

Rzeszów, 29.11.2023

prof. dr hab. inż. Grzegorz Budzik
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Katedra Konstrukcji Maszyn
Al. Powstańców Warszawy 12
35-959 Rzeszów

Recenzja rozprawy doktorskiej
pt. IDENTYFIKACJA WŁAŚCIWOŚCI METRIAŁOWYCH ORAZ ZASTOSOWANIE
KORELACJI CYFROWEJ OBRAZU DO BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI CZĘŚCI
WYTWORZONYCH W TECHNOLOGII MATERIAL JETTING
Autor: mgr inż. Natalia Majca-Nowak
promotor: prof. dr hab. inż. Paweł Pyrczanowski

Podstawa recenzji

Pismo prof. dr hab. inż. Roberta Sitnika Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej numer RND IM.521.45.2023 z dnia 16 października 2023 roku o wyznaczeniu na recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora mgr inż. Natalii Majcy-Nowak w oparciu o dysertację pt. Identyfikacja właściwości materiałowych oraz zastosowanie korelacji cyfrowej obrazu do badania wytrzymałości części wytworzonych w technologii Material Jetting.

1. Wprowadzenie

Tematyka przedstawionej do recenzji pracy dotyczy badań identyfikacji właściwości materiałowych oraz zastosowania korelacji cyfrowej obrazu do analizy wytrzymałości części wytworzonych z zastosowaniem procesu warstwowego nadruku ciekłego fotopolimeru utwardzanego światłem UV emitowanym z lampy zintegrowanej z głowicą drukującą określonym w normach jako Material Jetting - MJT. Tytuł dysertacji odzwierciedla jej obszar tematyczny, a podjęte zagadnienia są aktualne z punktu widzenia naukowego i aplikacyjnego. Proces MJT należy obecnie do jednej z bardziej precyzyjnych metod wytwórczych wykorzystujących addytywne nakładanie materiału płynnego. Stosuje się tu żywice, które po utwardzeniu charakteryzują się różnymi parametrami wytrzymałościowymi i mogą być przeznaczone do określonych zastosowań m.in. do wytwarzania elementów maszyn, narzędzi przetwórczych, szablonów medycznych prototypów wizualnych łącznie z drukiem kolorów i tekstur.

Producenci żywic stosowanych w tym procesie podają parametry przetwórcze i wytrzymałościowe materiałów w stanie utwardzonym, należy jednak pamiętać, że są to wartości uśrednione nie odnoszące się do szczegółów samego procesu czy określonego usytuowania wytwarzanego wyrobu względem układu współrzędnych drukarki 3D.

Biorąc to pod uwagę badania właściwości wyrobów wytwarzanych z zastosowaniem technologii przyrostowych wykorzystujących fotopolimeryzację warstwową stanowią istotny element poznania parametrów samych procesów przyrostowych jak również stosowanych w nich materiałów.

2. Charakterystyka ogólna rozprawy

Dysertacja przedstawiona do recenzji praca została wydana drukiem i liczy 132 strony zawiera na początku streszczenie w języku polskim i angielskim, spis treści, wykaz wykorzystanych skrótów. Składa się z ośmiu numerowanych rozdziałów oraz bibliografii liczącej 170 pozycji ułożonych w kolejności alfabetycznej, w jej skład wchodzi aktualne i odpowiednie do tematyki dysertacji opracowania monograficzne, artykuły i źródła internetowe. Wykaz literatury nie zawiera norm odnoszących się zarówno do badań materiałów polimerowych jak również procesów i technologii przyrostowych m.in. takich jak: *PN-EN ISO 17295:2023-06E, Wytwarzanie przyrostowe, Zasady ogólne Pozycjonowanie, współrzędne i orientacja części* oraz *ISO/ASTM 52900:2021 Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary*, które z punktu widzenia tematyki pracy mogą być istotne.

Układ rozprawy jest prawidłowy, rozdziały i podrozdziały ułożone są w logicznej kolejności, tworzą spójny układ, pozwalający na właściwą interpretację treści zawartych w kolejnych jej częściach składowych rozprawy.

Cześć merytoryczną pracy rozpoczyna wprowadzenie zawierające przegląd procesów przyrostowych, wady i zalety wybranych technologii druku 3D oraz przykłady zastosowań uwzględnieniem analizy stanu odkształceń opartej o metody optyczne i cyfrową korelację obrazu. Treść rozdziału jest w pewnym sensie analizą stanu zagadnienia, Autorka powołuje się na wiele źródeł internetowych należy tu jednak dodać, że zawarte tam informacje w niektórych przypadkach nie są aktualne z punktu widzenia stosowanej obecnie terminologii czy normowania procesów, co kilku miejscach ma swoje odzwierciedlenie w tekście dysertacji np. tytuł rozdziału „1.1.2. Technika fotopolimeryzacji...”. Fotopolimeryzacja jest procesem, który ma zastosowanie zarówno do utwardzania żywicy w technologii MJT jak też VPP (Vat Polymerization).

Rozdział drugi zawiera tezę cele pracy oparte o przeprowadzoną w poprzednim rozdziale analizę stanu zagadnienia, odnoszącą się do aplikacji technologii przyrostowych do wytwarzania obciążonych mechanicznie części maszyn. Główne cele pracy ujęto jako cztery zagadnienia dotyczące doboru metody przyrostowej do wytwarzania próbek do badań i materiałów na próbki badawcze a także określenia możliwości skrócenia czasu obliczeń i symulacji numerycznych elementów o złożonych kształtach. Przedstawione cele pracy odnoszą się do aktualnych potrzeb badań procesów addytywnych oraz aplikacji przemysłowych, biorąc pod uwagę, że rozprawa została zrealizowana w ramach Wdrożeniowego Programu Doktoranckiego MNiSW. Sformułowano tezę, która zakłada, że modele wytworzone z fotopolimeru Rigur metodą strumieniową druku 3D mają wysoce izotropowe właściwości izotropowe oraz wysoką dokładność geometryczną.

Trzeci rozdział rozpoczyna część badawczą dotyczącą dokładności wymiarowej i kształtowej próbek w kształcie dedykowanym do badań wytrzymałości statycznej na

rozciągania i zginanie. Wykonane zostały modele z zastosowaniem trzech technologii: FDM z materiału ABS i urządzenia Fortus 250MC, SLS z materiału PA12 i urządzenia EOS P395 oraz PolyJet z materiału Vero White Plus i urządzenia Objet 30. Dodatkowo wytworzono modele badawcze w kształcie wymiennika ciepła oraz głowicy turbiny powietrznej. Pomiary zostały wykonane z zastosowaniem skanera 3D Steinbichler Comet L3D, wyniki pomiarów porównano z modelem nominalnym opartym na geometrii 3D-CAD próbki badawczej. Szczegółowej analizie poddano geometrię próbek wykonanych z zastosowaniem procesu Material Jetting w różnych ustawieniach modeli względem platformy roboczej drukarek 3D oraz z wybranych materiałów polimerowych.

Rozdział czwarty zawiera wyniki badań i analiz opartych o cyfrową korelację obrazu DIC (Digital Image Correlation) próbek wytworzonych przyrostowo z zastosowaniem technologii FDM (materiał ABS plus), SLS (materiał Nylon 12 PA) i PJ (materiał Vero White). Wybrane właściwości materiałów stosowanych na próbki badawcze przedstawiono w tabeli 10 łącznie z podaniem normy do testowania, jednak jak wcześniej wspomniano nie ma w pracy odniesienia do norm literaturze. W pierwszej części rozdziału przedstawiony jest opis badań, który można uznać, że przedstawia metodykę badawczą. Do badań zastosowano aparaturę Aramis oraz oprogramowanie GOM Correlate, w tekście napisano, że widok stanowiska przedstawia rysunek 64, jednak rysunek 64 to wykres krzywej rozciągania. Badania rozciągania próbek wykonano z zastosowaniem maszyny wytrzymałościowej MTS Landmark 370.10 natomiast do pomiaru pola odkształceń użyto dwóch kamer Grasshopper GRAS-5S5M o matrycy 5 Mpx. Rysunek 52 przedstawia widok stanowiska badawczego, jednak nie ma w tekście odwołania do tego rysunku. Rozdział przedstawia szereg wyników badań w postaci wykresów krzywych rozciągania, krzywych rozkładu odkształceń odnosząc dane uzyskane na stanowisku badawczym do wyników symulacji wykorzystujących metodę elementów skończonych. Na końcu rozdziału znajduje się krótkie posumowanie, w którym Doktorantka ocenia możliwości zastosowania badań wykorzystujących cyfrową korelację obrazu do analizy modeli wytwarzanych z zastosowaniem technologii addytywnych.

W rozdziale piątym przedstawione są wyniki badań właściwości wytrzymałościowych uzyskanych podczas statycznego rozciągania próbek wykonanych z zastosowaniem przyrostowego procesu MJT z materiałów typu: VisiJet, Vero White, Rigur, Durus White, Digital ABS. Do badań zastosowano system tensometryczny Vishay CEA-06-125-UT0350, ekstensometr EKS025-1 oraz maszynę wytrzymałościową MTS Landmark 350.10, próbę wykonano w oparciu o normę ISO 527-1:12. Badania miały na celu uzyskania informacji dotyczących wpływu kierunku druku 3D wytworzonych próbek na ich wytrzymałość statyczną. Doktorantka zakłada tu hipotezę, w której odnosi izotropowość materiału do badanego modułu Younga dla próbek wytwarzanych przyrostowo dla dwóch kierunków ułożenia warstw modelu badawczego: pionowym (dłuższy wymiar próbki ułożony wzdłuż kierunku nakładania warstw) i poziomym (dłuższy wymiar próbki ułożony w płaszczyźnie nakładania warstw). Wyniki badań zestawiono w tabeli oraz przedstawiono graficznie. W podsumowaniu stwierdzono, że materiał typu Rigur może być z powodzeniem stosowany do wytwarzania elementów o złożonej geometrii ze względu na najlepsze właściwości izotropowe.

Rozdział szósty dotyczy prób wytrzymałościowych próbek badawczych wytworzonych z materiału Rigur. Rozdział rozpoczyna się od podrozdziału 6.1

zatytułowanego „*Metodologia*”, co określa generalnie naukę o metodach badawczych, a podrozdział ten opisuje raczej metodykę badawczą czyli sposób realizacji. Próbkę do badań wykonano z zastosowaniem drukarki 3D typu Objet30 PRO, natomiast badania właściwości wytrzymałościowych z zastosowaniem maszyny MTS 322 oraz systemu cyfrowej korelacji obrazu. Wyniki badań przedstawiono w postaci tabelarycznej i graficznej jednak tekst opisujący badania w niektórych miejscach jest nieprecyzyjny. Dla przykładu tekst opisujący tabelę 22 i 23 odnoszący do grubości warstwy jest niejednoznaczny, ponieważ w tabelach tych nie ma takiego parametru jak grubość warstwy, jest określone jako seria (1, 2, 3) i aby znaleźć grubość warstwy próbki w danej serii czytelnik musi się cofnąć do tabeli 21. Podrozdział 6.2.2. rozpoczyna się tekstem „*Podsumowanie wyników ze względu na parametry wydruków w wykończeniu matowym i błyszczącym zebrano w tab. 24 i 25*”. W rzeczywistości nie jest to podsumowanie wyników tylko zestawienie tabelaryczne wyników. Można się również zastanawiać co oznacza określenie „...na profesjonalnej drukarce Conneex 3...” (str. 108, 114, 115). Słowo „profesjonalna” jest tu nieodpowiednie ponieważ odnosi się do umiejętności i poziomu wykonywanej zawodowo czy zleconej za wynagrodzeniem pracy, tu zostało użyte do określenia drukarki 3D. Przy tej okazji, chciałem zauważyć że pracy znajdują się tego typu i inne błędy stylistyczne, stwierdzenia takie mogą być akceptowalne w przypadku wygłaszania referatów o charakterze marketingowym czy ogólnotechnicznym, jednak w pracy doktorskiej, należy zwracać uwagę aby stosować określenia techniczne i nazewnictwo dostosowane do rangi opracowania. W rozdziale tym przedstawiony jest szereg analiz uzyskanych wyników badań a końcowej części zawarte jest podsumowanie badań materiału Rigur oparte o dane z cyfrowej korelacji obrazu.

Siódmy rozdział stanowi podsumowanie i wnioski odnoszące się do całości badań i analiz przedstawionych w dysertacji. W pierwszej części wniosków padają stwierdzenia o charakterze dość ogólnym np. „*Technologia PolyJet wyróżnia się dokładnością, łatwością obsługi...*”, nie odniesione konkretnie do badań czy analiz. W dalszej części wniosków Autorka przedstawia porównanie badanych przez nią technologii odnosząc się do wyników badań wykorzystujących cyfrową korelację obrazu oraz analizę prób wytrzymałości mechanicznej.

Rozdział ósmy zawiera propozycję dalszych badań, które mogą obejmować szersze zastosowanie analizy oparte o symulacje MES dla obiektów o złożonych kształtach, a także rozwinięcie badań w zakresie struktur uzyskiwanych w procesach przyrostowych.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do oceny dysertacja odnosi się do istotnych zagadnień badawczych z punktu widzenia rozwoju nauki i aplikacji w dyscyplinie inżynierii mechanicznej w obszarze badań właściwości wyrobów kształtowanych w procesach przyrostowych.

Podstawowym celem pracy było badanie wybranych metod przyrostowych w aspekcie analizy stosowanych w nich materiałów polimerowych i ich właściwości oraz możliwości skrócenia czasu obliczeń i symulacji numerycznych z wykorzystaniem danych uzyskanych w procesie badań wytrzymałościowych przy użyciu cyfrowej korelacji obrazu.

Analizując treść rozprawy można stwierdzić, że cel rozprawy został osiągnięty w zakresie naukowym i użytkowym.

Pierwsza część pracy zawiera analizę trzech procesów przyrostowych, w których do wytwarzania modeli stosuje się materiały polimerowe, i do których należą metoda ekstruzji warstwowej polimerów termoplastycznych (technologia FDM), metoda spajania proszków złożu (technologia SLS), metoda warstwowego nadruku żywicy fotopolimerowej (technologia MJM i PolyJet). W części tej oprócz próbek do badań wytrzymałościowych zostały wykonane modele głowicy turbiny wiatrowej i wymiennika ciepła, co nie do końca koresponduje z głównym nurtem badań przedstawionych w pracy. Wykonano pomiary i analizę dokładności geometrycznej z zastosowaniem skanera optycznego. Sam proces skanowania optycznego posiada pewne elementy analizy obrazu i tworzenia zbioru punktów niezbędnego do budowy siatki, która jest wykorzystywana w procesie analizy wyników pomiarów. Nie jest to jednak typowa zdefiniowana w tytule cyfrowa korelacja obrazu. Badaniom poddano również rozdzielczość modeli wymienników ciepła wytworzonych w procesach przyrostowych, co z kolei również nie odnosi do głównego nurtu pracy. Wyniki te mogą stanowić wartość dodaną, jednak nie musiały być zamieszczone w pracy. W tej części znajduje się kilka błędów w opisach rysunków np. rys. 23 i 24, gdzie napisane jest „*Model pełnowymiarowy ... w skali 1:1*”. Patrząc się na te ilustracje można zobaczyć, że nie są to modele pełnowymiarowe w skali 1:1 a właściwie są to widoki izometryczne modeli 3D-CAD tych elementów i to w skali nieokreślonej. Skala rysunku odnosi się do krotności powiększenia lub pomniejszenia wymiarów na rysunku względem rzeczywistych wymiarów obiektu. Rysunek 25 przedstawia widok map odchyłek modeli głowicy turbiny i wymiennika ciepła, a nie jak to opisano skrótowo myślowym „*skany modeli*”, podobna uwaga odnosi się to do rysunków od 26 do 31. Badaniom poddano rozdzielczość przedmiotowych technologii na podstawie modeli wymienników ciepła wykonanych w różnej skali. Trudno tu jednak określić rzeczywistą rozdzielczość tego modelu, ponieważ podane są tylko jego gabaryty zewnętrzne na rysunku 42, co nie daje możliwości oceny dokładności szczegółów modelu. Właściwie można tą część pracy określić jako ocenę wizualną modeli wykonanych w różnej skali. Z punktu widzenia badawczego należałoby zaprojektować model, który charakteryzuje się założonymi parametrami geometrycznymi, model taki można poddać procesowi pomiarowemu w celu wyznaczenia rozdzielczości danego urządzenia wytwórczego. Dodatkowo rysunki 43 do 50 opisano jako wymienniki ciepła, które zostały wykonane z materiałów polimerowych o niskiej przewodności cieplnej, w technice raczej nie jest uzasadnione wytwarzanie wymienników ciepła z tego typu materiałów. Z tego względu można zauważyć, że raczej są to modele geometryczne wymienników ciepła, a część pracy związana z wydrukiem tych modeli mogłaby zostać pominięta.

Praca zawiera szeroki materiał badawczy, wykorzystano odpowiednie urządzenia wytwórcze i aparaturę badawczą, można stwierdzić że Autorka posiada odpowiednią wiedzę i aparat badawczy pozwalający na właściwe omówienie wyników badań oraz ich analizę, szczególnie w zakresie tematyki pracy dotyczącej identyfikacji właściwości materiałowych oraz zastosowania cyfrowej korelacji obrazu do oceny modeli wytworzonych w procesie MJT z materiałów polimerowych.

Badawczy charakter pracy w jej znacznej części pozwala na uzyskanie wyników, których analiza ma charakter naukowy, jednocześnie może stanowić materiał do praktycznego zastosowania w rozwiązaniach przemysłowych. Jest to istotne szczególnie przy realizacji prac doktorskich charakterze użytkowym w ramach programu Doktorat Wdrożeniowy.

Wyniki badań wytrzymałościowych i analiz metodą korelacji cyfrowej pozwoliły Autorce sformułować stwierdzenie, mówiące że anizotropia modeli wytwarzanych metodami przyrostowymi jest przyczyną różnic modułów sprężystości próbek wykonanych w różnym położeniu względem układu współrzędnych drukarki 3D. Dodatkowo stwierdzono, że możliwe jest wykonanie z metodą druku 3D obiektów o strukturze izotropowej przy użyciu technologii PolyJet z materiału Rigur.

4. Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji dysertacja dotyczy istotnych zagadnień, odnoszących się do analizy właściwości wytrzymałościowych obiektów wytworzonych metodami przyrostowymi. Zastosowanie cyfrowej korelacji obrazu do badań wytrzymałościowych i opracowane na tej podstawie założenia metody pośredniej oceny izotropii próbek stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Temat pracy został wybrany w sposób przemyślany i trafny, a jej zakres spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktorantki w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Układ formalny pracy jest zgodny z wytycznymi dla dysertacji doktorskich, zawiera odpowiednią bibliografię i materiał ilustracyjny. Praca odnosi się do aktualnej wiedzy, wnosi treści nowe w obszarze badań naukowych a także ich możliwości aplikacji przemysłowych. Pracę rozpoczyna części teoretyczna będąca jednocześnie analizą stanu zagadnienia, sformułowane cele badawcze zostały osiągnięte a opracowana analiza wyników badań stanowi oryginalny wkład Autorki w obszarze dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna. W mojej ocenie przedstawiona dysertacja świadczy o kompetencjach Autorki w zakresie samodzielnego prowadzenia prac naukowych o charakterze badawczym i wdrożeniowym.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska pt. „Identyfikacja właściwości materiałowych oraz zastosowanie korelacji cyfrowej obrazu do badania wytrzymałości części wytworzonych w technologii Material Jetting” autorstwa mgr inż. Natalii Majcy-Nowak, spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. 2018 poz. 1668 w zakresie dyscypliny inżynieria mechaniczna, w mojej ocenie może być dopuszczona do publicznej obrony.

Grzegorz Buchnik