



POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ

Instytut Technologii Materiałów

ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel. +48 61 665 2202

e-mail: office_mat@put.poznan.pl, www.wim.put.poznan.pl

dr hab. inż. Jacek Andrzejewski
Instytut Technologii Materiałów
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3
61-138 Poznań
Email: jacek.andrzejewski@put.poznan.pl
Tel. 697 121 605

Poznań, 13.11.2024

Recenzja

pracy doktorskiej „*Nowe metody poprawy więzi międzywarstwowej w produktach z tworzyw i kompozytów polimerowych wytwarzanych technologią drukowania 3D FDM*” autorstwa mgr inż. Grzegorza Florka

Promotor pracy: dr hab. inż. Józef Stabik, prof. PŚ

Podstawa formalna wykonania opinii

Niniejsza recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej, pismo przekazane przez przewodniczącego Rady Dyscypliny Pana Profesora dr hab. inż. Adama Grajcara z dnia 22 października 2024 (RDIME/138/51/2024). Przewód doktorski realizowany jest w ramach dyscypliny **Inżynieria Materiałowa**. Pismo wraz z załączoną pracą zostało dostarczone w dniu 05.11.2024.

1. Uwagi wstępne

Przedstawiona do oceny praca doktorska stanowi podsumowanie prac badawczych doktoranta w zakresie modyfikacji oprzyrządowania technologicznego stosowanego w technice druku 3D z zastosowaniem filamentu (FDM/FFF). W ramach prac realizowanej przez Pana Grzegorza Florka opracowane zostały 3 koncepcje mające na celu poprawę wytrzymałości międzywarstwowej wyrobów wytwarzanych technicznych kompozytów wzmocnionych włóknami węglowymi. Poza pracami konstruktorskimi, oraz wykonawstwem urządzeń/podzespołów przeznaczonych do testów technologicznych doktorant wykonał też szereg testów porównawczych mających na celu weryfikację

skuteczności opracowanych metod wytwarzania. Pomimo iż rozprawa została zakwalifikowana do oceny w ramach dyscypliny Inżynieria Materiałowa, w mojej ocenie charakter pracy jest interdyscyplinarny i łączy w sobie wiele aspektów z zakresu inżynierii mechanicznej, procesowej, lub nawet konstrukcji urządzeń mechatronicznych. Dlatego w trakcie oceny rozprawy głównej analizie poddana została wartość merytoryczna opracowanie, nie zaś jej aspekty dotyczące zgłoszonej dyscypliny.

Przedstawiona do oceny rozprawa obejmuje 205 stronicowy tekst, oraz dwa jednostronicowe streszczenie w języku polskim i angielskim. Praca podzielona jest 6 rozdziałów, spis treści oraz wykaz pozycji bibliograficznych. Studium literaturowe stanowiące jedną z głównych części pracy obejmuje kilkadziesiąt stron opisu, gdzie na uwagę zasługuje fakt iż tekst opracowania został oparty na licznych pozycjach literaturowych, które w całej pracy obejmują aż 594 pozycje. W treści rozprawy znaleźć można kilkadziesiąt rysunków, gdzie część została zaadoptowana z innych publikacji w omawianym temacie, natomiast znaczna część przedstawia rysunki konstrukcyjne, zdjęcia zbudowanych podzespołów i urządzeń oraz omawia wyniki testów w formie wykresów.

Sposób edytowania przedstawionego tekstu jest zgodny z przyjętymi wymaganiami dla prac doktorskich. Treść jest czytelna, numeracja rozdziałów i podrozdziałów jest bardzo klarowna.

We wstępie do pracy autor w czytelny sposób nakreślił główny problem badawczy związany z anizotropią właściwości mechanicznych wyrobów otrzymywanych technikami przyrostowymi, w szczególności dla wyrobów technicznych wzmacnianych włóknami krótkimi. W dalszej kolejności wskazał na główne cele prac badawczo-rozwojowych opisał też w czytelny sposób szereg kluczowych zagadnień prowadzących do realizacji głównych założeń realizowanego projektu.

Rozprawa w dużej części stanowi podsumowanie prac projektowych i walidacyjnych obejmujących opracowanie i wdrożenie trzech typów urządzeń zmodyfikowanych pod kątem uzyskania poprawy więzi międzywarstwowych drukowanych części. W mojej ocenie zakres prac jakich podjął się doktorant znacznie przekracza standardy dla rozprawy doktorskiej. Pomimo iż rozprawa jest bardzo obszerna i obejmuje ponad 200 stron maszynopisu, autor zdołał zamieścić w niej tylko wybraną część wyników swoich badań.

2. Ocena doboru tematyki rozprawy

Obszar tematyczny podejmowany w omawianej rozprawie doktorskiej obejmuje szeroki aspekt zagadnień związanych z techniką druku 3D z zastosowaniem filamentu. Analiza spisu treści oraz samego tekstu pozwala wyłonić kilka głównych wątków tematycznych pracy:

- przegląd dostępnych komercyjnie technik wytwarzania przyrostowego ze szczególnym uwzględnieniem metod z zastosowaniem ekstruzji filamentu (FFF/FDM),
- szczegółowe omówienie zagadnień związanych z adhezją międzywarstwową w wyrobach wytwarzanych przyrostowo,
- opis procesu konstrukcji i wytwarzania zmodyfikowanych urządzeń i podzespołów, oraz testy technologiczne z użyciem materiałów wzmocnionych włóknami węglowymi (CF),
- analiza efektywności zastosowanych koncepcji na właściwości mechaniczne przetwarzanych materiałów.

W mojej opinii tematyka rozprawy została przedstawiona prawidłowo, pozwala na wiarygodną ocenę istoty przedstawianych zagadnień, zwraca uwagę na główne problemy badawczy i opisuje sposoby ich rozwiązania. Wątek główny w postaci zagadnienia poprawy wytrzymałości międzywarstwowej, stanowi jedna z głównych przyczyn anizotropii właściwości części wytwarzanych przyrostowo, dlatego dobór problematyki pracy jest bardzo trafny.

3. Ocena szczegółowa rozprawy

Rozeznanie literaturowe obejmuje w dużej części szerokie omówienie dotychczas wdrożonych metod obróbki addytywnej, oraz bardzo szczegółowe omówienie podstaw, odmian i parametrów dotyczących metody druku z filamentu. Dział ten zasługuje na szczególną uwagę ze względu na bardzo wnikliwe rozpoznanie literaturowe, obejmujące również techniki bardzo niszowe i rzadko omawiane w publikacjach. W kontekście pracy warto podkreślić iż każda nowa technika wytwarzania, pomimo swoich wad i zalet, wnosi nową wiedzę do omawianej dziedziny nauki. Dlatego analiza zasady procesu i warunków procesu wytwarzania, nawet dla niekoniecznie optymalnych koncepcji technologicznych, pozwala na lepsze wykorzystanie dotychczasowej wiedzy w nowych projektach technicznych, tak jak to miało miejsce dla opracowywanych w ramach doktoratu rozwiązań. Poza oczywistym faktem zgromadzenia pokaznej bazy literaturowej, prezentowane studium tematyczne ma bardzo logiczną strukturę i stanowić może samo z siebie doskonały materiał publikacyjny.

Mając na uwadze dużą objętość materiału zgromadzonego w przeglądzie literaturowym, warto dodatkowo wskazać iż tekst nie jest monotony i omawia tylko najbardziej istotne kwestie w zakresie tematyki podrozdziałów. Sposób edycji tekstu ułatwia szybkie znalezienie literatury pozwalającej na bardziej dogłębne studium danej tematyki. Autor wybrał kilka głównych obszarów wiedzy w zakresie technik addytywnych, z których można wymienić kilka podzielonych na podrozdziały tematów:

- Przegląd technologii addytywnych/przyrostowych.
- Szczegółowe omówienie techniki druku z użyciem filamentu.
- Przegląd materiałów stosowanych w druku 3D
- Opis parametrów procesu druku oraz ich wpływ na właściwości wytwarzanych wyrobów
- Kluczowe obszary zastosowania techniki FFF/FDM

Wspomniane podrozdziały stanowią wartościowy materiał wprowadzający. W dalszej części tekstu autor w bardziej szczegółowy sposób odnosi się do podstawowych problemów stanowiących tematykę prowadzonych badań. W szczególności odnosi się do problemów adhezji międzywarstwowej i sposobów/technik poprawy, podrozdział ten jest uzupełniony o szczegółowy przegląd literatury dotyczącej aktualnie prowadzonych prac badawczych w obrębie poprawy adhezji międzywarstwowej, w tym prac poświęconych technikom zastosowania:

- modyfikacji powierzchni za pomocą plazmy i środków chemicznych,
- zmiany parametrów druku w tym temperatury dyszy i prędkości drukowania,
- podgrzewania powierzchni łączenia warstw wyrobu promieniowaniem podczerwym i mikrofalowym, wiązką lasera lub strumienia powietrza,
- kontrolowanej atmosfery gazów obojętnych i/lub aktywnych, bądź wykorzystania próżni i/lub wysokiego ciśnienia,

Cześć literaturowa pracy zakończona jest podsumowaniem oraz tezą pracy, której kontekst odnosi się do zastosowanych w części badawczej nowych odmian metody druku FFF/FDM, oraz ich optymalizacji w celu skutecznej poprawy wytrzymałości międzywarstwowej.

Zasadniczą część pracy stanowiąca wkład w dziedzinę nauk technicznych jest rozdział 4 omawiający prace własne doktoranta. W ramach wprowadzenia w pracy zaprezentowany została program prowadzonych prac badawczych, gdzie można wyszczególnić 3 główne kierunki działań, związanych z koncepcją:

- drukowania z głowicą rotującą,
- połączonych metod druku z głowicą rotującą i nagrzewaniem za pomocą lasera,
- zastosowania konfiguracji z górną płytą grzejną.

W każdym z powyższych przypadków prace obejmowały opracowanie nowej koncepcji procesu technologicznego, zaprojektowanie konstrukcji i wykonanie nowego urządzenia/instalacji, oraz przeprowadzenie badań weryfikacyjnych. W podrozdziale 4.2 doktorant dokonał rzeczowej argumentacji dla wyboru kierunku prac związanych z modyfikacją urządzeń i oprzyrządowania przeznaczonych do druku FFF/FDM, gdzie wskazał na przewagę rozwiązań oferujących poprawę dyfuzji międzywarstwowej nad technikami poprawy/modyfikacji tworzyw polimerowych.

Warto w niniejszej recenzji wskazać na iż w przypadku każdej z zastosowanych koncepcji możliwe byłoby opracowanie osobnej rozprawy doktorskiej, dlatego fakt podjęcia się tak obszernych badań zasługuje na szczególne wyróżnienie.

W przypadku pierwszej z zaprezentowanych koncepcji, druku za pomocą głowicy rotującej, prace konstrukcyjne obejmowały głównie opracowanie i zbudowanie podzespołów ekstrudera opartego na mechanizmie mimośrodowym. Układ kinematyczny urządzenia został oparty na konstrukcji ramy obrabiarki CNC, co pozwoliło na zaoszczędzenie znacznych środków związanych z opracowaniem konstrukcji całkowicie nowego urządzenia. Podejście autora uważam za prawidłowe, ponieważ w kontekście testowanej metody kluczowe podzespoły obejmują oprzyrządowanie ekstrudera maszyny. Wysoka sztywność układu kinematyczny frezarki umożliwia montaż nowo opracowanych komponentów urządzenia, ze względu na swój prototypowy charakter cechują się one znaczną masą, co dla mniej wytrzymałych konstrukcji nośnych mogłoby stanowić nadmierne obciążenie.

Niestety opis przedstawionej konstrukcji, pomimo iż w bardzo przystępny sposób wyjaśnia zasadę działania urządzenia, jest bardzo krótki, obejmuje jedynie kilka rysunków technicznych, zdjęcia podzespołów, oraz wygląd urządzenia po złożeniu i w trakcie pracy. W mojej ocenie opis konstrukcji urządzenia mógłby być bardziej rozwinięty, zawierać więcej rysunków technicznych i opisów zmian konstrukcyjnych. Skrócowa forma załączonego opisu konstrukcji urządzenia jest oczywiście dopuszczalna dla tak obszernej pracy, jednak nawet wtedy wskazane byłoby zamieszczenie bardziej obszernej dokumentacji technicznej, jako załącznika do pracy.

Na szczególną uwagę zasługuje rozdział poświęcony opracowanej metodyki prowadzenia pomiarów mechanicznych. Doktorant zbudował prototypowy aparat przeznaczony do testów zginania, co pozwoliło na prowadzenie testów bez dostępu do maszyn laboratoryjnych, w warunkach warsztatowych. Podobnie jak w przypadku konstrukcji prototypowego ekstrudera, opis konstrukcji i sposobu działania zastępczej maszyny wytrzymałościowej jest bardzo skrótowy. W mojej ocenie bardziej szczegółowy opis konstrukcji urządzenia mógłby stanowić wartościowy załącznik do pracy. Niemniej z opisu zamieszczonego w pracy wynika iż urządzenie może spełniać rolę aparatury testowej, zwłaszcza przy testach o charakterze porównawczym, które nie opierają się na ścisłych zasadach zawartych w normach ISO lub ASTM.

Próby technologiczne druku 3D na głowicy rotującej zostały przeprowadzone z użyciem 3 odmian materiałów napelnionych włóknami węglowymi. Autor wybrał do testów filament y na bazie poli(tereftalanu etylenu) PET, poliamidu PA oraz polipropylenu PP. Wybór materiałów nie został szczegółowo uzasadniony w tekście pracy, jednak przypuszczalnie autor chciał wykonać testy dla materiałów o odmiennych właściwościach osnowy, tak by możliwa była ocena efektywności opracowanego procesu w możliwie szeroki aspekcie. Podrozdział dotyczący konstrukcji głowicy rotującej kończy prezentacja wyników wstępnych pomiarów mechanicznych, jednak analiza wyników został na tym etapie pominięta w opisie. Autor w kolejnym podrozdziale skupia się na analogicznym opisie koncepcji i sposobu wykonania systemu podgrzewania powierzchni materiału laserem.

Podrozdział 4.4 stanowi opis rozwiązania konstrukcyjnego ekstrudera obejmujący głowicę rotującą oraz podgrzewacz laserowy. Struktura tekstu w tej części pracy jest analogiczna do poprzedniego podrozdziału, przy czym skupia się w głównej mierze na opisie procesu konstrukcyjnego dla podgrzewacza laserowego, pomijając już uprzednio zaprezentowane prace związane z budową głowicy rotującej. Podobnie jak w poprzednim przypadku opis kończy się zestawieniem wyników pomiarów mechanicznych, w tym przypadku autor przygotował zestawienie obejmujące charakterystyki otrzymane dla próbek wykonanych w trybie: a) standardowego trybu druku; b) z załączonym grzaniem laserem; c) w trybie druku z rotacją głowicy; d) wytwarzania z użyciem głowicy rotującej i podgrzewacza laserowego.

Zastawienie wyraźnie wskazuje na pozytywne efekty zastosowanych modyfikacji dla próbek z PA i PET, natomiast dla próbek na bazie PP wprowadzone modyfikacje pogarszają wyniki wytrzymałościowe. Biorąc pod uwagę spodziewany ciąg logiczny prac badawczych tego typu, autor powinien przedstawić na tym etapie wyniki badań strukturalnych, przeprowadzić głębszą analizę wyników pomiarów mechanicznych lub przynajmniej zaprezentować szczegółową inspekcję wyglądu przełomów próbek, jednak w pracy trudno doszukać się informacji tego typu. Autor kolejnym podrozdziale 4.5 przechodzi do opisu koncepcji wytwarzania FFF/FDM z użyciem płyty grzejnej.

Biorąc pod uwagę bardzo obszerny opis opracowywanej techniki druku z grzaną płytą, koncepcja ta wydaje się stanowić końcowy wynik przeprowadzonych eksperymentów. Tym razem konstrukcja urządzenia została w całości opracowana pod kątem przeprowadzenia planowanych testów. Autor zdecydował się też na zmianę materiału przetwarzanego w trakcie prób technologicznych na PEEK z zawartością 10% włókien węglowych. Polieteroteroeton jest jednym z najbardziej wymagających tworzyw stosowanych w technikach addytywnych, dlatego sam fakt zastosowania tego materiału w testach nowej technologii jest dużym wyzwaniem.

Opis podstaw konstrukcji nowego urządzenia wraz z opisem podstawowych jego podzespołów został podobnie jak w przypadku dwóch poprzednich metod przedstawiony w bardzo skrótowy sposób, podobnie jak dla poprzednich podrozdziałów wartościowe byłoby uzupełnienie pracy o dokumentację techniczną konstrukcji urządzenia. Niemniej z opisu zamieszczonego w pracy można wywnioskować iż wszystkie prace konstrukcyjne zostały zakończone sukcesem i planowane urządzenie mogło zostać wykorzystane do testów technologicznych, co potwierdzają zamieszczone wyniki pomiarów mechanicznych próbek. Podobnie jak dla poprzednio drukowanych próbek na bazie PA, PET oraz PP, pomiary mechaniczne prowadzone były metodą zginania trójpunktowego, na próbkach o zmniejszonych rozmiarach. Dla materiałów na bazie PEEK pomiary prowadzone były na maszynie wytrzymałościowej, co w zasadniczy sposób zwiększa wiarygodność otrzymanych wyników. Niestety wskazuje to też na pewną niekonsekwencję, ponieważ wyniki prób prowadzonych dla próbek wytwarzanych techniką druku FDM z podgrzewaną płytą nie mogą być porównywane z uprzednio wytworzonymi próbkami.

W celu dokładnej oceny wpływu poszczególnych parametrów procesu druku na właściwości mechaniczne otrzymanych próbek autor przeprowadził ocenę wielokryterialną w oparciu o plan eksperymentu. W opisywanej analizie autor wyszczególnił trzy kluczowe zmienne: temperaturę dyszy,

moc grzałki oraz przepływ powietrza. Właśnie te parametry stanowiły główne zmienne w trakcie testów technologicznych. Wybór tych czynników uważam za prawidłowy, również zakres zmienności każdego z nich wydaje się z perspektywy wyników prawidłowy.

Omówienie wyników testów mechanicznych zostało dla tej części pracy przedstawione w bardziej obszerny sposób, autor zamieścił w pracy zdjęcia przełomów kilku próbek, oraz wykresy z przeprowadzonych prób zginania. Podobnie jednak jak w przypadku opisu wyników dla próbek wytwarzanych przy użyciu głowicy rotującej i lasera, przedstawiona analiza jest raczej wybiórcza i nie ułatwia czytelnikowi prześledzenia pełnego raportu z prób mechanicznych.

Ostatnia z kluczowych podrozdziałów pracy (4.6.6.) stanowi analiza merytoryczna wyników badań mechanicznych próbek wytwarzanych z udziałem instalacji gorącej płyty. W tej części pracy autor opracował szczegółowe zestawienie wyników, w których zawarł opis wielu istotnych zjawisk tendencji pojawiających się w trakcie zmiany poszczególnych czynników w zaplanowanym eksperymencie.

4. Uwagi szczegółowe

Uwagi przedstawione w poniższym zestawieniu stanowią komentarz do pracy, odnoszą się głównie do pewnych niekonsekwencji wynikających z podjętej metodyki prac. Wyszczególnione uwagi nie mają charakteru merytorycznego, gdyż w samej pracy rażąco błędów tego typu trudno się doszukać. Wskazane jest jednak by autor odniósł się do tych komentarzy w trakcie dalszej procedury dyplomowej w formie pisemnej lub ustnej.

1. W pracy występuje pewne niekonsekwencja dotycząca zastosowania różnych materiałów kompozytowych na kolejnych etapach prac. Czy autor przeprowadził testy z wykorzystaniem urządzenia z podgrzewaną płytą również dla innych materiałów niż PEEK?
2. Brak konsekwencji jest zauważalny również w przypadku sposobu analizy wyników badań mechanicznych, gdzie szersze badania obejmujące oględziny przełomów próbek zostały przeprowadzone tylko dla próbek z materiału PEEK/CF. W jaki sposób zastosowanie głowicy rotującej i podgrzewacza laserowego wpłynęło na mechanizm pęknięcia próbek na bazie filamentu z PA, PET oraz PP?
3. W przypadku części prób mechanicznych testy zostały przeprowadzone na maszynie własnej konstrukcji, co może mieć wpływ na wiarygodność wyników. Czy autor wykonał pomiary walidacyjne na standaryzowanej maszynie, w celu zweryfikowania prawidłowości wyników uzyskanych na prototypowym urządzeniu, lub czy w jakikolwiek inny sposób zweryfikował poprawność wyników?
4. Ocena adhezji międzywarstwowej oparta jest o wyniki uzyskane w testach zginania, dodatkowo autor ograniczył analizę do wskaźnika wytrzymałości. Czy w ramach pracy były podjęte próby innego rodzaju, tak by ocenić korelację właściwości mechanicznych do zmian strukturalnych?

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Analiza przesłanego do recenzji tekstu pracy pozwala na sformułowanie kilku kluczowych dla procedury dyplomowej wniosków.

- badania naukowe zostały wykonane zgodnie z najnowszą wiedzą z zakresu konstrukcji oprzyrządowania przeznaczonego do obróbki przyrostowej techniką FDM/FFF, wyniki pracy wnoszą nową wiedzę w dziedzinie nauk technicznych,

- z treści pracy można wywnioskować, iż autor rozprawy wykazała się wysoką samodzielnością, zarówno na etapie planowania eksperymentu jak i w trakcie jego realizacji, gdzie musiał dokonywać licznych modyfikacji pierwotnej konstrukcji opracowywanych maszyn i oprzyrządowania,
- rozprawa doktorska przygotowana w postaci monografii stanowi wartościowe podsumowanie dla przeprowadzonych prac konstruktorskich i pomiarów technologicznych, znaczna część wyników ma też wysoki potencjał publikacyjny,
- praca odnosi się do bardzo istotnych problemów związanych z ograniczeniami technik wytwarzania przyrostowego, rozwiązania zaprezentowane w rozprawie mogą pozwolić na ograniczenia negatywnych zjawisk w trakcie wytwarzania wyrobów technicznych,
- główna teza pracy została potwierdzona, w przypadku większości zastosowanych modyfikacji metody FDM/FFF wyniki uzyskane przez autora wskazują na zauważalną poprawę wytrzymałość międzynarodowej wytwarzanych części,

Biorąc pod uwagę powyższe wnioski należy stwierdzić, że rozprawa doktorska pt. „*Nowe metody poprawy więzi międzywarstwowej w produktach z tworzyw i kompozytów polimerowych wytwarzanych technologią drukowania 3D FDM*” spełnia wszystkie wymogi pracy doktorskiej opisane w ustawie „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”. W związku z powyższym stwierdzeniem chciałbym prosić o przyjęcie rozprawy Pana Grzegorza Florka i realizację dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Signed by /
Podpisano przez:

Jacek
Andrzejewski

Date / Data:
2024-11-13 21:21