

Laserowy pomiar geometrii ścieżki druku 3D

Kamil Wyrobek, Roman Stryczek

Uniwersytet Bielsko-Bialski, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji, ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała

Streszczenie: Praca przedstawia opis stanowiska badawczego do bezdotykowego pomiaru geometrii powierzchni, uzyskanych w trakcie nakładania kolejnych warstw druku 3D metodą MEX. Stanowisko bazowało na 6-osiowym, hybrydowym centrum obróbkowym wyposażonym w głowicę drukującą, laser pomiarowy oraz kamerę termowizyjną. Badania wykonano dla różnych rozmiarów dysz głowicy drukującej, szybkości nakładania ścieżki oraz strategii budowy kolejnych warstw. Uzyskane wyniki pomiarów pozwalają lepiej zrozumieć procesy formowania powierzchni zewnętrznych drukowanych części i mogą być podstawą do budowy dokładniejszych modeli predykcyjnych w wytwarzaniu przyrostowym. Możliwość realizacji druku 3D na obrabiarce wieloosiowej otwiera nowe obszary badań i potencjalnie, nowe perspektywy optymalizacji strukturalnej i parametrycznej operacji druku 3D.

Słowa kluczowe: centra hybrydowe, pomiary laserowe, druk 3D metodą MEX, optymalizacja druku 3D, OMM, szum pomiarowy

1. Wprowadzenie

Wytwarzanie przyrostowe AM (ang. *Additive Manufacturing*) stanowi obecnie jeden z filarów czwartej rewolucji przemysłowej. Zalety zrównoważonej produkcji zapewniane przez procesy AM to mniej surowca potrzebnego w procesie łańcucha dostaw, wyższa efektywność wykorzystania dostępnych zasobów, mniejsze odpady produkcyjne, większa stopa recyklingu, mniejsze zanieczyszczenie środowiska, mniejsza liczba czynności transportowych, mniejszy ślad węglowy, zdecentralizowana i bliska konsumentom produkcja, wydłużenie żywotności produktów przez ułatwienie regeneracji i naprawy istniejących produktów, a także możliwość pełnej cyfryzacji procesu [1–5].

Metoda MEX (ang. *Material Extrusion*) jest obecnie najpopularniejszą stosowaną i najszybciej rozwijającą się technologią wytwarzania przyrostowego w XXI wieku. W jej ramach mieści się między innymi technika FFF (ang. *Fused Filament Fabrication*), znana również pod nazwą FDM (ang. *Fused Deposition Modeling*), w której materiał w postaci uplastycznionego tworzywa jest nakładany warstwa po warstwie w celu wytworzenia trójwymiarowego obiektu [6]. Składa się na to dostępność drukarek 3D oraz rozwój i coraz większa różnorodność materiałów do druku, zarówno w postaci filamentu, jak i granulatu. Ze względu na liczne czynniki wpływające na przebieg oraz jakość procesu wytwarzania, nie jest on dotychczas w pełni przebadany. Obecnie wciąż brakuje wystarczającej wiedzy niezbędnej do opracowania dokładnych modeli predykcyjnych, umożliwiających wiarygodne przewidywanie skutków doboru, odpowied-

niego zestawu parametrów procesu. Wynika to przede wszystkim z niedostatecznej liczby badań eksperymentalnych prowadzonych w tym obszarze [6–10]. Brak takich modeli uniemożliwia optymalizację procesu w trybie off-line [11] i sprawia, że użytkownik często dochodzi do odpowiednich nastaw parametrów metodą prób i błędów, co generuje straty produkcyjne. Powoduje to straty materiałowe i czasowe oraz generuje dodatkowe obciążenia środowiskowe. Badacze zajmujący się powyższą tematyką [6–11] opracowują najczęściej modele cząstkowe, które są następnie stopniowo weryfikowane i doskonalone na podstawie wyników własnych badań eksperymentalnych oraz danych dostępnych w literaturze.

Na Uniwersytecie Bielsko-Bialskim (UBB) prowadzone są badania nad drukiem 3D metodą MEX [36], realizowane w dobrze wyposażonych laboratoriach i wspierane bogatym doświadczeniem zespołu. Jednym z kluczowych kierunków prac jest analiza jakości powierzchni zewnętrznych drukowanych elementów. W procesach wytwórczych, szczególnie istotne jest zapewnienie odpowiedniej jakości powierzchni, ponieważ wszelkie jej niedociągnięcia, mogą negatywnie wpłynąć na funkcjonalność techniczną lub estetykę gotowego wyrobu. Nieodpowiednia jakość powierzchni często wymaga dodatkowych operacji post-processingu zarówno mechanicznych [12, 13], jak i chemicznych [14], co zwiększa końcowy koszt produkcji.

Badacze najczęściej interesują dwa źródła nierówności powierzchni części wytwarzanych metodą MEX: błąd wynikający ze schodkowej budowy powierzchni skośnych w stosunku do kierunku druku oraz błąd wynikający z odchył ścieżki w kierunku normalnym do drukowanej powierzchni [15, 16]. Ponieważ drukując na wieloosiowej obrabiarce, pierwszy rodzaj błędów można wyeliminować, autorów interesował drugi z tych błędów, który ma bezpośrednie przełożenie na strukturę geometryczną powierzchni tj. odchyłki kształtu, falistość i chropowatość, tworzące trójwymiarową topografię powierzchni [17]. Stan wydrukowanej powierzchni można określić za pomocą parametrów profilowych 2D lub stereometrycznych: powierzchniowych lub objętościowych. W opublikowanych dotychczas badaniach teksturę powierzchni wykonywanych technikami AM zwykle

Autor korespondujący:

Kamil Wyrobek, kwyrobek@ubb.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 02.10.2025 r., przyjęty do druku 18.11.2025 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Int.

podaje się jako wartość parametru chropowatości Ra, mierzoną w poprzek formowanych ścieżek [18].

Najważniejsze czynniki wpływu na jakość uzyskanych powierzchni zewnętrzną to: materiał filamentu lub granulatu, grubość nakładanych warstw, szczelina powietrzna między nakładanym materiałem a dyszą, szerokość ścieżki zależna głównie od średnicy otworu wyjściowego dyszy, stopień wypełnienia powierzchni, rozkład temperatur, prędkość wytłaczania oraz topologia nanoszenia ścieżek w sąsiednich warstwach [19, 20]. Oddziałują także czynniki zewnętrzne jak wilgotność, przepływ powietrza, czas krzepnięcia, czystość końcówki dyszy, czy vibracje głowicy drukującej [19]. Zasadnicza różnica w jakości powierzchni wynika z pozycji osi dyszy w stosunku do formowanej powierzchni. Jedną z zalet druku 3D na wieloosiowych urządzeniach jest możliwość wyboru tej pozycji i dokładnego kontrolowania pozycji dyszy dla prawie wszystkich powierzchni zewnętrznych. Inną, istotną zaletą druku wieloosiowego jest możliwość takiej dekompozycji modelu, która ogranicza lub eliminuje konieczność stosowania podpór [16]. W konsekwencji uzyskujemy krótszy czas operacji druku, mniejsze zużycie filamentu oraz lepszą jakość powierzchni zewnętrznych drukowanych obiektów.

Metrologia na maszynie OMM (ang. *On-Machine Metrology*) staje się obecnie bardzo popularna, ponieważ pozwala

uniknąć czasochłonnych operacji ponownego ustawiania i możliwych uszkodzeń podczas transportu między maszyną a platformą pomiarową [21]. Szczególnego znaczenia pomiary OMM nabierają w przypadku wytwarzania hybrydowego. Zastosowanie bezdotykowej sondy pomiarowej było niezbędne, gdyż należy mieć na uwadze, że mierzona powierzchnia w momencie pomiaru jest gorąca, lepka i w stanie półplnym.

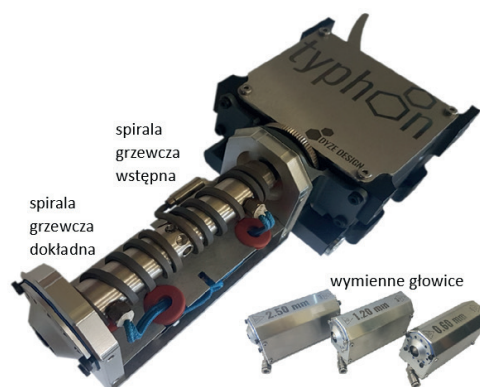
Optyczne sondy triangulacyjne mają swoje zalety i ograniczenia. Są bardzo dokładne, łatwe w obsłudze, szybkie w zakresie pomiarów punktowych i stosunkowo tanie. Niepewność pomiaru w dużym stopniu jest uwarunkowana od chropowatości powierzchni oraz materiału z którego zbudowany jest mierzony obiekt [22]. Sam pomiar chropowatości powierzchni urządzeniami bezdotkowymi, np. w postaci chromatycznych konfokalnych laserów, jest możliwy, a zaobserwowane błędy pomiaru utrzymują się w zakresie 5–10 % [23, 24]. Dopiero od niedawna na komercyjnym rynku oferowane jest urządzenie dedykowane OMM, pracujące w oparciu o holografię cyfrową, które przewyższa możliwościami dokładnego obrazowania 3D dotychczasowe rozwiązania [25].

Celem prowadzonych prac badawczych jest zdobycie danych, które w drugim etapie umożliwią, dzięki adaptacyjnym metodom, budowę sparametryzowanych modeli, opartym na inteligentnych algorytmach. W kolejnych krokach wirtualne,



Rys. 1. Widok ogólny centrum hybrydowego Hermes (opracowanie własne)

Fig. 1. General view of the Hermes Hybrid Center (own work)



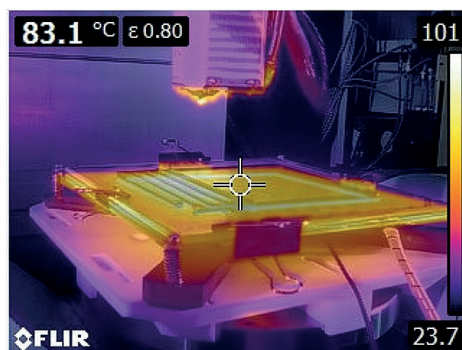
Rys. 2. Profesjonalny ekstruder z wymiennymi głowicami (opracowanie własne)

Fig. 2. Professional extruder with interchangeable print heads (own work)



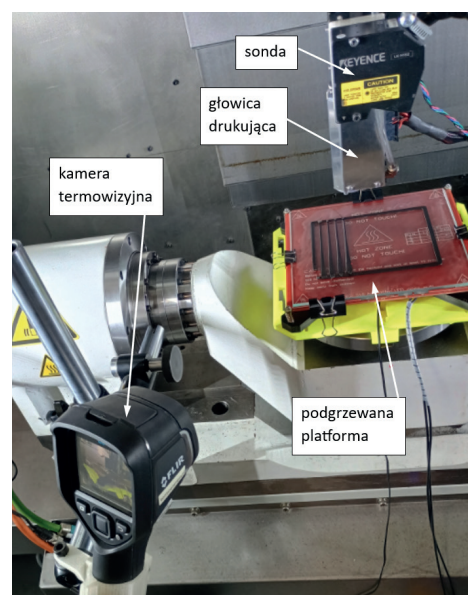
Rys. 3. Głowica sondy laserowej typu punktowego [28]

Fig. 3. Point-type laser probe head [28]



Rys. 4. Obraz z kamery termowizyjnej (opracowanie własne)

Fig. 4. Thermal camera image (own work)



Rys. 5. Widok przestrzeni roboczej stanowiska badawczego (opracowanie własne)

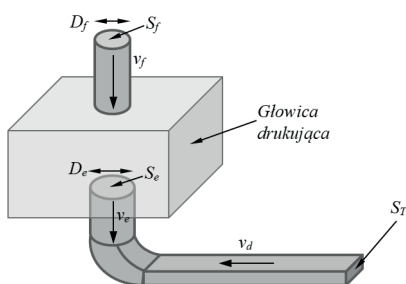
Fig. 5. View of the research setup's workspace (own work)

symulacyjne testy pozwolą na optymalizację procesu pod względem ograniczenia liczby braków produkcyjnych, poprawy stabilności procesu oraz poprawy jakości estetycznej produkowanych elementów.

2. Struktura stanowiska badawczego

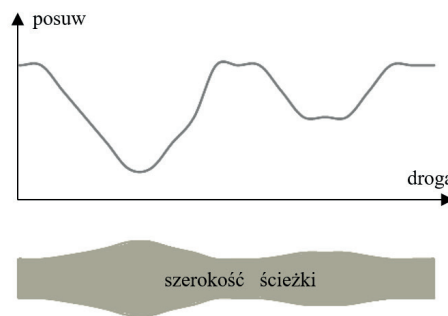
Stanowisko badawcze do pomiaru nierówności powierzchni zewnętrznych drukowanych elementów zostało zbudowane na bazie 6-osowego centrum hybrydowego Hermes (rys. 1), z układem sterowania SINUMERIK ONE. Hermes jest obrabiarką prototypową, zbudowaną na bazie pionowego centrum, wyposażoną w przyrząd uchylno-obrotowy (osie obrotowe A i C) oraz indeksowane wrzeciono robocze, pozwalające na powtarzalne położenia sondy pomiarowej w przestrzeni roboczej. Centrum, obok standardowego magazynu narzędzi, wyposażone jest w dodatkowe ramię pozwalające automatycznie wymieniać narzędzie niestandardowe jakim jest głowica drukująca. Dodatkowo HMI układu sterowania zostało wzbogacone o okna dialogowe użytkownika, pozwalające zadawać parametry druku oraz śledzić aktualną temperaturę głowicy drukującej.

Kluczowym elementem stanowiska badawczego jest wysoko-wydajny, profesjonalny ekstruder Typhon firmy Dyze Design wraz z kompletem trzech głowic drukujących o średnicy dyszy: 0,6 mm, 1,2 mm oraz 2,5 mm. Głowice mają po dwie spirale grzewcze (rys. 2), co umożliwia elastyczne sterowanie uplastycznianiem filamentu. Powyższy ekstruder został zintegrowany z laserową sondą przemieszczenia wysokiej precyzji LK-H152 f-my Keyence (rys. 3), o długości fali 655 nm (czerwony), odległości referencyjnej 150 mm i powtarzalności 0,25 μm . Sonda optyczna obsługiwana jest przez kontroler LK-G5001P, umożliwiający zarówno ciągły tryb pracy, jak i pojedyncze odczyty uaktywniane wyzwalaczem z poziomu programu NC, zawierającego odpowiednie akcje synchroniczne. Dostęp do parametrycznej konfiguracji odczytów sondy pomiarowej oraz wizualizację i zarządzanie wynikami pomiarów umożliwia pakiet oprogramowania LK-Navigator-2. Fizyczna integracja sondy pomiarowej z ekstruderem umożliwia synchroniczne pomiary, bez potrzeby wymiany tych urządzeń, umożliwiając równocześnie zachowanie stabilnych warunków cieplnych procesu druku.



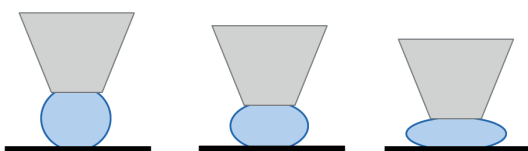
Rys. 6. Uproszczony schemat kształtowania się ścieżki druku (opracowanie własne)

Fig. 6. Simplified diagram of print path formation (own work)



Rys. 7. Zmiana szerokości ścieżki w zależności od szybkości osadzania (opracowanie własne)

Fig. 7. Change in track width due to change in deposition rate (own work)



Rys. 8. Zmiana kształtu eliptycznego przekroju ścieżki w zależności od wysokości warstwy (opracowanie własne)

Fig. 8. Changing the shape of the elliptical cross-section of the path depending on the layer height (own work)

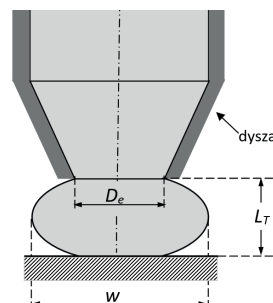
Odpowiednie warunki cieplne zapewniono poprzez zastosowanie podgrzewanej szklanej platformy. Zastosowanie jej wynikało z potrzeby zapewnienia płaskości, która nie przekraczała 0,02 mm dla całej powierzchni. Stanowisko uzupełnia kamera termowizyjna Flir serii Ex (rys. 4), pozwalając na kontrolę i rejestrowanie rozkładu ciepła zarówno w formowanym przedmiocie jak i głowicy drukującej. Rozmieszczenie instrumentów w przestrzeni roboczej obrabiarki ilustruje zdjęcie (rys. 5). Dodatkowo do pomiarów weryfikujących pomiar chropowatości w trybie OMM korzystano z mobilnego chropowatościomierza MarSurf M310 firmy MAHR.

3. Podstawy teoretyczne formowania ścieżki druku

Jakość druku jest bezpośrednio związana z kształtem przekroju ścieżki druku, który determinowany jest głównie objętością osadzanego materiału wzdłuż ścieżki drukowania v_e (rys. 6), zmianami posuwu (rys. 7) oraz wysokością osadzonej warstwy S_T (rys. 8).

Zbyt niski wydatek materiału prowadzi do niedostatecznego wypełnienia warstw, natomiast nadmiar materiału skutkuje jego nadlewaniem, pogarszając jakość powierzchni i efekty wizualne [26, 27]. Istotna jest tu również właściwa wartość przesunięcia końcówki dyszy od drukowanej powierzchni. Zazwyczaj odstęp między końcówką dyszy a powierzchnią drukowania odpowiada żądanej grubości warstwy.

Szybkość osadzania (posuw F) v_d to wartość, z jaką porusza się końcówka dyszy głowicy ekstrudera wzdłuż zaprogramowanej ścieżki druku. Szybkość ta jest zazwyczaj inna niż szybkość przemieszczania się filamentu w ekstruderze v_p , a także szybkość ekstruzji v_e , czyli szybkość wypływu stopionego tworzywa z dyszy [28]. Wynika to z faktu, że najczęściej średnica filamentu D_f (pole przekroju filamentu S_f) jest inna aniżeli średnica końcówki dyszy D_e (pole przekroju ekstrudatu S_e). Natężenie przepływu to objętość przemieszczającego się materiału, odniesiona do jednostki czasu [mm^3/s] lub jednostki odcinka drogi [mm^3/mm]. W tym drugim przypadku wygodniej posługiwać się polem przekroju poprzecznego osadzonej ścieżki S_T [mm^2].



Rys. 9. Formowanie się kształtu przekroju ścieżki druku (opracowanie własne)

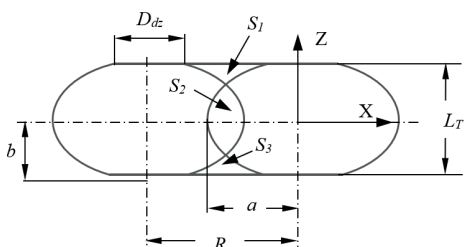
Fig. 9. Formation of the cross-sectional shape of the print path (own work)

Aby prawidłowo dobrać parametry ruchu głowicy w procesie MEX, konieczne jest szczegółowe zrozumienie ich wpływu na rzeczywisty przekrój poprzeczny ścieżki materiału. W praktyce wytłoczone tworzywo termoplastyczne nie odwzorowuje geometrycznie kształtu dyszy. W trakcie osadzania materiał ulega spłaszczeniu, a następnie łączy się z sąsiednimi ścieżkami i warstwami, co prowadzi do powstania jednorodnej struktury. Proces ten zależy w szczególności od temperatury dyszy, temperatury stołu oraz rozkładu temperatur w komorze roboczej, które determinują czas chłodzenia. W symulatorach ścieżek druku przyjmuje się różne kształty przekroju ścieżki, począwszy od regularnego kołowego, poprzez eliptyczne, po prostokątny. Stąd symulatory te nie oddają rzeczywistego stanu powierzchni zewnętrznych [29–31]. Producenci drukarek 3D przyjmują najczęściej uproszczony model przekroju poprzecznego, składający się z prostokąta i dwóch półkoli o średnicy równej wysokości warstwy (rys. 9). W takim przypadku, ustalając przekrój poprzeczny ścieżki S_T (1) oraz grubość warstwy L_T , łatwo oszacować szerokość ścieżki w (2).

$$S_T = \pi \left(\frac{D_f}{2} \right)^2 \frac{v_f}{v_d} \quad (1)$$

$$w = L_T + \frac{S_T - \left(\frac{L_T}{2} \right)^2}{L_T} \quad (2)$$

Rysunek 10 przedstawia hipotetycznie optymalną sytuację, od której należy oczekiwać dobrej jakościowo powierzchni zewnętrznej warstwy. W tym przypadku suma $S_1 + S_3$ równa się S_2 . W praktyce osiągnięcie tego warunku jest niezwykle trudne. W pracy [6] podano wzory pozwalające obliczyć pole powierzchni S_2 (3) oraz S_1 (4) równą S_3 , gdzie a i b są to wartości półosi teoretycznej elipsy.



Rys. 10. Optymalny rozkład materiału w sąsiednich ścieżkach (opracowanie własne)

Fig. 10. Optimal distribution of material in adjacent paths (own work)

$$S_2 = 4 \int_{-a}^{\frac{-R}{2}} \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2} dx \quad (3)$$

$$S_{1,3} = \frac{1}{2} \left[L_T (R - D_{zd}) - 4 \int_{-0,5R}^{\frac{-0,5D_{zd}}{2}} \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2} dx \right] \quad (4)$$

Zakładając stałą wartość zewnętrznej średnicy dyszy D_{zd} poszukiwanymi zmiennymi nastawczymi są: wysokość warstwy L_T oraz rozstaw sąsiednich ścieżek R .

Prace badawcze realizowane w ostatnich latach odnośnie druku 3D zawierają także próby weryfikacji kształtu przekroju ścieżki druku. W kontekście poruszanej tutaj tematyki należy zwrócić uwagę na pracę [32], gdzie autorzy przedstawili metodę pozyskiwania układu równań do przewidywania wartości wysokości, szerokości i pola przekroju poprzecznego dla danych parametrów przetwarzania w procesie FFF. Pomiary przekroju

poprzecznego dotyczyły pierwszej warstwy druku nanoszonej na płytce szklanej. Pomiary były realizowane na maszynie CT Nikon XT H 225 z użyciem zaawansowanego oprogramowania VGStudio MAX do wizualizacji stosów obrazów. Metoda zapewniła dokładność odwzorowania pikseli 10 μm . W pracy [33] autorzy podjęli szczegółowe badania nad modelowaniem procesu wiązania dyfuzyjnego pomiędzy osadzonymi ścieżkami żaroodpornego materiału PEEK w technologii FDM. Opracowany model uwzględnia sprzężenie zjawisk transportu ciepła z procesem dyfuzji na styku sąsiednich ścieżek, analizując zarówno rozkład w obszarze kontaktu, jak i zmiany geometrii przekroju poprzecznego osadzanych ścieżek w funkcji parametrów procesu. Uzyskane wyniki pozwoliły na powiązanie mechanizmu formowania się szybkich połączeń między ścieżkami z kształtowaniem topografii i chropowatości powierzchni wytwarzanych elementów. Do pomiaru topografii powierzchni użyto laserowego mikroskopu skaningowego VK-X200K. W obu przypadkach pomiary realizowane były więc na zaawansowanych, drogich urządzeniach pomiarowych poza przestrzenią roboczą urządzenia drukującego.

4. Badania własne

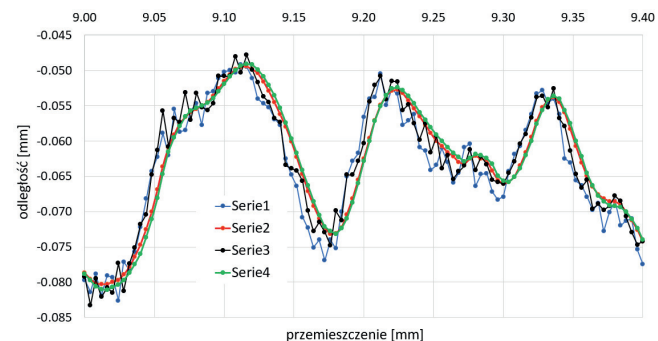
Zakres badań, uwzględniony w pracy, obejmował trzy zagadnienia:

- szacowanie i odfiltrowanie szumu pomiarowego,
- pomiar geometrii konturu przekroju poprzecznego ścieżki druku, przy liniowo zmiennym posuwie, dla różnych grubości drukowanej ścieżki,
- pomiar geometrii styku sąsiednich ścieżek przy liniowo zmiennym posuwie oraz dyskretnie zmiennym rozstawie ścieżek.

4.1. Szacowanie szumu pomiarowego

Stanowiący składową sygnału wyjściowego szum pomiarowy, będący kombinacją szumu wewnętrznego przyrządu pomiarowego oraz oddziaływania środowiska zewnętrznego, jest zazwyczaj istotną składową niepewności pomiaru [34]. W przypadku pomiarów realizowanych bezpośrednio na obrabiarce istnieje wiele źródeł zakłócających precyzyjne pomiary, z których najistotniejszymi są drgania układu OUPN (obrabiarka-uchwyt-przedmiot-narzędzie). Szacowanie składowej błędu wynikającej z szumu pomiarowego przeprowadzono porównując dwa zestawy wyników pomiarów, dla tych samych fragmentów profilu powierzchni, przeprowadzonych z tymi samymi parametrami dynamicznymi ruchu oraz w bardzo zbliżonych warunkach zewnętrznych (temperatura, przepływ powietrza, zakłócenia elektromagnetyczne). Pomiar wzdłuż tej samej ścieżki pomiarowej jest możliwy przez dokładne zsynchronizowanie ruchu pomiarowego z odczytami wyników pomiaru. Wyjście cyfrowe NCK uruchamia programowo start zapisu kolejnej serii wyników pomiaru.

Na rys. 11 zaprezentowano wykresy dla dwóch zestawów wyników. Szum pomiarowy Δy został oszacowany jako średnia



Rys. 11. Fragment wyników dla powtórzonego pomiaru (opracowanie własne)

Fig. 11. Fragment of results for repeated measurement (own work)

różnica rzędnych y_1 i y_2 (5) odwzorowanych profili. W każdym z dwóch cykli pomiarowych (serie 1 i 3) zarejestrowano $n = 4000$ punktów pomiarowych, w odstępie $4 \mu\text{m}$. Wyznaczony tak Δy osiągnął wartość $2,20 \mu\text{m}$. Ze względu na wielkość i charakter tych zakłóceń, można je łatwo ograniczyć przez zastosowanie uśredniania lub filtru dolnoprzepustowego. Filtr uśredniający dla użytej sondy oblicza średnią ruchomą mierzonej wartości w zakresie od 1 do 262 144 razy. Częstotliwość odcięcia dla filtru dolnoprzepustowego można ustawiać od $0,1 \text{ Hz}$ do 3000 Hz . Przesunięcie w fazie (poziome) nie ma tutaj istotnego znaczenia, gdyż jest jednakowe dla wybranych, niezmiennych danych ustawczych. Dla częstotliwości odcięcia 30 Hz (serie 2 i 4) średnia kwadratowa różnica odfiltrowanych profili (profilu pierwotnych) wyniosła $0,68 \mu\text{m}$.

$$\Delta y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_1 - y_2)^2} \quad (5)$$

Powyższe próby wykonano z szybkością posuwu 60 mm/min . Dla zmniejszonego posuwu do 15 mm/min i większej gęstości odczytu $0,001 \text{ mm}$ oraz 16 tys. punktów pomiarowych, obliczone wartości różnic były na bardzo zbliżonym poziomie, odpowiednio $1,79 \mu\text{m}$ i $0,66 \mu\text{m}$.

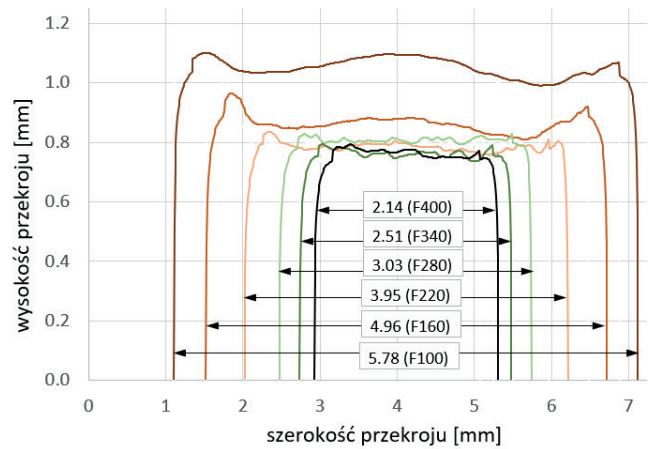
Niezależnie od prezentowanych w pracy wyników pomiarów geometrii ścieżki wcześniej przeprowadzono obszerne badania niepewności pomiarów OMM na centrum hybrydowym sondą dotykową, na podstawie testów obejmujących wyznaczenie środka precyzyjnego wzorca kulowego. Każdy z testów obejmował 30 pełnych cykli pomiarowych. Stwierdzono, przy nierozgrzanej obrabiarce, dryft temperaturowy w osi pionowej Z, który zniżał po około 1 h pracy obrabiarki. Ze względu na krótki (około 3 min.) czas pomiaru geometrii ścieżek oraz fakt, że pomiar profilu ścieżki był pomiarem względnym, tzn. wynik pomiaru w osi Z zawsze odnoszono do podstawy platformy druku, dryft temperaturowy nie ma wpływu na niepewność pomiaru profilu ścieżki druku. Wyznaczona, standardowymi metodami dla pomiarów współrzędnościowych, niepewność wyników pomiarów środka wzorca kulowego była o rząd wielkości mniejsza od zarejestrowanego szumu pomiarowego przy pomiarze ścieżki druku, stąd nie uwzględniono jej w dalszej analizie wyników.

4.2. Pomiar geometrii przekroju ścieżki

Zasadnicze badania dotyczyły określenia kształtu i wymiarów przekroju ścieżki przy liniowo zmiennym posuwie głowicy drukującej względem platformy wydruku oraz zmiennej wysokości końcówki dyszy nad platformą druku. Tego typu badania pozwalają na określenie, przy jakich parametrach dochodzi do połączenia się ścieżek, bez nadmiernego wypływania materiału. Wydruki próbne wykonano dyszą o średnicy otworu $2,5 \text{ mm}$ i średnicy zewnętrznej 6 mm . Średnica użytego filamentu wynosiła $2,85 \text{ mm}$, a stały wydatek objętościowy dla wszystkich prezentowanych w tej pracy testów wynosił $750 \text{ mm}^3/\text{min}$, co kwalifikuje je do kategorii wysokowydajnego druku 3D. Rysunek 12 ilustruje wyniki testu dla jednej zakładanej wysokości ścieżki $0,8 \text{ mm}$, przy zmiennym liniowo posuwie w zakresie $100\text{--}400 \text{ mm/min}$.

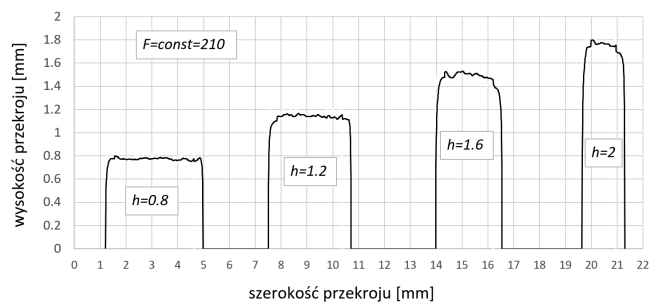
Wysokość ścieżki dla niewielkich wartości posuwu (F100 i F160) wyraźnie przekracza wysokość końcówki dyszy nad platformą druku, co świadczy o tym, że wydajność objętościowa druku jest zbyt duża dla tych wartości posuwu. Oczywiście jest to zjawisko niekorzystne, gdyż nie pozwala kontrolować wysokości uzyskanej warstwy. Z kolei szerokość ścieżki dla małych szybkości druku była duża, bliska średnicy zewnętrznej dyszy i stopniowo malała wraz ze wzrostem posuwu. Należy zwrócić uwagę, że dla najwyższej badanej wartości posuwu (F400) szerokość ścieżki była mniejsza od średnicy dyszy.

Dla porównania zamieszczono (rys. 13) wyniki pomiaru przekroju ścieżki dla różnych wysokości druku przy jednakowym



Rys. 12. Sekwencja przekrojów ścieżek przy zmiennym posuwie dla wysokości warstwy 0.8 mm (opracowanie własne)

Fig 12. Sequence of path cross-sections at variable feed rates for a layer height of 0.8 mm (own work)



Rys. 13. Przekrój 4 ścieżek o zmiennej wysokości przy niezmiennych pozostałych parametrach druku (opracowanie własne)

Fig. 13. Cross-section of four paths with varying heights under constant remaining printing parameters (own work)

posuwie $F210 \text{ mm/min}$. Z wykresu wynika, że zakładaną wysokość ścieżki osiągnięto dla $h = 0,8 \text{ mm}$. Dla większych wysokości druku, wysokość przekroju ścieżki była mniejsza od zakładanej, co oznacza, że szybkość posuwu dla tych wysokości druku i założonej wydajności objętościowej była już zbyt duża. Wraz ze wzrostem założonej wysokości druku następuje znaczne zwiększenie uzyskanych szerokości ścieżki.

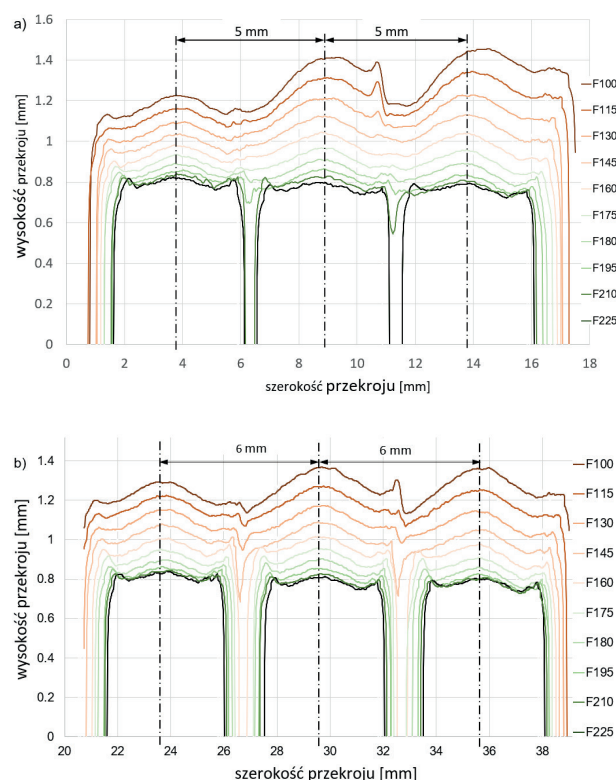
4.3. Pomiar wzajemnego usytuowania sąsiednich ścieżek

Kolejna część badań dotyczyła wzajemnego położenia ścieżek druku przy liniowo zmiennym posuwie oraz zmiennym rozstawie ścieżek. Tego typu wiedza jest istotna dla oszacowania spójności ścieżek oraz stopnia wypełnienia warstwy druku. Rysunek 14 prezentuje widok wydrukowanych ścieżek przy posuwie zmiennym liniowo w zakresie od $100\text{--}400 \text{ mm/min}$ i zmiennym rozstawie 5 i 6 mm .

Wyniki przeprowadzonych testów dla wysokości druku $0,8 \text{ mm}$ prezentuje rys. 15. Z wykresów można zaobserwować proces powstawiania szczeliny pomiędzy sąsiednimi ścieżkami oraz stopniowe wyrównywanie powierzchni warstwy wraz ze wzrostem posuwu. Na podstawie takiego eksperymentu można dobrać właściwą dla danego materiału oraz wydajności objętościowej druku wartość szybkości posuwu F , tak aby ścieżki były spójne i powierzchnia warstwy wyrównana. Jak wynika z przedstawionych zdjęć i wykresów, szczelina w przypadku większego rozstawu (6 mm) pojawia się szybciej, tzn. przy mniejszym posuwie. Stąd pytanie, czy większy rozstaw ścieżek i równocześnie mniejszy posuw rekompensuje możliwość uzyskania bardziej wyrównanej powierzchni warstwy przy mniejszym rozstawie ścieżek? Należy również zwrócić uwagę, że szczelina między ścieżkami



Rys. 14. Widok wydrukowanych ścieżek przy liniowo zmiennym posuwie i różnym rozstawie (opracowanie własne)
Fig. 14. View of the printed paths at linearly varying feed rates and different spacings (own work)



Rys. 15. Sekwencja przekrojów ścieżek przy zmiennym posuwie dla rozstawu 5 mm (a) i 6 mm (b) (opracowanie własne)
Fig. 15. Sequence of path cross-sections at variable feed rates for a spacing of 5 mm (a) and 6 mm (b) (own work)

o rozstawie 6 mm pojawia się już w momencie, gdy wysokość ścieżki przekracza założoną grubość warstwy 0,8 mm.

5. Podsumowanie

Punktowa sonda laserowa okazała się skutecznym i dobrze dostosowanym narzędziem do bezdotykowego pomiaru kolejnych linii depozycji, nanoszonych na gorącej powierzchni stołu grzejnego. Przeprowadzone pomiary geometrii ścieżek dla druku 3D wykazały dużą zmienność w zależności od zmieniających się parametrów termicznych i kinematycznych druku. Potwierdziły się przypuszczenia, że teoretyczne modele kształtowania się geometrii ścieżki druku dla najczęściej stosowanych w popularnych urządzeniach drukujących parametrów, tj. średnica dyszy mniejsza od 1 mm oraz grubość nakładanej

warstwy 0,1–0,3 mm, nie mają zastosowania dla druku 3D wykorzystującego wyższe średnice dysz oraz wysokości warstw.

Zgodnie z poprzednią tezą, wydaje się celowe posiadanie na niestandardowych urządzeniach drukujących jak obrabiarki CNC lub roboty przemysłowe urządzeń pomiarowych w trybie OMM dla szybkiej oceny jakości druku oraz optymalizacji parametrów druku.

Potencjał zaprezentowanego w pracy stanowiska badawczego nie ogranicza się tylko do przedstawionych eksperymentów. Jest wskazane aby przeprowadzić dalsze badania dotyczące bezwładności głowicy drukującej, tzn. jak szybko po zmianie parametrów druku nastąpi zmiana kształtu i wymiarów ścieżki druku. Tego typu wiedza jest niezbędna dla celów uzyskania dobrych jakościowo i powtarzalnych wydruków.

Podziękowania

Praca została wykonana w ramach projektu „Wysokoprecyzyjne, hybrydowe centrum druku 3D w pięciu osiach z synchronicznym frezowaniem części drukowanych”, wspieranego przez Regionalny Program Operacyjny Województwa Śląskiego (nr WND-RPSL.01.02.00-24-009A/19-005), z Funduszy Unii Europejskiej na lata 2014–2020.

Bibliografia

- Dehghan S., Karganroudi S.S., Echchakoui S., Barka N., *The Integration of Additive Manufacturing into Industry 4.0 and Industry 5.0: A Bibliometric Analysis (Trends, Opportunities, and Challenges)*, “Machines”, Vol. 13, No. 1, 2025, DOI: 10.3390/machines13010062.
- Bigliardi B., Bottani E., Gianatti E., Monferdini L., Pini B., Petroni A., *Sustainable Additive Manufacturing in the context of Industry 4.0: A Literature Review*, “Procedia Computer Science”, Vol. 232, 2024, 766–774, DOI: 10.1016/j.procs.2024.01.076.
- Hegab H., Khanna N., Monib N., Salem A., *Design for sustainable additive manufacturing: A review*, “Sustainable Materials and Technologies”, Vol. 35, 2023, DOI: 10.1016/j.susmat.2023.e00576.
- Shah H.H., Tregambi C., Bareschino F., Pepe F., *Environmental and Economic Sustainability of Additive Manufacturing: A Systematic Literature Review*, “Sustainable Production and Consumption”, Vol. 51, 2024, 628–643, DOI: 10.1016/j.spc.2024.10.012.
- Kunovjanek M., Knofius N., Reiner G., *Additive Manufacturing and Supply Chains – A Systematic Review*, “Production Planning & Control”, Vol. 33, No. 13, 2022, DOI: 10.1080/09537287.2020.1857874.
- Jiang J.C., Xu X., Rui W., Jia Z., Ping Z., *Line width mathematical model in fused deposition modelling for precision manufacturing*, E3S Web of Conferences 231, 2021, DOI: 10.1051/e3sconf/202123103003.
- Hebda M., McIlroy C., Whiteside B., Caton-Rose F., Coates F., *A method for predicting geometric characteristics of polymer deposition during fused-filament-fabrication*, “Additive Manufacturing”, Vol. 27, 2019, 99–108, DOI: 10.1016/j.addma.2019.02.013.
- Shi X., Sun Y., Tian H., Abhilash P.M., Luo X., Liu H., *Material Extrusion Filament Width and Height Prediction via Design of Experiment and Machine Learning*, “Micro-machines”, Vol. 14, No. 11, 2023, DOI: 10.3390/mi14112091.
- Gharehpapagha B., Dolen M., Yaman U., *Investigation of Variable Bead Widths in FFF Process*, “Procedia Manufacturing”, Vol. 38, 2019, 52–59, DOI: 10.1016/j.promfg.2020.01.007.
- Oskolkov A.A., Bezukladnikov I.I., Trushnikov D.N., *Mathematical Model of the Layer-by-Layer FFF/FGF Poly-*

- mer Extrusion Process for Use in the Algorithm of Numerical Implementation of Real-Time Thermal Cycle Control, "Polymers", Vol. 15, No. 23, 2023, DOI: 10.3390/polym15234518.
11. Nath P., Olson J.D., Mahadevan S., Lee Y.-T.T., *Optimization of Fused Filament Fabrication Process Parameters under Uncertainty to Maximize Part Geometry Accuracy*, "Additive Manufacturing", Vol. 35, 2020, DOI: 10.1016/j.addma.2020.101331.
 12. Mertkan İ.A., Tezel T., Kovan V., *Improving surface and dimensional quality with an additive manufacturing-based hybrid technique*, "The International Journal of Advanced Manufacturing Technology", Vol. 128, 2023, 1957–1963, DOI: 10.1007/s00170-023-12055-z.
 13. Pascu S., Balc N., *Process parameter optimization for hybrid manufacturing of PLA components with improved surface quality*, "Polymers", Vol. 15, No. 17, 2023, DOI: 10.3390/polym15173610.
 14. Chohan J.S., Singh R., *Pre and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: A state of art review and future applications*, "Rapid Prototyping Journal", Vol. 23, 2017, 495–513, DOI: 10.1108/RPJ-05-2015-0059.
 15. Golhin A.P., Tonello R., Frisvad J.R., Grammatikos S., Strandlie A., *Surface Roughness of As-Printed Polymers: A Comprehensive Review*, "The International Journal of Advanced Manufacturing Technology", Vol. 127, 2023, 987–1043, DOI: 10.1007/s00170-023-11566-z.
 16. Isa M.A., Lazoglu I., *Five-Axis Additive Manufacturing of Freeform Models Through Buildup of Transition Layers*, "Journal of Manufacturing Systems", Vol. 50, 2019, 69–80, DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.12.002.
 17. Bouzaglou O., Golan O., Lachman N., *Process Design and Parameters Interaction in Material Extrusion 3D Printing: A Review*, "Polymers", Vol. 15, No. 10, 2023, DOI: 10.3390/polym15102280.
 18. Triantaphyllou A. et al., *Surface texture measurement for additive manufacturing*, "Surface Topography: Metrology and Properties", Vol. 3, No. 2, 2015, DOI: 10.1088/2051-672X/3/2/024002.
 19. Kechagias J., Chaidas D., Vidakis N., Salonitis K., Vaxevanidis N.M., *Key Parameters Controlling Surface Quality and Dimensional Accuracy: A Critical Review of FFF Processes*, "Materials and Manufacturing Processes", Vol. 37, No. 9, 2022, 963–984, DOI: 10.1080/10426914.2022.2032144.
 20. Dey A., Yodo N., *A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics*, "Journal of Manufacturing and Materials Processing", Vol. 3, No. 3, 2019, DOI: 10.3390/jmmp3030064.
 21. Jiang X., J., Gao F., Martin H., Williamson J., Li D., *On-machine metrology for hybrid Machining*, Hybrid Machining: Theory, Methods, and Case Studies, edited by: Luo, X., Qin, Y., Elsevier Science & Technology, 2018, DOI: 10.1016/B978-0-12-813059-9.00010-5.
 22. Knauer M.C., Richter C., Häusler G., *3D sensor zoo – Species and natural habitats*, "Laser Technik Journal", Vol. 3, No. 1, 2006, 33–37, DOI: 10.1002/latj.200790081.
 23. Lishchenko N., O'Donnell G.E., Culleton M., *Contactless method for measurement of surface roughness based on a chromatic confocal sensor*, "Machines", Vol. 11, No. 8, 2023, DOI: 10.3390/machines11080836.
 24. Fu S., Kor W.S., Cheng F., Seah L.K., *In-situ measurement of surface roughness using chromatic confocal sensor*, "Procedia CIRP", Vol. 94, 2020, 780–784, DOI: 10.1016/j.procir.2020.09.133.
 25. Seyler T., Engler J., Beckmann T. et al., *HoloPort – design and integration of a digital holographic 3-D sensor in machine tools*, "Journal of sensors and sensor systems", Vol. 9, 2020, 33–41, DOI: 10.5194/jsss-9-33-2020.
 26. Kim M.K., Lee I.H., Kim H.-C., *Effect of Fabrication Parameters on Surface Roughness of FDM Parts*, "International Journal of Precision Engineering and Manufacturing", Vol. 19, 2018, 137–142, DOI: 10.1007/s12541-018-0016-0.
 27. Badarinath R., Prabhu V., *Real-Time Sensing of Output Polymer Flow Temperature and Volumetric Flowrate in Fused Filament Fabrication Process*, "Materials", Vol. 15, No. 2, 2022, DOI: 10.3390/ma15020618.
 28. Lendvai L., Fekete I., Rigotti D., Pegoretti A., *Experimental Study on the Effect of Filament-Extrusion Rate on the Structural, Mechanical and Thermal Properties of Material Extrusion 3D-Printed Polylactic Acid (PLA) Products*, "Progress in Additive Manufacturing", Vol. 10, 2025, 619–629, DOI: 10.1007/s40964-024-00646-5.
 29. Pranzo D., Larizza P., Filippini D., Percoco G., *Extrusion-Based 3D Printing of Microfluidic Devices for Chemical and Biomedical Applications: A Topical Review*, "Micromachines", Vol. 9, No. 8, 2018, DOI: 10.3390/mi9080374.
 30. Comminal R., Serdeczny M.P., Pedersen D.B., Spangenberg J., *Numerical Modeling of the Strand Deposition Flow in Extrusion-Based Additive Manufacturing*, "Additive Manufacturing", Vol. 20, 2018, 68–76, DOI: 10.1016/j.addma.2017.12.013.
 31. Stryczek R., Wyrobek K., *Projektowanie operacji druku 3D metodą FFF*, Uniwersytet Bielsko-Bialski, 2022.
 32. Hebda M., McIlroy C., Whiteside B., Caton-Rose F., Coates F., *A method for predicting geometric characteristics of polymer deposition during fused-filament-fabrication*, "Additive Manufacturing", Vol. 27, 2019, 99–108, DOI: 10.1016/j.addma.2019.02.013.
 33. Wang P., Zou B., Ding S., *Modeling of surface roughness based on heat transfer considering diffusion among deposition filaments for FDM 3D printing heat-resistant resin*, "Applied Thermal Engineering", Vol. 161, 2019, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114064.
 34. Dobrowolski T., Tomasik J., Tandecka K., Magdziak M., Reizer P., *Szum pomiarowy jako składowa niepewności pomiarów struktury geometrycznej powierzchni*, „Mechanik”, Nr 12, 2018, DOI: 10.17814/mechanik.2018.12.202.

Inne źródła

35. ISO/ASTM 52900:2021, *Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary*, International Organization for Standardization, Geneva, 2021.
36. ISO/ASTM 52900:2015, *Additive Manufacturing — General Principles — Terminology*, International Organization for Standardization, 2015.
37. Keyence Corporation, *LK-G5000 Series: Ultra High-Speed/High-Accuracy Laser Displacement Sensor – Datasheet*, Keyence, 2018.

Laser Measurement of 3D Printing Path Geometry

Abstract: The study presents a description of a research setup designed for non-contact measurement of surface geometry formed during the deposition of successive layers in MEX 3D printing. The setup was based on a six-axis hybrid machining center equipped with a printing head, a laser sensor, and a thermal imaging camera. The experiments were conducted for various nozzle sizes of the printing head, different path-deposition speeds, and multiple layer-construction strategies. The obtained measurement results provide a deeper understanding of the mechanisms governing the formation of outer surfaces in printed parts and may serve as a basis for developing more accurate predictive models in additive manufacturing. The capability to perform 3D printing on a multi-axis machine tool opens new areas of research and, potentially, new opportunities for structural and parametric optimization of 3D printing processes.

Keywords: Hybrid centers, Laser measurements, Fused filament fabrication, 3D printing optimization, OMM, Measuring noise



dr hab. inż. Roman Stryczek, prof. UBB
rstryczek@ubb.edu.pl
ORCID: 0000-0003-1662-972X

Pracownik Katedry Technologii Maszyn i Automatykacji Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego. Specjalista w zakresie komputerowego projektowania procesów wytwórczych, optymalizacji parametrycznej i strukturalnej, elastycznego programowania obrabiarek, sterowania adaptacyjnego obrabiarek, sieci Petri, zastosowania metod sztucznej inteligencji w wytwarzaniu maszyn, identyfikacji i kompensacji błędów obrabiarek NC.



mgr inż. Kamil WYROBEK
kwyrobek@ubb.edu.pl
ORCID: 0000-0002-5881-8054

Absolwent Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki UBB, ze specjalizacją Inżynieria Mechaniczna i Projektowanie Maszyn. Ma duże doświadczenie praktyczne w programowaniu i eksploatacji obrabiarek CNC i zaawansowanych systemów CAD/CAM. Jego zainteresowania naukowe skupiają się na druku 3D, postprocessingu, symulacjach komputerowych i inżynierii odwrotnej.

