

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

Rzeszów, 10.07.2025

Recenzja rozprawy doktorskiej
pt. OCENA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH ELEMENTÓW WYTWARZANYCH
TECHNOLOGIĄ DRUKU 3D DO ZASTOSOWAŃ BIOMEDYCZNYCH
autor: mgr inż. Paweł Szczygieł
promotor: dr hab. inż. Jerzy Bochnia, prof. PŚk
promotor pomocniczy: dr hab. inż. Tomasz Kozior, prof. PŚk

Podstawa recenzji

Pismo dr hab. inż. Sławomira Błasiaka, prof. PŚk, Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej numer MAA-411/70/2025 z dnia z dnia 20.05.2025 dotyczące powołania na recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora Panu mgr inż. Paweł Szczygieł w oparciu dysertację pt. Ocena właściwości mechanicznych elementów wytwarzanych technologią druku 3D do zastosowań biomedycznych.

1. Wprowadzenie

Rozwój nowoczesnych technologii przemysłowych i medycznych jest możliwy dzięki integracji wielu dyscyplin naukowych m.in. z obszaru modelowania numerycznego, systemów informatycznych, metod wytwarzania, inżynierii materiałowej, wytwarzania przyrostowego, inżynierii medycznej czy bioinżynierii. W wielu przypadkach przemysł wymaga szybkiej reakcji na otaczający rynek i stosowania innowacyjnych rozwiązań opartych o technologie przyrostowe pozwalające m.in. na zwiększenie wydajności procesów produkcyjnych. Odnosi się to również szeroko rozumianej medycyny, gdzie procesy i technologie wspomagane komputerowo stanowią istotne elementy odpowiedzialne za skuteczność prowadzenia diagnostyki medycznej, realizacji operacji, procesów leczenia i rehabilitacji. Wytwarzanie wyrobów w tym tych stosowanych w medycynie wymaga materiałów o specyficznych właściwościach. Odnosi się to zarówno do właściwości mechanicznych jak również możliwości zastosowań w obszarze medycyny, co jest związane z jednej strony z wymagany brakiem

interakcji z organizmem żywym czy też biokompatybilnością. Technologie przyrostowe w dalszym ciągu notują zwyżkowe tendencje rozwoju i zastosowań w wielu dziedzinach. Wiele procesów addytywnych zostało poddane normalizacji, co przedstawiają odpowiednie normatywy. Dynamiczny rozwój technologii przyrostowych można zaobserwować w obszarze inżynierii materiałowej, co wiąże się zarówno z tendencją dotyczącą opracowywania nowych materiałów jak też badania ich właściwości, szczególnie parametrów wytrzymałościowych. Biorąc powyższe pod uwagę analiza właściwości mechanicznych elementów wytwarzanych z zastosowaniem druku 3D ma istotne znaczenie w obszarze zastosowań biomedycznych oraz inżynierii mechanicznej, tym samym podjęcie tego tematu przez Doktoranta jest w pełni uzasadnione.

2. Charakterystyka i ocena rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca liczy 236 stron i została wydana w formie książkowej. W początkowej części zawiera spis treści, wykaz ważniejszych skrótów i wykaz ważniejszych oznaczeń. Na końcu dysertacji zamieszczono spis rysunków i spis tabel oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Praca składa się z części teoretycznej opisującej stosowane powszechnie procesy przyrostowe oraz części badawczej przedstawiającej wyniki testów i analiz odnoszące się do założonych celów. Analizę źródeł przeprowadzono na podstawie literatury liczącej 118 pozycji książkowych i artykułów, dziesięciu norm, pięciu patentów, jednego rozporządzenia oraz dwudziestu źródeł internetowych. Materiał ten zawiera aktualne pozycje związane z tematyką przedstawionej do recenzji pracy.

Układ rozprawy oraz jej struktura są prawidłowe, rozdziały i podrozdziały ułożono logicznie, dzięki temu tworzą spójne opracowanie, co pozwala na właściwy odbiór zawartych treści.

Rozdział pierwszy i jednocześnie część teoretyczną rozpoczyna wprowadzenie, w którym Autor opisuje miejsce technologii przyrostowych w procesach wytwórczych przedstawia również historię wytwarzania przyrostowego i charakterystykę metod addytywnych w oparciu o obowiązujące normy.

Rozdział drugi stanowi analizę stanu zagadnienia, którą rozpoczyna opis materiałów biokompatybilnych w odniesieniu do definicji przedstawionej jako zgodność biologiczną, która obejmuje harmonijną interakcję z materiążywioną. Opisany jest również sposób oceny biokompatybilności w oparciu o normę PN-EN ISO 10993, przeznaczonej dla dostawców materiałów i producentów wyrobów medycznych w zakresie wsparcia oceny biologicznej i jedynie w tym zakresie ma zastosowanie. Przedstawiono również pojęcia dotyczące biologicznych punktów końcowych dla specyficznych parametrów biologicznych, które ocenia się w badaniach biokompatybilności wyrobów medycznych. Punkty te pozwalają na określenie efektów biologicznych spowodowanych przez kontakt wyrobów

medycznych z organizmem ludzkim. Opisano również bardzo szeroko technologie przyrostowe w odniesieniu do zastosowań medycznych przypisując poszczególne procesy addytywne do możliwych aplikacji w medycynie i inżynierii medycznej uwzględniając wymagania stawiane dla elementów medycznych. Analizie poddano również procesy dekontaminacji wyrobów medycznych, mające na celu eliminację, redukcję lub inaktywację patogenów, w tym bakterii, wirusów i grzybów, z powierzchni i wnętrza wyrobu. Proces ten jest niezbędny dla zapewnienia bezpieczeństwa pacjentów oraz personelu medycznego. W końcowej części rozdziału odniesiono się do zagadnień wytrzymałości elementów, szczególnie wytwarzanych z zastosowaniem procesów addytywnych.

W rozdziale trzecim przedstawiono cel i zakres pracy, określony jako przeprowadzenie oceny właściwości mechanicznych elementów wykonanych z zastosowaniem technologii druku 3D przy uwzględnieniu orientacji ustawień próbek badawczych względem platformy roboczej oraz wpływu parametrów technologicznych wydruku na wybrane wskaźniki właściwości mechanicznych.

Rozdział czwarty przedstawia program badań planowanych do realizacji w ramach pracy doktorskiej, obejmujący odpowiednie metody i środki badawcze oraz analizy wyników, który został przedstawiony w sposób czytelny na schemacie. Program dotyczy procesów wytwarzania przyrostowego w których zastosowano materiały biokompatybilne. Przedmiot badań odnosi się do różnych rodzajów próbek o wymiarach zgodnych z normami oraz o zaprojektowanych specjalnie własnych geometrii, które mogą mieć zastosowanie w inżynierii medycznej i medycynie. Numeryczne modele 3D wykonano z zastosowaniem oprogramowania 3D-CAD oraz przy użyciu procedur inżynierii odwrotnej. Wyszczególniono tu również aparaturę stosowaną w procesie badawczym.

W rozdziale piątym opisano zastosowane technologie i materiały, do których należą: nadruk płynnego materiału (MJT) technologia PolyJet Matrix, wytłaczanie warstwowe materiału termoplastycznego (MEX) oparte na technologii firm MakerBot i Zortrax oraz selektywne spajanie sproszkowanego materiału (PBF) oparte na technologii SLS firmy EOS.

Rozdział szósty przedstawia przebieg i wyniki badań doświadczalnych, w tym wybrane właściwości mechaniczne wytwarzanych w ramach badań elementów, dla których Autor udowadnia, że parametry wytrzymałościowe są uzależnione od zastosowanego procesu przyrostowego oraz rodzaju użytego materiału. Do badań przygotowane zostały próbki z materiałów biokompatybilnych, wykonane z wykorzystaniem trzech procesów addytywnych: MJT, MEX oraz PBF. Opisano tu również wyniki badań reologicznych wykonane w ramach eksperymentów dla modeli wytwarzanych technologią MJT oraz wyniki analizy struktury geometrycznej powierzchni tych próbek.

W rozdziale siódmym opisano badania uzupełniające mające na celu analizę wpływu usytuowania modeli podczas wydruku 3D na właściwości tribologiczne z uwzględnieniem pomiarów kąta zwilżania oraz twardości powierzchni. Próbki do badań wykonano z zastosowaniem procesów MJT oraz MEX. Została

tu przeprowadzona również analiza finansowa firm branży medycznej w obszarze druku 3D, materiał opracowano na podstawie badań zewnętrznych, ma on dość luźny związek tematem pracy osadzonym w inżynierii mechanicznej i z tego punktu widzenia, mimo że jest to interesujący materiał, to mógłby być pominięty lub umieszczony w rozdziale związanym z analizą stanu zagadnienia.

Rozdział ósmy zawiera opis i wyniki symulacji komputerowych, dla których zdefiniowano właściwości materiałowe. Analizy przeprowadzono z zastosowaniem oprogramowania SOLIDWORKS oraz ANSYS, stosując model liniowy materiału ortotropowego. Wyniki symulacji dla materiału PLA porównano z wynikami uzyskanymi eksperymentalnie, przeprowadzono również symulacje dla materiału MED610. Badania pokazały, że istnieje możliwość realizacji obliczeń numerycznych i ich korelacji z wynikami doświadczalnymi dla modeli wytwarzanych przyrostowo.

W rozdziale dziewiątym przedstawiono podsumowanie i wnioski końcowe, rozpoczynając od wniosków o charakterze ogólnym, kończąc na opisanu kierunków dalszych badań.

Praca napisana jest przejrzysto, zawiera znaczący i obszerny materiał badawczy, Autor nie ustrzegł się jednak od pewnych pomyłek o charakterze terminologicznym. Jak wielu badaczy, szczególnie o krótkim stażu pomylił nazwy technologii opartych na procesie MEX, przypisując nazwę FDM zastrzeżoną dla Firmy Stratasys innym producentom.

Opis wykresów na stronie 81 na osi poziomej przedstawiono jako „kierunek wydruku”, jednak wygląda, że jest to kąt nachylenia osi próbki względem płaszczyzny roboczej podczas wydruku 3D. Podobne określanie można spotkać w pracy w innych miejscach, co należy uznać jako pewien skrót myślowy opisujący jednak nieprecyzyjnie proces realizacji badań. Kierunek wydruku związany jest z danym procesem czy maszyną i jest dla niej określony procesowo lub geometrycznie, próbka natomiast ma określone usytuowanie względem układu współrzędnych danego urządzenia wytwórczego.

W części badawczej począwszy od strony 82 Autor przedstawia analizę anizotropii wybranych właściwości mechanicznych ze względu na kierunek usytuowania drukowanych próbek względem układu współrzędnych urządzenia dla procesu MJT analizując wybrane parametry struktury geometrycznej powierzchni. Materiał ten stanowi ciekawe rozważanie teoretyczne, jednak warto byłoby wyjaśnić w jakim celu zostały one przeprowadzone, ponieważ pokazują ogólnie znane i przedstawione w wielu opracowaniach cechy wyrobów wytwarzanych metodami przyrostowymi. Badania te przeprowadzono tylko dla próbek wykonanych technologią PJM, co poddaje pod wątpliwość zamieszczanie ich w pracy ze względu na brak porównań z innymi procesami przyrostowymi. Uwaga ta odnosi się również do badań zamieszczonych na stronie 123 dotyczących próbek wykonanych z zastosowaniem procesów MEX (a nie FDM, jak już wcześniej wspominałem), które to badania odnoszą się do jednego procesu

i nie ma możliwości porównania z innymi procesami co z punktu widzenia wiodącego tematu pracy mogłyby zostać przeredagowane.

W pracy można znaleźć kolejne nieprecyzyjne stwierdzenia określające usytuowanie próbek podczas wydruku względem układu współrzędnych maszyny, dla przykładu dla procesu MJT Autor opisuje kierunki wydruku jako 0° , 45° i 90° , dla procesu MEX próbki są opisane jako wykonane w osi X, Y czy Z, podobnie jak dla procesu PBF. Należy stwierdzić, że dla analizowanych procesów przyrostowych modele są wykonywane w trzech osiach X, Y, Z, taka jest idea druku 3D. Uznając nawet skróty myślowe zastosowane przez Autora, to i tak występują różnice w umieszczeniu próbek względem układu współrzędnych maszyny dla przedstawionych metod MJT oraz MEX i PBF. Biorąc to pod uwagę analiza porównawcza wyników badań w pewnych obszarach staje się utrudniona.

Część badawcza pracy zawiera przykłady pewnych modeli aplikacyjnych wytwarzanych przyrostowo takich jak elementy uchwyty hakowe robota medycznego, protezy palców czy ortezy. Poddano analizie ich właściwości wytrzymałościowe, co stanowi istotny materiał badawczy. Przedstawiono również wyniki dokładności geometrycznej elementów ortez wykonane z zastosowaniem skanowania 3D, których zamieszczenie z punktu widzenia głównego tematu może nie być zasadne.

Pojawia się również pytanie w jakim celu zostały przeprowadzone badania tribologiczne próbek wykonanych w procesach MJT i MEX, materiał ten jest bardzo interesujący jednak trudno określić jakie ma odniesienie do zastosowań medycznych biorąc pod uwagę warunki badań z zastosowaniem środków smarnych i w warunkach tarcia suchego, a przedstawione w podsumowaniu pracy uzasadnienie dla procesu MJT nie jest szczególnie przekonywujące.

Zamieszczone uwagi nie umniejszają ogromu pracy włożonej w przeprowadzenie badań i analiz, mają charakter dyskusyjny, który ma pobudzić Autora do refleksji nad planowaniem pracy badawczej i analizą wyników badań. Należy zauważyć, że koszty badań naukowych są przeważnie dość wysokie z tego względu warto brać pod uwagę ich efektywność pod względem liczby przeprowadzonych prób i czasu poświęconego na ich realizację, nie zawsze duża ilość badań skutkuje trafnym wnioskowaniem.

Przedstawiona do oceny praca jest związana z procesami technologicznymi z obszaru druku 3D, może mieć jednak charakter interdyscyplinarny obejmujący dodatkowo inżynierię medyczną i nauki medyczne. Praca zawiera bogaty materiał ilustracyjny, wiele rysunków i schematów wykonanych jest jako opracowania własne Autora na podstawie przeprowadzonych badań. Struktura pracy jest prawidłowa, zgodna z wymaganiami stawianymi rozprawom doktorskim.

Głównym celem dysertacji była analiza właściwości wytrzymałościowych modeli badawczych wytworzonych z zastosowaniem procesów przyrostowych, co zostało osiągnięte w wyniku realizacji prac badawczych. Wyniki badań pozwoliły na przeprowadzenie analiz o znaczeniu naukowym i aplikacyjnym, co stanowi

materiał mający potencjał praktycznego zastosowania w rozwiązaniach przemysłowych z obszaru inżynierii mechanicznej.

3. Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji dysertacja dotyczy istotnych zagadnień, odnoszących się do badań i analiz przyrostowych procesów wytwórczych w odniesieniu do właściwości wytrzymałościowych oraz w kontekście aplikacji w inżynierii biomedycznej. Przedstawiona metodyka badawcza, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Obszar tematyczny dysertacji został określony w sposób przemyślany i trafny, a jej zakres spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Praca prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta i pokazuje jego możliwości samodzielnej realizacji prac badawczych, prowadzenia analiz o charakterze naukowym oraz wyciągania wniosków. Układ formalny pracy jest zgodny z wytycznymi dla dysertacji doktorskich, zawiera odpowiednią literaturę i materiał ilustracyjny. Praca odnosi się do aktualnej wiedzy, wnosi treści nowe w obszarze badań naukowych a także ich możliwości aplikacji przemysłowych i medycznych. Praca 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.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska pt. „Ocena właściwości mechanicznych elementów wytwarzanych technologią druku 3D do zastosowań biomedycznych” autorstwa mgr inż. Pawła Szczygła, promotor dr hab. inż. Jerzy Bochnia, prof. PŚk, promotor pomocniczy dr hab. inż. Tomasz Kozior, prof. PŚk spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. 2018 poz. 1668 z późn. zm. w zakresie dyscypliny inżynieria mechaniczna, w mojej ocenie może być dopuszczona do kolejnych etapów procedury przewodu doktorskiego.

Gregorz Jendziński