

Wydział Inżynierii Mechanicznej

Katedra Technologii i Automatyzacji

dr. hab. inż. Tomasz Stachowiak, prof. PCz

ul. Armii Krajowej 21, 42-201 Częstochowa, +48 34250 539

e-mail : tomasz.stachowiak@pcz.pl

Częstochowa 05 listopada 2024

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Grzegorza Florka

pod tytułem:

„Nowe metody poprawy więzi międzywarstwowej w produktach z tworzyw i kompozytów polimerowych wytwarzanych technologią drukowania 3D FDM”

przygotowanej na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej. Rozprawa została przygotowana pod kierunkiem Promotora Pana dr hab. inż. Józefa Stabika Prof. Pol. Śl.

Recenzja opracowana została na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa, Wydziału Mechanicznego Technologicznego, Politechnik Śląskiej, Pana Profesora dr hab. inż. Adama Grajcara z dnia 22 października 2024 r.

(pismo RDIMa.512.4.2024 / RDIMa/.139/51/2024)

Informacje dotyczące wykształcenia oraz przebiegu pracy naukowo-zawodowej mgr inż. Grzegorza Florka

Doktorant tytuł inżyniera uzyskał w roku 2011 po ukończeniu studiów pierwszego stopnia na Politechnice Śląskiej, na wydziale Mechanicznym Technologicznym, na kierunku: Zarządzanie i Inżynieria Produkcji, w specjalności: Budowa i eksploatacja maszyn. Tytuł magistra Doktorant otrzymał w roku 2013 w zakresie Projektowania i automatyzacja maszyn i procesów technologicznych, na Wydziale Mechanicznym Technologicznym, na kierunku: Zarządzanie i Inżynieria Produkcji, Politechniki Śląskiej.

Od roku 2013 Doktorant rozpoczął studia doktoranckie na Politechnice Śląskiej, a tematem jego pracy były "Własności struktur szkieletowych z kompozytów polimerowych wzmocnionych ciągłym włóknem węglowym". W roku 2024 nastąpiła zmiana tematu przewodu doktorskiego.

Przebieg pracy zawodowej Doktoranta:

- | | |
|-----------|---|
| 1995-1996 | Zakłady Chemiczne Blachownia, Wydział Automatykacji, Kędzierzyn-Koźle, Stanowisko: Technik procesów przemysłowych |
| 1996-1997 | Własna działalność gospodarcza - produkcja sprzętu sportowego z kompozytów włókien węglowych i aramidowych |
| 2000-2012 | Własna działalność gospodarcza – projektowanie CAD, rozwój prototypów, serwis i produkcja urządzeń automatycznych |
| 2013-2023 | Maszyny s.c. Projektowanie i Wytwarzanie, stanowisko: Konstruktor Automatyk, Dyrektor Zarządzający |

Tematyka rozprawy doktorskiej

Tematyka rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Grzegorza Florka dotyczy opracowania, wprowadzenia oraz weryfikacji innowacji technologicznej procesu drukowania 3D opartego na popularnej metodzie przyrostowej określanej jako FDM (*ang.* „Fused Deposition Modeling”). Praca stanowi nowatorskie podejście do procesu drukowania 3D, a jej celem jest wprowadzenie rozwiązań procesowych, głównie konstrukcyjno-technologicznych, mających na celu uzyskanie poprawy jakości wydruku (elementu gotowego). Jednakże głównym celem pracy oraz wprowadzanych rozwiązań jest przede wszystkim poprawa więzi międzywarstwowej w produktach z tworzyw i kompozytów polimerowych wytwarzanych technologią drukowania 3D (FDM).

Technologia druku 3D FDM, należy do jednych z najbardziej obecnie popularnych metod addytywnych (grupy procesów technologicznych określanymi jako *ang.* „Rapid prototyping”). Założenia technologiczne czynią tę technologię niezwykle podobną do technologii wytłaczania. Swoją popularność technologia FDM zawdzięcza swojej prostocie, związanej z konstrukcją urządzenia drukującego (drukarki 3D), dostępnością i ceną filamentów, jak również szybkością drukowania oraz relatywnie dobrą jakością otrzymywanych wyrobów.

Metody addytywne znajdują coraz szersze zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, ale również w medycynie, kolejnictwie oraz przemyśle lotniczym (aczkolwiek w wielu przypadkach dotyczy to również rozwiązań, w których elementy drukowane są np. z proszków metali – technologia SLM – *ang.* Selective laser melting). Metody addytywne zawdzięczają swoją popularność między innymi możliwości otrzymywania bardzo skomplikowanych kształtów, które w większości np. technologii ubytkowych nie byłyby możliwe do uzyskania, ze względu na ograniczenia techniczne i technologiczne. Ponadto metody addytywne charakteryzują się wytwarzaniem detali (niezależnie jakiego pochodzenia jest materiał drukowany) bez generowania odpadu, co na chwilę obecną staje się niezwykle cenną zaletą. Nawet w przypadku stosowania elementów

pomocniczych elementów podporowych (tzw. supportów) technologia FDM umożliwia stosowanie głowic wielomateriałowych, w których materiał supportów może być rozpuszczalny w wodzie (zastosowanie filamentów wytworzonych z polimeru PVA - Alkohol poliwinylowy). Prowadzi to do jeszcze większej uniwersalności i elastyczności procesu drukowania oraz otwiera możliwość wykorzystania tej technologii w nowych obszarach oraz aplikacjach.

Ponadto stosowanie metod addytywnych, w szczególności technologii FDM staje się atrakcyjną alternatywą dla technologii produkcji masowej, m.in. technologii wtryskiwania tworzyw sztucznych, szczególnie w sytuacjach gdy wolumen produkcji jest niewielki (kilkadziesiąt, kilkaset sztuk) a wymagania jakościowe oraz wymagania dotyczące wybranych właściwości mechanicznych nie są zbyt wygórowane. W przypadku technologii wtryskiwania koszt wykonania narzędzia (formy wtryskowej) może być znaczący i ekonomicznie nieuzasadniony. Równocześnie nie oznacza to, że technologia druku 3D FDM nie nadaje się do stosowania do wytwarzania wyrobów przenoszących obciążenia mechaniczne lub wyrobów o wysokiej jakości wizualnej powierzchni, lub spełniających określone funkcje. Własności te w znacznej mierze zależne są od zastosowanego materiału oraz parametrów drukowania (temperatura wytłaczanego tworzywa, prędkość wytłaczania grubość i szerokość drukowanej warstwy, atmosfera drukowania).

Celem pracy Autora było wprowadzenie innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych oraz technologicznych znanego i stosowanego już procesu drukowania 3D FDM, które w znaczący sposób wpłynęłyby na więź przylegania pomiędzy sąsiadującymi warstwami drukowanego polimeru lub kompozytu polimerowego. Rozwiązania te mają na celu, wpłynąć w pozytywny sposób na właściwości mechaniczne gotowego wyrobu. Podkreślenia wymaga fakt, że analiza wpływu wprowadzanych modyfikacji technologii FDM przeprowadzana była przez Autora z wykorzystaniem własnych projektów (bazujących na wniosku patentowym zgłoszonym przez Autora rozprawy), jak również

urządzeniach wykonanych przez Autora. Przedstawiona praca stanowi znaczący wkład w rozwój wiedzy z zakresu technologii drukowania 3D FDM. Biorąc to pod uwagę, należy stwierdzić, że rozprawa doktorska Pana Grzegorza Florka, charakteryzuje się daleko idącą innowacyjnością, zarówno w podejściu do analizowanego zagadnienia, jak również proponowanego rozwiązania, co przekłada się na jej wysoki poziom naukowy, użyteczny i aplikacyjny.

Charakterystyka rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Grzegorza Florka obejmuje 207 stron maszynopisu. Praca zawiera również 66 rysunków oraz 23 tabele i składa się ze spisu treści, wstępu, celu i zakresu pracy. Część teoretyczna pracy (rozdział 3) składa się z pięciu podrozdziałów. Część praktyczna pracy (praca własna – rozdział 4) składa się z sześciu podrozdziałów. Pracę zamyka podsumowanie, wnioski końcowe, spis literatury oraz streszczenia w języku polskim oraz angielskim.

Część teoretyczna pracy

Część teoretyczna pracy została podzielona na pięć podrozdziałów, począwszy od podrozdziału 3.1 skończywszy na podrozdziale 3.5. W podrozdziale pierwszym Autor prezentuje i przybliża zagadnienia technologii druku 3D oraz genezy tego typu rozwiązań technologicznych. W swoich rozważaniach Autor odwołuje się do również do takich zagadnień jak czwarta rewolucja przemysłowa, w niej właśnie upatrując początku technologii przyrostowych. Autor zwraca również uwagę, że szeroko rozumiane metody przyrostowe określane również mianem addytywnych, znajdują również zastosowanie dla innych rodzajów materiałów konstrukcyjnych takich jak ceramika lub metale. Ponadto, co należy podkreślić, również przemysł medyczny, zaczyna spoglądać przychylnym okiem na technologie związane np. z możliwością drukowania organów lub tkanek. Na chwilę obecną przemysł medycznych wykorzystuje na szeroką skalę możliwości technologii SLM (ang. Selective laser melting) w celu przygotowanie personalizowanych tytanowych endoprotez (np. biodrowych).

W dalszej części podrozdziału Autor zwraca również uwagę na powiązanie technologii addytywnych z projektowaniem inżynierskim oraz wykorzystaniem oprogramowania typu CAD (ang. Computer Aided Design) oraz CAM (ang. Computer Aided Manufacturing) w celu otrzymania wyrobów gotowych z pominięciem czasochłonnego i generującego znaczne koszty przygotowaniem specjalistycznych narzędzi (na przykład form wtryskowych). Podsumowanie podrozdziału 3.1 koncentruje się na wskazaniu

możliwości oraz zalet procesu drukowania 3D w odniesieniu do powszechnie stosowanych rozwiązań technologicznych, opartych np. na metodach ubytkowych. Jednocześnie Autor zwraca uwagę, że mimo zalet, technologia druku 3D wykorzystująca materiały polimerowe nie została dostatecznie zbadana i istnieje przestrzeń do wprowadzania zmian oraz modyfikacji, mających na celu usprawnienie tego procesu w celu uzyskania większej powtarzalności otrzymanych wyrobów. Ponadto wdrażane innowacje powinny być również skupione na poprawie np. właściwości mechanicznych drukowanych elementów.

W podrozdziale 3.2 oraz kolejnych trzech podrozdziałach Autor przedstawia szerokie oraz starannie przygotowany przegląd dostępnej literatury z zakresu wykorzystywanych obecnie technologii oraz metod drukowania 3D.

Podrozdział 3.3 stanowi jeden najobszerniejszych składowych części teoretycznej rozprawy. W kolejnych podrozdziałach Autor przybliży założenia technologii drukowania FDM. Punktem wyjścia w tych rozważaniach są założenia mechaniczne i termiczne, które występują w technologii FDM, Autor zwraca szczególną uwagę na konieczność precyzyjnej kontroli temperatury oraz rozkładu pola temperatury zarówno po stronie narzędzia (głowicy drukującej), jak również drukowanego materiału. Jak wskazuje Autor, komercyjnie dostępne drukarki stanowią urządzenia uniwersalne przeznaczone do pracy z szeroką gamą termoplastycznych materiałów polimerowych. Niestety, tak daleko idąca elastyczność oraz uniwersalność prowadzić może do mało precyzyjnej kontroli kluczowych parametrów procesu drukowania (szczególnie temperatury) dla polimerów skrajnie różniących się parametrami przetwórstwa. Jak wskazuje Autor, aspekty mechaniczne druku 3D w technologii FDM, zależne są od takich składowych jak prędkość drukowania oraz grubość pojedynczej warstwy. Oba parametry stanowią również kompromis pomiędzy jakością wydruku, w tym otrzymywanymi właściwościami mechanicznymi, a czasem drukowania. Autor wskazuje również, że otrzymywane

właściwości mechaniczne gotowego wydruku zależne są również od takich parametrów jak intensywność chłodzenia i utwardzania poszczególnych warstw.

Kolejny podrozdział poświęcony jest omówieniu zagadnień związanych ze zbieżnością procesu drukowania w technologii FDM z procesem wytłaczania termoplastycznych tworzyw sztucznych i zjawisk fizycznych jakie obserwowane są podczas tego procesu. Autor podkreśla konieczność kontroli procesu podawania materiału oraz nakładania jego kolejnych warstw w celu uzyskania wymaganej adhezji między kolejnymi warstwami. Wydaje się to być kluczowe zagadnienia w kontekście prac badawczych prowadzonych przez Doktoranta, a ich klarowne przedstawienie i omówienie przybliży czytelnikowi kierunek oraz tok rozumowania, oraz podjęty przez Autora kierunek badawczy.

W dalszej części rozprawy Autor skupia się na procesach, mających na celu przetworzenie modeli cyfrowych na fizyczne w technologii FDM. Etap ten jest nieodzowny w celu poprawnego przebiegu procesu drukowania. Co więcej obrazuje, że dzięki obecnie stosowanym rozwiązaniom możliwe jest szybkie przetworzenie trójwymiarowego modelu CAD w obiekt rzeczywisty, z uwzględnieniem parametrów drukowania. Kolejną bardzo obszerną część rozprawy stanowi omówienie przez Autora termoplastycznych materiałów polimerowych stosowanych w technologii FDM, ze wskazaniem zakresów termicznych ich przetwarzania. Należy podkreślić, że Autor przytacza również informacje dotyczące kompozytów polimerowych, które z powodzeniem mogą zostać wykorzystane w procesach drukowania 3D. Dalsze rozważania teoretyczne prowadzone przez Autora dotyczą z jednej strony najważniejszych parametrów procesu FDM, takich jak temperatura dyszy drukującej, temperatura stołu roboczego, prędkość drukowania, grubość pojedynczej warstwy, grubość warstwy startowej, prędkość chłodzenia wymuszonego, jak również prędkości przepływu powietrza w komorze roboczej, średnicy dyszy a w końcu retrakcji. Z drugiej strony podkreślenia roli oprogramowania oraz jego wpływu na charakterystykę

i przebieg procesu drukowania. Podobnie jak w przypadku innych technologii, w tym między innymi obróbce ubytkowej, tak i w przypadku drukowania 3D stosowane są coraz częściej zaawansowane algorytmy, mające na celu optymalizację ruchu narzędzia (planowanie ścieżek przejścia głowicy drukującej), grubości i szerokości warstwy (z możliwością wykorzystania rozwiązań, mających na celu adaptacyjne podejście do nakładanej grubości warstwy) oraz prędkości nakładania poszczególnych warstw z uwzględnieniem dynamicznej kontroli temperatury procesu. W dalszych rozważaniach Autor wskazuje na kolejny czynnik mogący w znaczący sposób wpływać na właściwości gotowego wyrobu ale również przebieg samego procesu drukowania - zawartość wilgoci filamentów, oraz konieczność ich poprawnego przygotowania (suszenia) do procesu drukowania. Podobnie jak w technologiach takich jak wtryskiwanie lub wytłaczanie, materiał wejściowy wymaga odpowiedniego podejścia procesowego. Na szczególną uwagę, jak wskazuje Autor, zasługują zatem polimery termoplastyczne, należące do grupy materiałów higroskopijnych lub zawierających napełniacze higroskopijne. Ich przetwarzanie wymusza na przetwórcach zastosowanie wyższej kultury technicznej, wiedzy przetwórczej oraz większego reżimu technologicznego. Podsumowanie podrozdziału trzeciego stanowi obszernie omówienie przez Autora wyzwań oraz możliwości technologii FDM, ze wskazaniem obecnych oraz możliwych obszarów jej stosowania.

W podrozdziale 3.4 Autor koncentruje się na wyzwaniach związanych z poprawą adhezji międzywarstwowej w technologii drukowaniu metodą FDM. Autor prezentuje podstawowe teorie z zakresu adhezji, takie jak mechaniczna, elektrostatyczna, dyfuzyjna oraz fizyczno-chemiczna, jak również ich znaczenie w procesach drukowania 3D. Następnie, Autor płynnie przechodzi do metod modyfikowania powierzchni drukowanych polimerów w celu uzyskania poprawy siły przylegania. Wśród stosowanych obecnie sposobów modyfikacji jakości oraz właściwości powierzchni, Autor zwraca uwagę na metody plazmowej modyfikacji powierzchni, metody chemiczne w tym stosowanie dodatków adhezyjnych lub polimerów. Specjalną grupę materiałów,

stanowią nanocząstki, które dzięki swoim rozmiarom mogą wnikać w pory i zwiększać powierzchnię kontaktu a zatem adhezję.

W podrozdziale oznaczonym jako 3.4.4, Autor zawiera szczegółowe informacje dotyczące optymalizacji parametrów technologicznych procesu drukowania. Punktem wyjścia dla tych rozważań jest optymalizacja wartości temperatury dyszy drukującej, jako najbardziej odpowiedzialnego ogniwa w procesie. W dalszej kolejności Autor wskazuje również na parametr jakim jest prędkość drukowania oraz w jaki sposób zmiany prędkości drukowania wpływają na proces. Kolejne podpunkty stanowią, niejako punkt wyjścia do części praktycznej pracy. Autor przedstawia szereg rozwiązań oraz technik, mających wpływ na sposób oddziaływania termicznego pomiędzy narzędziem a drukowanymi warstwami. Prezentowane informacje skupiają się na takich rozwiązaniach jak wykorzystanie promieniowania podczerwonego, mikrofalowego, laserowego, stosowanych w celu poprawy siły przylegania warstw. Ponadto Autor wskazuje, że wspomniane powyżej metody nie wyczerpują możliwość modyfikacji procesu drukowania i podkreśla, że na przebieg procesu można wpłynąć poprzez oddziaływanie fizyczne powiązane ze zmianą atmosfery, w tym zastosowanie gazów o podwyższonej temperaturze, ciśnieniu, gazów obojętnych, gazów aktywnych bądź próżni.

Część teoretyczną pracy domyka podsumowanie przeglądu literatury oraz postawiona przez Autora teza. Podsumowując chciałbym zauważyć że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Grzegorza Florka charakteryzuje się klasycznym układem, na który składają się dwie części, teoretyczna oraz doświadczalna. Należy zauważyć, że część teoretyczna rozprawy została przygotowana z zachowaniem najwyższy standardów oraz wykorzystaniem znaczącej liczby pozycji literaturowych. Część teoretyczna rozprawy, została przygotowana przez Doktoranta w taki sposób, aby czytelnik zapoznając się z rozprawą został wprowadzony w meandry procesu

drukowania FDM, w sposób łatwy oraz przyjemny, jednak z zachowaniem najwyższych standardów, odpowiadających pracy naukowej.

Część doświadczalna pracy

Część doświadczalna pracy składa się z jednego rozdział głównego, na który składa się sześć podrozdziałów. W pierwszej kolejności podrozdziały te przedstawiają założenia konstrukcyjne, technologiczne oraz badawcze doktoranta, by w podrozdziale ostatnim zaprezentować otrzymane wyniki i dokonać porównania oraz ewaluacji zastosowanych modyfikacji procesu drukowania w technologii FDM.

Na tym etapie należy bardzo mocno podkreślić zakres prowadzonych przez Doktoranta prac. Chciałbym szczególną uwagę zwrócić na fakt, że Doktorant w swoich rozważaniach nie ograniczył się do jednej metody modyfikującej przebieg procesu drukowania w oparciu o technologię FDM, lecz zaproponował trzy odmienne procesy mające swoje oparcie w znacząco odmiennych założeniach techniczno-technologicznych. Swoje rozważania Doktorant oparł na następujących modyfikacjach procesu drukowania:

- **Technologia drukowania 3D z głowicą rotującą,**
- **Technologia drukowania 3D z głowicą rotującą i nagrzewaniem laserowym,**
- **Technologia drukowania z górną płytą grzejącą.**

Dla każdego z proponowanych rozwiązań Doktorant opracował proces technologiczny, a następnie opracował koncepcję urządzenia - drukarki 3D wraz z doбором napędu poszczególnych osi oraz sterowania ruchami poszczególnych jej podzespołów. Następnie Doktorant skompletował wymagane podzespoły w celu zbudowania drukarki wraz z uwzględnieniem wprowadzanych modyfikacji konstrukcyjnych (dla każdego zaproponowanego rozwiązania). Dla tego etapu prowadzone również były działania

korygujące oraz optymalizujące pracę drukarki. Badania weryfikacyjne obejmowały opracowanie programu i metodyki badań oraz analizę ich wyników.

W tym miejscu chciałbym podkreślić bardzo rozległy zakres prac konstrukcyjno-technologicznych podjętych oraz przeprowadzonych przez Doktoranta. Dotyczy to między innymi samodzielnego zaprojektowania, wykonania a następnie implementacji elementów niestandardowych, urządzeń lub elementów o charakterze innowacyjnym, stanowiącym modyfikację procesu drukowania w technologii FDM.

Ponadto przedłożona do recenzji rozprawa, jak i wdrażane rozwiązania oparte zostały na patencie (Pat.244194), którego Doktorant jest Autorem (patent został zgłoszony do UP RP 2021-05-18).

Opisy kolejnych kroków dla poszczególnych etapów wytwarzania oraz implementacji modyfikacji oraz usprawnień stosowanych urządzeń, przedstawione zostały w sposób czytelny oraz przejrzysty jak również zrozumiały dla czytelnika. Prezentowane w części doświadczalnej rozprawy rysunki oraz zdjęcia w niezwykle czytelny sposób przedstawiają kolejne kroki prowadzonych prac. Natomiast zawarte w rozprawie wykresy oraz tabele prezentują otrzymane dane oraz opracowania statystyczne, pozwalając na intuicyjną weryfikację otrzymanych wyników oraz wskazanie optymalnego rozwiązania.

Przedstawione w pracy badania oraz otrzymane wyniki zostały przeprowadzone w oparciu o właściwe normy przedmiotowe, swoje uwagi i spostrzeżenia co do zakresu stosowania norm przedstawię w dalszej części recenzji.

Część doświadczalną pracy kończą podsumowanie, wnioski oraz wskazane przez Doktoranta kierunki dalszych prac oraz badań. Domknięciem części doświadczalnej rozprawy jest niezwykle obszerny spis literatury zawierający aż 594 pozycje literaturowe. Uważam że, zarówno część teoretyczna jak i część doświadczalna rozprawy, są zredagowana poprawnie. W częściach pracy pojawiają niewielkie braki

edytorskie. Przedstawione informacje pozwalają stwierdzić że zarówno część teoretyczna jak i doświadczalna stanowią komplementarną całość, jednoznacznie opisując istotę osiągnięcia naukowego jak również jego wartość użyteczną oraz możliwości aplikacyjne.

Ocena merytoryczna

Tytuł rozprawy doktorskiej „Nowe metody poprawy więzi międzywarstwowej w produktach z tworzyw i kompozytów polimerowych wytwarzanych technologią drukowania 3D FDM”, odpowiada w całości jej treści. Również tytuł, jak i cel i zakres pracy odpowiadają przedłożonemu zakresowi przeprowadzonych prac projektowych, konstrukcyjnych oraz badań zaprojektowanych i przeprowadzonych przez Autora. Doktorant w rozprawie porusza bardzo ciekawy oraz ambitny temat badawczy, zarówno z naukowego jak i użytecznego punktu widzenia. Podjęta przez Doktoranta tematyka jest niezwykle istotna, szczególnie pod kątem optymalnego wykorzystania materiałów polimerowych oraz technologii stosowanych do ich przetwórstwa, jak również przyszłych trendów stosowanych w szeroko rozumianym przetwórstwie tworzyw sztucznych. Moim zdaniem modyfikacje oraz optymalizacje zaproponowane przez Autora, już istniejącej technologii, ma szczególne znaczenie pod kątem ekonomicznym, przetwórczym oraz jakościowym. Wdrażanie nowych, kosztownych technologii wydaje się nieefektywne oraz nieopłacalne, szczególnie w obliczu możliwości usprawnienia już istniejących rozwiązań oraz wykorzystania ich pełnego potencjału. Przyjęty przez Pana mgr inż. Grzegorza Florka cel badawczy wpisuje się w obecne trendy mające w zamyśle opracowanie innowacyjnych technologii przetwórstwa materiałów polimerowych lub modyfikację już istniejących rozwiązań w celu osiągnięcia wymiernych korzyści procesowych lub zmiany właściwości gotowego wyrobu. Autor przedstawia rozwiązania, które w znaczący sposób mogą się przyczynić do poprawy przebiegu procesu technologicznego, jego stabilizacji oraz uzyskania większej kontroli nad kluczowymi

parametrami drukowania. Jednocześnie proponowane rozwiązania wpływają na jakość gotowego wyrobu oraz jego właściwości mechaniczne, co z użytkowego punktu widzenia wydaje się być najistotniejsze. Ponadto, poprawa właściwości mechanicznych otrzymywanych w technologii FDM wydruków, może się przyczynić do jeszcze szerszego ich stosowania jako alternatywy dla procesów masowych. Dzięki zaproponowanym przez Autora modyfikacjom proces druku detali polimerowych w technologii FDM, może wypełnić lukę technologiczną pomiędzy procesami zaawansowanymi technologicznie ale kosztowymi w przygotowaniu, a procesami charakteryzującymi się niewielkimi nakładami finansowymi wymaganymi do ich uruchomienia, ale wytwarzającymi detale o gorszych właściwościach np. mechanicznych. Przedłożona do recenzji rozprawa odznacza się wysokim charakterem poznawczym, ale co równie ważne rozprawę cechuje bardzo wysoki poziom gotowości technologicznej oraz aplikacyjnej, co w znacznym stopniu przyczynia się do jej dużego potencjału wdrożeniowego.

Przeprowadzona przez Pana mgr inż. Grzegorza Florka analiza aktualnego stanu wiedzy w oparciu o dostępną literaturę oraz szeroko rozumiane źródła internetowe w zakresie przedmiotu rozprawy doktorskiej oceniam jako bardzo dobrą i bardziej niż wystarczającą. Ilość przywołanej literatury uważam za imponującą, jednocześnie zawartość części literaturowej pod kątem merytorycznym jest poprawna. Część teoretyczna pracy powinna stanowić dogłębne ale jednocześnie poprawne merytorycznie opracowanie, na temat zagadnień, które stanowią przedmiot rozprawy. Ponadto ta część pracy powinna wprowadzać odbiorcę w część doświadczalną pracy i pomóc mu lepiej zrozumieć podejmowane zagadnienia badawcze. Uważam, że w przypadku przedkładanej do recenzji rozprawy doktorskiej cele te zostały osiągnięte. Chciałbym również zauważyć że zapoznając się z częścią teoretyczną pracy, doznałem wrażenia, że Autor rozprawy bardzo dobrze porusza się w obszarze materiałowym oraz technologicznym, które opisuje. Wiedza ta pozwala nie tylko na niezwykle poprawne opisanie zagadnienia, ale prowadzi również do sformułowania odważnej tezy a następnie przeprowadzenie czytelnika do części doświadczalnej, w której przedstawia rozwiązania

postawionego problemu badawczego. Jak już wspomniałem, proponowane przez Autora rozwiązania przedstawione w części doświadczalnej nie mają jedynie charakteru teoretycznego, lecz poparte są rozwiązaniami aplikacyjnymi oraz badaniami.

Część teoretyczna pracy została opracowana niezwykle starannie a zagadnienia związane z szeroko rozumiany drukiem 3D, nie tylko technologii FDM zostały wyjaśnione w bardzo przejrzysty sposób, ze wskazaniem różnic, wad oraz zalet stosowania różnych procesów drukowania. Autor zwraca dużo uwagi na czynniki materiałowe w procesie druku, prezentując szereg informacji dotyczących polimerów oraz kompozytów polimerowych wykorzystywanych w procesach drukowania. Doktorant w swoich rozważaniach teoretycznych poświęca dużo uwagi parametrom procesowym, ich optymalizacji oraz zjawiskom występującym i wpływającym na przebieg procesu drukowania w technologii FDM. Podejście to wydaje się być doskonałym punktem wyjścia do rozważań prowadzonych w części doświadczalnej pracy. W części teoretycznej, Autor podkreśla newralgiczne punkty technologii FDM, by w części doświadczalnej płynnie przejść do założeń badawczych oraz podjętych działań, mających na celu modyfikację procesu technologicznego a następnie weryfikację otrzymanych wyników.

Jak już wspomniałem, Autor rozprawy zaproponował aż trzy sposoby modyfikacji klasycznego procesu drukowania FDM. Każdy z tych sposobów zawierał opracowanie indywidualnego procesu technologicznego, zaprojektowanie i wykonanie elementów modyfikujących standardowy moduł drukujący, zaprojektowania i wykonania układu sterowania, doboru i optymalizacji parametrów procesu drukowania oraz przeprowadzenie badań w oparciu o bardzo dobrze przygotowany plan badań. Otrzymane w badaniach wyniki zostały przedstawione w postaci tabel, wykresów ale również powierzchni odpowiedzi wraz ze szczegółową interpretacją każdej z nich oraz powiązania poszczególnymi parametrami technologicznymi, a otrzymywanymi wielkościami wynikowymi. Chciałbym zauważyć że część badawcza pracy została bardzo starannie przygotowana a zakres wykonanych prac jest bardzo szeroki i cechuje go

znaczna ilość informacji wynikowych. Praca badawcza doktoranta zdecydowanie wykracza poza przyjęte standardy zarówno pod kątem zakresu wykonanych badań, jak również ze względu na charakter aplikacyjny pracy oraz oparcie jednego z prezentowanych rozwiązań na autorskim patencie. W mojej ocenie praca ma bardzo praktyczny charakter oraz wymiar, z możliwością szybkiego wdrożenia otrzymanych rozwiązań.

Swoje uwagi oraz spostrzeżenia szczegółowe chciałbym podzielić na dwie grupy, ujęte w grupę uwag edycyjnych oraz uwag merytorycznych. Przedstawię je w sposób chronologiczny poczynając od części teoretycznej rozprawy.

Na stronach 13, 14, 15, 16, 18, 19, 21, 23, 24, 26, 32 zostały umieszczone przez Autora rysunki (oznaczone od rysunku 3.1 do 3.11), niestety brak jest informacji czy stanowią one opracowanie własne Autora, czy też zostały pobrane ze źródeł literaturowych. Jeśli to Autor je wykonał, należałoby o tym poinformować odbiorcę, natomiast jeśli zostały pobrane ze źródeł należałoby to wskazać w opisie rysunku.

Na stronie 26 Autor podaje cytowane pozycje literatury numery [47,48] w osobnych nawiasach kwadratowych, odwołanie tego typu powinno być umieszczone w jednym nawiasie kwadratowym.

Doktorant w pracy zamieszcza znaczną ilość rysunków, schematów, tabel, wzorów oraz opracowań, jednakże w całej pracy wyrównane są one do lewej strony, z edycyjnego i estetycznego punktu widzenia dobrze byłoby te elementy pracy wyśrodkować.

Na stronie 44 zdanie rozpoczyna się od kropki. Ten znak interpunkcyjny powinien zostać przeniesiony do wiersza powyżej.

Na stronie 46 Doktorant przedstawia szereg informacji dotyczących grubości warstwy drukowanej oraz jej korelacji z właściwościami przetwarzanych materiałów. W akapicie drugim Autor odwołuje się do właściwości wybranych materiałów polimerowych oraz stopnia krystaliczności wybranych materiałów. W akapicie tym pojawia się określenie materiały półkrystaliczne. Zakładam, że Doktorant miał na myśli termoplastyczne polimery częściowo krystaliczne.

Na stronie 95 w części pracy poświęconej doborowi układu sterowania drukarką 3D pojawia się drobna literówka, w tekście pojawia się słowo zaletami a powinno być zaletami.

Na stronie 97 Doktorant umieścił rysunek oznaczony jako 4.10 i przedstawiający głowicę drukującą z rubinową końcówką firmy Olsson, ten sam rysunek został przez Autora wykorzystany na stronie 134 i oznaczony jako 4.35.

Na stronie 133 w części badawczej pracy, Autor prezentuje zdjęcie drukarki wraz z zespołem górnej płyty grzejnej. Widok tego elementu został przedstawiony na rysunku oznaczonym jako 4.33 (strona 133). Natomiast na stronie 134 umieszczony został kolejny rysunek, oznaczony jako 4.35. Powstała zatem luka w numeracji rysunków, brak jest rysunku oznaczonego jako 4.34. kolejne rysunku umieszczone w pracy mają zatem nieoprawną numerację, którą należałoby skorygować.

Przedstawione powyżej uwagi odnoszące się do części edycyjnej rozprawy w żaden sposób nie umniejszają jej wartości ani nie wpływają na moją pozytywną opinię rozprawy doktorskiej, którą oceniam bardzo dobrze. Chciałbym również podkreślić wysoki poziom merytoryczny, części teoretycznej recenzowanej rozprawy.

Przystępując do oceny części badawczej pracy chciałbym wyrazić swoje uznanie dla zakresu podjętych działań oraz nakładu pracy wykonanej przez Pana mgr inż. Grzegorza Florka w celu zaprojektowania, wykonania oraz przetestowania daleko idących modyfikacji procesu drukowania 3D z wykorzystaniem technologii FDM. Rozprawę Pana mgr inż. Grzegorza Florka należy traktować jako pracę technologiczną, cechującą się elementami projektowymi oraz konstrukcyjnymi, zawierającą poprawnie opracowane i przygotowane elementy badawcze, nakierowane na osiągnięcie wymiernych korzyści oraz właściwości gotowego wyrobu. Praca jest na tyle złożona, że część projektowo-konstrukcyjna wystarczyłaby o ubieganie się o nadanie stopnia. Natomiast szerokie i kompleksowe podejście Autora pozwoliło na opracowanie innowacyjnych modyfikacji

technologii drukowania 3D (Autor zaproponował trzy unikatowe rozwiązania) oraz przetestowanie tych rozwiązań, w postaci w pełni funkcjonalnych rozwiązań technologicznych z uwzględnieniem indywidualnych układów sterowania. Uważam, że wymagało to od Doktoranta po pierwsze gruntownej wiedzy i znajomości procesu drukowania 3D w technologii FDM, po drugie gruntownej wiedzy konstrukcyjnej z zakresu projektowania oraz obliczania wytrzymałości i sztywności konstrukcji poddanych obciążeniom mechanicznym, i po trzecie wiedzy z zakresu materiałoznawstwa, w tym wiedzy z zakresu wytrzymałości metali oraz właściwości i przetwórstwa termoplastycznych tworzyw sztucznych. W dalszej kolejności należy podkreślić umiejętność przełożenia wiedzy teoretycznej z w/w zakresów oraz jej implementację praktyczną, w celu wykonania niestandardowych elementów oraz proponowanych modyfikacji drukarki 3D, a następnie ich wdrożenia do znanego już procesu technologicznego. Ponadto praca Autora wymagała włączenia do procesu twórczego, wiedzy z zakresu automatyki, automatyzacji oraz elektroniki w połączeniu z wiedzą informatyczną i projektową w środowisku CAD i CAM. Przeprowadzone prace wymagały połączenia wiedzy oraz umiejętności z kilku obszarów nauk technicznych, zatem przedłożona do recenzji rozprawa doktorska ma według mnie wyraźny charakter interdyscyplinarny. Należy również wziąć pod uwagę czas poświęcony przez Autora na przygotowanie modeli trójwymiarowych poszczególnych elementów niestandardowych. Następnie własnoręczne ich wykonanie za pomocą maszyn i urządzeń prezentowanych w pracy. Zakładam że równie dużo pracy oraz nakładów czasowych Autor poświęcił na poprawne zaprogramowanie drukarki 3D oraz optymalizację jej pracy w celu otrzymania próbek badawczych. Ponadto, Autor rozprawy przygotował autorskie urządzenie do analizy właściwości mechanicznych otrzymanych w procesie drukowania próbek, w oparciu o enkoder o bardzo wysokiej rozdzielczości. Zatem w celu określenia wybranych właściwości mechanicznych, opracował i zastosował własne urządzenia pomiarowe oraz metodę badawczą. Mimo tak dużego nakładu pracy, który jest imponujący, Doktorant bardzo sprawnie oraz czytelnie przeprowadził

poszczególne eksperymenty oraz implementacje zaproponowanych przez siebie usprawnień, a następnie je opisał. Kolejne kroki są jasno zdefiniowane, każdy z rozdziałów zawiera opis i podsumowanie podjętych działań i stanowi punkt wyjścia do dalszych prac oraz rozważań. Przyjęta i wdrożona przez Autora chronologia prac zdaje się być właściwa. Część badawcza pracy w ujęciu Doktoranta, to nie tylko działania projektowo-konstrukcyjne, ale również wykorzystane narzędzia pomiarowe oraz metody analizy które pozwalają weryfikować oraz wartościować otrzymane wyniki pod kątem naukowym oraz aplikacyjnym. W związku z tak szerokim zakresem prac i proponowanych modyfikacji, nasunęły mi się pewne uwagi, o wyjaśnienie których zwracam się do Doktoranta.

Na stronie 108 rozprawy, zostały przedstawione wymiary próbek, które zostały przygotowane w celu prowadzenia dalszych prac badawczych. Jak wynika z opisu próbki zostały wydrukowane a następnie poddane obróbce mechanicznej w celu uzyskania następujących wymiarów długość 30: mm, szerokość: 20 mm, grubość: ~ 6mm. Próbki zostały przygotowane w taki sposób aby w kolejnym kroku przeprowadzić na nich próby zginania. Zgodnie z normą ISO 178 wymiary próbki determinowane są przez jej grubość, stąd przy grubości 6 mm, długość próbki powinna wynosić 96 mm. Proszę o wyjaśnienie rozbieżności zastosowanych wymiarów próbek z wymaganiami normy.

Na stronie 136 Autor opisuje dobór materiału (filamentu) do badań. W tekście wyspecyfikowane zostały dwa rodzaj materiałów czyli PEEK oraz PEEK CF10. Czym podyktowany był wybór tych właśnie materiałów? Nie są to standardowe filamenty. Do najbardziej popularnych i najczęściej wykorzystywanych materiałów należą filamenty wytworzone z PLA, ABS, PA oraz PET, dla których wymagania procesowe w tym termiczne nie są tak restrykcyjne.

Ponadto w części teoretycznej pracy, Autor wiele uwagi poświęca procesom przygotowania wybranych materiałów polimerowych do procesu drukowania w szczególności zawartości wilgoci. Niestety w części doświadczalnej brak jest informacji dotyczącej zawartości wilgoci w badanych filamentach, brak jest informacji dotyczącej

sposobu pomiaru zawartości wilgoci w przetwarzanych filamentach. Czy pomiar ten był wymagany dla przetwarzanych materiałów? Proszę o odpowiedź.

Kolejnym obszarem, do którego chciałbym się odnieść są informacje przedstawione przez Autora a odnoszące się do właściwości termicznych przetwarzanych materiałów oraz wpływu temperatury drukowania na właściwości gotowego wyrobu (elementu wydrukowanego). Osobiście uważam, że dobrze byłoby uwzględnić również analizę właściwości termicznych takich jak na przykład, badanie HDT lub badanie dynamicznych właściwości mechanicznych (DMA).

W ramach analizy właściwości mechanicznych otrzymanych wydruków, Autor skoncentrował się na analizie w oparciu o oznaczanie właściwości przy zginaniu. Norma ISO 14130 (jest to norma zakresowa dla kompozytów, jednakże w ciekawy sposób specyfikuje badania, mające na celu określenie Interlaminar Shear Properties) ze względu na strukturę warstwową otrzymane próbki przywodzą na myśl warstwowe kompozyty stąd, uważam, że dobrze byłoby uwzględnić również badania tego typu, które mogłyby dać odpowiedź o zależnościach wytrzymałościowych pomiędzy warstwami.

Na stronach 149 (rys. 4.41), 150 (rys. 4.43), 152 (rys. 4.45) Autor przedstawia próbki oraz ich przełomy po zakończonych testach oznaczania właściwości przy zginaniu, z jednoczesną charakterystyką ich powierzchni, na tej podstawie dokonuje również wniosku o charakterze przełomu. Uważam, w tego typu analizie, dobrze byłoby uwzględnić obserwacje mikroskopowe np. z mikroskopu optycznego, co mogłyby dostarczyć ciekawych informacji o zachowaniu się poszczególnych warstw podczas próby zginania.

Zarówno w części teoretycznej jak i części doświadczalnej Autor odwołuje się, jak i wykorzystuje materiały polimerowe napełnione. Dla części praktycznej zastosowano kompozyt z 10 % napełnieniem mielonym włóknem węglowym. Niezwykle ciekawym wydaje się dalsza analiza tego zagadnienia, mająca na celu weryfikację, czy napełniacze stosowane w polimerze termoplastycznym, np. włókna szklane lub

węglowe, mogą wpływać na wartość siły przylegania poszczególnych warstw oraz czy ilość napełniacza może mieć wpływ na wartość siły przylegania?

Ostatnim zagadnieniem, do którego chciałbym się odnieść, jest ponownie temat procesów, mających wpływ na właściwości materiału lub wydruku. Autor w swoich rozważaniach skupił się na zagadnieniach związanych z odpowiednim przygotowaniem filamentów do procesu wydruku, stosowanych parametrów suszenia oraz dopuszczalnej zawartości wilgoci przed rozpoczęciem procesu. Jednocześnie w swoich rozważaniach teoretycznych odnosił się do wpływu takich parametrów, jak temperatura drukowania na właściwości strukturalne polimerów częściowo krystalicznych. Ponownie niezwykle ciekawym wydaje się dalsza analiza tego zagadnienia, pod kątem wprowadzania procesów technologicznych (np. wygrzewania w podwyższonej temperaturze po zakończeniu procesu drukowania) oraz wpływu jaki może mieć proces wygrzewania na właściwości wydruku. Równie interesująca mogłaby być analiza, jak tego typu procesy technologiczne mogą wpłynąć na siły przylegania poszczególnych warstw wydruku.

Podsumowując część praktyczną rozprawy, zakres prac projektowo-konstrukcyjnych, technologicznych oraz badawczych, sposób ich prezentacji, omówienia wyników oraz formułowania wniosków, nie zawiera rażących lub większych błędów edytorskich lub merytorycznych jednocześnie przy niewielkiej ilości, drobnych błędów edycyjnych lub literówek.

Biorąc pod uwagę wszystkie powyższe informacje, chciałbym stwierdzić, że przedłożoną do recenzji rozprawę doktorską Pana mgr inż. Grzegorza Floraka oraz jej wartość merytoryczną oceniam bardzo wysoko. Praca jest niezwykle oryginalna i bazuje na autorskim pomysłem Doktoranta. Chciałbym zwrócić również uwagę na interdyscyplinarny charakter pracy, łączący w sobie aspekty nie tylko inżynierii materiałowej ale również inżynierii mechanicznej, automatyki i automatyzacji jak i nauk technologicznych. Aspekt naukowy oraz aplikacyjny rozprawy stanowi istotny wkład w rozwój Dyscypliny Inżynieria Materiałowa.

Dorobek naukowy Doktoranta

Na dorobek naukowy Doktoranta składa się głównie patent o numerze zgłoszenia P.437798 i numerze prawa wyłącznego Pat.244194 pod tytułem:

„Drukarka 3D z płytą środowiska lokalnego i sposób drukowania 3D”, którego to Doktorant jest wyłącznym Autorem.

Podsumowanie

Przechodząc do podsumowania recenzji rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. p.t. „*Nowe metody poprawy więzi międzywarstwowej w produktach z tworzyw i kompozytów polimerowych wytwarzanych technologią drukowania 3D FDM*” stwierdzam, że praca stanowi oryginalne osiągnięcie zarówno o charakterze poznawczym oraz użytecznym. Wymiernym efektem recenzowanego doktoratu jest zaprojektowanie oraz wykonanie skutecznej modernizacji procesu technologicznego druku 3D w celu uzyskania poprawy więzi międzywarstwowej w produktach z tworzyw i kompozytów polimerowych. W aspekcie badawczym praca dostarcza szeregu informacji o właściwościach drukowanych materiałów polimerowych (nienapełnionych i napełnionych mielonym włóknem węglowym) w odniesieniu do parametrów procesu drukowania oraz zaimplementowanych zmian konstrukcyjnych i procesowych. Przedłożona praca oraz jej zakres, wyraźnie potwierdzają wysokie kompetencje naukowe oraz badawcze Doktoranta, przy jednoczesnej łatwości prezentowania wiedzy technicznej w sposób przystępny i zrozumiały dla odbiorcy.

Jednoznacznie stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska Pana mgr inż. Grzegorza Florka w **dyscyplinie naukowej Inżynieria Materiałowa** spełnia wymogi ustawowe stawiane rozprawom doktorskim [**Ustawa Prawo szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. 2018 poz 1668 z późn. zm)**]. Wniosuję do Rady Dyscypliny Inżynieria

Materiałowa Politechniki Śląskiej o przyjęcie pracy i przeprowadzenie dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora.

Biorąc pod uwagę aktualność podjętej tematyki, poziom merytoryczny doktoratu, zakres zrealizowanych prac projektowych, konstrukcyjnych oraz badawczych oraz dorobek naukowy Doktoranta, wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Grzegorza Florka.

Częstochowa 08.11.2024

dr hab. inż. Tomasz Stachowiak, prof. PCz

