

Wrocław, 09.01.2025r.

Dr hab. inż. Patrycja Szymczyk-Ziółkowska, prof. uczelni  
Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny  
Katedra Technologii Laserowych, Automatyzacji i Organizacji Produkcji  
Łukasiewicza 25, 50-371 Wrocław

Recenzja rozprawy doktorskiej

Mgr. inż. Marcina Piotra Głowackiego

pod tytułem:

*„Ocena wpływu oddziaływania czynników środowiskowych na strukturę i właściwości mechaniczne elementów z tworzyw polimerowych wytwarzanych technikami przyrostowymi”*

Formalną podstawę opracowania stanowi uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich nr 7/10/2024/2025 z dnia 22 października 2024r. przedstawiona w zawiadomieniu nr 3/RNCS.520.15.2024 z dnia 30 października 2024 r.

## 1. Ocena wyboru tematyki badawczej

Recenzowana dysertacja podejmuje tematykę wpływu czynników środowiskowych na właściwości mechaniczne oraz strukturę polimerów przetwarzanych za pomocą technik przyrostowych (*ang. Additive Manufacturing, AM*). W badaniach uwzględniono powszechnie stosowane materiały polimerowe, takie jak: ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*), ASA (*Acrylonitrile Styrene Acrylate*), PLA (*Polylactic Acid*) i HIPS (*High Impact Polystyrene*), które znajdują szerokie zastosowanie w aplikacjach przemysłowych.

Badania, których podjął się Pan mgr inż. Marcin Piotr Głowacki mają charakter interdyscyplinarny i w pełni wpisują się w aktualne trendy rozwoju nauki i technologii. Głównym celem pracy jest ocena wpływu podwyższonych i obniżonych temperatur, wilgotności oraz oddziaływania oleju mineralnego na integralność mechaniczną oraz właściwości użytkowe wybranych polimerów. Uzyskane wyniki mogą zostać wykorzystane do poprawy wydajności procesów produkcyjnych, zwiększenia trwałości komponentów oraz obniżenia kosztów eksploatacji dzięki zastosowaniu materiałów o podwyższonej odporności na czynniki środowiskowe.

## 2. Ocena formalna rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska została przygotowana w języku polskim. Opracowanie zawiera krótkie wprowadzenie do tematyki pracy doktorskiej (Rozdział 1-2), hipotezę oraz cele naukowe (Rozdział 3), opis publikacji wraz z podsumowaniem (Rozdział 4-8), a także wymaganym streszczeniem (Rozdział 10-11) oraz osiągnięciami doktoranta (Rozdział 12) zawarty został na 71 stronach. Bibliografia (Rozdział 9) składa się z 53 pozycji literaturowych. Oświadczenia współautorów publikacji tworzących cykl jak również kopie publikacji, które są podstawą rozprawy stanowią załącznik do autoreferatu (Rozdział 13).

Rozprawa doktorska ma formę cyklu złożonego z powiązanych tematycznie publikacji naukowych opublikowanych w czasopismach z listy JCR. W skład cyklu wchodzi pięć publikacji (jedna przeglądowa i cztery doświadczalne) opublikowane w latach 2022-2024:

- **Marcin Głowacki**, Mazurkiewicz Adam, Słomion Małgorzata, Skórczewska Katarzyna, Resistance of 3D-Printed Components, Test Specimens and Products to Work under Environmental Conditions Review, (Materials), 2022, 15, 6162. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15176162>
- **Marcin Głowacki**, Katarzyna Skórczewska, Krzysztof Lewandowski, Piotr Szewczykowski, Adam Mazurkiewicz, Effect of Shock-Variable Environmental Temperature and Humidity Conditions on 3D-Printed Polymers for Tensile Properties, (Polymers), 2023, 16, 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16010001>
- **Marcin Głowacki**, Adam Mazurkiewicz, Katarzyna Skórczewska, Krzysztof Lewandowski, Emil Smyk, Ricardo Branco, Effect of Thermal Shock Conditions on the Low-Cycle Fatigue Performance of 3D-Printed Materials: Acrylonitrile Butadiene Styrene, Acrylonitrile Styrene-Acrylate, High-Impact Polystyrene, and Poly(lactic acid), (Polymers), 2024, 16, 1823. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16131823>
- **Marcin Głowacki**, Katarzyna Skórczewska, Krzysztof Lewandowski, Adam Mazurkiewicz, Piotr Szewczykowski, Evaluation of the Effect of Mineral Oil Exposure on Changes in the Structure and Mechanical Properties of Polymer Parts Produced by Additive Manufacturing Techniques, (Materials), 2022, 15, 6162. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17153680>
- **Marcin Głowacki**, Adam Mazurkiewicz, Katarzyna Skórczewska, José Miguel Martínez Valle, Emil Smyk, Change in the Low-Cycle Performance on the 3D-Printed Materials ABS, ASA, HIPS, and PLA Exposed to Mineral Oil, (Polymers), 2024, 16, 1120. DOI: 10.3390/polym16081120

Wszystkie prace tworzące cykl zostały opublikowane w czasopismach *Materials* (2 prace) oraz *Polymers* (3 prace) wchodzących w skład wydawnictwa MDPI i były wcześniej poddane merytorycznej analizie przez niezależnych Recenzentów i ocenione przez nich pozytywnie. Łączna wartość punktowa według punktacji MNiSW (stan na dzień 21.09.2024r.) wyniosła 580 przy sumarycznym współczynniku wpływu (IF) na poziomie 19. W przypadku rozprawy doktorskiej opartej o współautorski cykl publikacji istotnym elementem recenzji jest ocena indywidualnego udziału Doktoranta w publikacjach stanowiących rozprawę, którą

można przeprowadzić na podstawie oświadczeń współautorów. W przypadku wszystkich prac włączonych do cyklu Pan mgr inż. Marcin Piotr Głowacki jest zarówno pierwszym autorem, jak również pełnił funkcję autora korespondencyjnego (w przypadku pracy pt. *Effect of Shock-Variable Environmental Temperature and Humidity Conditions on 3D-Printed Polymers for Tensile Properties* oraz *Evaluation of the Effect of Mineral Oil Exposure on Changes in the Structure and Mechanical Properties of Polymer Parts Produced by Additive Manufacturing Techniques* wspólnie z Panią dr inż. Katarzyną Skórczewską). Dorobek naukowy autora rozprawy uzupełniają rozdziały w monografiach naukowych oraz patenty i zgłoszenia patentowe opisane szczegółowo w autoreferacie (Rozdział 12).

Do poszczególnych prac zostały zamieszczone oświadczenia Doktoranta i współautorów o ich udziale w przygotowaniu artykułów wchodzących w skład cyklu, które wyraźnie wskazują na wiodącą rolę Pana mgr inż. Marcina Piotra Głowackiego w opracowaniu koncepcji badawczej, prowadzeniu badań eksperymentalnych i analizie wyników a także redakcji manuskryptów.

### **3. Ocena merytoryczna rozprawy i uwagi szczegółowe**

W mojej ocenie sposób przedstawienia poszczególnych elementów rozprawy nie został w pełni przemyślany, co negatywnie wpływa na klarowność i spójność przekazu naukowego. W szczególności zauważalne są pewne braki w logicznym układzie treści, co utrudnia czytelnikowi płynne śledzenie toku argumentacji oraz formułowanych wniosków. Złożona konstrukcja zdań, nierzadko obarczona błędami interpunkcyjnymi, znacząco utrudnia zrozumienie prezentowanych treści. Dodatkowo, jakość redakcyjna rozprawy budzi zastrzeżenia, co uwidacznia się poprzez liczne błędy edycyjne i stylistyczne. Takie niedociągnięcia mogą obniżać wartość pracy i stanowić istotną przeszkodę w jej odbiorze.

#### Uwagi ogólne:

1. Opis we wstępie pracy jest wybiórczy i nie w pełni odpowiada zakresowi prezentowanych treści. Choć zwięzły opis wprowadzenia może być zaletą, w omawianym przypadku brakuje uwzględnienia kluczowych aspektów dotyczących badanego tematu. Nie przedstawiono wystarczająco kompleksowo istotnych zagadnień związanych z celami pracy, problematyką badawczą oraz znaczeniem podjętego tematu w kontekście dotychczasowych badań.
2. W pracy nadużywany jest język potoczny, co znacząco obniża jej formalny i naukowy charakter. Przykłady takich sformułowań, jak „druk 3D”, „tworzenie” zamiast wytwarzanie, „pokrojony model” (wyrażenie to najprawdopodobniej odnosi się do przekrojów poprzecznych modelu używanych do odtwarzania warstw) czy „obróbka tradycyjna” (prawdopodobnie chodzi o metody konwencjonalne), wskazują na brak precyzji terminologicznej, która jest kluczowa w opracowaniach naukowych. Dalsze wyrażenia, takie jak „praktycznie cały filament”, „tworzenie słabych modeli”, „część pierwotna” czy „wykorzystanie wydruków z druku 3D”, nie tylko wprowadzają nieścisłości, ale również mogą być odebrane jako brak profesjonalizmu w prezentacji treści technicznych.

3. W opisie technik przyrostowych zauważono brak uwzględnienia nomenklatury zgodnej z normą ISO/ASTM Additive Manufacturing (ISO/ASTM 52900:2021), która wprowadza standardowe definicje i klasyfikacje. Pominięcie tych standardów może prowadzić do nieścisłości w interpretacji terminologii oraz ograniczać międzynarodową zgodność i zrozumienie opracowania w środowisku naukowym i przemysłowym. Zastosowanie ujednoliconej terminologii jest kluczowe dla precyzyjnego opisu technik przyrostowych.
4. Wiele terminów używanych w technikach przyrostowych, takich jak FDM (*Fused Deposition Modeling*) czy SLS (*Selective Laser Sintering*), to nazwy handlowe opatentowane przez producentów. W nauce zaleca się stosowanie nomenklatury zgodnej z ASTM, która umożliwi precyzyjne rozróżnienie technik niezależnie od producenta. Na przykład FDM zgodnie z ASTM powinno być określane jako Material Extrusion (MEX) (ekstruzja materiału), co opisuje proces osadzania warstw przez dyszę, bez odniesienia do nazw handlowych. Nazwy takie jak FDM czy SLS powinny być używane wyłącznie w odniesieniu do konkretnych rozwiązań technologicznych, np. sprzętu badawczego. W innych przypadkach preferowane są neutralne terminy zgodne z zasadami obiektywizmu naukowego. Należy również unikać przestarzałych określeń, takich jak „*rapid prototyping*” (RP), które nie oddają współczesnego zakresu technik przyrostowych, obejmujących produkcję pełnowartościowych elementów o różnorodnych właściwościach. Określenie „*wytwarzanie addytywne*”, jako dosłowne tłumaczenie z angielskiego („*additive manufacturing*”), może być nieprecyzyjne w języku polskim i wymaga odpowiedniego kontekstu.

Uwagi redakcyjne/nieścisłości terminologiczne i językowe:

1. Numeracja rozdziałów w pracy jest nieprawidłowa, co wpływa na spójność i czytelność struktury dokumentu. Zarówno **Wykaz skrótów i oznaczeń**, jak i **Wstęp** zostały oznaczone numerem "1", co jest niezgodne z przyjętymi standardami redakcyjnymi. Ponadto, po podrozdziale **1.2 Opis procesu** następuje rozdział o oznaczeniu **2.3 Technologie druku 3D**, co wskazuje na brak logicznej kontynuacji i spójności w numeracji. Dodatkowo, struktura pracy nie jest zgodna z zaprezentowanym **Spisem treści**, co utrudnia czytelnikowi odnalezienie poszczególnych sekcji oraz zrozumienie hierarchii rozdziałów.
2. Wykaz akronimów charakteryzuje się brakiem uporządkowania, co wpływa na jego czytelność i zgodność z zasadami redakcyjnymi. Nie zastosowano porządku alfabetycznego, co utrudnia szybkie odnalezienie poszczególnych terminów. W zakresie wprowadzania akronimów występują istotne błędy, takie jak użycie akronimu przed wcześniejszym wprowadzeniem pełnej nazwy oraz podawanie pełnej nazwy w nawiasach po użyciu skrótu.
3. Brak konsekwencji w stosowaniu akronimów, co negatywnie wpływa na jej spójność. Przykładowo, akronim „**STL**” występuje zarówno w wersji bez kropki, oraz jako „**stl**”, co wprowadza niejednoznaczność w interpretacji terminologii. Ponadto, akronimy są wprowadzane w tytułach rozdziałów, a następnie powtarzane jako nowe w treści tych samych rozdziałów, co jest zbędne. Dodatkowo zauważono zastosowanie dwóch różnych tłumaczeń dla akronimu „**FDM**” (*Fused Deposition Modeling*), co może powodować dezorientację czytelnika i sugerować brak jednolitego podejścia do terminologii.



4. Brak konsekwencji w redagowaniu list punktowanych (spisów), co negatywnie wpływa na jej estetykę oraz zgodność z zasadami edytorskimi. Niejednolitość przejawia się w rozpoczynaniu pozycji punktowanych zarówno wielką, jak i małą literą, bez jasno określonej reguły oraz zastosowaniu różnych znaków interpunkcyjnych na końcu pozycji, takich jak przecinki lub ich brak, co wprowadza niespójność.
5. Prezentacja informacji w Tabeli nr 2, gdzie większość komórek pozostaje niewypełniona, budzi istotne zastrzeżenia pod względem czytelności i merytorycznej wartości tego elementu pracy. Taka forma prezentacji sugeruje brak kompletności danych lub ich niedostateczne opracowanie, co może prowadzić do wątpliwości dotyczących jakości przeprowadzonych analiz.
6. W przytoczonym fragmencie: „*Opisany cykl procedury został nazwany szokiem, który wykonywano trzykrotnie, a z każdego etapu, tj. po 1, 2 i 3 cyklu szokowym pobierano próbki do badań.*”, pojawia się nieścisłość terminologiczna dotycząca określenia "cykl procedury". W tym przypadku bardziej adekwatnym i precyzyjnym byłoby użycie określenia „*opisana procedura*”.
7. (Skróty myślowe/błędy logiczne). Przykładem skrótu myślowego jest stwierdzenie, że niewystarczająca dokładność aproksymacji modelu CAD 3D do formatu .STL wpływa na jakość wytwarzanego elementu. W rzeczywistości zmiana ta dotyczy dokładności odwzorowania modelu cyfrowego, a nie bezpośrednio jakości samego wytwarzanego elementu. Element jest odtwarzany zgodnie z cyfrową reprezentacją, która została przekazana do oprogramowania służącego do przygotowania procesu technologicznego. Tym samym, wpływ niewystarczającej dokładności aproksymacji modelu CAD do formatu .STL należy interpretować jako potencjalne ograniczenie w precyzji odwzorowania geometrii modelu, które może skutkować niedokładnościami w cyfrowym opisie powierzchni obiektu. Jednak to jakość przygotowania danych wejściowych i ich zgodność z wymaganiami procesu technologicznego ostatecznie determinuje dokładność oraz jakość fizycznie wytwarzanego elementu.
8. (Skróty myślowe/błędy logiczne). Przykładem skrótu myślowego jest następujący opis: „*Próbki wydrukowane z 100% wypełnieniem z badanych materiałów, takich jak: ABS, ASA, HIPS i PLA zostały umieszczone w wodzie destylowanej na 72 godziny, następnie po wyjęciu z wody, umieszczono je niezwłocznie w zamrażarce o temperaturze -20 °C na 24 godziny, a następnie próbki zostały przeniesione bezpośrednio do suszarki 70 °C na 24 godziny*”. Poprawnym sformułowaniem byłoby: „...temperatura wewnątrz zamrażarki została ustawiona na -20°C...”, co precyzyjnie wskazuje, że chodzi o warunki temperaturowe panujące w urządzeniu oraz „...temperatura wewnątrz suszarki została ustawiona na 70°C...”, co eliminuje potencjalne nieporozumienia i precyzuje zakres badanych warunków.

W pracy zauważono szereg nieścisłości oraz uproszczeń, które wymagają sprostowania i rozwinięcia w celu poprawy wartości naukowej pracy oraz poprawności technicznej. Poniżej przedstawiono szczegółowe uwagi do wybranych elementów pracy.

a) Uwagi szczegółowe do rozdziału 2. Wstęp (numeracja zgodna ze Spisem treści):

1. Sformułowanie, że aby maszyna mogła być uznana za urządzenie do wytwarzania przyrostowego: „...*musi posiadać 3 cechy: możliwość poruszania w 3 osiach, produkcję addytywną i konstrukcję opartą na warstwach.*”, jest nieściśle. Istnieje wiele urządzeń, które umożliwiają wytwarzanie obiektów trójwymiarowych przy ruchu w jednej lub dwóch osiach. Rekomenduje się uzupełnienie definicji o bardziej uniwersalne kryteria.
2. Stwierdzenie, że format .STL korzysta z metody elementów skończonych, jest błędne. Format .STL jest formatem pliku opisującym powierzchnię obiektu za pomocą siatki trójkątów, bez powiązania z analizami MES.
3. Sformułowanie, że: „*Budowanie modelu rozpoczyna się od najniższej warstwy przylegającej do platformy, przy czym każda nowo uformowana warstwa jest podłożem dla najniższej warstwy.*”, wymaga sprostowania. Jest oczywiste, że proces wytwarzania modelu przyrostowego przebiega od pierwszej (najniższej) warstwy do ostatniej, a informacja ta nie wnosi istotnej wartości merytorycznej. Należy także zauważyć, że każda nowo uformowana warstwa pełni funkcję podłoża dla kolejnej, a nie dla najniższej warstwy, co stanowi istotną różnicę w interpretacji procesu. Precyzyjne opisanie tego mechanizmu jest kluczowe dla zrozumienia zasad działania technologii przyrostowych oraz prawidłowego przekazu naukowego.
4. Wprowadzenie terminu „*filament*” bez uprzedniego wyjaśnienia jego znaczenia i umieszczenia definicji w odpowiednim kontekście technologicznym.
5. Stwierdzenie, że wytwarzanie zgodnie z kierunkiem działania obciążenia pozwala uzyskać lepsze właściwości mechaniczne („*Można również uzyskać lepsze właściwości mechaniczne, gdy model jest drukowany w kierunku działania obciążenia.*”), jest uproszczeniem i pomija istotne aspekty. Brakuje wprowadzenia zjawiska anizotropii właściwości mechanicznych, które jest kluczowe w technikach przyrostowych. Właściwości mechaniczne zależą od orientacji warstw w stosunku do kierunku działania sił, co może prowadzić zarówno do poprawy, jak i pogorszenia parametrów wytrzymałościowych. Rekomenduję rozszerzenie tego zagadnienia o szczegółowy opis wpływu orientacji warstw na wytrzymałość oraz uwzględnienie metod identyfikacji optymalnych kierunków wytwarzania.
6. Sformułowanie, że w metodzie Vat Photopolymerization (VPP) wykorzystującej ekran do maskowania promieniowania ultrafioletowego wszystkie warstwy skanowane są jednocześnie, wymaga doprecyzowania. W rzeczywistości w procesach takich jak Digital Light Processing (DLP) cała warstwa może być jednocześnie naświetlana, jednak nie dotyczy to wszystkich wariantów metody VPP. W innych konfiguracjach, takich jak stereolitografia (SLA), naświetlanie odbywa się punktowo. Wymaga to jednoznacznego rozróżnienia między różnymi technologiami w obrębie VPP. W kontekście wariantów metod z grupy Vat Photopolymerization (VPP) należy jednoznacznie doprecyzować mechanizm skanowania wiązką laserową. Kluczowe pytanie dotyczy tego, czy skanowanie wiązką odbywa się bezpośrednio na powierzchni płynnego materiału (żywicy), czy nad tą powierzchnią?
7. Twierdzenie, że zmiennymi parametrami procesowymi w technikach Vat Photopolymerization (VPP) są średnica wiązki lasera oraz dokładność dostarczonego

modelu w formacie .STL, wymaga doprecyzowania, ponieważ przedstawia uproszczony obraz kluczowych czynników wpływających na proces wytwarzania. Średnica wiązki lasera jest jednym z parametrów, który może wpływać na rozdzielczość procesu, jednak sama w sobie nie jest bezpośrednio regulowaną zmienną procesową. Dokładność modelu .STL, wyrażająca się w jakości siatki trójkątów definiujących geometrię obiektu, wpływa na precyzję odwzorowania geometrii w procesie wytwarzania. Jednak nie jest to zmienny parametr procesowy w ścisłym znaczeniu, lecz raczej cecha wejściowego pliku projektowego.

8. W pracy przedstawiono zestawienie prezentujące „*Wady i zalety druku 3D*” (Tabela 1), w którym nie wszystkie przedstawione pozycje są rzeczywiście wadami lub zaletami, a niektóre z nich okazują się nieprawdziwe (np. stwierdzenie o konieczności wytwarzania w zamkniętej komorze). Takie podejście obniża rzetelność i przejrzystości prezentowanych informacji oraz wiarygodność merytoryczną opracowania.
9. Przedstawiony opis w punkcie **2.33 Selektywne spiekanie laserem (SLS)** jest zbyt lakoniczny i zawiera kilka nieścisłości. Autor stwierdza, że w procesie dochodzi do spiekania proszku, podczas gdy w rzeczywistości proces ten polega na jego przetapianiu przy użyciu lasera, co zapewnia tworzenie spójnych struktur materiałowych. Dodatkowo wskazanie porowatości struktury jako „*ogromnej zalety*” tej technologii wymaga korekty i doprecyzowania. Typowa porowatość elementów wytwarzanych z wykorzystaniem metody Powder Bed Fusion-Laser Beam of Polymers (PBF-LB/P) wynosi zazwyczaj poniżej 5%. Taka cecha jest powszechnie uznawana za wadę, ponieważ wraz ze wzrostem porowatości następuje znaczące obniżenie właściwości mechanicznych, takich jak wytrzymałość na rozciąganie czy moduł sprężystości. Twierdzenie, że porowatość przyczynia się do „*niewielkiego obniżenia właściwości mechanicznych*”, nie znajduje potwierdzenia w literaturze naukowej i wymaga rewizji. Kolejnym błędnym stwierdzeniem jest uznanie, że: „*szybkie chłodzenie drukowanych części*” jest wadą techniki PBF-LB/P. W rzeczywistości komora robocza urządzenia w tej technologii jest utrzymywana w podwyższonej temperaturze, zazwyczaj powyżej temperatury krystalizacji danego tworzywa. Taki zabieg ma na celu opóźnienie procesu krystalizacji aż do zakończenia całego cyklu wytwarzania, co minimalizuje naprężenia wewnętrzne i zapewnia lepszą jakość powierzchni. Dodatkowo, proszek otaczający wytworzone elementy działa jako izolacja termiczna, co spowalnia proces chłodzenia. W praktyce czas chłodzenia komory wypełnionej modelami i proszkiem może być równy czasowi wytwarzania, często wynosząc nawet 24–30 godzin.
10. W przeglądzie literatury zawarto stwierdzenie, że: „*Długotrwała ekspozycja na aceton wpłynęła na zmniejszoną wytrzymałość mechaniczną elementu...*”. Należy jednak zauważyć, że tego rodzaju sformułowanie może sugerować błąd logiczny. W rzeczywistości to właściwości acetonu jako rozpuszczalnika dla tworzywa ABS są odpowiedzialne za obniżenie jego właściwości mechanicznych. Abstrahując od tej nieścisłości, należy podkreślić, że jest to spodziewany efekt, ponieważ rozpuszczalniki organiczne, takie jak aceton, powodują degradację struktury materiału polimerowego poprzez interakcje chemiczne, takie jak rozpuszczanie lub zmiękczenie jego macierzy.
11. Omówienie wpływu procesów sterylizacji na elementy wytwarzane technikami przyrostowymi ogranicza się do jednego zdania: „*Wpływ procesu sterylizacji koniecznego*

przy zastosowaniach medycznych, na elementy drukowane metodą 3D opisano w pracach [44–46].” Tego rodzaju lakoniczne wprowadzenie literatury nie dostarcza czytelnikowi wystarczającego kontekstu ani informacji o szczegółach oddziaływania procesów sterylizacyjnych, takich jak autoklawowanie, sterylizacja chemiczna czy UV, na właściwości mechaniczne i strukturalne wytwarzanych elementów.

b) Uwagi szczegółowe do rozdziału 3. Hipoteza, cele badawcze

1. Wątpliwości budzi sformułowanie hipotezy badawczej. Wydaje się, że hipoteza powinna odnosić się również do wpływu zastosowanej metody wytwarzania (np. techniki przyrostowe w porównaniu z metodami konwencjonalnymi) na właściwości materiałów, szczególnie, że badane tworzywa termoplastyczne są materiałami dobrze poznanymi i szeroko opisanymi w literaturze. Skupienie hipotezy wyłącznie na wpływie czynników środowiskowych może ograniczać jej innowacyjność oraz znaczenie w kontekście technik wytwarzania.
2. Ponadto, brak uzasadnienia wyboru badania wpływu warunków środowiskowych na elementy wytwarzane metodą MEX (Material Extrusion) stanowi istotne niedociągnięcie. Wyjaśnienie motywacji stojącej za tym wyborem oraz jego znaczenia dla praktyki inżynierskiej i przemysłowej jest kluczowe dla podkreślenia wartości naukowej pracy. Uwzględnienie tych elementów mogłoby znacząco podnieść jakość opracowania oraz jego odbiór w środowisku naukowym.

c) Uwagi szczegółowe do rozdziału 5. Uzasadnienie spójności tematycznej cyklu publikacji rozprawy

1. Brak szczegółowej charakterystyki materiałów wyselekcjonowanych do badań, zarówno w kontekście ich przynależności do grupy tworzyw termoplastycznych, jak i specyficznych właściwości analizowanych materiałów. Wprowadzenie takie jest kluczowe, aby zapewnić czytelnikowi odpowiedni kontekst badawczy i uzasadnić wybór tych materiałów do analizy.
2. Autor błędnie odnosi się do normy ISO 527:1998 (Rysunek 3), która została wycofana i zastąpiona przez bardziej aktualne wersje, w tym ISO 527-1. Wskazuje to na brak uwzględnienia aktualnego stanu prawnego i technicznego w zakresie norm regulujących metody badania właściwości mechanicznych tworzyw sztucznych.
3. W pracy zauważono odniesienie do pojęcia gęstości wypełnienia, jednak we wstępie brak jest wyjaśnienia, czym ten parametr jest oraz jakie ma znaczenie w kontekście procesów wytwarzania przyrostowego. Jednocześnie należy zauważyć, że nawet przy ustawieniu parametru na poziomie pełnego wypełnienia (100%), elementy wytwarzane metodą Material Extrusion (MEX) będą wykazywać pewien poziom porowatości. Wynika to z ograniczeń technologicznych związanych z generowaniem ścieżki narzędzia w obrębie wewnętrznej struktury elementu. Porowatość ta jest związana z naturalnymi przerwami i niedoskonałościami w ułożeniu ścieżek materiału, które są nieuniknione w metodzie MEX.
4. „Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że w przypadku materiałów takich jak ABS, ASA oraz HIPS nie zaobserwowano zmian we właściwościach mechanicznych, lecz w przypadku materiału PLA zaobserwowano obniżenie wartości modułu sprężystości -  $E_t$ .



*Największe zmiany udarności zaobserwowano po pierwszym cyklu szokowym, niezależnie od użytego materiału.*” Sformułowanie to zawiera sprzeczność logiczną. Autor z jednej strony stwierdza, że cykl szokowy nie wpływa na właściwości mechaniczne materiałów ABS, ASA i HIPS, a z drugiej strony wskazuje, że największe zmiany udarności wystąpiły po pierwszym cyklu szokowym, niezależnie od rodzaju użytego materiału. Jeśli cykl szokowy faktycznie wpływa na udarność wszystkich badanych materiałów, należy zrewidować wcześniejsze twierdzenie o braku wpływu na ich właściwości mechaniczne.

5. W przytoczonym zdaniu *„Pod wpływem zaproponowanych czynników środowiskowych doszło do zmian strukturalnych w elementach wytworzonych metodą 3D, powodujących w ten sposób uszkodzenie płaszczyzn łączenia filamentu, a tym samym osłabienie struktury całego wydruku”* zauważono nieściśłość terminologiczną dotyczącą określenia *„łączenie filamentu”*. Wcześniej Autor odnosił się do pojęcia filamentu jako materiału wsadowego wykorzystywanego w technologii Material Extrusion (MEX), natomiast w przytoczonym zdaniu pojęcie to wydaje się odnosić do połączeń między sąsiadującymi ścieżkami materiału wytłaczanego przez narzędzie.
6. (Skróty myślowe/błędy logiczne). *„W pracy [P3] badania nad wpływem cykli szokowych zostały rozszerzone o ocenę zmian porowatości oraz wytrzymałości na cykliczne obciążenia, podczas próby rozciągania kształtek drukowanych po każdym z cykli szokowych.”* Czy zatem kształtki były wytwarzane przed poddaniem ich cyklom szokowym, czy proces ich wytwarzania następował dopiero po zakończeniu cyklu szokowego?
7. Czy materiał PLA miał losowy charakter zmian właściwości czy nie można było trendu określić jednoznacznie? Błąd logiczny: *„W przypadku materiału ASA i HIPS doszło do zmniejszenia trwałości zmęczeniowej, a w przypadku PLA wyniki wskazują, że zmiany trwałości zmęczeniowej mają charakter losowy. W przypadku tego materiału nie wykazano z braku możliwości jednoznacznie trendu zmian trwałości.”*
8. Czy w przypadku materiału PLA zmiany trwałości zmęczeniowej miały losowy charakter, czy też brak możliwości jednoznacznego określenia trendu wynikał z ograniczeń w analizie? Należy poprawić logiczną spójność stwierdzenia: *„W przypadku materiałów ASA i HIPS zaobserwowano zmniejszenie trwałości zmęczeniowej, natomiast w przypadku PLA wyniki sugerują losowy charakter zmian trwałości zmęczeniowej. Dla tego materiału nie udało się jednoznacznie określić trendu zmian trwałości z powodu ograniczeń analitycznych.”*

d) Uwagi szczegółowe do rozdziału 6. Metodyka badań

1. W Tabeli 5, przedstawiającej parametry procesu MEX (w recenzowanej pracy opisanego jako FDM), uwzględniono parametr *„Tolerancja średnicy”*. Czy odnosi się on do średnicy dyszy? Proszę o wyjaśnienie. Warto również zauważyć błąd w zapisie w tabeli, gdzie zamiast *„dyszy”* podano *„dyszu”*. Dodatkowo parametr *„gęstość wypełnienia”* oraz *„wysokość warstwy”* zostały zamieszczone dwukrotnie, przy czym *„wysokość warstwy”* wykazuje dwie różne wartości (!), co wymaga wyjaśnienia.
2. Nie określono orientacji budowy próbek, która w przypadku metody MEX odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu właściwości mechanicznych! Warto podkreślić, że we wstępie Autor sam zwrócił uwagę na znaczenie tego czynnika, jednak przy tym błędnie zidentyfikował orientację zapewniającą najlepsze właściwości mechaniczne.

3. **W jaki sposób dokonano wyboru parametrów procesu MEX?** Dlaczego w przypadku materiałów o znacząco odmiennych właściwościach nie wprowadzono modyfikacji innych istotnych parametrów, takich jak prędkość ruchu narzędzia czy siła nadmuchu na ekstrudowaną ścieżkę?
4. W opisie metodyki badań autor odwołuje się do normy EN ISO 527-1:2012, natomiast w schemacie programu badawczego (Rysunek 3) przywołuje normę ISO 527:1998. Warto zauważyć, że obie te normy są obecnie nieaktualne, co podkreśla konieczność aktualizacji odniesień w pracy. Dodatkowo brak wskazania konkretnego typu kształtu próbki, na przykład 1A czy 5A, znacząco utrudnia jednoznaczną interpretację zastosowanej metodyki badawczej. Podobny problem występuje w przypadku odwołania do normy EN ISO 179-1:2010, która również jest obecnie nieobowiązująca.
5. W pracy brak konsekwencji terminologicznej w odniesieniu do testów szokowych. W różnych fragmentach są one określane jako *cykl szokowy*, *test szokowy* lub po prostu *szok*.
6. W opisie dotyczącym „**Oznaczania właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu**” (punkt 6.3) Autor stwierdza, że: „...*badania zmęczeniowe prowadzone zgodnie z panem badawczym były wykonywane dla 5 próbek...*”. Występuje tu brak konsekwencji oraz nieprecyzyjność opisu. Punkt 6.3. dotyczy oznaczania właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu, jednak w jego treści opisano także badania zmęczeniowe. Jest to niezgodne z zakresem deklarowanym w nagłówku. Dodatkowo, w niniejszym fragmencie brakuje informacji na temat liczby grup oraz liczebności próbek w każdej z nich w kontekście statycznej próby rozciągania. Należy również rozważyć, czy liczba 5-ciu próbek jest wystarczająca do zastosowania proponowanych metod statystycznych, takich jak analiza wariancji (ANOVA) wraz z testem post-hoc Tukeya.
7. W opisie dotyczącym statycznej próby rozciągania (punkt 6.3) brakuje informacji na temat metody wyznaczania wydłużenia próbki. Należy zauważyć, że norma ISO 527-1 dopuszcza stosowanie więcej niż jednej metody w tym zakresie, co wymaga precyzyjnego określenia zastosowanej procedury.
8. W pracy zastosowano termin „*styczny moduł sprężystości ( $E_t$ )*”, który nie odpowiada polskiej terminologii technicznej. Zgodnie z obowiązującą nomenklaturą właściwe jest użycie określenia „*statyczny moduł sprężystości*”. Ponadto, w tekście użyto sformułowania „*maksymalne naprężenie ( $\sigma_m$ )*”, które w polskiej terminologii technicznej powinno być określane jako „*wytrzymałość na rozciąganie*”. W celu zapewnienia zgodności z przyjętymi standardami terminologicznymi zaleca się uszczegółowienie opisów.
9. W pracy brakuje informacji uzasadniających wybór parametrów testu, w szczególności prędkości rozciągania: 1 mm/min w zakresie określania modułu sprężystości oraz 10 mm/min w dalszym przebiegu badania. Należy wyjaśnić, dlaczego zdecydowano się na zastosowanie tych wartości, a także przedstawić kryteria określające moment zakończenia pomiaru w obszarze modułu oraz moment przejścia na zwiększoną prędkość rozciągania. Nie wskazano również, jaka głowica została wykorzystana do przeprowadzenia statycznej próby rozciągania ani jaki był jej zakres pomiarowy.
10. W pracy nie przedstawiono uzasadnienia dla przeprowadzenia badań zmęczeniowych w zakresie niskocyklowej wytrzymałości zmęczeniowej przy rozciąganiu. Brakuje wyjaśnienia, dlaczego wybrano właśnie ten typ badań oraz jakie znaczenie miały one



w kontekście celu pracy. Ponadto, w treści nie odniesiono się do normy, zgodnie z którą wykonano badania niskocyklowej wytrzymałości zmęczeniowej. Zaleca się uzupełnienie i wskazanie konkretnych norm, takich jak np. normy dedykowane próbom zmęczeniowym przy sterowaniu naprężeniem. Dodatkowo, w pracy nie wskazano szczegółów dotyczących sprzętu użytego w badaniach, w tym rodzaju głowicy oraz zakresu jej zakresu pomiarowego. Uzupełnienie tych informacji pozwoli na pełniejsze zrozumienie zastosowanej metodyki badawczej oraz jej powtarzalności.

11. Wskazano, że geometria próbek była zgodna z normą EN ISO 527-1:2012, która dotyczy próbek stosowanych w statycznej próbie rozciągania (norma obecnie nieaktualna). Należy zaznaczyć, że nie jest to norma odpowiednia dla badań zmęczeniowych, co wymaga doprecyzowania i uzasadnienia jej zastosowania w tym kontekście.
12. Autor wspomniał, że testy zostały przeprowadzone dla cyklu odzerowo-tętniącego, co wskazuje na wartość współczynnika asymetrii cyklu  $R=0$ . Warto jednak explicite podać tę informację w opisie, aby zapewnić pełną klarowność i zgodność z wymaganiami standardowego opisu badań zmęczeniowych. Uwzględnienie tego parametru jest istotne dla precyzyjnego przedstawienia warunków eksperymentalnych.

e) Uwagi szczegółowe do rozdziału 7. Wyniki badań składające się na rozprawę doktorską

1. **Opis doboru parametrów przedstawiony w punkcie 7.1 jest lakoniczny.** Autor wspomina o przeprowadzonej optymalizacji, stwierdzając, że „...określono optymalne parametry wydruku...”, jednakże nie precyzuje kryteriów, na podstawie których dokonano tej optymalizacji. Brak tych kluczowych informacji znacząco utrudnia ocenę zasadności i efektywności zastosowanych założeń. Co więcej, brak szczegółowego uzasadnienia może utrudniać jednoznaczną ocenę jednego z głównych osiągnięć naukowych rozprawy (punkt 8. Podsumowanie), którym autor określa „*Określenie optymalnych parametrów wydruków*”.
2. W pracy wskazano, że do analizy statystycznej wykorzystano oprogramowanie OriginPro 2024, stosując metody takie jak analiza wariancji (ANOVA) z testem post-hoc Tukeya, test Shapiro–Wilka do oceny normalności rozkładu oraz test Levene’a do sprawdzenia jednorodności wariancji. Analizy miały być prowadzone przy poziomie istotności  $p < 0,05$ . Jednak w części wynikowej, zarówno dla wytrzymałości statycznej, jak i zmęczeniowej, brakuje prezentacji wyników tych analiz statystycznych. Nie podano wyników testu Shapiro–Wilka, które są kluczowe do oceny normalności rozkładu danych, ani wyników testu Levene’a oceniającego jednorodność wariancji. Nie przedstawiono również interpretacji uzyskanych wyników dotyczących normalności rozkładu danych. Nawet jeśli test Shapiro–Wilka został przeprowadzony, brak informacji na temat tego, czy dane spełniają założenia normalności rozkładu oraz brak wyjaśnienia konsekwencji w przypadku ich niespełnienia, pozostawia wątpliwości co do adekwatności zastosowanych metod statystycznych. Szczególnie istotne jest, że analiza wariancji (ANOVA) wymaga założenia normalności rozkładów oraz jednorodności wariancji, co nie zostało potwierdzone ani omówione. Brak wyników tych testów i ich interpretacji prowadzi do niejasności w zakresie doboru metod statystycznych, a także ogranicza możliwość oceny poprawności i wiarygodności przedstawionych wyników badawczych. Nie wskazano również, w jaki

sposób wyniki przeprowadzonych testów wpłynęły na interpretację wyników eksperymentalnych oraz na przyjęte podejście statystyczne, co dodatkowo obniża spójność wniosków przedstawionych w pracy.

3. Brak precyzji w zakresie prezentacji wyników (np. Tabela 7). Dlaczego wyniki dotyczące „Modułu sprężystości” jedynie w przypadku próbek zanurzonych w oleju mineralnym przez okres 15 dni w 70°C prezentowane są z dokładnością do jednego miejsca po przecinku? Dodatkowo w tabelach nie podano jednostek dla opisywanych parametrów pomiarowych.
4. Autor wskazuje, że „*badania cykliczne przy wysokich poziomach naprężeń nie są możliwe dla tego materiału (HIPS)*” z powodu „*spadku wytrzymałości statycznej*”. Związek przyczynowo-skutkowy pomiędzy tymi zjawiskami wymaga doprecyzowania. Nie jest jasne, dlaczego spadek wytrzymałości statycznej uniemożliwia przeprowadzenie badań cyklicznych ani co dokładnie autor rozumie przez „*wysokie poziomy naprężenie*”. Zaleca się doprecyzowanie następujących kwestii: Co oznacza „*wysoki poziom naprężenia*” – np. jako procent wytrzymałości na rozciąganie materiału? W jaki sposób spadek wytrzymałości statycznej wpływa na możliwość i przebieg testów cyklicznych? Czy istnieją dane potwierdzające tę zależność dla badanego materiału (HIPS)? Wyjaśnienie tych aspektów jest kluczowe dla lepszego zrozumienia ograniczeń badawczych.
5. Zaleca się dołączenie interpretacji uzyskanych wyników, ze szczególnym uwzględnieniem współczynnika determinacji  $R^2$  dla równań krzywych zmęczeniowych. Wyjaśnienie, czy uzyskane wartości  $R^2$  są wystarczające, aby uznać krzywe za wiarygodne, byłoby istotnym uzupełnieniem umożliwiającym ocenę jakości i precyzji przeprowadzonych analiz. Taka interpretacja pozwoliłaby lepiej ocenić trafność zastosowanego modelu matematycznego.
6. Zaleca się zastosowanie bardziej precyzyjnego i formalnego sposobu podpisywania rysunków, na przykład: „*Krzywa trwałości zmęczeniowej materiału HIPS – zależność  $N_f$  od  $\sigma_a$* ”. Taki sposób opisu zapewnia większą klarowność i zgodność z przyjętymi standardami w prezentacji wyników naukowych. Dodatkowo należy zwrócić uwagę, że osie na wykresach są opisane w języku angielskim, na przykład „*cycle*”. Zgodnie z zasadami redakcji prac naukowych pisanych w języku polskim, opisy osi na wykresach również powinny być dostosowane do języka polskiego, aby zachować spójność językową całej pracy. Warto również zwrócić uwagę na fakt, że oś Y na wykresie została przedstawiona w skali logarytmicznej, jednak w treści pracy brakuje uzasadnienia takiego wyboru. Zasadne byłoby wyjaśnienie motywacji zastosowania tej skali oraz określenie jej znaczenia w kontekście prezentowanych wyników. Uzasadnienie to powinno wskazywać, w jaki sposób skala logarytmiczna ułatwia interpretację danych lub lepiej odzwierciedla charakter badanych zjawisk.
7. Autor wskazuje, że „*Struktura kształtek z materiału ABS na skutek działania cykli szokowych nie wykazała istotnych zmian, ponieważ zachowane zostały i widoczne były w obu przypadkach pojedyncze włókna filamentu materiału formowane podczas drukowania...*” (punkt 7.4). W przytoczonym fragmencie zauważono nieścisłość terminologiczną dotyczącą określenia „*włókna filamentu*”. Wcześniej termin „*filament*” był używany w odniesieniu do materiału wsadowego wykorzystywanego w technologii Material Extrusion (MEX), natomiast w tym kontekście wydaje się, że odnosi się do połączeń między sąsiadującymi ścieżkami materiału wytłaczanego przez narzędzie.

Dodatkowo proszę o wyjaśnienie mechanizmu „*stapiania poszczególnych ścieżek*” (dotyczy ekspozycji na olej mineralny w temperaturze 23°C)?

8. Autor wskazuje, że „*W przypadku materiału ASA zarówno cykle szokowe, jak i olej mineralny w wyższej temperaturze spowodował wzrost porowatości*”. Jednak zdjęcia mikroskopowe SEM nie potwierdzają takiego trendu. Należy wyjaśnić, skąd wynikają te rozbieżności między wynikami pomiarów a obserwacjami mikroskopowymi. Dodatkowo zwraca się uwagę, że zdjęcia mikroskopowe, szczególnie w przypadku analizy porównawczej, powinny być wykonywane przy zastosowaniu jednakowej skali. Brak jednolitej skali utrudnia bezpośrednie porównanie próbek, co może wpływać na interpretację wyników oraz ich wiarygodność.
9. Na jakiej podstawie dokonano doboru parametrów pomiarowych w tomografii komputerowej (CT) oraz określono obszar pomiarowy (ROI)? Doprecyzowanie kryteriów doboru tych parametrów jest kluczowe dla pełnej transparentności i rzetelności przeprowadzonych badań.

Uprzejmie proszę o odniesienie się do powyższych uwag i przedstawienie wyjaśnień dotyczących zaistniałych nieścisłości.

#### **4. Wniosek końcowy**

Tematyka poruszana w rozprawie doktorskiej dotyczy aktualnego i istotnego wyzwania technologicznego, które ma znaczenie zarówno z naukowego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Analizowane zagadnienia są ważne dla rozwoju technik przyrostowych i ich praktycznego zastosowania, co podkreśla znaczenie przeprowadzonych badań. Zgłoszone uwagi w przeważającej większości mają charakter redakcyjny, związany z nieścisłościami terminologicznymi i językowymi. Choć wymagają one korekty, nie wpływają one istotnie na wartość merytoryczną opracowania.

Niemniej jednak, w pracy zauważono szereg nieścisłości oraz uproszczeń, które wymagają sprostowania i rozwinięcia w celu poprawy zarówno wartości naukowej rozprawy, jak i jej poprawności technicznej. Doprecyzowanie kluczowych elementów opracowania przyczyniłoby się do lepszego zrozumienia i pełniejszego docenienia osiągniętych wyników. Wprowadzenie sugerowanych kierunków rozwoju oraz wskazanych ulepszeń w przyszłych badaniach i publikacjach przyczyni się do podniesienia ich wartości naukowej i praktycznej, wzmacniając jednocześnie ich znaczenie zarówno w kontekście teoretycznym, jak i aplikacyjnym.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska w formie cyklu złożonego z powiązanych tematycznie publikacji naukowych Pana mgr. inż. Marcina Piotra Głowackiego pt. „*Ocena wpływu oddziaływania czynników środowiskowych na strukturę i właściwości mechaniczne elementów z tworzyw polimerowych wytwarzanych technikami przyrostowymi*” spełnia wymagania ustawy – Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. 2022, poz. 574 z późn. zm.) na poziomie umożliwiającym dopuszczenie jej do publicznej obrony.

