–13.12.2023 – wizyta badawcza ukierunkowana na weryfikację wyników uzyskanych w projekcie oraz opracowanie planu publikacji. W trakcie spotkania podsumowano przebieg dotychczasowych prac, przeanalizowano rezultaty prezentowane na konferencjach naukowych oraz zdefiniowano kolejne kroki realizacji projektu, w tym harmonogram przygotowania manuskryptów, podział zadań i zakres prac uzupełniających. Efektem wizyty było opracowanie spójnej mapy publikacyjnej oraz planu działań prowadzących do realizacji kluczowych pakietów roboczych projektu.
- 6-9.08.2024 – wizyta badawcza poświęcona porównaniu wyników opracowanych modeli numerycznych z rezultatami badań funkcjonalnych. W trakcie spotkania przedstawiono postępy prac, przeanalizowano rozbieżności i uzgodniono strategię rozwiązania zidentyfikowanych problemów. Jednocześnie rozszerzono zakres badań o materiały wytwarzane z wykorzystaniem konwencjonalnych metod wytwórczych oraz testy prowadzone w ujemnych temperaturach, definiując wymagania dotyczące danych wejściowych i kryteriów porównawczych. Efektem wizyty było doprecyzowanie kierunków dalszych prac oraz opracowanie planu działań obejmującego rozszerzony zakres eksperymentów i walidacji modeli.
- 12-14.11.2024 – wizyta badawcza ukierunkowana na opracowanie planu publikacji oraz podsumowanie dotychczasowych rezultatów projektu. W trakcie spotkania zweryfikowano stan prac i zaplanowano działania niezbędne do ukończenia zadań projektowych. Opracowano

propozycje manuskryptów dotyczących: oceny wpływu temperatury kriogenicznej na stop Scalmalloy® oraz eksperymentalnej i numerycznej analizy uszkodzeń w niskocyklowych badaniach zmęczeniowych stopu AlSi7Mg0.6. Efektem wizyty było ustalenie zakresu publikacji, podziału zadań oraz harmonogramu przygotowania publikacji, będących na etapie finalizacji.

Prace badawcze opublikowane w ramach współpracy:

Referaty / wystąpienia konferencyjne:

- [D5] Daniela Schob, Jakub Tabin, Jakub Kawałko, Robert Roszak, **Grzegorz Ziółkowski, Matthias Ziegenhorn**, Kai Hilgenberg: *Comparative Analysis FFF vs. cold rolled 316L Samples*, 4th Symposium on Materials and Additive Manufacturing – Additive 2024, Berlin (Germany), 12–14.06.2024

Rozdziały w monografiach / pracach zbiorowych:

- [D9] Daniela Schob, Lukas Richter, Philipp Maasch, Robert Roszak, **Grzegorz Ziółkowski**, Michał Olejarczyk, Piotr Gruber, Emilia Grochowska, Tomasz Kurzynowski, **Matthias Ziegenhorn**: *Abaqus umat implementation for evaluating shear behavior in selectively laser-sintered polyamide 12: an experimental and numerical approach*, [w:] Grzegorz Lesiuk, Wojciech Myszka (red.), XIX Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania. Abstrakty, Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2023. ISBN 978-83-7493-255-4.
- [D10] **Grzegorz Ziółkowski**, Iryna Smolina, Emilia Grochowska, Andrzej Pawlak, Karol A. Kobiela, Konrad Gruber, **Matthias Ziegenhorn**, Robert Roszak, Daniela Schob, Lukas Richter, Philipp Maasch, Tomasz Kurzynowski: *Understanding the Relationship between Pore Features and Fatigue Behaviour in AlSi7Mg0.6 Alloy Fabricated by Additive Manufacturing*, [w:] Grzegorz Lesiuk, Wojciech Myszka (red.), XIX Krajowa Konferencja Mechaniki Pękania. Abstrakty, Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2023, s. 86–87. ISBN 978-83-7493-255-4

Artykuły w czasopismach:

- [A3] **Grzegorz Ziółkowski**, Konrad Gruber, Emilia Tokarczyk, Robert Roszak, **Matthias Ziegenhorn**: *X-ray Computed Tomography for the ex-situ mechanical testing and simulation of additively manufactured IN718 samples*, Additive Manufacturing, 2021, vol. 45, art. 102070.
- [B12] Irina Smolina, Konrad Gruber, Andrzej Pawlak, **Grzegorz Ziółkowski**, Emilia Grochowska, Daniela Schob, Karol A. Kobiela, Robert Roszak, **Matthias Ziegenhorn**, Tomasz Kurzynowski: *Influence of the AlSi7Mg0.6 aluminium alloy powder reuse on the*

quality and mechanical properties of LPBF samples, Materials, 2022, vol. 15, nr 14, art. 5019, s. 1–21.

5.2. Współpraca krajowa

5.2.1. Uniwersytet Wrocławski

Okres współpracy: 2019–obecnie

Naukowcy z którymi współpracuje: prof. dr hab. Tomasz Płonka

Zakres i efekt współpracy:

Współpraca z prof. Tomaszem Płonką (Instytut Archeologii Uniwersytetu Wrocławskiego) obejmuje transfer narzędzi i standardów analizy inżynierskiej do archeologii epoki kamienia, w szczególności poprzez zastosowanie technicznej tomografii komputerowej (XCT) jako metody nieinwazyjnego pozyskiwania danych o geometrii i strukturze wewnętrznej zabytków. Kluczowym elementem tych działań jest budowa cyfrowych reprezentacji 3D (modele, przekroje, wizualizacje cech), umożliwiających powtarzalną dokumentację oraz porównania między obiektami. Na tej podstawie rozwijany jest również komponent sztucznej inteligencji, wspomagający identyfikację i opis cech sztuki przenośnej (np. znaków, nacięć, ornamentów) oraz standaryzację procesu digitalizacji i interpretacji, co prowadzi do zwiększenia skalowalności analiz i ograniczenia uznaniowości opisu. Efektem współpracy są wspólne publikacje naukowe i wystąpienia potwierdzające użyteczność podejścia XCT (a także kierunku rozwoju metod opartych na AI) w badaniach mezolitycznej i paleolitycznej sztuki przenośnej. Współpraca realizowana jest w ramach wspólnych projektów [P11] oraz [P4].

Prace badawcze opublikowane w ramach współpracy:

Referaty / wystąpienia konferencyjne:

- [D1] **Tomasz Płonka**, Maja Ducka, Aleksandra Furczyk, Szymon Sułowski, **Grzegorz Ziółkowski**: *Zastosowanie sztucznej inteligencji (AI) w badaniach sztuki kultury magdaleńskiej z terenu ziem polskich (16,5–12 tys. lat p.n.e.)*, Druga Uniwersytecka Konferencja „Artificial Intelligence V”, Uniwersytet Wrocławski, 12.12.2025
- [D8] **Tomasz Płonka**, Andrzej Wiśniewski, Adrian Marciszak, **Grzegorz Ziółkowski**, Grzegorz Lipecki, Marcin Diakowski, Kamil Serwatka: *The Middle Palaeolithic incised bear bone from the Dziadowa Skala Cave: a new approach*, konferencja: The Past in Caves. New methods and interdisciplinary approaches towards human occupation and its context, Wydział Archeologii, Uniwersytet Warszawski, 21.03.2024.

Rozdziały w monografiach / pracach zbiorowych:

- [C3] **Tomasz Płonka**, Marcin Diakowski, Rafał Niedźwiedzki, **Grzegorz Ziółkowski**: Przedmioty symboliczne, [w:] Michał Przeździecki, Witold Migal (red.), *Na granicy światów. Obozowisko kultury magdaleńskiej w Ćmielowie*, woj. świętokrzyskie, Warszawa: Uniwersytet Warszawski, Państwowe Muzeum Archeologiczne, 2020, s. 279–316.
- [C11] **Tomasz Płonka**, Marcin Diakowski, Bernadeta Kufel-Diakowska, Krzysztof Stefaniak, **Grzegorz Ziółkowski**: *New data on Mesolithic art in Poland*, [w:] Judith Martina Grünberg, Bernhard Gramsch, Erik Brinch Petersen, Tomasz Płonka, Harald Meller (red.), *Mesolithic Art – Abstraction, Decoration, Messages*, Halle (Saale): Tagungen des Landesmuseums für Vorgeschichte Halle, 2023, vol. 26/I, s. 361–372.

Artykuły w czasopismach:

- [A7] **Tomasz Płonka**, Marcin Diakowski, Joanna Krupa-Kurzynowska, Viktoria Hoppe, **Grzegorz Ziółkowski**: *Application of computed tomography to the study of Mesolithic portable art: results, interpretations and expectations – the case of ornamented roe deer antler harpoon from Police*, NW Poland, *Archaeometry*, 2024, vol. 66, nr 1, s. 219–237.
- [B7] **Tomasz Płonka**, Andrzej Wiśniewski, Adrian Marciszak, **Grzegorz Ziółkowski**, Grzegorz Lipecki, Marcin Diakowski, Kamil Serwatka: *Middle Palaeolithic incised bear bone from Dziadowa Skala Cave, Poland: the oldest marked object north of the Carpathian Mountains*, *Journal of Archaeological Science*, 2024, vol. 166, 105971.

5.2.2. Uniwersytet Medyczny we Wrocławiu

Okres współpracy: 2013–obecnie

Naukowcy z którymi współpracuje: dr hab. n.med. Adam Junka, profesor uczelni

Zakres i efekt współpracy:

Współpraca z prof. Adamem Junką (Zakładu Technologii Translacyjnych) ma charakter interdyscyplinarny i koncentruje się na interakcji pomiędzy nowoczesnymi materiałami implantacyjnymi, technikami wytwarzania przyrostowego oraz ilościową oceną jakości procesu i wyrobów gotowych z wykorzystaniem technicznej tomografii komputerowej (XCT). Zastosowanie XCT spina cały łańcuch badawczy, umożliwiając kompleksową, ilościową ocenę geometrii i struktury implantów, która stanowi podstawę do rzetelnej oceny biologicznej i mikrobiologicznej bezpieczeństwa wyrobów gotowych. W ramach współpracy analizowano wpływ parametrów technologicznych oraz modyfikacji powierzchni stopów Ti-6Al-4V ELI oraz

Ti-6Al-7Nb na właściwości funkcjonalne implantów, obejmujące aspekty mechaniczne i strukturalne oraz przydatność do rozwiązań spersonalizowanych, a także na kluczowe ryzyka kliniczne, w szczególności cytotoksyczność oraz zdolność do tworzenia biofilmu (m.in. przez *Staphylococcus aureus* i *Pseudomonas aeruginosa*). Tomografię komputerową wykorzystałem jako narzędzie kontroli jakości i ilościowego porównania badanych obszarów, próbek testowych i wyrobów gotowych w postaci implantów, umożliwiające ocenę wpływu czynników chemicznych, mechanicznych i biologicznych na wytwarzane struktury. Efektem współpracy jest spójny cykl publikacji, w którym wykazano, że kontrolowane zabiegi obróbki i modyfikacji powierzchni prowadzą do jednoczesnej poprawy parametrów użytkowych struktur implantacyjnych oraz redukcji podatności na trwałą kolonizację mikrobiologiczną. Współpraca była realizowana w ramach wspólnych projektów naukowych obejmujących przyrostowe wytwarzanie spersonalizowanych wyrobów medycznych w postaci implantów metalicznych, w tym przeznaczonych dla pacjentów onkologicznych [P18], oraz spersonalizowanych rozwiązań dla medycyny i farmacji bazujących na przetwarzaniu materiałów polimerowych [P10]. Zakres prac obejmował również badania oddziaływania biomateriałów z układami biologicznymi, w tym analizę wpływu biofilmu na materiały podłoża oraz badania metabolomiczne komórek planktonicznych i biofilmowych, ukierunkowane na identyfikację mechanizmów oddziaływań i potencjalnych markerów istotnych z punktu widzenia bezpieczeństwa i skuteczności terapii.

Prace badawcze opublikowane w ramach współpracy:

Artykuły w czasopismach:

- [A6] Patrycja Szymczyk-Ziółkowska, **Grzegorz Ziółkowski**, Viktoria Hoppe, Małgorzata Rusińska, Karol A. Kobiela, Marcin Madeja, Robert Dziedzic, **Adam Junka**, Jerzy Detyna: *Improved quality and functional properties of Ti-6Al-4V ELI alloy for personalized orthopedic implants fabrication with EBM process*, Journal of Manufacturing Processes, 2022, vol. 76, s. 175-194.
- [B20] Patrycja Szymczyk, Viktoria Hoppe, Małgorzata Rusińska, Jolanta Gąsiorek, **Grzegorz Ziółkowski**, Karolina Dydak, Joanna Czajkowska, **Adam Junka**.: *The impact of EBM-manufactured Ti6Al4V ELI alloy surface modifications on cytotoxicity toward eukaryotic cells and microbial biofilm formation*. Materials. 2020, vol. 13, nr 12, art. 2822, s. 1-21.
- [B26] Patrycja Szymczyk, **Grzegorz Ziółkowski**, **Adam Junka**, Edward Chlebus.: *Application of Ti6Al7Nb alloy for the manufacture of Biomechanical Functional Structures (BFS) for custom-made bone implants*. Materials. 2018, vol. 11, nr 6, s. 1-16.

- [B30] **Adam Junka**, Patrycja Szymczyk, **Grzegorz Ziółkowski**, Ewa Karuga-Kuźniewska, Danuta Smutnicka, Iwona Bil-Lula, Marzenna Bartoszewicz, Susan Mahabady, Parish P. Sedghizadeh.: *Bad to the bone: on in vitro and ex vivo microbial biofilm ability to directly destroy colonized bone surfaces without participation of host immunity or osteoclastogenesis*. PLoS ONE. 2017, vol. 12, nr 1, s. 1-20.
- [B33] **Adam Junka**, Patrycja Szymczyk, Anna Secewicz, Andrzej P. Pawlak, Danuta Smutnicka, **Grzegorz Ziółkowski**, Marzenna Bartoszewicz, Edward Chlebus.: *The chemical digestion of Ti6Al7Nb scaffolds produced by Selective Laser Melting reduces significantly ability of Pseudomonas aeruginosa to form biofilm*. Acta of Bioengineering and Biomechanics. 2016, vol. 18, nr 1, s. 105-110.
- [B40] **Adam Junka**, Stanisław Deja, Danuta Smutnicka, Patrycja Szymczyk, **Grzegorz Ziółkowski**, Marzenna Bartoszewicz, Piotr Młynarz.: *Differences in metabolic profiles of planktonic and biofilm cells in Staphylococcus aureus - 1H nuclear magnetic resonance search for candidate biomarkers*. Acta Biochimica Polonica. 2013, vol. 60, nr 4, s. 701-706.
- [B44] Patrycja Szymczyk, **Adam Junka**, **Grzegorz Ziółkowski**, Danuta Smutnicka, Marzenna Bartoszewicz, Edward Chlebus.: *The ability of S.aureus to form biofilm on the Ti-6Al-7Nb scaffolds produced by Selective Laser Melting and subjected to the different types of surface modifications*. Acta of Bioengineering and Biomechanics. 2013, vol. 15, nr 1, s. 69-76.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę

6.1. Osiągnięcia dydaktyczne

6.1.1. Promotor prac magisterskich/inżynierskich

W latach 2016-2025 pełniłem funkcję promotora 26 prac dyplomowych (magisterskich i inżynierskich) realizowanych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. Tematyka prowadzonych prac obejmowała zagadnienia związane z nieniszczącą analizą strukturalną, w szczególności z wykorzystaniem nowoczesnych metod obrazowania trójwymiarowego XCT.

6.1.2. Promotor pomocniczy – przewody doktorskie

Aktualnie sprawuję opiekę naukową jako promotor pomocniczy w dwóch przewodach doktorskich prowadzonych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej:

- mgr inż. Dawid Kęszycki – stopień realizacji 100%, termin złożenia rozprawy: wrzesień 2025 r.; planowany termin obrony: czerwiec 2026 r.
- mgr inż. Emilia Grochowska – stopień realizacji 85%; planowany termin złożenia rozprawy: kwiecień 2026 r.

Prace doktorskie koncentrują się na zagadnieniach z zakresu:

- badań nieniszczących z wykorzystaniem technicznej tomografii komputerowej (XCT), obejmujących rozwój i zastosowanie metod korekcji artefaktów tomograficznych, w tym rozwiązań sprzętowo-algorytmicznych z wykorzystaniem kolimatorów, ukierunkowanych na poprawę jakości danych wolumetrycznych, stabilność rekonstrukcji oraz wiarygodność ilościowej analizy geometrycznej;
- projektowania implantów medycznych z wykorzystaniem danych tomograficznych (CT), realizowanego poprzez opracowanie zautomatyzowanego, parametrycznego narzędzia projektowego dla spersonalizowanych implantów stawu biodrowego typu *custom-made*, oraz integrującego segmentację anatomiczną, modelowanie geometryczne i walidację projektów.

Moje zaangażowanie obejmuje wsparcie merytoryczne w projektowaniu eksperymentów, rozwijaniu metod analizy danych przestrzennych, interpretacji wyników oraz współtworzeniu publikacji naukowych. Istotnym elementem mojej aktywności dydaktyczno-badawczej jest opieka nad młodymi naukowcami, w ramach której angażuję doktorantów i stypendystów w realizację zadań badawczych, w szczególności dotyczących technicznej tomografii komputerowej XCT (projekty [P1], [P3]).

6.1.3. Opracowane przedmioty/materiały dydaktyczne

W ramach działalności dydaktycznej na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej przygotowałem karty dla następujących przedmiotów: *Zaawansowane metody kontroli jakości w procesach wytwórczych*, *Metrologia optyczna i współrzędnościowa*, *Projekt technologiczny zindywidualizowanego implantu* oraz *Praca przejściowa – projekt technologiczny*. Byłem również współautorem materiałów dydaktycznych i instrukcji laboratoryjnych do zajęć *Reverse Engineering*. Prowadzę zajęcia dydaktyczne na studiach stacjonarnych i niestacjonarnych, I i II stopnia, zarówno w języku polskim, jak i angielskim. Zakres moich obowiązków dydaktycznych obejmuje wykłady, laboratoria, ćwiczenia oraz projekty z następujących przedmiotów:

- Projekt technologiczny zindywidualizowanego – projekt
- Praca przejściowa – projekt technologiczny – projekt
- Techniczne aspekty zapewnienia jakości – wykład/laboratorium
- Reverse Engineering – wykład/laboratorium
- Przyrostowe technologie wytwarzania – wykład/laboratorium
- Technologie rozwoju produktu – laboratorium
- Innowacyjne technologie mechaniczne/*Innovative Mechanical Technologies* – wykład/laboratorium
- Metody i techniki eksperymentu – wykład/projekt
- Nowoczesne trendy w produkcji – wykład
- *Modern Trends in Production* – wykład
- Metody kwalifikacji produktów i procesów technologicznych – wykład/ćwiczenia
- Organizacja procesów produkcyjnych – wykład
- Maszyny technologiczne CNC/*Manufacturing Systems CNC* – wykład/laboratorium
- Informatyka – podstawy programowania (w tym MATLAB) – projekt

W latach akademickich 2021/2022, 2022/2023, 2023/2024 oraz 2024/2025 byłem współprowadzącym międzynarodowy kurs *Design of Engineering Materials* (wykład/laboratorium), realizowany w ramach programu *European Master in Advanced Solid Mechanics*. Program ten stanowi wspólny kierunek magisterski sześciu uczelni: Université de Lille, École centrale de Lille, Università della Calabria, KU Leuven, National Technical University of Athens oraz Politechniki Wrocławskiej.

Dodatkowo, w 2018 roku ukończyłem kurs dydaktyczny dla nauczycieli akademickich (105 godzin zajęć), realizowany na Politechnice Wrocławskiej, który przygotował mnie do prowadzenia zajęć dydaktycznych w szkolnictwie wyższym.

6.2. Osiągnięcia organizacyjne

6.2.1. Pełnienie funkcji kierownika Laboratorium Technicznej Tomografii Komputerowej (XCTlab)

Od 2020 r. pełnię funkcję kierownika Laboratorium Technicznej Tomografii Komputerowej (XCTlab) w Katedrze Zaawansowanych Technik Wytwarzania na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. W ramach tej roli odpowiadam za rozwój infrastruktury badawczej, koordynację pracy zespołu, wdrażanie procedur zapewnienia jakości oraz planowanie kierunków rozwoju działalności naukowo-technicznej laboratorium. Posiadam certyfikat Asystenta systemu

zarządzania w laboratorium (Nr 298 DA/PC/E01-3/E/2014) wydany przez Polskie Centrum Badań i Certyfikacji S.A., a także certyfikat ukończenia szkolenia Planowanie, budowa i oskonalenie systemu zarządzania w laboratorium, również wydany przez PCBC S.A.

6.2.2. Pełnienie funkcji opiekuna studenckiego Koła Naukowego BIOAddMed

Od 2017 r. sprawuję opiekę naukową nad Studenckim Kołem Naukowym BIOAddMed, działającym przy Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej, którego byłem inicjatorem. Koło realizuje interdyscyplinarne projekty badawcze z zakresu inżynierii biomedycznej, nowoczesnych technik wytwórczych (*Additive Manufacturing*), cyfrowego projektowania implantów i narzędzi medycznych, a także kontroli jakości wyrobów gotowych wytwarzanych przyrostowo. Działalność Koła obejmuje prowadzenie prac projektowych i eksperymentalnych, organizację szkoleń i warsztatów, udział w krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych oraz popularyzację nauki w środowisku akademickim, edukacyjnym i społecznym.

6.2.3. Wkład w rozwój zaplecza laboratoryjnego, technicznego i pomiarowego

W ostatnich latach aktywnie uczestniczyłem w rozbudowie zaplecza aparaturowego i pomiarowego Laboratorium Technicznej Tomografii Komputerowej (XCTLab) w Katedrze Zaawansowanych Technik Wytwarzania, na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. Moje zaangażowanie obejmowało udział w przygotowaniu wniosków projektowych, opracowanie specyfikacji technicznych, oraz prowadzenie postępowań zakupowych, co przełożyło się na pozyskanie aparatury o łącznej wartości ponad 5 000 000,00 zł.

- **2019** – W ramach grantu badań własnych (nr 0402/0074/18) sfinansowałem zakup serwera danych o pojemności ok. 96 TB oraz budowę maszyny wytrzymałościowej do badań *in situ* XCT (publikacja opisująca rozwiązanie: <https://doi.org/10.37705/TechTrans/e2020028>).
- **2019** – Uczestniczyłem w przygotowaniu wniosku projektowego, opracowaniu specyfikacji technicznej oraz przeprowadzeniu postępowań przetargowych (ZP/BZP/417/2018 oraz ZP/BZP/001/2019) dotyczących zakupu systemu technicznej tomografii komputerowej GE phoenix V|tome|x m300/180 wraz z dedykowanym oprogramowaniem, w ramach projektu ICEMTA – Międzynarodowe Centrum Doskonałości Technologii Wytwarzania i ich Aplikacji (nr RPDS.01.01.01-02-0002/18).
- **2024** – Brałem udział w opracowaniu specyfikacji technicznej oraz realizacji postępowania przetargowego (2024/BZP 00008019/52/P – 2.2.14) na zakup zintegrowanej maszyny

wytrzymałościowej *in situ* 5 kN do zastosowań w XCT, w ramach projektu MultiALoy – Wieloskalowe modelowanie i probabilistyczna ocena wieloosiowego zmęczenia stopu A6061-RAM2 wytwarzanego technikami przyrostowymi (nr 2023/51/B/ST8/02039), w którym pełniłem rolę wykonawcy.

- **2025** – Uczestniczyłem w opracowaniu specyfikacji technicznej oraz postępowaniu przetargowym (2025/BZP 00011006/37/P – 2.2.53) dotyczącym zakupu systemu do badań wytrzymałościowych w zmiennych warunkach środowiskowych, obejmującego mini maszynę wytrzymałościową DEBEN umożliwiającą prowadzenie badań w zakresie temperatur od -20°C do $+150^{\circ}\text{C}$, przeznaczoną do eksperymentów *in situ* w XCT, w ramach projektu Centrum Technologii Bezpieczeństwa Publicznego (nr FEDS.01.01-IZ.00-0003/24).
- **2025** – W ramach tego samego projektu (FEDS.01.01-IZ.00-0003/24) pozyskałem również licencję oprogramowania Waygate phoenix|datos do rekonstrukcji i analizy danych tomograficznych, wykorzystywanego z systemem XCT phoenix V|tome|x m300/180.

6.3. Osiągnięcia popularyzujące naukę

Do istotnych działań popularyzujących naukę zaliczam udział w wykładach, warsztatach oraz prezentacjach laboratoriów, skierowanych zarówno do młodzieży, jak i szerokiego grona odbiorców spoza środowiska akademickiego. W szczególności są to:

- Współpraca z Wrocławskim Centrum Rozwoju Społecznego w ramach oferowania zajęć dotyczących „Technicznej Tomografii Komputerowej” dla uczniów z wrocławskich szkół – od 2025 r.
- Wykład i warsztaty w ramach warsztatów naukowych dla studentów kierunku Mechanika i Budowa Maszyn, pt. „Nowoczesne techniki pomiarowe w zastosowaniach przemysłowych”. Temat prezentacji: „Techniczna tomografia komputerowa - zasada działania, zastosowania, przykłady pomiarów”. Wydarzenie odbyło się we Wrocławiu w 2015 roku (rola: współprowadzący).
- Udział jako współprowadzący w wydarzeniach organizowanych w ramach Dolnośląskiego Festiwalu Nauki w latach 2011-2013, w tym w sesjach prezentacyjnych oraz pokazach dydaktycznych promujących nowoczesne techniki pomiarowe.

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

7.1. Nagrody, wyróżnienia, stypendia otrzymane na Politechnice Wrocławskiej

- Laureat programu *Primus* (Program Politechniki Wrocławskiej dla osób publikujących w najwyższej punktowanych czasopismach naukowych): II edycja 2021, III edycja 2022, V edycja 2024, VI edycja 2025.
- Laureat programu *Secundus* (Program Politechniki Wrocławskiej promujący doskonałość naukową, w ramach którego nagrody finansowe otrzymuje stu młodych naukowców, którzy nie ukończyli 40 lat i nie posiadali habilitacji, a mogą się pochwalić największą sumą wartości punktowych w publikacjach):
 - II edycja 2020 (<https://pwr.edu.pl/uczelnia/aktualnosci/program-secundus-setka-wyroznionych-12108.html>).
 - III edycja 2021 (<https://pwr.edu.pl/uczelnia/aktualnosci/secundus-po-raz-trzeci-oto-laureaci-12406.html>).
 - IV edycja 2022 (<https://pwr.edu.pl/uczelnia/aktualnosci/secundus-2023-12873.html>)
- Laureat *Nagrody Rektora Politechniki Wrocławskiej* w uznaniu wyróżniającego wkładu w działalność uczelni (2023).
- Laureat *Nagrody Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej* za wyróżniający wkład w działalność dydaktyczną na Wydziale (2021).
- Laureat *Nagrody Rektora Politechniki Wrocławskiej* w uznaniu wyróżniającego wkładu w działalność uczelni (2020).
- Laureat *Nagrody Rektora Politechniki Wrocławskiej* w uznaniu wyróżniającego wkładu w działalność uczelni (2018).
- Wyróżnienie pracy doktorskiej przez Radę Naukową Wydziału Mechanicznego PWr (2016).
- Beneficjent interdyscyplinarnego stypendium naukowego w ramach projektu "*Młoda kadra 2015 plus*" (2011-2015).

7.2. Nagrody, wyróżnienia, stypendia otrzymane poza Politechniką Wrocławską

- [Zespołowa] Nagroda II stopnia Wrocławskiej Rady FSNT NOT za *wybitne osiągnięcia w dziedzinie techniki*, przyznana za realizację w 2021 roku projektu pt. „Rozproszona produkcja środków ochrony indywidualnej (ŚOI) i części zamiennych aparatury medycznej w sytuacjach kryzysowych.”
- [Zespołowa] Polska Nagroda Inteligentnego Rozwoju 2016 nagroda przyznana zespołowi badawczemu za realizację projektu AMpHOra – „Badania technologii przyrostowych i procesów hybrydyzacji obróbki dla potrzeb rozwoju innowacyjnej produkcji lotniczej.”

- [Zespołowa] Nagroda „Luminatus 2015” (Bloomberg Businessweek Polska) Wyróżnienie w kategorii *zespół badawczy* za realizację projektu pt. „Bioimplanty dla potrzeb leczenia ubytków tkanki kostnej u chorych onkologicznych.”
- [Zespołowa] Nagroda I stopnia Wrocławskiej Rady FSNT NOT *Za wybitne osiągnięcia w dziedzinie techniki*, przyznana w 2014 roku za wdrożenie zrealizowane w 2013 r. pt. „Nowatorska technologia lutowania twardego prętów stojana generatorów dużej mocy wytwarzanych w ALSTOM Power Sp. z o.o. w Warszawie Oddział we Wrocławiu.”

7.3. Finansowanie badań naukowych

Okres po uzyskaniu stopnia doktora

Uczestniczyłem/uczestniczę w realizacji 12 projektów badawczych, w tym:

- 2 projektów prowadzonych w roli **kierownika / autora projektu** [P1, P5],
- 3 projektów, w których pełniłem funkcję **kierownika działania naukowego** [P2, P3, P11].
- 1 projekt w którym pełniłem obowiązki **(PO) kierownika** prze okres ponad 6 miesięcy [P10].

Projekty w trakcie realizacji:

- [P1] 2025-2029 – FNP/FIRST TEAM FENG, nr FENG.02.02-IP.05-0038/2. „*Inteligentny system wsparcia współrzędnościowych pomiarów tomograficznych AiSSIST*”. Projekt AiSSIST stanowi predykcijno-interpretowalny system wsparcia pomiarów XCT, integrujący hierarchiczny model procesu z analizą danych i sztuczną inteligencją w celu ilościowej oceny jakości, identyfikacji źródeł odchyłek oraz adaptacyjnej optymalizacji parametrów akwizycji, rekonstrukcji i segmentacji. (Politechnika Wrocławska, Massachusetts Institute of Technology MIT, ITA sp. z o.o. Sp. K).

Funkcja w projekcie: kierownik merytoryczny projektu/autor wniosku

Budżet: 4 000 000 zł

- [P2] 2024-2026 – NCN/MINIATURA 8, nr DEC-2024/08/X/ST2/01093. „*Wzorcowanie geometrii obiektów referencyjnych na potrzeby tomograficznej metrologii aplikacyjnej*”. W projekcie opracowuję i weryfikuję metody wzorcowania geometrii obiektów

referencyjnych, aby zapewnić spójne odniesienie metrologiczne i porównywalność wyników w tomograficznych pomiarach aplikacyjnych XCT. (Politechnika Wrocławska).

Funkcja w projekcie: kierownik zadania badawczego/autor wniosku

Budżet: 27 601 zł

- [P3] 2024-2028 – OPUS 26, 2023/51/B/HS3/00261. „*Sztuka magdaleńska w Polsce: technologia, modyfikacje i znaczenie społeczne*”. W projekcie wykorzystuję dane XCT do nieinwazyjnej dokumentacji i ilościowej analizy obiektów sztuki magdaleńskiej oraz przygotowuję standaryzowane modele 3D w postaci AI-ready (normalizacja geometrii i ujednolicony łańcuch przetwarzania) do analiz porównawczych i uczenia maszynowego. (Politechnika Wrocławska, Uniwersytet Wrocławski).

Funkcja w projekcie: kierownik zadania badawczego

Budżet: 1 482 100 zł

- [P4] 2024-2027 – OPUS 26, 2023/51/B/ST8/02039. „*MultiALoy – Wieloskalowe modelowanie i probabilistyczna ocena wieloosiowego zmęczenia stopu A6061-RAM2 wytwarzanego technikami przyrostowymi*”. W projekcie OPUS 26 rozwijam metodykę 4D XCT (*in situ*) z wykorzystaniem miniaturowych maszyn wytrzymałościowych, umożliwiającą śledzenie w czasie degradacji mikrostruktury stopu A6061-RAM2 podczas obciążeń i powiązanie wyników obrazowania z probabilistyczną oceną zmęczenia.

Funkcja w projekcie: wykonawca

Budżet: 1 661 671 zł

Projekty zrealizowane:

- [P5] 2023–2024 – NAWA/Wspólne Projekty Badawcze Polska–Niemcy-BPN/BDE/2022/1/00013/U/00001. „*Zastosowanie funkcjonalnej wysokorozdzielczej tomografii komputerowej w symulacjach numerycznych i badaniach mechanicznych wytwarzanych przyrostowo stopów*”. W projekcie NAWA Polska–Niemcy (2023–2024) zastosowałem wysokorozdzielczą XCT do badań stopów aluminium w warunkach ex-situ, w tym w temperaturze kriogenicznej, integrując wyniki obrazowania 3D z symulacjami numerycznymi i testami mechanicznymi. (Politechnika Wrocławska, Brandenburg University of Technology Cottbus-Senftenberg BTU)

Funkcja w projekcie: kierownik/ autor wniosku

Budżet: 24 250 zł

- [P6] 2022–2023 – MIT-Poland Lockheed Martin Seed Fund/program MISTI MIT Global Experiences. *„Self-Optimizing Additive Manufacturing”*. W czasie pobytu na MIT opracowałem koncepcję integracji AI i XCT jako podstawę architektury predykcyjno-wyjaśnialnego systemu AiSSIST. (Politechnika Wrocławska, Massachusetts Institute of Technology MIT)

Funkcja w projekcie: wykonawca

Budżet: 20 150 USD

- [P7] 2022–2024 – M-ERA.NET 3 Call 2021, M-ERA.NET3/2021/26/PowderEUse/2023. *„PowderEUse – Nowa metoda recyklingu proszków poliamidowych do ponownego wykorzystania w procesie selektywnego spiekania laserowego”*. W projekcie PowderEUse (M-ERA.NET, 2022–2024) wykorzystałem XCT do ilościowej oceny jakości i jednorodności proszków poliamidowych przed i po recyklingu oraz do walidacji wpływu parametrów ponownego użycia na strukturę i właściwości wyrobów wytwarzanych techniką przyrostową SLS. (Politechnika Wrocławska, Fraunhofer IWU, Fraunhofer-Gesellschaft e.V., SondaSys sp. z o.o., Zakład Badawczy Przemysłu Piekarskiego Sp. z o.o.)

Funkcja w projekcie: wykonawca

Budżet: 4 958 712 zł

- [P8] 2021-2024 – NCBR / TECHMATSTRATEG III - TECHMATSTRATEG-III/0044/2019. *„Bioniczne, lekkie węzły strukturalne wytwarzane przyrostowo dla przemysłu motoryzacyjnego – BioniAMoto”*. W projekcie BioniAMoto wykorzystywałem XCT do nieinwazyjnej kontroli jakości bionicznych węzłów strukturalnych wytwarzanych przyrostowo, obejmującej ilościową ocenę porowatości/nieciągłości oraz zgodności geometrycznej w celu walidacji technologii pod wymagania przemysłu motoryzacyjnego. (Politechnika Wrocławska, Politechnika Poznańska, Germaz)

Funkcja w projekcie: wykonawca.

Budżet: 12 900 812 zł

- [P9] 2020–2021 – NCBiR/Szpitalne Jednoimienne - SZPITALEJEDNOIMIENNE/6/2020. *„Virtual AM Storage Covid-19 – Metoda natychmiastowego wytwarzania przyrostowego*

części zamiennych i alternatywnych aparatury medycznej oraz środków ochrony indywidualnej w środowisku rozproszonym w sytuacjach kryzysowych.” (Politechnika Wrocławska, Wojewódzki Szpital Specjalistyczny im. J. Gromkowskiego we Wrocławiu)

Funkcja w projekcie: wykonawca

Budżet: 2 172 500 zł

- [P10] 2019–2022 – NCBiR/LIDER – LIDER/23/0098/L-9/17/NCBR/2018. *„Przyrostowe wytwarzanie zindywidualizowanych wyrobów medycznych na bazie biomateriałów polimerowych – BIOAddMed”*. W projekcie wykorzystywałem XCT do nieinwazyjnej kontroli jakości zindywidualizowanych wyrobów medycznych z biomateriałów polimerowych (ocena geometrii, porowatości i nieciągłości), a przez 7 miesięcy pełniłem funkcję p.o. kierownika projektu, koordynując realizację zadań badawczych i walidację wyników. (Politechnika Wrocławska, USP Zdrowie)

Funkcja w projekcie: wykonawca; p.o. kierownika projektu (wrzesień 2021 – kwiecień 2022).

Budżet: 1 195 250 zł

- [P11] 2019–2020 – OPUS 15, 2018/29/B/HS3/01162. *„Sztuka mezołityczna w Polsce: znaczenie społeczne i rytualne artefaktów w świetle ich biografii”*. W projekcie zastosowałem XCT do nieinwazyjnej, ilościowej analizy struktury artefaktów mezołitycznych, umożliwiającej porównanie ich cech geometrycznych i materiałowych oraz rekonstrukcję różnicowania technologicznego i funkcjonalnego badanych obiektów. (Politechnika Wrocławska, Uniwersytet Wrocławski).

Funkcja w projekcie: kierownik zadania badawczego.

Budżet: 414 250 zł

- [P12] 2017–2019. NCBiR/LIDER, LIDER/0109/L-7/15/NCBR/2016. *„Stopy na bazie magnezu przetwarzane technologią selektywnej laserowej mikrometalurgii proszków do zastosowań lotniczych”*. W projekcie wykorzystałem XCT do nieinwazyjnej oceny mikrostruktury i nieciągłości (m.in. porowatości) w elementach ze stopów na bazie magnezu wytwarzanych selektywną laserową mikrometalurgią proszków, wspierając kwalifikację technologii pod wymagania zastosowań lotniczych. (Politechnika Wrocławska)

Funkcja w projekcie: wykonawca

Budżet: 1 188 750 zł

- [P13] 2017–2021 – EU/HORIZON 2020, H2020-FOF-2017 No 768775. „*AdditiveManufacturABLE (AMable)*”. W projekcie wspierałem prace badawczo-wdrożeniowe od strony XCT, realizując nieinwazyjną kontrolę jakości elementów wytwarzanych przyrostowo (analiza porowatości, nieciągłości i zgodności geometrycznej) w celu walidacji procesów i porównywalnej oceny wyników między partnerami. (m.in. Fraunhofer ILT, Politechnika Wrocławska, TNO Innovation for Life, Danish Technological Institute, Inspire)

Funkcja w projekcie: wykonawca

Budżet: 8 861 681,25 EUR

- [P14] 2017–2020 – NCBiR, TECHMATSTRATEG1/347514/7/NCBR/2017. „*Opracowanie innowacyjnej technologii wytwarzania złożonych geometrycznie, cienkościennych komponentów silników lotniczych ze stopów na bazie niklu*”. W projekcie wykorzystywałem XCT do nieinwazyjnej kontroli jakości cienkościennych komponentów ze stopów na bazie niklu (m.in. Inconel 718), obejmującej ocenę nieciągłości wewnętrznych i zgodności geometrycznej w celu walidacji technologii wytwarzania pod wymagania silników lotniczych. (Politechnika Wrocławska, Pratt & Whitney Kalisz, Instytut Lotnictwa Warszawa)

Funkcja w projekcie: wykonawca

Budżet: 12 901 992 zł

Okres przed uzyskaniem stopnia doktora

Uczestniczyłem w realizacji 5 projektów badawczych w których pełniłem funkcję **wykonawcy**.

- [P15] 2015–2018 – NCBiR /CuBR, CuBR-2/5/2015/NCBR. „*Warstwy i powłoki z udziałem renu, jego związków lub stopów – ich właściwości, zastosowania oraz metody nanoszenia*”. W projekcie wykorzystywałem XCT do nieinwazyjnej kontroli jakości warstw i powłok z udziałem renu, obejmującej ocenę jednorodności, porowatości oraz defektów wewnętrznych w celu walidacji metod nanoszenia i właściwości uzyskiwanych struktur. (Instytut Metali Nieżelaznych w Gliwicach, Politechnika Wrocławska, Politechnika Warszawska, Politechnika Rzeszowska, Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu, Instytut Spawalnictwa, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Plasma System, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie).

Funkcja w projekcie: wykonawca

Budżet: 4 934 000 zł

- [P16] 2014–2018 – NCBiR / INNOLOT, INNOLOT/I/6/2013/NCBR. „*Badania technologii przyrostowych i procesów hybrydyzacji obróbki dla potrzeb rozwoju innowacyjnej produkcji lotniczej*”. W projekcie wspierałem rozwój technologii przyrostowych i procesów hybrydyzacji obróbki dla produkcji lotniczej, wykorzystując XCT do nieinwazyjnej kontroli jakości elementów (analiza nieciągłości wewnętrznych i zgodności geometrycznej) oraz walidacji wyników w cyklu wytwarzania. (PZL Mielec, Pafana, Politechnika Wrocławska, Politechnika Lubelska, Politechnika Świętokrzyska)

Funkcja w projekcie: wykonawca

Budżet: 18 565 520 zł

- [P17] 2012–2016 – NCBiR/PBS1, PBS1/A5/12/2012/NCBR. „*Opracowanie i zastosowanie laserowej technologii mikrometalurgii proszków do wytwarzania materiałów o specjalnych właściwościach modyfikowanych renem*”. W projekcie wspierałem rozwój laserowej mikrometalurgii proszków dla materiałów modyfikowanych renem, wykorzystując XCT do nieinwazyjnej oceny jakości wytwarzanych struktur. (Politechnika Wrocławska, Politechnika Warszawska)

Funkcja w projekcie: wykonawca

Budżet: 3 720 000 zł

- [P18] 2010–2015 – NCBiR/POIG, POIG.01.01.02-00-022/09. „*Bioimplanty dla potrzeb leczenia ubytków tkanki kostnej u chorych onkologicznych – Bio-Implant*.” W projekcie Bio-Implant (2010–2015) wykorzystywałem XCT wraz z medyczną tomografią komputerową CT do projektowania geometrii zindywidualizowanych implantów oraz do nieinwazyjnej kontroli jakości wytwarzanych struktur (ocena geometrii i defektów wewnętrznych) w kontekście zastosowań klinicznych. (Politechnika Wrocławska, Politechnika Warszawska, Centrum Onkologii – Instytut im. Marii Skłodowskiej-Curie, Warszawski Uniwersytet Medyczny)

Funkcja w projekcie: wykonawca

Budżet: 43 273 045 zł

- [P19] 2009–2013 – POIG, UDA-POIG.01.03.01-02-160/09. „*LasTech – Technologie laserowego wytwarzania przestrzennych i powłokowych struktur funkcjonalnych*”. W projekcie wykorzystywałem XCT do nieinwazyjnej kontroli jakości wytwarzanych

laserowo struktur przestrzennych i powłok funkcjonalnych, obejmującej ocenę geometrii, jednorodności oraz defektów wewnętrznych. (Politechnika Wrocławska)

Funkcja w projekcie: wykonawca

Budżet: 4 012 750 zł

7.4. Podsumowanie aktywności naukowej

*Tabela 2 Podsumowanie aktywności naukowej w postaci danych bibliometrycznych**

Aktywność	Pozycja	Przed uzyskaniem stopnia doktora	Po uzyskaniu stopnia doktora	Suma
Publikacje	Publikacje z JCR	7	32	39
	Publikacje spoza listy JCR	6	8	14
	Rozdziały w monografiach	3	4	7
	Prace w materiałach konferencyjnych	7	4	11
	Suma:	23	48	71
Wskaźniki	IF	7.241	124.565	131.806
	Indeks Hirsha - Scopus	6	16	16
	Indeks Hirsha - WoS	6	16	16
	Cytowania Scopus	392	504	896
	Cytowania Scopus – bez autocytowań	328	415	743
	Cytowania WoS	320	449	769
	Cytowania WoS – bez autocytowań	319	406	725
	Punktacja MNiSW	625	4260	4885
	Punktacja MNiSW dla cyklu A1-A8	-	1290	1290
Projekty	Kierownik	-	2	2
	Wykonawca	5	12	17
	Suma:	5	14	19
Działalność dydaktyczna	Opiekun pracy mgr/inż.	-	26	26
	Opiekun pomocniczy przewodu dr.	-	2	2

*stan na dzień 30.01.2026 r.



(podpis wnioskodawcy)