

Rzeszów, 13.09.2024

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. Kształtowanie właściwości wytrzymałościowych struktur komórkowych wytworzonych przyrostową techniką SLM/DMLS
autor: mgr inż. Kevin Moj
promotor: dr hab. inż. Grzegorz Robak, profesor PO
promotor pomocniczy: dr inż. Robert Owsiański

Podstawa recenzji

Pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Opolskiej dr hab. inż. Piotra Niestonego, prof. PO numer RNDIM/101/2024 z dnia z dnia 11 lipca 2024 dotyczące opracowania recenzji rozprawy doktorskiej pt. Kształtowanie właściwości wytrzymałościowych struktur komórkowych wytworzonych przyrostową techniką SLM/DMLS, autor mgr inż. Kevin Moj.

1. Wprowadzenie

Dynamiczny rozwój technologii przyrostowych powoduje, że coraz częściej stosowane są do wytwarzania wysoko obciążonych i odpowiedzialnych elementów konstrukcyjnych maszyn i urządzeń. Modelowanie obiektów przeznaczonych do wytwarzania metodami przyrostowymi daje projektantom wiele swobody w odniesieniu do koncepcji geometrycznej oraz zastosowania programowych narzędzi opartych np. na procesach optymalizacji topologicznej. Należy jednak pamiętać, że modelowanie i symulowanie wytrzymałości wymaga wprowadzenia odpowiednich warunków granicznych, które często nie mogą opierać się na standardowych danych z badań wytrzymałościowych. Odnosi się to zarówno do modeli jednorodnych jak też wykorzystujących specjalnie projektowane struktury komórkowe.

Procesy przyrostowe pozwalają na projektowanie i wytwarzanie wyrobów z wykorzystaniem specyficznych struktur komórkowych, które często są trudne czy niemożliwe do wykonania z zastosowaniem klasycznych technologii. Zastosowanie tego typu struktur pozwala na uzyskanie dla danego elementu wysokiej wytrzymałości mechanicznej przy relatywnie małym ciężarze. Określenie rzeczywistej wytrzymałości struktur komórkowych wymaga przeprowadzenia szeregu badań, ponieważ mimo założonej

geometrycznie jednorodności struktury sam proces wytwarzania przyrostowego generuje różnice właściwości mechanicznych wynikające m.in. z zastosowanego materiału, stosowanej technologii, grubości warstwy czy ułożenia modelu w komorze roboczej drukarki 3D. Dodatkowo w przypadku procesu spajania proszków metali w łożu (PBF – Powder Bed Fusion) często stosuje się proszki różnych producentów, proszki mieszane, gdzie w skład frakcji wchodzi proszek nowy i pochodzący z odzysku po poprzednich procesach. Jest to ekonomicznie i ekologicznie uzasadnione, ponieważ pozwala zastosować wytyczne produkcyjne gospodarki obiegu zamkniętego. Analizując wytrzymałość elementów kształtowanych w procesie przyrostowym jest zależna nie tylko od parametrów samego procesu ale również od innych czynników, które mogą mieć charakter losowy. Z tego względu niezbędne jest prowadzenie badań wytrzymałości modeli wytwarzanych przyrostowo zarówno w kontekście samego obiektu, jak też tworzenia baz danych parametrów wytrzymałościowych dla struktur typu jednorodnego jak też struktur komórkowych. Biorąc to pod uwagę podjęcie przedstawionego w rozprawie tematu należy uznać za celowe i aktualne z punktu widzenia stanu wiedzy, badań naukowych oraz potrzeb obszaru związanego z technologiami przyrostowymi.

Autor przedstawia szereg wyników badań i ich analizę jako element procesu poznawczego, skupia się strukturach komórkowych specjalnie zaprojektowanych do wytworzenia z zastosowaniem technologii DMLS. Tytuł rozprawy odzwierciedla jej obszar tematyczny, a analizowane zagadnienia są aktualne z punktu widzenia naukowego jak też potencjału aplikacyjnego.

2. Charakterystyka ogólna rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca liczy 121 stron, zawiera w początkowej części spis treści oraz spis skrótów i oznaczeń. W dysertacji można wyróżnić kolejno część merytoryczną składającą się z dziewięciu rozdziałów, streszczenie w języku polskim i angielskim oraz spis literatury liczący 150 pozycji. Bibliografia ułożona została w kolejności powołań, w jej skład wchodzi generalnie aktualne i odpowiednio dobrane do tematyki dysertacji opracowania monograficzne, artykuły i normy.

Struktura i układ rozprawy są prawidłowe, rozdziały i podrozdziały ułożone są logicznie, tworząc spójny materiał, pozwalający na właściwą interpretację treści zawartych w kolejnych jej częściach składowych.

W pierwszym rozdziale zawarty jest krótki wstęp dotyczący możliwości zastosowań technologii przyrostowych oraz wytwarzanych przy ich pomocy struktur komórkowych w wybranych obszarach nauki i techniki.

Rozdział drugi pracy dotyczy sposobów wytwarzania struktur komórkowych ze sproszkowanych materiałów w procesach addytywnych opartych na spajaniu proszków w łożu maszyny w wykorzystaniem skoncentrowanego źródła energii. Przedstawione są skrótowo również inne procesy addytywne, których jednak zastosowanie do wytwarzania struktur komórkowych może być ograniczone, szczególnie dla struktur o małych wymiarach, których dotyczy praca. Autor odnosi się do normy ISO/ASTM 52900:2015, jednak nie ustrzegł od się typowych dla doktorantów błędów w terminologii dotyczącej procesów i technologii druku 3D. Dla przykładu konsekwentnie w całej pracy przypisuje technologię SLM do DMLS, której używał do wytworzenia próbek badawczych ze stopów metali. Można zrozumieć, że

wiele popularnonaukowych czy hobbystycznych źródeł internetowych myli te pojęcia, jednak proces DMLS jest opracowany i wykorzystywany przez urządzenia Firmy EOS, nazwa SML była początkowo zarezerwowana dla technologii opracowanej w Instytucie Fraunhofer'a, później przez firmę MCP HEK, później SLM Solutions GmbH. Technologie te należą do grupy procesów PBF (Powder Bed Fusion), co w myśl ostatnich norm powinno być opisane jako spajanie proszków w łożu, a nie jak przedstawił to Autor czy inne źródła, jako spajanie proszków w złożu. Z punktu widzenia samego przyrostowego procesu PBF nie są to istotne błędy, lecz z punktu widzenia producentów i odbiorców technologii może to mieć znaczenie.

Rozdział ten opisuje również narzędzia do modelowania struktur komórkowych ich charakterystykę, metody ich analizy pod względem struktury geometrycznej powierzchni i dokładności wymiarowej.

W rozdziale trzecim przedstawiono przegląd stanu wiedzy rozpoczynając od analizy właściwości mechanicznych struktur komórkowych, poprzez metody analizy numerycznej i jakości tego typu struktur biorąc pod uwagę wpływ chropowatości powierzchni czy porowatości. Z punktu widzenia merytorycznego można zauważyć, że rozdziały drugi i trzeci dotyczą w sumie analizy stanu zagadnienia i mogły stanowić jeden rozdział.

Rozdział czwarty opisuje cel, zakres i hipotezę badawczą pracy, w której założono, że na właściwości mechaniczne struktur komórkowych mają wpływ różne czynniki do których należą m.in.: topologia komórki i jej rozmiar, gęstość względna a ich analiza może pozwolić na zaprojektowania i uzyskanie określonej kombinacji co będzie miało wpływ na właściwości obiektu w makroskali. Celem dysertacji była ocena wpływu topologii powierzchni, wielkości komórki i gęstości względnej na właściwości makroskopowe całej struktury komórkowej.

Rozdział piąty rozpoczyna część doświadczalną pracy, jako opis przedmiotu badań, opisano metody badawcze i procesy wytwarzania struktur komórkowych. W pierwszej części rozdziału przeprowadzono badania mikroskopowe proszków stopów metali, następnie sposób modelowania struktur komórkowych opierając się na doborze danych wejściowych takich jak kształt komórki, wielkość komórki i gęstość względna. Konfiguracja samej struktury opiera się na parametrach z biblioteki programowej. Próbkę wykonano ze stali narzędziowej MS1 i stopu tytanu Ti64 przy użyciu urządzenia EOSINT M280 oraz z poliamidu PA12 przy użyciu drukarki 3D EOS P396 z zastosowaniem parametrów procesu zalecanych standardowo przez producenta drukarek 3D.

W rozdziale szóstym przedstawiono wyniki badań i analiz numerycznych struktur komórkowych opierając się o metodę bryłową oraz homogenizację numeryczną z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS 2023 R3. Ciekawym podejściem do badań jest ich przeprowadzenie w oparciu o nominalne modele numeryczne oraz w oparciu o geometrię pochodzącą z badań próbek wykonanych tomografem komputerowym. Badania miały na celu również określenie minimalnej liczby komórek dla danego modelu. Podjęto również próbę określenia modeli materiałowych na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

Rozdział siódmy dotyczy badań właściwości mechanicznych struktur komórkowych opartych o statyczną próbę rozciągania i statyczną próbę ściskania z wykorzystaniem maszyny Instron 8852. Wyniki badań przedstawiono w formie wykresów oraz tabel dla różnych struktur komórkowych.

W rozdziale ósmym przeprowadzono ocenę jakościową wytworzonych w procesie badawczym struktur komórkowych. Zaproponowano w tym celu schemat badań składający

się kolejnych etapów: skanowanie obiektu, akwizycja danych, obróbka programowa danych, rekonstrukcja 3D, analiza danych pomiarowych i określenie odchyłek. Do badań wykorzystano system Phoenix V Tome xS, parametry skanowania takie jak napięcie, prąd, powiększenie, rozmiar woksela, liczba obrazów, rozmiar plamki oraz czas naświetlania dostosowano do rodzaju próbek. Wyznaczono rzeczywistą gęstość względną definiowaną jako stosunek gęstości struktury komórkowej do gęstości materiału bazowego, jako istotny parametr służący do analizy rzeczywistych właściwości mechanicznych. Określono odchyłki wymiarowe i kształtowe modeli badawczych względem zaprojektowanego modelu nominalnego. Przeprowadzono analizę porowatości struktur komórkowych oraz próbę analizy mechanizmów zniszczenia wybranych struktur komórkowych.

Część merytoryczną zamykają syntetyczne wnioski oraz podsumowanie procesu badawczego i analizy wyników badań. Autor stwierdza, że zostało wykazane powiązanie pomiędzy parametrami struktury komórkowej a właściwościami mechanicznymi projektowanego obiektu co w dużym zakresie jest zbieżne z celem dysertacji określonym jako przeprowadzenie oceny wpływu topologii powierzchni, wielkości komórki i gęstości względnej na właściwości makroskopowe całej struktury komórkowej. Jednak nieco na wyrost sformułowano wniosek, że wykazano iż odpowiednie dopasowanie parametrów struktury komórkowej pozwala na zaprojektowanie materiału porowatego o precyzyjnie ustalonych właściwościach mechanicznych. Wydaje się, że pomyłono tu materiał i proces jego przetwarzania z obiektem badań (elementem czy wyrobem), który można wykonać z zastosowaniem zadanej struktury komórkowej wykorzystując technologie przyrostowe.

Do pracy dołączono dodatkowo jej wersję elektroniczną na pycie CD oraz raport z badania antyplagiatowego wygenerowany przez Jednolity System Antyplagiatowy i zaakceptowany przez promotora dr hab. inż. Grzegorza Robaka, prof. Politechniki Opolskiej.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do oceny praca dotyczy istotnych problemów naukowych, dla których obecnie niewiele jest dostępnych źródeł wiedzy, podjęta tematyka może mieć zastosowanie interdyscyplinarne, jednak w większości dotyczy ważnych zagadnień badawczych z punktu widzenia rozwoju dyscypliny inżynieria mechaniczna.

Celem dysertacji było przeprowadzenie oceny wpływu topologii powierzchni, wielkości komórki i gęstości względnej na właściwości makroskopowe całej struktury komórkowej, co można uznać, że zostało osiągnięte w wyniku jej realizacji. Badawczy charakter pracy pozwolił na uzyskanie wyników, których analiza ma aspekt naukowy, jednocześnie może stanowić materiał mający potencjał zastosowania w obszarach inżynierii materiałowej i inżynierii mechanicznej.

Przedstawiona do recenzji praca zawiera pewne treści, które wymagają pewnych wyjaśnień, lub dyskusji odnoszącej się do problemów badawczych czy terminologii.

Temat pracy dotyczy kształtowania właściwości wytrzymałościowych struktur komórkowych wytworzonych przyrostową techniką SLM/DMLS, która to przeznaczona jest do przetwarzania sproszkowanych stopów metali, dlatego pojawia się pytanie z jakiego powodu praca zawiera wyniki badań i treści dotyczące wytwarzania struktur komórkowych materiału polimerowego poliamid PA12. Materiał ten nie jest związany z tematyką pracy, Autor nie przedstawia dodatkowych rozważań dotyczących podobieństwa modelowego

w zakresie wytrzymałości elementów o strukturach komórkowych wytworzonych z zastosowaniem procesu PBF z materiałów polimerowych i stopów metali. Z tego względu treści dotyczące badań polimeru PA12 w pracy można uznać za zbędne.

Praca zawiera podrozdział 5.2.2, który dotyczy przygotowania próbek do wydruku 3D i doboru parametrów procesu, gdzie Autor pisze, że korzystał z ustawień zalecanych przez producenta. Samo przygotowanie modeli przedstawia bardzo syntetycznie wykorzystując ilustracje mało oddające to zagadnienie w tym rysunki są dość małych rozmiarów (rys. 5.6). Technologia DMLS wymaga stosowania konstrukcji mocujących model do platformy roboczej tzw. podpór, które mają za zadanie wspierać wytwarzany model jak też odprowadzać od wyrobu ciepło generowane podczas procesu spajania wiązką lasera. Ułożenie modeli względem platformy roboczej urządzenia może mieć nieraz kluczowe znaczenie dla procesu projektowania konstrukcji podpierających, samego procesu spajania proszku, możliwości powstawania odkształceń procesowych, wad termicznych i docelowo wytrzymałości mechanicznej. Rozmieszczenie modeli w przestrzeni roboczej drukarki 3D, co jest związane z generowaniem konstrukcji podpierających, nie należy do ustawień fabrycznych i jest zabiegiem wykonywanych przez operatora urządzenia. Biorąc to pod uwagę informacje te powinny być przedstawione w pracy w szerszy sposób, ze względu na jej tematykę i stosowaną technologię DMLS.

Praca napisana poprawnym językiem, zawiera bogaty materiał ilustracyjny, jednak Autor zastosował w tytułach podrozdziałów tę samą czcionkę co w pozostałym tekście, zmiana wielkości czcionki tytułów poprawiła by czytelność opracowania. Wiele wykresów przedstawionych jest w dość małym rozmiarze w wersji drukowanej, biorąc to pod uwagę dołączenie pliku w formacie PFD z treścią rozprawy było uzasadnione.

Autor stwierdził we wnioskach, że zaproponował zoptymalizowaną metodę do analizy numerycznej struktur komórkowych, wykorzystując technikę homogenizacji numerycznej na podstawie modeli uzyskanych z procesu tomografii komputerowej podczas badania wytworzonych próbek. Wydaje się, że stwierdzenie to sformułowano na wyrost, ponieważ nie podano kryteriów optymalizacji i założeń samego procesu optymalizacyjnego. Dodatkowo odnosząc się do samego przygotowania i wytworzenia próbek, który opisany jest bardzo skromnie, raczej w pracy przeprowadzono analizę numerycznych modeli struktur komórkowych, jednak nie do końca odniesionych do samego procesu DMLS.

Przedstawienie badań i omówienie właściwości mechanicznych struktur komórkowych jest szerokie. Analizując treść pracy i przedstawione wyniki badań można stwierdzić, że stanowi istotny wkład w zakresie wiedzy dotyczącej badań elementów wytwarzanych przyrostowo, ma również charakter oryginalnego rozwiązania problemu naukowego w obszarze wiodącej dyscypliny. Wyniki badań mogą mieć interdyscyplinarne zastosowanie jednak są osadzone naukowo i metodycznie w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

4. Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji rozprawa przedstawia istotne zagadnienia, dotyczące badań i analizy właściwości mechanicznych struktur komórkowych wytwarzanych z proszków stopów metali z zastosowaniem procesu PBF. Przeprowadzone badania oraz analiza wyników, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Temat pracy został

wybrany w sposób przemyślany i trafny, a jej zakres spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskimi prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Układ formalny pracy jest zgodny z wytycznymi dla prac 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. Dysertacja zawiera część teoretyczną będącą jednocześnie analizą stanu zagadnienia. Sformułowane cele badawcze zostały osiągnięte a opracowana analiza wyników badań stanowi oryginalny wkład Autora w obszarze dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna. W mojej ocenie przedstawiona dysertacja świadczy o kompetencjach Autora w zakresie samodzielnego prowadzenia prac naukowych o charakterze badawczym z wysokim potencjałem wdrożeniowym.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska pt. „Kształtowanie właściwości wytrzymałościowych struktur komórkowych wytworzonych przyrostową techniką SLM/DMLS” autor mgr inż. Kevin Moj, spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. 2023 poz. 742 w zakresie dyscypliny inżynieria mechaniczna, w mojej ocenie może być dopuszczona do kolejnych etapów procedury przewodu doktorskiego.

Gregorz Budyński