

Dr hab. inż. Filip GÓRSKI, prof. PP

Wydział Inżynierii Mechanicznej

Instytut Technologii Materiałów

Politechnika Poznańska

filip.gorski@put.poznan.pl

Poznań, dnia 15.08.2025

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła SZCZYGŁA

pt. Ocena właściwości mechanicznych elementów wytwarzanych technologią druku 3D do zastosowań biomedycznych

Promotor: dr hab. inż. Jerzy Bochnia, prof. PŚk

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Tomasz Kozior, prof. PŚk

Recenzja została opracowana na podstawie pisma Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach z dnia 20.05.2025r. o numerze MAA-511/72/2025.

1. Ocena merytoryczna pracy

1.1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska „Ocena właściwości mechanicznych elementów wytwarzanych technologią druku 3D do zastosowań biomedycznych” mgr inż. Pawła Szczygła składa się z 9 numerowanych rozdziałów. Tekst rozprawy ma postać książki formatu B5, o łącznej objętości 236 stron. Na końcu tekstu znajdują się streszczenia w dwóch językach, jak również bibliografia (w podziale na literaturę, normy, patenty i strony internetowe). Część teoretyczna, obejmująca 2 rozdziały (wprowadzenie i analizę literatury), zajmuje około 1/4 objętości pracy (~60 stron), resztę rozprawy stanowi opis metodyki oraz wyników badań. Jest to układ typowy dla rozpraw doktorskich w dziedzinie inżynierii mechanicznej. Szczegółowa charakterystyka układu i zawartości rozprawy oraz dotyczące jej uwagi krytyczne zostały przedstawione w dalszej części recenzji.

Jeśli chodzi o tytuł rozprawy, jest on generalnie adekwatny do charakteru pracy, choć nieco zbyt ogólny, sugerujący dokonanie przez autora szerokiej oceny dla dużej liczby klas wyrobów do zastosowań biomedycznych – można byłoby go nieco zawęzić, zwłaszcza że autor skupia się głównie na znormalizowanych próbkach i wyrobach ortopedycznych (proteza palca, orteza nadgarstka). Użyto także potocznego określenia „druk 3D” zamiast bardziej przyjętego w literaturze naukowej „wytwarzanie przyrostowe”. Są to jednak niewielkie zastrzeżenia, mające znikomy wpływ na ocenę całości rozprawy.

1.2. Trafność i oryginalność podjętej tematyki badawczej

Tematyka rozprawy dotyczy zastosowania technologii wytwarzania przyrostowego (druku 3D) w zastosowaniach biomedycznych, a dokładniej analizy właściwości mechanicznych wybranych

elementów wytwarzanych tymi technikami. Jest to obszar badawczy bardzo aktualny i istotny zarówno w skali światowej, jak i krajowej. Dynamiczny rozwój technologii addytywnych w ostatnich latach (tak w przemyśle, jak i w medycynie) powoduje, że rośnie zapotrzebowanie na wiedzę o zachowaniu mechanicznym wytwarzanych w ten sposób elementów, zwłaszcza w kontekście biomedycznym – gdzie elementy wytwarzane przyrostowo mogą stanowić anatomicznie dopasowane implanty, protezy, narzędzia chirurgiczne czy ortezy – poznanie ich właściwości mechanicznych i czynników na nie wpływających ma kluczowe znaczenie dla ich dalszych zastosowań. Stopniowe zapełnianie luk badawczych i zwiększanie poziomu wiedzy umożliwiające popularyzację szybkiego wytwarzania m.in. ortezy czy protezy dopasowanych anatomicznie jest ważnym kierunkiem prac badawczo-rozwojowych, gdyż zastosowanie takich wyrobów w terapii nie jest jeszcze standardową praktyką, zwłaszcza w Polsce. Z punktu widzenia rozwoju nauki, ale także bezpośrednio z perspektywy badacza zajmującego się tą tematyką wraz z zespołem, bardzo pozytywnie oceniam fakt podjęcia akurat takiego tematu przez doktoranta.

Na tle literatury światowej, podjęte zagadnienie należy uznać za wybrane stosunkowo trafnie. Istnieje wiele prac analizujących wpływ różnych parametrów druku 3D (np. geometrii wypełnienia, rodzaju materiału, orientacji druku) na właściwości mechaniczne wytwarzanych elementów. Jednak, jak wskazano w rozprawie, dotychczas stosunkowo niewiele publikacji poświęcono kompleksowej ocenie takich właściwości w kontekście zastosowań biomedycznych i z wykorzystaniem różnych technik druku w jednej pracy. Autor koncentruje się na trzech technologiach: fotopolimerowej PolyJet Matrix (PJM), ekstruzji (FDM) oraz selektywnym spiekaniu laserowym proszków (SLS). Dodatkowo uwzględnia specyficzne materiały biokompatybilne stosowane w medycynie (m.in. fotopolimer MED610, filament PLA modyfikowany nanocząstkami miedzi – PLACTIVE, tworzywo ABS Medical, poliamid PA2200 do SLS).

Mam jednak w tym miejscu pewne zastrzeżenie co do zakresu rozprawy. Z jednej strony, należy docenić tak dużą liczbę poruszanych zagadnień – doktorant wybrał trzy różne wyroby medyczne (ortezę nadgarstka, protezę palca oraz hak do robota medycznego), które wytworzył i przebadal; oprócz tego przeprowadził badania na standaryzowanych próbkach, ale dołączył do tego także wyniki badań symulacyjnych, analizę tribologiczną i analizę ekonomiczną przedsiębiorstw zajmujących się wytwarzaniem przyrostowym wyrobów medycznych na rynku polskim. Problem polega na tym, że te badania i analizy – same w sobie wartościowe – nie do końca integrują się w jedną całość. W pracy brakuje wyraźnego, konkretnego motywu łączącego i jasno nakreślonego, pojedynczego problemu naukowego, a podsumowanie i wnioski także są dość ogólne. Wygląda to jak złożenie ze sobą kilku różnych, niezależnie prowadzonych eksperymentów badawczych (których wyniki zresztą opublikowano w różnych artykułach naukowych) – cierpi na tym spójność rozprawy jako całości i jest to – w mojej opinii – największe zastrzeżenie jakie można postawić oceniając tę rozprawę.

Zastrzeżenie to nie stanowi jednak o znacznym umniejszeniu wartości naukowej rozprawy, która wciąż pozostaje duża. Tematyka rozprawy jest innowacyjna a uzyskane wyniki zapełniają wiele luk badawczych – nie jest to jednak w mojej ocenie przełom otwierający zupełnie nowy kierunek badawczy w skali świata (tematyka ma charakter aplikacyjny, stosunkowo niszowy). Problemy związane z wytwarzaniem przyrostowym, badaniem właściwości mechanicznych oraz wytwarzaniem w ten sposób wyrobów medycznych i oceną ich właściwości są dostępne w literaturze już od dawna. Przedstawione badania – zrealizowane rzetelnie i w szerokim zakresie – nie wykraczają poza znane schematy, nie zaproponowano zupełnie nowych metod czy pomysłów na realizację eksperymentów (innymi słowy, brak w pełni autorskiej, kreatywnej metodyki). Trzeba jednak docenić wkład pracy doktoranta i jego umiejętności łącznego stosowania różnych technik wytwarzania i metod badawczych.

Rozprawa została przedstawiona do oceny w ramach dyscypliny inżynieria mechaniczna i formalnie potwierdzam jej przynależność do tej dyscypliny, należy jednak zauważyć że podejmowane w niej zagadnienia mają wyraźny charakter interdyscyplinarny. Rozprawa, oprócz bardzo wyraźnej bazy w inżynierii mechanicznej, zawiera elementy inżynierii biomedycznej, a także inżynierii materiałowej, co jest dość częstym połączeniem w tego typu pracach, ale i tak wartym docenienia.

Podsumowując, temat rozprawy jest aktualny, ważny i oryginalny. Autor wykazał się dobrą znajomością światowych trendów w swojej dziedzinie, czego dowodem jest odpowiednio dobrana literatura przedmiotowa, obejmująca m.in. najnowsze raporty branżowe i prace z ostatnich 3 lat. Choć badania nad drukiem 3D w medycynie prowadzone są na świecie dość intensywnie, recenzowana praca stanowi wartościowe uzupełnienie istniejącej wiedzy, zwłaszcza w kontekście polskim, gdzie kompleksowych opracowań w tej tematyce jest nadal niewiele. Oryginalność rozprawy polega przede wszystkim na szerokim zakresie podjętych zagadnień i ich integracji w ramach jednej pracy. Stwierdzam, że zarówno wybrana tematyka, jak i zdefiniowane przez doktoranta problemy i cele pracy spełniają znamiona oryginalnego rozwiązania postawionego problemu naukowego i wnoszą istotny wkład w dyscyplinę inżynieria mechaniczna.

1.3. Uzyskane rezultaty i ich znaczenie dla nauki i praktyki

Wyniki uzyskane w rozprawie mają istotne znaczenie zarówno dla nauki, jak i dla praktyki inżynierskiej – zwłaszcza w obszarze nowoczesnych technologii medycznych. Doktorant przeprowadził badania, które – w mojej ocenie – zwiększyły ogół wiedzy naukowej nt. wpływu technologii wytwarzania przyrostowego na proces tworzenia wyrobów do zastosowań medycznych, w tym zindywidualizowanych anatomicznie.

Z punktu widzenia nauki (dyscypliny inżynieria mechaniczna oraz, w mniejszym stopniu, inżynieria biomedyczna), praca dostarcza nowych danych eksperymentalnych i spostrzeżeń dotyczących zachowania materiałów w technologiach przyrostowych. Udokumentowano właściwości mechaniczne kilku ważnych, popularnych materiałów do zastosowań biomedycznych (fotopolimer MED610,

PLA/PLACTIVE, ABS, PA2200) wytwarzanych różnymi technikami druku 3D. Dane te wzbogacają dostępną literaturę o informacje na temat wpływu orientacji druku i parametrów procesu na wytrzymałość, sztywność czy chropowatość elementów. Cenny jest fakt, że badania objęły także materiały modyfikowane i biokompatybilne (np. PLACTIVE z miedzią) – co stanowi wkład w rozwój wiedzy na temat nowych kompozytów polimerowych dla druku 3D. Ponadto, praca pokazuje na potencjalne kierunki integracji eksperymentu z symulacjami komputerowymi: opracowane modele ortotropowe i lepkosprężyste mogą posłużyć innym badaczom do rozwijania narzędzi symulacyjnych przewidujących zachowanie wydruków pod obciążeniem, co stanowi wciąż nierozwiązany w makroskali problem badawczy w tym obszarze naukowym (tu niestety autor nie dokonał przełomu). Jednym z zastrzeżeń jakie można tu postawić jest brak wzajemnego odniesienia się między technologiami wytwarzania przyrostowego, tj. zastosowania podobnej klasy materiałów – poliamid jest dostępny zarówno w SLS, jak i w FDM, więc można by pokusić się o jego zastosowanie np. zamiast ABS, uzyskując ciekawe porównanie.

Z perspektywy praktyki inżynierskiej, wyniki pracy mają charakter aplikacyjny. Autor przedstawił konkretne wskazówki, jak dobierać parametry druku, by uzyskać pożądane własności, choć nie są one szczególnie przełomowe (np. zwrócenie uwagi na orientację w komorze roboczej – fakt znany od wielu lat). Doktorant zaaplikował zaawansowane metody wnioskowania statystycznego i optymalizacji (regresja liniowa, metoda Taguchi itp.), finalnie dochodząc do wniosków że najważniejsza dla wytrzymałości jest orientacja, a dla chropowatości – wysokość warstwy oraz orientacja, co jest więcej niż oczywiste dla każdego, kto zajmuje się drukiem 3D (nie tylko naukowca czy eksperta). Wyniki są same w sobie bardzo ciekawe i rozbudowane, problem tkwi tutaj w prowadzeniu dyskusji i wyciągania głębszych wniosków z poczynionych metodą naukową obserwacji (zbyt oczywiste wnioski).

Najbardziej namacalnym efektem pracy jest demonstracja, że elementy wytworzone drukiem 3D mogą z powodzeniem pełnić funkcje użytkowe w medycynie. Zaprojektowane przez doktoranta uchwyty do robota chirurgicznego wytrzymały próby mechaniczne, co sugeruje możliwość stosowania ich w zabiegach – tym bardziej, że druk 3D pozwala na kształty niemożliwe do uzyskania tradycyjną obróbką (np. wewnętrzne kanały, specyficzne profile). Przeprowadzona analiza wymiarowa i wytrzymałościowa tych uchwytów wykazała wysoką dokładność i wystarczającą wytrzymałość wydrukowanych narzędzi. Dla pozostałych wyrobów także wykazano przydatność użytkową i możliwość personalizacji z zastosowaniem technik inżynierii odwrotnej – są to oczywiście fakty już dobrze znane w dostępnej literaturze naukowej, niemniej warto je potwierdzać w kolejnych pracach także z użyciem innych materiałów czy technik wytwarzania, nie umniejsza to autorowi pracy. Warto podkreślić zastosowane przez doktoranta podejście metodyczne, w którym oprócz próbek, poddał obciążeniom także rzeczywiste wyroby zindywidualizowane, traktując ortezy czy palce jako próbki. W świetle anizotropowych właściwości wyrobów wytwarzanych przyrostowo oraz często zmieniającej się i nietypowej, „organicznej” geometrii takich wyrobów, tego typu próby są bardzo cenne (także z mojej

osobistej perspektywy – jestem zwolennikiem takiego podejścia i jest ono prezentowane także w pracach naukowych mojego zespołu badawczego). Natomiast zdecydowanym minusem, podważającym nieco wiarygodność uzyskanych wyników, jest brak powtarzalności statystycznej – autor, z tego co wynika z rozprawy, wytworzył po jednej sztuce ortezy ręki z każdego materiału, podobnie zresztą dla palców protezowych. Trudno zatem mówić o statystycznym uzasadnieniu wyciąganych wniosków (zwłaszcza, gdy znana z literatury jest słaba powtarzalność i duży rozrzut wyników przy elementach wytwarzanych przyrostowo, szczególnie metodą FDM), potrzebnych jest więcej badań (co zresztą sam autor zauważa), a naukowa „moc” pracy tkwi jednak bardziej w badaniach na standaryzowanych próbkach, które jednak nie są już aż tak interesujące ze strony biomedycznej, bo nie mówią wiele w kontekście użyteczności kompletnych wyrobów – jak wiadomo, właściwości wyrobów wytwarzanych przyrostowo są mocno zależne także od ich geometrii.

Jak wspomniano wcześniej, praca porusza również kwestie tarcia, zużycia i biogodności powierzchni, co ma znaczenie np. z perspektywy projektowania i wytwarzania zindywidualizowanych implantów stawowych czy elementów protez działających w ruchu względnym. Stwierdzenie, że drukowane elementy posiadają hydrofilowe powierzchnie sprzyjające integracji z tkanką jest dobrą prognozą dla ewentualnych implantów, choć doktorant nie podjął się wytwarzania i badania akurat tej klasy wyrobów. Natomiast wiedza o tym, jak orientacja druku wpływa na zużycie tribologiczne (zużywanie się powierzchni w kontakcie, np. z kością czy innym elementem) może pozwolić projektantom zminimalizować to zużycie przez odpowiedni dobór kierunku budowy elementu. Dodatkowo, wykazano że obecność płynu (lubrykantu) zmniejsza współczynnik tarcia wytworzonych przyrostowo obiektów, co jest znowu wnioskiem dość oczywistym, ale jednak cennym z perspektywy rzetelnie przeprowadzonego eksperymentu i poprawnego opisu jego wyników.

Choć praca skupia się na aspektach technicznych, autor zawarł w rozprawie także analizę finansową (rozdział 7.3). Pokazuje ona, że firmy działające w obszarze medycznego druku 3D w Polsce są w stanie osiągać stabilne dochody i przetrwać nawet trudniejsze okresy. To sygnał, że rozwijane technologie mają rację bytu biznesowego – co z kolei oznacza, że wyniki badań mogą znaleźć realnych odbiorców w przemyśle. Mam jednak pewne zastrzeżenia co do tego fragmentu. Rozdział ten bazuje głównie na raporcie zewnętrznym. O ile informacje w nim zawarte są ciekawe, nie wynikają one z własnych badań doktoranta i nie mają bezpośredniego wpływu na realizację celów naukowych rozprawy. Stanowią raczej uzupełnienie kontekstu. Fragment ten nie jest błędem, ale jego znaczenie naukowe w ramach rozprawy jest ograniczone. Być może lepiej byłoby umieścić te informacje we wstępie lub w (bardziej rozbudowanym) uzasadnieniu podjęcia problemu badawczego, zamiast w osobnym rozdziale między wynikami technicznymi.

Podsumowując, wpływ rozprawy na praktykę jest zauważalny. Wiele z zaleceń i obserwacji poczynionych przez doktoranta ma charakter wdrożeniowy – praca dostarcza konkretnych rozwiązań (zbadane prototypy urządzeń medycznych) i wskazówek dla inżynierów. Równocześnie wkład naukowy

jest także dość spory – nowe dane empiryczne i modele poszerzają stan wiedzy. Praca może służyć jako punkt wyjścia do dalszych badań (na co wskazuje słusznie sam autor) i jako referencja dla kolejnych badaczy zajmujących się drukiem 3D w medycynie. Należy także docenić fakt opublikowania wyników badań w recenzowanych czasopismach naukowych – doktorant jest autorem 9 publikacji indeksowanych w bazie Scopus, z czego zdecydowana większość jest bezpośrednio związana z tematyką przedstawionego do oceny doktoratu.

Można mieć jednak zastrzeżenia co do krytycznej analizy uzyskanych przez doktoranta wyników – nie porównał on wyników własnych badań do literatury (w ujęciu całościowym, krytycznym – są cząstkowe porównania wyników eksperymentów w tekście rozprawy) ani nie przeprowadził właściwej, solidnej dyskusji tych wyników, zatem na podstawie lektury wyłącznie samej rozprawy trudno odnieść uzyskane wyniki do literatury światowej. Umiejętność porównania uzyskanych we własnym laboratorium wyników z wynikami badań naukowców „ze świata” oraz krytyczna analiza mocnych i słabych stron własnych badań jest bardzo istotna dla naukowca i zalecam doktorantowi jej dalszy rozwój. Niemniej, uzyskane wyniki w ujęciu całościowym są nowe i istotne oraz uzyskane bezpośrednio przez doktoranta, co formalnie wyczerpuje znamiona „samodzielnego rozwiązania oryginalnego problemu naukowego” i wystarcza aby pozytywnie ocenić rozprawę w tym aspekcie.

1.4. Poprawność formalno-językowa, stylistyczna i interpunkcyjna

Rozprawa doktorska napisana jest w języku polskim, w standardzie akceptowalnym dla prac doktorskich przedstawianych do oceny w naukach inżyniersko-technicznych. Autor wypowiada się jasno, stosując fachową terminologię (np. związaną z technologiami przyrostowymi, wytrzymałością materiałów, inżynierią biomedyczną), unikając (w większości) żargonu. Zdania są zrozumiałe i rzeczowe, a tok myśli logiczny. Praca zachowuje formalny, obiektywny styl – unika się trybu osobowego, stosowane jest słownictwo techniczne zgodnie z normami pisania prac naukowych.

Pod kątem formalnym, rozprawa spełnia wszystkie wymogi, zawiera streszczenie (w języku polskim i angielskim), słowa kluczowe, wykazy oznaczeń i skrótów itp., jak również poprawnie i konsekwentnie cytowaną literaturę. Całość została wydana i oprawiona zgodnie z wytycznymi Politechniki Świętokrzyskiej. Numeracja rozdziałów, rysunków i tabel jest konsekwentna. Językowo praca stoi na poprawnym poziomie, aczkolwiek ma pewne drobne uchybienia. Są to głównie literówki lub drobne błędy stylistyczne, fleksyjne, jak również związane z doбором słów, które nie wpływają na zrozumiałość tekstu. Poniżej wypisano wybrane przykłady pojawiających się w rozprawie błędów dotyczących strony językowej, edytorskiej czy formalnej, ze wskazaniem stron na których zauważono dany błąd.

1. Str. 15 „kwestia ta jest rozwiązywana przez wybitną grupę badaczy” (dotyczy norm ISO) – podkreślanie wybitności nie jest tutaj adekwatne, a jeśli już, to „grupę wybitnych badaczy”.

2. Str. 16 „opiera się na pierwszej technologii przyrostowej” – wiadomo, że chodzi tutaj o to, że SLA jest historycznie pierwszą technologią, ale należałoby to lepiej wyjaśnić, bo samo słowo „pierwszy” jest mylące.
3. Str. 31 „lekarze (...) stosowali te materiały (...) co prowadziło do rezultatów z różnym skutkiem” – błąd stylistyczny, pleonazm, rezultat=skutek powinno być „prowadziło do różnych skutków”, można byłoby dodać „nie zawsze szczęśliwych dla pacjenta”.
4. Str. 72 „mogą spowodować obrażenia w wyniku (...) utknięcie fragmentu odzieży” (błędna deklinacja lub literówka).
5. Str. 72 „Selektywnego Spiekania Laserowego” – w języku polskim nie piszemy tych wyrazów wielką literą, nawet jeśli są częścią skrótu (powinno być po prostu „selektywnego spiekania laserowego”).
6. Str. 76, rys. 6.2 – niektóre zarysy są pogrubione (b, c), a inne nie, trudno powiedzieć z czego to wynika, podobnie jeśli chodzi o skalowanie linii oznaczającej osie symetrii próbek, rysunek techniczny powinien trzymać się jednego standardu, inaczej wygląda to niestarannie.
7. Uporczywe używanie określenia „drukowanie” zamiast „wytwarzanie” (występuje w całej pracy). Jest to jednak dość żargonowe, potoczne określenie. Samo określenie „druk 3D” jest dopuszczalne (w zastępstwie „technologie wytwarzania przyrostowego”), natomiast jego wszelkie odmiany – lepiej unikać w rozprawach naukowych gdzie używany jest formalny język. Puryści (do których się nie zaliczam) uważają, że w ogóle nie powinno się używać określenia „druk 3D”, a zamiast tego po prostu „wytwarzanie przyrostowe”. Zatem, nie drukujemy, tylko wytwarzamy, uzyskujemy wyroby, a nie wydruki itp. Od czasu do czasu można wtrącić zamiennik, autor natomiast używa określenia „druk” we wszelkich odmianach permanentnie, co nieco razi. Podobnie, zamiast np. „kierunek drukowania” (str. 77) lepiej byłoby użyć precyzyjniejszego określenia „kierunek nakładania warstw”.
8. Praca zawiera dużo pustych przestrzeni, zwłaszcza w rozdziałach z wynikami. Domyślam się, że jest to kwestia umiejscowienia rysunków, ale wciąż jest to jednak drobne uchybienie edytorskie.
9. Zamiast „wyższy”/„niższy” powinno być użyte określenie „większy/mniejszy”, np. tab. 6.4 (str. 94) – „większa wartość danego czynnika” zamiast „wyższy poziom danego czynnika”.

Powyższe przykłady uchybień (jest ich dużo więcej) nie stanowią jednak o obniżeniu wartości pracy. Nie utrudniają one znacząco jej odbioru ani nie obniżają wartości naukowej, wpływając wyłącznie na tzw. „wrażenia estetyczne” podczas jej czytania. Autorowi zalecam w kolejnych pracach dochowanie nieco większej staranności – ale w pracy o takiej objętości trudno jest uniknąć błędów. Ich występowanie nie wpłynęło na moją ocenę pracy.

2. Ocena metodologiczna pracy

2.1. Dobór literatury, umiejętność wykorzystania źródeł

Analiza literatury i stanu techniki w rozprawie mgr inż. Pawła Szczygła została przeprowadzona na poziomie akceptowalnym dla rozpraw doktorskich w naukach inżyniersko-technicznych. Autor przeanalizował szereg zagadnień związanych z wyrobami medycznymi, ich charakterystyką, jak i też wytwarzaniem przyrostowym takich wyrobów różnymi technikami. Wybrana literatura jest generalnie aktualna i adekwatna do omawianych zagadnień. Autor bardzo szczegółowo charakteryzuje procesy wytwarzania wyrobów medycznych, przytacza mnóstwo przykładów zastosowań różnych technik przyrostowych oraz badań i wdrożeń takich wyrobów z całego świata i generalnie można zauważyć że temat ten jest mu dobrze znany.

Nie można mieć także większych zastrzeżeń co do doboru źródeł cytowanych publikacji – pochodzą one w większości z prestiżowych czasopism naukowych (mających współczynnik wpływu), można tutaj jako drobne zastrzeżenie odnotować jedynie brak cytowania publikacji autorstwa polskich badaczy. W kraju od wielu lat prężnie działa kilka ośrodków zajmujących się wytwarzaniem przyrostowym, także wyrobów medycznych (między innymi Politechnika Śląska, Wrocławska, Warszawska, Gdańska, Bydgoska, Rzeszowska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, także Politechnika Poznańska), a tymczasem na liście cytowań, jeśli znajdziemy tam autorów z Polski, to prawie wyłącznie z Politechniki Świętokrzyskiej. Zalecam na przyszłość doktorantowi rozpoczynanie analizy literatury od poszukiwania podobnych badań i rozwiązań w kraju, a dopiero później za granicą.

Moje główne zastrzeżenie do analizy literatury dotyczy jednak innej kwestii. Praca doktorska w większości skupia się na wyznaczaniu i analizie właściwości mechanicznych wyrobów wytwarzanych przyrostowo. Tymczasem sekcja dotycząca tego zagadnienia w analizie literatury (2.5) ma zaledwie niecałe 3 strony i w mojej opinii jest przeprowadzona bardzo pobieżnie, cytowanych jest zaledwie kilka artykułów naukowych i ogólne trendy. To dość duży mankament – autor nie sprawdził dokładnie czy zaproponowane przez niego eksperymenty nie zostały już przypadkiem przez kogoś przeprowadzone i później także nie odniósł się do wyników zawartych w literaturze światowej w podsumowaniu i wnioskach. Zalecam na przyszłość większą staranność w analizie literatury ściśle (a nie tylko ogólnie) związanej z badaniami własnymi. Analiza literatury to nie jest przykra konieczność, ani też nie ma na celu uzyskanie zbioru luźnych faktów powiązanych z tematyką własnej pracy – dobrze przeprowadzona ma ukierunkować badacza tak, aby pracował w sposób optymalny – eksperymenty były odpowiednio zaplanowane (bez redundancji), a wnioski odnosiły się do ogółu wiedzy w danym, ścisłym zagadnieniu (co pozwala uniknąć nadmiernej generalizacji, skutkującej średnią do niskiej przydatnością przedstawionych wyników dla kolejnych badaczy).

Pomimo tych uwag, autor udowodnił, że potrafi korzystać z literatury w sposób adekwatny do poziomu doktoratu. Ogólnie oceniam tę część rozprawy jako poprawnie napisaną, a umiejętność korzystania ze źródeł – jako adekwatną dla kandydata ubiegającego się o stopień doktora.

2.2. Poprawność formułowania problemów i hipotez

W rozprawie doktorskiej przedstawionej do oceny sformułowano *explicite* wyłącznie cel i zakres pracy (rozdział 3). Głównym celem pracy było oszacowanie właściwości mechanicznych elementów dla danej technologii druku 3D, z uwzględnieniem parametrów procesu oraz ocena wpływu tych parametrów na wybrane właściwości (cytując rozprawę). Cel ten jest istotny i ważny, ale zdecydowanie zbyt ogólny. Szczegółowe cele („dodatkowy” oraz „użyteczny”) są sformułowane jeszcze bardziej ogólnie. Dodatkowo, autor sam się tutaj pozytywnie recenzuje, pisząc m.in. że „przedstawione cele są spójne” i „opracowanie stanowi bazę wiedzy zawierającą niezbędne informacje (...)”. Jest to zdecydowanie nie na miejscu, a jeśli już – to tego typu stwierdzenia mogą padać na końcu rozprawy, podsumowując jej wyniki.

Hipoteza badawcza nie została wprost sformułowana, co jest akceptowalne w naukach inżyniersko-technicznych, ale w tym wypadku jej obecność mogłaby uporządkować pracę. Przy tak ogólnie sformułowanych celach, w zasadzie trudno określić kiedy należałoby uznać cel za zrealizowany. Patrząc na wyniki rozprawy – owo „oszacowanie właściwości mechanicznych” mogłoby zostać uznane za wykonane zarówno po wykonaniu ¼ badań opisanych przez autora, jak i w ogóle nie uznane za spełnione (autor nie uwzględnił wszystkich orientacji czy parametrów, a cel, w formie zapisanej w rozprawie, nie precyzuje jakie technologie, materiały i wyroby ma na myśli). Autor nie wytypował także precyzyjnie konkretnego problemu badawczego i luki poznawczej, skupiając się na dość ogólnych wytycznych co do produkcji wyrobów medycznych.

Podsumowując – ogólny kierunek pracy jest zarysowany dość dobrze, ale wyłania się dopiero po przeczytaniu całości. Bardziej szczegółowe zdefiniowanie celów pomocniczych oraz konkretnego problemu badawczego, jak i postawienie hipotezy (i późniejsza jej weryfikacja statystyczna) mogłyby wzmocnić naukowy charakter pracy, a także ułatwić interpretację jej wyników. Ta część rozprawy zdecydowanie mogłaby zostać poprawiona (zwłaszcza w kontekście tego, jak brzmią ustawowe wymogi co do rozpraw doktorskich) i zalecam tutaj autorowi na przyszłość szlifowanie umiejętności formułowania problemów i stawiania hipotez, jak również późniejszej ich weryfikacji.

2.3. Trafność doboru metod i narzędzi badawczych, umiejętność ich stosowania

Analizując treść przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej, a w szczególności rozdziałów 4-8, można stwierdzić że doktorant dysponuje dużą wiedzą i umiejętnościami praktycznymi z zakresu stosowania metod badawczych właściwych dla dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna i pokrewnych. W szczególności, doktorant wykazał się umiejętnością planowania złożonych eksperymentów badawczych, analizy ich wyników z użyciem metod statystycznych oraz prowadzenia

optymalizacji wielokryterialnej. Wykazał się także dogłębną znajomością materiałów i procesów wytwarzania przyrostowego oraz uwarunkowań z nimi związanych (zmienności parametrów wytwarzania i ich wpływ na wyroby).

Doktorantowi nieobce są także metody projektowania komputerowego wyrobów biomedycznych zindywidualizowanych anatomicznie – sprawnie operuje obrazowaniem medycznym DICOM, jak również dobrze porusza się w technikach inżynierii odwrotnej z użyciem skanowania 3D i modelowania CAD. Ogólnie wysoko oceniam wiedzę, umiejętności i doświadczenie doktoranta – ma on, jak wynika z treści rozprawy, pełen warsztat metodyczny aby prowadzić kompleksowe badania i prace wdrożeniowe w obszarze wytwarzanych przyrostowo wyrobów medycznych.

Pozwolę sobie jednak wymienić pewne mankamenty rozprawy w aspekcie dobranych i zastosowanych metod i narzędzi badawczych, przynajmniej w mojej opinii.

1. Praca nie zawiera szczegółowej analizy ekonomicznej procesu produkcji wyrobów biomedycznych. Analiza kosztów produkcji i szczegółowe ich rozbicie na składowe w kontekście różnych technologii druku 3D i obróbki poprocesowej (w tym sterylizacji) znacznie wzbogaciłaby pracę, zwłaszcza pod kątem oceny potencjalnej przydatności w obszarze klinicznym.
2. Obecna w pracy analiza finansowa firm z branży medycznego druku 3D (7.3) jest ciekawa i rzetelna, lecz niepotrzebna (to nie praca z inżynierii zarządzania czy finansów) i powinna być zastąpiona czymś bardziej powiązanym z główną tematyką rozprawy, np. analizą ekonomiczną, jak wspomniałem wyżej.
3. Przeprowadzona optymalizacja wielokryterialna parametrów procesu FDM z użyciem m.in. Taguchi i Analytical Hierarchy Process jest (wyłącznie w mojej opinii!) tyleż rzetelna i skrupulatna, co niepotrzebna. Sformułowane przez autora wnioski są dość ogólne i w miarę oczywiste, zwłaszcza że analizę przeprowadzono dla bardzo prostego wyrobu (próbki do badania wytrzymałości na rozciąganie). Sam fakt podjęcia się takiej analizy oceniam pozytywnie, ale uważam że autor włożył w to pracę, która nie do końca jest uzasadniona, zważywszy na niewielką nowość uzyskanych wniosków poznawczych i użytkowych.
4. Analizy MES są przeprowadzone poprawnie, podobnie jak badania tribologiczne, ma się jednak wrażenie „doklejenia” ich do głównego tekstu pracy – brak sensownej integracji z badaniami doświadczalnymi, zwłaszcza na poziomie (nieistniejącej de facto w rozprawie) dyskusji wniosków. Autor nie uwzględnił w analizie MES innych materiałów niż PLA – bardzo szkoda, był potencjał na zestawienie wyników symulacji i eksperymentu dla zróżnicowanych materiałów i procesów.
5. Brak bardziej szczegółowej analizy porównawczej różnych materiałów polimerowych używanych w procesie druku 3D. Oprócz braku uwzględnienia różnych materiałów w MES (jw.), autor nie zestawia ze sobą wyników badań wytrzymałościowych dla różnych technologii,

przez co ma się wrażenie „oderwania” od siebie fragmentów pracy dotyczących PolyJet, FDM i SLS. Warto byłoby zrobić kompletne zestawienia proces-materiał, a najlepiej jeszcze proces-materiał-maszyna, dla wyników badań wytrzymałościowych próbek wykonanych różnymi technologiami. Powinno to zostać także jasno uwzględnione we wnioskach.

W mojej opinii zakres przeprowadzonych badań i umiejętności jakie demonstruje autor operując różnymi technikami z pewnością zasługują na podkreślenie. Mimo pewnych zastrzeżeń, należy uznać poziom naukowy zastosowanych metod i narzędzi badawczych za właściwy i akceptowalny w kontekście wymagań stawianych kandydatom na doktorów w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych, a pojawiające się wątpliwości mogą zostać wyjaśnione w trakcie publicznej obrony rozprawy.

2.4. Prawdliwość układu pracy i struktury podziału treści

Układ pracy co do zasady spełnia bazowe kryteria tworzenia rozpraw naukowych. Tekst przedstawiony do oceny zawiera wprowadzenie i przegląd literatury naukowej (rozdziały 1 i 2). Następnie autor formułuje cel i zakres pracy (rozdział 3) i przedstawia program badawczy (rozdział 4). W kolejnym rozdziale (5) przedstawione są zastosowane materiały i urządzenia, można go więc potraktować jako metodykę. Dalsze rozdziały to już opisy przeprowadzonych eksperymentów i ich wyniki (rozdziały 6-8). Opis w rozdziałach 6-8 jest bardzo szczegółowy, w mojej opinii autor niczego nie pomija i nie skraca, prezentując nawet obliczenia arytmetyczne regresji co do pojedynczych działań (nie do końca jest to potrzebne, ale docenić należy pełną transparentność procesów i analiz przeprowadzonych przez doktoranta – dzięki temu badania są łatwiej reprodukowalne). Wnioski i końcowe podsumowanie stanowią rozdział 9 pracy.

Zaprezentowany w pracy układ co do zasady spełnia założenia stawiane rozprawom doktorskim. Mam natomiast pewne zastrzeżenia co do samego układu, struktury i „balansu” poszczególnych treści rozprawy, jak niżej:

1. Wprowadzenie (rozdział 1) zawiera rys historyczny wytwarzania przyrostowego – w mojej opinii w tej formie niepotrzebny, gdyż nie ma nawiązania do właściwej tematyki rozprawy, tj. właściwości mechanicznych elementów wytwarzanych na potrzeby medyczne. Poza tym we wprowadzeniu jest też ogólna charakterystyka wytwarzania przyrostowego – napisana poprawnie, ale powinna być podzielona na podrozdziały, gdyż autor porusza wiele tematów (podział technik, normatywy, projektowanie wyrobów, formaty danych), a opis jest ciągły, co utrudnia nawigację.
2. Brak właściwego wprowadzenia do tematu (1-2 strony które powinny być na samym początku pracy), w którym opisana byłaby skrótowo motywacja autora, trendy (ściśle związane z tematyką rozprawy) i krótko zaznaczone najważniejsze luki badawcze.

3. Rozdział 3 (cel i zakres) jest zbyt ogólny i krótki i stoi bardziej na poziomie prac magisterskich, a nie doktorskich. Brak wyraźnie zarysowanych problemów, motywacji, hipotez, celów szczegółowych i mierników ich spełnienia (o czym wspomniałem przy okazji formułowania hipotez).
4. Licząc od rozdziału 4 w górę, struktura mogłaby być ułożona w postaci typowej dla rozpraw naukowych – tj. rozdział 4 powinien nazywać się „Materiały i metody badań” i zawierać w sobie to, co obecnie rozdział 4 i 5, jak również opisy sposobu przeprowadzania eksperymentów i analiz z kolejnych rozdziałów. Natomiast później powinien być rozdział 5, który zawierałby tylko wyniki, w podziale na trzy główne sekcje (badania doświadczalne, symulacje, badania uzupełniające).
5. Rozdziały 6-8 zawierają niestety dość spore uchybienie w opisie – autor łączy metodykę z wynikami badań i obserwacjami oraz wnioskami. Oczywiście, łatwiej jest po prostu opisać przeprowadzone działania w formie ciągłego tekstu, od założeń do wyników i obserwacji (i autor zrobił to bardzo rzetelnie, nie pomijając niczego), od naukowca ze stopniem naukowym doktora oczekuje się jednak umiejętności rozdzielenia od siebie metodyki (opisy sposobu przeprowadzenia badań, założeń, parametrów, oprogramowania, sprzętu, materiałów, próbek, metod ich projektowania oraz także sposobu ich oceny – bez wyników!), wyników (tabele, wykresy, analiza statystyczna – regresja itp.) oraz wniosków (obserwacje autora i opinie nt. uzyskanych wartości i przyczyn, dla których są one takie jakie są). Autor nie zaprezentował tej umiejętności zbyt przekonująco i jest to jeden z większych mankamentów rozprawy (nie samych badań!). Sugeruję usprawnienie warsztatu naukowego i ulepszenie opisów w kolejnych pracach – znacznie ułatwia to pracę kolejnym badaczom, którzy mogą szybko wybrać interesujący ich fragment dotyczący np. metodyki konkretnego eksperymentu czy analizy, czy konkretnych wyników – obecnie trzeba się „przebijać” przez kompletne rozdziały.
6. Brakuje oddzielnego rozdziału z solidnie przeprowadzoną dyskusją wyników i wnioskami, w rozprawie obecne jest podsumowanie połączone z wnioskami, zdecydowanie zbyt mało rozbudowane. Wnioski są „rozsiane” także po całej pracy, brak jednak syntetycznego ich zestawienia znacznie utrudnia interpretację tego, co właściwie autor osiągnął w wyniku swoich badań.

Podsumowując, podobnie jak w przypadku innych elementów rozprawy doktorskiej, jej układ i struktura także spełniają wymagania stawiane rozprawom w dziedzinie nauk inżyneryjno-technicznych. Istniejące uchybienia są stosunkowo zauważalne, ale nie na tyle aby rozprawa wymagała poprawy – bardziej istotne byłoby, aby autor uświadomił sobie z czego one wynikają i usprawnił swój warsztat opisowy na tyle, aby w kolejnych pracach opisywać badania już zgodnie z wszelkimi zasadami sztuki naukowej.

2.5. Uwagi i pytania

Najważniejsze uwagi i pytania do pracy przedstawiono poniżej – wynikają one z zastrzeżeń sformułowanych we wcześniejszych sekcjach recenzji. W mojej opinii nie ma potrzeby uzupełnienia ani poprawy samego tekstu rozprawy, chciałbym jednak aby doktorant odniósł się do uwag w trybie pisemnym jeszcze przed obroną.

1. Proszę o próbę sformułowania: konkretnego problemu badawczego i luki badawczej, którą zapęłnia przedstawiony do oceny doktorat oraz co najmniej jednej hipotezy badawczej (sformułowanej nie ogólnikowo, lecz konkretnie, tj. z wartościami liczbowymi) którą wyniki badań przedstawionych w rozprawie mogłyby udowodnić.
2. Czy autor przeprowadził szczegółową analizę ekonomiczną wytwarzanych wyrobów medycznych, tj. ortezy nadgarstka, protezy palca i haka do robota? Proszę o przedstawienie porównania kosztów wytwarzania z różnych materiałów i różnymi technikami przyrostowymi (jest to wspomniane w pracy, ale bez konkretnych wartości kosztów materiałów, amortyzacji maszyn, pracy operatora, zużycia prądu itd.).
3. Czy wytworzone wyroby biomedyczne były konsultowane/opiniowane przez przedstawicieli środowiska medycznego, np. lekarzy ortopedów, fizjoterapeutów itp.? Jeśli tak, jaki był odbiór i wnioski?
4. Czy doktorant uważa, że zaproponowana przez niego metodyka analiz symulacyjnych ma szansę sprawdzić się w przewidywaniu właściwości mechanicznych wyrobów o innych geometriach niż przedstawione w pracy? Proszę o przedstawienie procedury zastosowania opracowanych przez autora modeli dla dowolnego wyrobu medycznego o innej geometrii niż przedstawione w pracy w rozdziale 8.
5. Na str. 138, w wyniku przeprowadzonych analiz doktorant stwierdza, że najlepszym ustawieniem ze względu na chropowatość i wytrzymałość jest to z najmniejszą wysokością warstwy, największym wypełnieniem i poziomym kierunkiem wytwarzania. Proszę o uzasadnienie zastosowania skomplikowanych metod optymalizacji wielokryterialnej (Taguchi, AHP, SAW) w kontekście uzyskanego bardzo oczywistego wniosku – na pierwszy rzut oka wydaje się, że przeciętny użytkownik drukarki 3D mógłby stwierdzić dokładnie to samo bez tych analiz, zwłaszcza w odniesieniu do wyrobu o tak prostej geometrii jak próbka do wytrzymałości na rozciąganie. Czy z przeprowadzonych analiz można wyciągnąć bardziej szczegółowe i nieoczywiste wnioski? Czy parametry wyznaczone przez doktoranta da się zaaplikować do wyrobów o innej geometrii z podobnym efektem, np. ortezy nadgarstka?

3. Wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska prezentuje nową wiedzę w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, pozyskaną przez autora w wyniku zrealizowanych badań eksperymentalnych, poprzedzonych analizą literaturową i zdefiniowaniem problemu naukowego. Zgodnie z zapisami właściwej ustawy można, w mojej opinii, przyjąć, że rozprawa stanowi oryginalne i samodzielne rozwiązanie problemu naukowego. Badania i ich wyniki przedstawione do oceny w rozprawie pozwalają uznać że doktorant ma wiedzę oraz umiejętności pozwalające na samodzielne planowanie i realizację badań naukowych w wybranym przez siebie obszarze, związanym z wytwarzaniem przyrostowym i oceną właściwości wyrobów do zastosowań biomedycznych. Doktorant udowodnił, że potrafi skutecznie planować i samodzielnie prowadzić badania naukowe w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych i w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, w której aplikuje on o stopień naukowy doktora.

Zatem w świetle dokonanej analizy i sformułowanych ocen stwierdzam, że rozprawa Pana mgr inż. Pawła Szczygła pt. „Ocena właściwości mechanicznych elementów wytwarzanych technologią druku 3D do zastosowań biomedycznych” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w Ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. z 2018 poz. 1668 z późn. zm.), w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie **inżynieria mechaniczna**. W związku z tym **wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej** Pana mgr inż. Pawła Szczygła i **dopuszczenie jej do publicznej obrony**.

Fulop Górski