

Łódź, dn. 26.01.2025 r.

Dr hab. inż. Dorota Bociąga, prof. Politechniki Łódzkiej
Zakład Inżynierii Biomedycznej i Materiałów Funkcjonalnych
Instytut Inżynierii Materiałowej
Wydział Mechaniczny Politechniki Łódzkiej
ul. Stefanowskiego 1/15, 90-537 Łódź, Polska

Recenzja rozprawy doktorskiej

Autor rozprawy: mgr inż. Marcin Piotr Głowacki

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

Promotor: dr hab. inż. Adam Mazurkiewicz

Promotor pomocniczy: dr inż. Katarzyna Skórczewska

Niniejsza recenzja została wykonana na podstawie powołania przez Radę Naukową Dyscypliny inżynieria mechaniczna Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

1. UWAGI OGÓLNE O TEMATYCE ROZPRAWY

1.1. Znaczenie problematyki podjętej w recenzowanej rozprawie

Recenzowana rozprawa doktorska pt. „Ocena wpływu oddziaływania czynników środowiskowych na strukturę i właściwości mechaniczne elementów z tworzyw polimerowych wytwarzanych technikami przyrostowymi” podejmuje tematykę bardzo aktualnych zagadnień dotyczących druku 3D. Techniki przyrostowe, zwane potocznie drukiem 3D nie są nowe. Stereolitografia (SLA), jako narzędzie wytwarzania trójwymiarowych obiektów, pojawiła się już ponad 40 lat temu a chwilę po niej techniki oparte na selektywnym spiekaniu laserem (SLS – z ang. *Selective Laser Sintering*) oraz ekstruzji (FDM – z ang. *Fused Deposition Modeling*). Bazowe założenia tych technologii pozostają niemalże niezmiennie, jednak rozwój w zakresie materiałów, technik skanowania czy też obróbki obrazu, otwierają wciąż nowe możliwości w zakresie udoskonalania tych technik jak również ich odmian, które się nieustannie pojawiają.

Druk 3D, czyli technologia addytywna, zyskuje coraz większe znaczenie w wielu dziedzinach inżynierii i przemysłu. Jego zastosowanie pozwala na tworzenie skomplikowanych struktur i komponentów w sposób szybki, precyzyjny i dostosowany do indywidualnych i jednostkowych potrzeb, co w tradycyjnych metodach produkcji, takich jak obróbka skrawaniem czy odlewanie, bywa trudne i/lub kosztowne.

Druk 3D jest technologią, która zmienia podejście do projektowania i produkcji w wielu dziedzinach. Jego zastosowanie w takich obszarach jak prototypowanie, produkcja części zamiennych, medycyna, produkcja lekkich struktur czy budownictwo, świadczy o jego wszechstronności i ogromnym potencjale. Dzięki ciągłemu rozwojowi materiałów i technologii druku, spodziewać się można dalszej ekspansji tej technologii w różnych gałęziach przemysłu.

W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Marcin Głowacki skupił uwagę na druku technologią FDM. Jest to jedna z najpopularniejszych metod addytywnych, polegająca na nakładaniu materiału warstwa po warstwie w procesie topienia termoplastycznego filamentu. Jakość uzyskiwanych wydruków zależy od wielu czynników technologicznych, materiałowych oraz środowiskowych, które wpływają na dokładność, wytrzymałość, estetykę i funkcjonalność końcowego produktu. Optymalizacja parametrów takich jak temperatura, prędkość druku, grubość warstwy, kalibracja drukarki oraz wybór odpowiedniego filamentu, są kluczowe dla uzyskania wysokiej jakości produktów o wymaganej precyzji i wytrzymałości. Monitorowanie warunków otoczenia i zastosowanie odpowiedniego oprogramowania stanowią dodatkowe elementy, które pozwalają na maksymalizację efektywności procesu druku 3D.

Doniesienia literaturowe oraz opisywane doświadczenia osób pracujących na co dzień z technologią FDM wskazują, że jakość wydruków zależy od kilku kluczowych czynników: rodzaj i jakość materiału (filamentu), temperatura ekstrudera i stołu roboczego, prędkość druku, grubość warstwy, kalibracja drukarki, termostatowanie procesu, warunki środowiskowe (np. temperatura i wilgotność otoczenia). Optymalizacja tych czynników pozwala na uzyskanie wysokiej jakości wydruków 3D, charakteryzujących się precyzją, wytrzymałością i estetyką. Rozdzielić jednak należy dwa fakty – jakość wydruku to jedno a

drugie to jego zdolność do utrzymania zadanych parametrów przy różnych warunkach użytkowania. To właśnie tymi aspektami zajął się badawczo mgr inż. Marcin Głowacki, analizując wpływ czynników środowiskowych na strukturę i właściwości mechaniczne polimerów, z których wytwarzane są elementy techniką FDM.

1.2. Cel rozprawy i jej zakres

W niniejszej rozprawie Doktorant postawił hipotezę badawczą, że warunki środowiskowe, takie jak podwyższona i ujemna temperatura, wilgotność, olej mineralny wpływają na zmiany właściwości mechanicznych elementów z tworzyw polimerowych wytwarzanych metodą druku 3D.

W celu sprawdzenia przyjętej hipotezy badawczej mgr inż. Marcin Głowacki określił następujące cele naukowe:

1. Ocena zmian właściwości mechanicznych pod wpływem oddziaływań środowiskowych obejmujących cykle szokowe, gdzie poddano ocenie podatność materiału na zmiany temperatury oraz wilgotności.
2. Ocena zmian właściwości mechanicznych po ekspozycji na olej mineralny w temperaturze pokojowej oraz podwyższonej.
3. Charakterystyka zmian w strukturze materiału, które zachodzą pod wpływem tych środowisk.

2. FORMALNA STRONA ROZPRAWY

2.1. Struktura rozprawy i wykorzystana literatura

Recenzowana rozprawa liczy 177 strony i podzielona jest na dwie części: pierwsza (do strony 90) to niejako przewodnik po badaniach, jakie przeprowadził Doktorant, a które wpisały się w cykl publikacji opisujących wyniki tychże eksperymentów. Tę część pracy rozpoczyna wykaz skrótów i oznaczeń, po którym następuje „Wstęp” podzielony na 6 podrozdziałów. Doktorant omawia w nich sam proces druku 3D, jego rodzaje, wady i zalety, przy czym w całym tym ogólnym opisie w części końcowej skupia się na metodzie FDM, której dotyczyły jego badania. Opisuje również zastosowanie wydruków 3D wytwarzanych tą metodą oraz wpływ czynników środowiskowych na nie. Ten podrozdział jest dobrym punktem wyjścia i uzasadnieniem do sformułowania hipotezy i celów badawczych, które znalazły się w podrozdziale nr 3. Po nich Doktorant zawarł wykaz artykułów naukowych stanowiących cykl publikacji rozprawy (podrozdział 4) ujmując je tabelarycznie ze wskazaniem punktacji MNiSW oraz IF każdej z nich. Wszystkie pięć publikacji ukazały się w wydawnictwie MDPI (trzy z nich w czasopiśmie „Polymers” a dwa w „Materials”), są z bazy Journal Citation Reports i przypisane

do dyscypliny inżynieria mechaniczna. W kolejnym podrozdziale (nr 5) znajduje się uzasadnienie spójności tematycznej cyklu publikacji a podrozdział 6 obejmuje obszerny wykaz metodyk badawczych, które zostały zastosowane celem realizacji założonego planu eksperymentów. Ich wyniki znalazły się w podrozdziale 7. Następnie Doktorant zawarł trzystronicowe podsumowanie, wykaz literatury oraz streszczenie w języku polskim i jego wersję anglojęzyczną zamieszczoną w podrozdziale 11 zatytułowanym „Abstrakt”. Ta część pracy kończy się rozdziałem 12 „Dorobek naukowy autora rozprawy”, w którym jest wykaz publikacji, rozdziały w monografiach oraz zgłoszenia patentowe i patenty. Całość pracy kończy rozdział 13 w postaci załączników a w nich znalazły się oświadczenia Autora rozprawy, oświadczenia Współautorów artykułów naukowych cyklu oraz kopie artykułów naukowych stanowiących monotematyczny cykl publikacji (13.3).

Literatura przytoczona do opisu stanowiącego podsumowanie rozprawy liczy 53 pozycje. Publikacje zostały dobrane trafnie i poprawnie przypisane względem omawianych zagadnień.

2.2. Język i formalna strona rozprawy

Pracę stanowi zbiór pięciu publikacji wskazanych przez Doktoranta w rozdziale 4 rozprawy zatytułowanym „*Artykuły naukowe stanowiące cykl publikacji rozprawy*”, których spójność tematyczną opisał Doktorant w rozdziale 5. Składają się na nią następujące pozycje:

1. **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>;
2. **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>
3. **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>;
4. **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>;

5. **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.

Powyższe prace w wersjach oryginalnych i w całości zostały włączone do pracy jako rozdział 13.3. We wszystkich tych pracach mgr inż. Marcin Głowacki jest pierwszym autorem. W trzech z nich występuje jako autor korespondencyjny a w dwóch dzieli tę rolę z inną współautorką. Zakres prac wykonanych przez niego w każdej z tych publikacji został wskazany w jego oświadczeniu zbiorczym (13.1). Oświadczenia współautorów zebrano w podrozdziale 13.2.

Rozprawa doktorska napisana jest w języku polskim. Stosuje się do podstawowych zasad typografii. Zawiera 19 tabel i 27 rysunków nie licząc tych, które są przytoczone w oryginałach publikacji składających się na osiągnięcie naukowe – te mają swoją każdorazowo niezależną numerację stron, rysunków, tabel i odnośników literaturowych (nawet jeśli są przytoczeniami bezpośrednio z publikacji z cyklu). Język pracy jest właściwy dla opracowań naukowych. Opisy są zwarte a potwierdzenie faktów znajduje swoje odzwierciedlenie w pozycjach literaturowych.

Dość nietypowym jest, że streszczenie pracy (w języki polskim i angielskim) znalazło się w końcowej części opisów poprzedzających przytoczenie artykułów w oryginale. Nie jest to błędem i nie wpływa na jakość pracy, niemniej jednak wprowadzenie streszczenia na samym początku daje ogłęd na pracę, jako całość przed przystąpieniem do zapoznawania się z jej szczegółami.

Edycja pięciu publikacji stanowiących cykl wskazany jako rozprawa, ich poprawność językowa i zakres, nie podlegają ocenie recenzentki z racji faktu, że są to pozycje opublikowane w recenzowanych czasopismach.

Ogólny bardzo pozytywny odbiór pracy co do estetyki jej edytorskiego opracowania (spójne oznaczenia publikacji z cyklu wprowadzone i konsekwentnie powtarzane w całej pracy, bardzo dobra jakość zdjęć, widm, wykresów, etc.) zaburzają liczne uchybienia interpunkcyjne, które utrudniają momentami właściwe odczytanie znaczenia zdań. Warto, aby w przyszłości Doktorant każdorazowo raz jeszcze przeczytał swoje teksty pod kątem korekty takich niepoprawności.

3. OCENA MERYTORYCZNA

W recenzowanej rozprawie doktorskiej pt. „*Ocena wpływu oddziaływania czynników środowiskowych na strukturę i właściwości mechaniczne elementów z tworzyw polimerowych wytwarzanych technikami przyrostowymi*” zaprezentowany cykl publikacji został poświęcony badaniom nad wpływem oddziaływania czynników środowiskowych na druki 3D wykonane z różnych materiałów. Badania obejmowały ekspozycję materiału na szokową zmianę

temperatury lub jednoczesną obecność wody oraz wpływu oleju mineralnego w temperaturze 23°C oraz podwyższonej do 70°C.

Za wstępną **analizę literatury** dla recenzowanej pracy doktorskiej uznać można publikację przeglądową pt. *„Resistance of 3D-Printed Components, Test Specimens and Products to Work under Environmental Conditions- Review”*, w której (na podstawie 113 pozycji literatury) dokonano przeglądu informacji dotyczących wpływu różnych czynników środowiskowych na właściwości mechaniczne i inne wytwarzanych w technologii druku 3D elementów z materiałów termoplastycznych. Poprzez tę publikację wykazano motywację do podjęcia tematyki pracy i stanowiła ona dobrą podstawę do sformułowania hipotezy badawczej oraz jej celów naukowych.

Za część eksperymentalną niniejszej rozprawy uznać należy cztery artykuły badawcze wskazane w rozprawie w rozdziale 4 i przytoczone powyżej w niniejszej recenzji. W publikacji pt. *„Effect of Shock-Variable Environmental Temperature and Humidity Conditions on 3D-Printed Polymers for Tensile Properties”* Doktorant badał wpływ temperatury i wody na próbki wydrukowane ze 100% wypełnieniem z materiałów takich, jak: ABS, ASA, HIPS i PLA. Opracował w tym celu test szokowy odzwierciedlający warunki atmosferyczne o gwałtownej zmianie temperatury (od -20°C do + 70°C). W pracy zatytułowanej *„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)”* badania wpływu cykli szokowych poszerzył Doktorant o ocenę zmian porowatości oraz wytrzymałości na cykliczne obciążenia przeprowadzając próby rozciągania kształtek drukowanych po każdym z cykli szokowych. Badał w ten sposób wytrzymałość zmęczeniową. Kolejnym krokiem badań była ocena wpływu maszynowego oleju mineralnego, który jest często niezbędny podczas pracy urządzeń, na właściwości elementów formowanych metodą 3D. Analizowano te same materiały wyjściowe a badanie obejmowało umieszczenie w oleju mineralnym kształtek uzyskanych metodą druku 3D w temperaturze 23°C oraz w temperaturze podwyższonej, tj. 70°C. Wyniki badań właściwości mechanicznych oraz zmiany w strukturze materiałów opisane zostały w kolejnej publikacji z cyklu, mianowicie *„Evaluation of the Effect of Mineral Oil Exposure on Changes in the Structure and Mechanical Properties of Polymer Parts Produced by Additive Manufacturing Techniques”*. Te badania zostały poszerzone o analizy wpływu oleju mineralnego na trwałość kształtek formowanych metodą 3D poprzez przeprowadzenie mechanicznych badań cyklicznych w próbie rozciągania wraz z oceną zmian porowatości. Wyniki tych testów zostały opisane w publikacji pt. *„Change in the Low-Cycle Performance on the 3D-Printed Materials ABS, ASA, HIPS, and PLA Exposed to Mineral Oil”*.

W pracy przedstawionej do recenzji mgr inż. Marcin Głowacki sam podkreśla, że cykl publikacji stanowi spójną całość – dotyczy tych samych materiałów, dla których kolejno wykonano szereg sukcesywnie uzupełniających się badań. Swego rodzaju dowodem na to są tabele nr 2 i 19. Pierwsza z nich jest zestawieniem wykonanym na podstawie przeglądu

literatury i pokazuje w jaki sposób różne typy środowiska i procesy (np. wysoka temperatura, płyny fizjologiczne, woda morską, sterylizacja) wpływają na właściwości elementów formowanych metodą 3D. Drugą to zestawienie opracowanych badań zmęczeniowych po ekspozycji na zasymulowane badania środowiskowe. O ile jednak w każdej publikacji znalazły się wnioski a w pracy podsumowanie, to publikacje dotyczą poszczególnych pojedynczych etapów badań a w podsumowaniu znalazły się informacje co do osiągnięć naukowych rozprawy oraz zwięzły opis wszystkich wyników. Nigdzie w pracy Doktorant nie zawarł opisów o charakterze dyskusji, które podejmowałyby próbę wyjaśnienia zjawisk, które rządzą obserwowanymi zależnościami i uzyskanymi wynikami. Niemniej jednak fakt przebadania czterech powszechnie stosowanych w druku FDM materiałów w sposób tak kompleksowy, jak zaproponował to mgr inż. Marcin Głowacki w swojej rozprawie doktorskiej, jest bardzo dużą zaletą z punktu widzenia aplikacyjnego i zasługuje na uznanie.

Podsumowując – część eksperymentalna składająca się z czterech publikacji stanowi pewien spójny ciąg badawczy. Prace te skupiają się na analizie wpływu oddziaływania czynników środowiskowych na elementy wykonane metodą FDM. Choć prace z cyklu stanowią odrębne opracowania, składają się na uzupełniającą się całość badań, które w końcowym efekcie mają potencjał do dostarczenia szeregu istotnych informacji z praktycznego punktu widzenia.

Do tej części rozprawy mam pytania i będę wdzięczna za udzielenie wyjaśnień co do nich.

- 1) ABS, ASA, PLA oraz HIPS są powszechnie stosowane w różnych aplikacjach inżynierskich, niemniej jednak w grupie tej jest tak wiele propozycji materiałowych, że ich wybór, tym bardziej do celów porównawczych, wymaga dobrego przemyślenia. Czym kierował się Doktorant wybierając wskazane materiały do badań?
- 2) Dlaczego badania prowadzono w temp 70°C?
- 3) W jaki sposób można wyjaśnić zaobserwowane wyniki, iż ekspozycja na olej mineralny może zmniejszać porowatość próbek, co wpływa na ich właściwości mechaniczne, szczególnie w przypadku materiałów takich jak ABS i ASA?
- 4) Test szokowy zakładał badanie próbek w momencie, gdy próbki były po suszeniu w 70°C. Czy wyniki mogłyby być inne, gdyby pomiar modułu Younga następował zaraz po wyjęciu próbki z -20°C?
- 5) Jakie uzasadnienie przyświecało przeprowadzeniu badania szoku termicznego po moczeniu próbek przez 72h w wodzie dejonizowanej? Wiadomo bowiem, że w warunkach rzeczywistych woda dejonizowana jest raczej rzadko występującym środowiskiem pracy dla wydruków.
- 6) Zaletą druku 3D jest to, że można zmniejszyć masę wydruku a tym samym zminimalizować koszty materiałów niezbędnych do jego wykonania, poprzez m.in. zmniejszenie wypełnienia. Jednocześnie wymaganą wytrzymałość wydruku można determinować poprzez zastosowanie odpowiedniego wzoru wypełnienia

wewnętrznego (np. gyroidalny, linie równoległe, trójkąty, gwiazdki, plaster miodu, etc.). Zmniejszenie wypełnienia oznacza zwiększenie przestrzeni wewnątrz wydruku, które zwiększają porowatość wydruku i mogą np. zatrzymać płyny. Na ile zatem wydruki ze 100 % wypełnieniem są odzwierciedleniem rzeczywistych wydruków i ich warunków pracy?

Podsumowując powyższą część recenzji, stwierdzam, że uwagi i pytania w niej zawarte wynikają z ciekawości natury naukowej i nie wpływają na bardzo pozytywną ocenę rozprawy jako całości.

4. OCENA ROZPRAWY I WNIOSKI KOŃCOWE

Wyniki badań przeprowadzone przez mgra inż. Marcina Głowackiego pozwalają na lepsze zrozumienie mechanizmów degradacji i zmian strukturalnych, co może być wykorzystane do optymalizacji procesów produkcyjnych oraz projektowania elementów bardziej odpornych na warunki środowiskowe. Praca ta stanowi istotny wkład w rozwój technologii przyrostowych i ich zastosowań w różnych dziedzinach przemysłu.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych rozprawy doktorskiej mgra inż. Marcina Głowackiego można zaliczyć:

1. Zaprojektowanie własnej metodyki badań.
2. Określenie zmian właściwości mechanicznych oraz zmian w strukturze wydruków z ABS, ASA, HIPS i PLA pod wpływem czynników występujących w środowisku ich pracy, takich jak: wilgoć, podwyższona oraz obniżona temperatura czy olej mineralny.
3. Wyznaczenie krzywych zmęczeniowych materiałów stosowanych do druku techniką przyrostową FDM (ABS, ASA, HIPS i PLA) poddanych działaniu czynników środowiskowych.

Przemysłany tok badań i kompleksowe podejście, jakie przedstawił mgr inż. Marcin Głowacki, począwszy od określenia problemu badawczego (na podstawie opublikowanego przeglądu literatury) poprzez sformułowanie zadań eksperymentalnych, aż po ich realizację z zastosowaniem odpowiednio dobranych technik, **świadczą o jego dojrzałości badawczej i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.** Przedstawiona rozprawa wykazuje, że Doktorant dysponuje ogólną wiedzą teoretyczną i dorobkiem w dyscyplinie **inżynieria mechaniczna.**

Publikacje, wskazane jako cykl stanowiący pracę doktorską Pana **mgra inż. Marcina Głowackiego pt. „Ocena wpływu oddziaływania czynników środowiskowych na strukturę i właściwości mechaniczne elementów z tworzyw polimerowych wytwarzanych technikami przyrostowymi”** opisują oryginalne rozwiązania z zakresu projektowania eksperymentów badawczych i efektów wpływu czynników środowiskowych na wydruki z materiałów termoplastycznych stosowanych w technice przyrostowej FDM. Opisane rozwiązania i

otrzymane wyniki przyczyniają się do rozwoju inżynierii mechanicznej oraz otwierają drogę do przyszłych badań i rozwoju rozwiązań w technologiach przyrostowych opartych na ekstruzji materiału polimerowego.

Stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji **rozprawa doktorska mgra inż. Marcina Głowackiego pt. „Ocena wpływu oddziaływania czynników środowiskowych na strukturę i właściwości mechaniczne elementów z tworzyw polimerowych wytwarzanych technikami przyrostowymi”** spełnia wymagania określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.) oraz mieści się w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna. Biorąc powyższe pod uwagę stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Marcina Głowackiego do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę spójność wyводу naukowego, jak i jakość oraz zakres badań przeprowadzonych przez Doktoranta, które stanowią o znaczącym wkładzie w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna, **wnoszę o wyróżnienie niniejszej rozprawy doktorskiej.**

Donata Boujga