



Projekt pt.: „Metodologia pomiaru oraz analizy geometrii struktur szkieletowych i skorupowych obiektów wytwarzanych przyrostowo”, nr PM-II/SP/0085/2024/02 przyjęty do finansowania w drodze konkursu na realizację projektów w ramach programu pod nazwą Polska Metrologia II, ogłoszonego komunikatem Ministra Edukacji i Nauki.

Okres realizacji projektu: 05.02.2024 r. - 04.08.2026 r.

Całkowita wartość projektu: 949 553,80 zł

Wartość dofinansowania z budżetu państwa: 949 553,80 zł

Opis osiągniętych celów i uzyskanych efektów projektu (w tym zastosowania praktyczne)

Wszystkie założone we wniosku rezultaty zostały osiągnięte. Najważniejszym rezultatem całego projektu było opracowanie metodologii i metodyki prowadzenia pomiarów w celu analizy struktur szkieletowych i skorupowych wytwarzanych w technologiach przyrostowych pod kątem zachowania ich geometrii, stanowiącej jednocześnie nowe rozwiązanie technologiczne metodologię i metodykę pomiarów hybrydowych obiektów o złożonej geometrii.

W tym celu konieczne było:

- Przeprowadzenie analizy literatury w zakresie pomiarów tomograficznych i optycznych obiektów o zamkniętych profilach, obiektów cienkościennych o grubości ścianek 0,5–2 mm oraz norm i procedur pomiarowych (ponad 50 pozycji).
- Opracowanie dwóch geometrii modeli badawczych w kształcie kolanka nawrotnego o przekroju kołowym i kwadratowym oraz wykonanie 108 wariantów próbek skorupowych (12 konfiguracji wymiarowych, technologie MEX, PolyJet/MJT i PBF, orientacje druku 0°, 45° i 90°).
- Opracowanie siedmiu geometrii struktur szkieletowych typu lattice (15 × 15 × 15 mm) wraz z dokumentacją techniczną i ich wykonanie w kilku technologiach przyrostowych.





- Realizacja pomiarów stykowych (GUM), tomograficznych CT i skanowania laserowego 3D (Politechnika Poznańska) oraz pomiarów optycznych topografii technikami FVM, CM, Confocal Fusion i CSI (Politechnika Opolska).
- Zbudowanie bazy danych pomiarowych, ujednolicenie formatów danych (CSV, PLUX, SUR, XYZ, XLSX) oraz opracowanie skryptów i algorytmów automatyzujących analizę topografii i ocenę geometrii.
- Sformułowanie zaleceń i ograniczeń dla poszczególnych technik pomiarowych oraz zasad porównywania wyników CT, skanowania 3D i pomiarów topografii powierzchni wewnętrznych.

Efektom prac nad konstrukcją stanowiska do badań próbek cienkościennych było zgłoszenie w Urzędzie Patentowym RP wynalazku „Urządzenie do badania próbek cienkościennych” (P.454219, 23.12.2025 r.), dokonane wspólnie przez Politechnikę Rzeszowską, Politechnikę Opolską i Politechnikę Poznańską.

W ramach realizacji projektu przygotowano i zgłoszono do czasopisma Metrology & Hallmark dwa artykuły naukowe, oba z udziałem pracowników Głównego Urzędu Miar:

- Pierwszy z nich, pt. „Assessment of the topography of the internal surfaces of thin-walled elements made in various geometric configurations and 3D printing positions”, został zgłoszony 29 stycznia 2026 r. Przeprowadzono pełny proces recenzyjny, uwzględniający przygotowanie odpowiedzi na uwagi recenzentów, a następnie 28 maja 2026 r. artykuł został zaakceptowany do publikacji.
- Drugi artykuł, pt. „Possibilities of geometrical measurements of elements manufactured by additive technologies”, został zgłoszony 4 marca 2026 r.





Opóźnienie formalnego ukazania się artykułów drukiem wynika z procesu wydawniczego, niezależnego od autorów. Jednocześnie realizacja rezultatu została rozszerzona o zgłoszenia do czasopisma Measurement (Q1, 200 pkt):

- W dniu 24 maja 2026 r. zgłoszono artykuł „Quasi-static measurement method for evaluating failure torque and validating the geometry of additively manufactured gears” (MEAS-D-26-09532), który znajduje się w procesie recenzji (status na 11.09.2026 r.)
- W dniu 31 lipca 2026 r. zgłoszono artykuł „Metrological Aspects of Multi-Scale Measurements of Thin-Walled Structures Manufactured by Additive Manufacturing: A Comparative Study of CT, 3D Scanning, and Surface Topography” (MEAS D-26-15174). Pomimo odrzucenia zgłoszenia (12.08.2026 r.) artykuł zostanie skierowany do innego czasopisma.

Wyniki i tematyka projektu zostały wykorzystane w pięciu pracach dyplomowych, dotyczących m.in. projektowania parametrycznego elementów cienkościennych, budowy drukarki 3D oraz projektowania elementów wytwarzanych przyrostowo na podstawie danych z tomografii komputerowej i skanowania 3D.

W ramach projektu odbyły się seminaria i warsztaty w formule spotkań bezpośrednich lub hybrydowych, w tym warsztaty „Polska Metrologia II” na Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej (19.02.2025 r. i 09.07.2025 r.), regularne spotkania on-line zespołów PO, PP, PRz i GUM oraz spotkania liderów partnerów podczas seminarium ITA w Poznaniu, posiedzeń Komitetu Budowy Maszyn PAN oraz konferencji MANUFACTURING 2026 i MWTW 2026.

Uruchomiono i prowadzono stronę internetową projektu, mającą na celu promocję wydarzeń związanych z realizacją projektu oraz upowszechniających uzyskane rezultaty.





Otrzymane wyniki były prezentowane na konferencjach krajowych i międzynarodowych:

- 11th International Scientific and Expert Conference of the International TEAM Society, Ostrava, 10–13 września 2024 r.
- VII Konferencja Naukowa Szybkie Prototypowanie – Druk 3D & 4D w zastosowaniach inżynierskich, Rzeszów, 17–18 października 2024 r. (dwa referaty)
- 16th International Scientific Conference MOTSP 2025, Crikvenica (Chorwacja), 3–6 czerwca 2025 r.
- International Conference on Manufacturing Engineering and Materials ICMEM 2025, Nový Smokovec (Słowacja), 23–27 czerwca 2025 r.
- VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowa Szybkie Prototypowanie – Druk 3D & 4D, Kielce, 17–19 września 2025 r.
- XX Krajowa i XI Międzynarodowa Konferencja „Metrologia w Technikach Wytwarzania” MWTW 2026, Gdańsk, 9–11 września 2026 r.
- Konstelacja Szkół Naukowych w Inżynierii Mechanicznej KSN 2026, Kraków-Wieliczka, 23–25 września 2026 r.

Znaczenie naukowe i praktyczne

Projekt wypełnia lukę dotyczącą braku jednoznacznych wytycznych pomiaru geometrii wewnętrznej obiektów wytwarzanych przyrostowo. Jego znaczenie naukowe polega na połączeniu danych objętościowych CT, skanowania 3D i pomiarów topografii w jednym schemacie walidacyjnym, z rozdzieleniem odchylek wynikających z cyfrowego przygotowania druku, procesu wytwarzania i procesu pomiarowego, oraz na wykazaniu wpływu skali i pola analizy na wartości parametrów topografii.

Znaczenie praktyczne rezultatów wiąże się z możliwością wykorzystania metodyki w kontroli jakości elementów z kanałami konformalnymi, strukturami kratowymi i cienkimi ściankami, m.in. w przemyśle lotniczym, narzędziowym i medycznym. Zasady dokumentowania danych i odróżniania wady wyrobu od artefaktu rekonstrukcji ograniczają ryzyko błędnych decyzji o zgodności, a baza danych i procedury stanowią podstawę dalszej automatyzacji oceny w strukturze Metrologia 4.0.





Wnioski końcowe

- Pełna weryfikacja geometrii obiektów skorupowych i szkieletowych wymaga podejścia hybrydowego – CT jako jedynej źródła informacji o geometrii wewnętrznej, uzupełnionego skanowaniem 3D i pomiarami topografii.
- Wyniku CT nie należy automatycznie traktować jako bezbłędnej wzorca – o jego wiarygodności decydują ustawienia akwizycji, rekonstrukcji i segmentacji, które trzeba dokumentować i weryfikować.
- Każda ocena odchyłki wymaga jawnego odniesienia (CAD, STL produkcyjny lub dane zadania druku).
- Technika CSI nie zapewnia akceptowalnego odwzorowania powierzchni wewnętrznych kanałów (50–65% punktów zmierzonych); lepsze wyniki dają FVM, mikroskopia konfokalna i Confocal Fusion.
- Wartości parametrów topografii zależą od wielkości i położenia pola analizy; zaleca się powierzchnię zszywaną oraz porównywanie metod we wspólnym paśmie długości fal z użyciem wskaźników PSD.
- Materiał i orientacja druku istotnie wpływają na chropowatość powierzchni wewnętrznych – próbki PLA wykazują większą powtarzalność niż RGD720.

Realizacja projektu pozwoliła połączyć projektowanie próbek, wytwarzanie przyrostowe oraz pomiary stykowe, tomograficzne i optyczne w jednolitym podejściu metodycznym. Uzyskane rezultaty mogą zostać wykorzystane do opracowania procedur przemysłowych, materiałów szkoleniowych i propozycji normalizacyjnych.

