

prof. dr hab. inż. Lucjan ŚNIEŻEK  
Wydział Inżynierii Mechanicznej  
Wojskowa Akademia Techniczna  
ul. gen. S. Kaliskiego 2  
00-908 Warszawa

Warszawa, dn. 27.08.2024 r.

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Kevina MOJ**

**pt. „Kształtowanie właściwości wytrzymałościowych struktur komórkowych  
wytworzonych przyrostową techniką SLM/DMLS”**

Podstawę formalną wykonania recenzji stanowiło pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Opolskiej, Pana dr. hab. inż. Piotra Niesłonego, prof. PO, nr RNDIM/102/2024 z dnia 11 lipca 2024 r.

### **1. Wstęp**

Obserwowane szerokie zainteresowanie wytwarzaniem przyrostowym w niemal wszystkich dyscyplinach nauk inżynierijno-technicznych i w wielu gałęziach przemysłu w dużej mierze wynika z coraz łatwiejszego dostępu do większości urządzeń przyrostowych oraz z coraz większej gamy różnorodnych materiałów do druku 3D. Zastosowanie technologii addytywnej umożliwia niekiedy znaczące skrócenie czasu projektowania nowych rozwiązań z uwagi na możliwość szybkiego wytworzenia prototypu lub gotowego elementu o bardzo złożonych kształtach. Te obszary implementacji technik przyrostowych są przedmiotem rozległych prac prowadzonych w wielu ośrodkach badawczych na całym świecie. Stosowane obecnie rozwiązania umożliwiają również wytwarzanie obiektów i struktur niemożliwych do uzyskania z wykorzystaniem konwencjonalnych technik wytwarzania. Jednym z takich rozwiązań są struktury komórkowe (ang. lattice structures). Wytworzenie tego typu struktur o dużej złożoności geometrycznej i precyzji wymiarowej prowadzi do uzyskania materiałów inżynierskich charakteryzujących się znaczącą redukcją masy i względnie lepszymi, a niekiedy specyficznymi właściwościami wytrzymałościowymi i termomechanicznymi oraz umożliwia wpływ na czynniki związane z bioresorbowalnością, np.: implantów medycznych.

Wytwarzając struktury komórkowe można uzyskać materiał zapewniający na przykład lokalne zmienną sztywność wyrobu, anizotropię własności mechanicznych oraz założone zdolności do absorpcji energii lub do przewodzenia ciepła. Należy podkreślić, że na obecnym etapie badań, kluczowym wyzwaniem stojącym przed wieloma ośrodkami zajmującymi się implementacją technik przyrostowych w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, energetycznym czy inżynierii biomedycznej jest dążenie do zdolności wytwarzania lekkich, ale wytrzymałych komponentów umożliwiających jednocześnie, w niektórych przypadkach, optymalizację przepływu płynu chłodzącego i maksymalizację powierzchni wymiany ciepła. Z tego względu podjęcie przez Doktoranta w recenzowanej rozprawie doktorskiej próby oceny właściwości wytrzymałościowych wybranych struktur komórkowych wytworzonych techniką przyrostową SLM/DMLS uważam za ważką i w pełni uzasadnioną inicjatywę.

## **2. Charakterystyka pracy**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Kevina Moj składa się z 9 rozdziałów i *Bibliografii* zawierającej 150 pozycji prac, na które Autor powołał się w tekście. Warto dodać, że 110 z nich ukazało się w ciągu ostatnich 5 lat, a w pięciu przywołanych publikacjach Doktorant występuje jako ich współautor. Część opisową pracy zamykają streszczenia rozprawy w języku polskim i angielskim.

Praca na 121 stronach jest bogato ilustrowana w głównej mierze obrazami struktur komórkowych i modeli symulacji numerycznych, graficznymi charakterystykami i wykresami właściwości wytrzymałościowych oraz deformacji rozpatrywanych struktur komórkowych. Łącznie w rozprawie zamieszczono 51 rysunków i 29 tabel.

W dwustronicowym *Wprowadzeniu* stanowiącym pierwszy rozdział rozprawy, poprzedzonym spisem występujących w pracy oznaczeń i najważniejszych skrótów, Doktorant w zwięzły sposób opisuje możliwości precyzyjnego kształtowania materiałów porowatych z wykorzystaniem technologii SLM i SLS, skupiając swoją uwagę na możliwościach i znaczeniu ich praktycznego zastosowania. Wymienia zalety wytwarzanych przyrostowo regularnych struktur komórkowych, w tym możliwości podwyższenia efektywności i redukcji kosztów produkcji oraz opisuje precyzyjną kontrolę procesu zapewniającą wytwarzanie materiału o ściśle określonych właściwościach użytkowych przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia surowców. Podkreśla zarazem ograniczoną bazę szczegółowych charakterystyk wytrzymałościowych tego typu struktur z uwzględnieniem kształtu pojedynczej komórki, jej rozmiaru oraz gęstości względnej materiału, które w znaczący sposób wpływają na ich zdolności aplikacyjne. Wymienione cechy struktur

komórkowych uzasadniają pytanie, które Doktorant sformułował na zakończenie *Wprowadzenia*, w brzmieniu „... jaki wpływ na właściwości mechaniczne struktur komórkowych mają takie czynniki jak kształt pojedynczej komórki, jej rozmiar oraz gęstość względna?”. Pytanie to legło u podstaw zrealizowanego w zasadniczej części pracy obszaru badawczego.

W rozdziale drugim zatytułowanym *Wykorzystanie metod przyrostowych do wytwarzania struktur komórkowych*, na 27 stronach, w oparciu o 99 pozycji literaturowych dokonano usystematyzowanego opisu technik przyrostowych znajdujących zastosowanie do tworzenia zaawansowanych struktur komórkowych, poświęcając szczególną uwagę technice SLM/DMLS - wykorzystywanej do selektywnego topienia drobnego proszku metalicznego oraz technice SLS – w której laser wykorzystywany jest do spiekania proszku poliamidowego. Dodatkowo scharakteryzowane zostały najpopularniejsze proszki do druku 3D technikami SLM i SLS i metody ich wytwarzania, podkreślając znaczenie ich jakości dla szerokiego spektrum właściwości wydrukowanych elementów. Syntetyczne ujęcie zbioru informacji dotyczących technicznych aspektów przyrostowego wytwarzania z proszków metalicznych i tworzyw sztucznych uzasadnia ogólna ich dostępność związana z coraz większą popularnością druku 3D. O wiele bardziej wartościową, z uwagi na tematykę rozprawy, zdaje się być ta część rozdziału, w której przedstawione zostały kwestie związane z klasyfikacją, projektowaniem i analizą numeryczną struktur komórkowych. Bez konieczności przytaczania konkretnych technik wytwarzania Doktorant identyfikuje trzy najważniejsze cechy struktury komórkowej, tj.: kształt komórki jednostkowej, jej wielkość i stopień wypełnienia. Ponadto przedstawia wielokryterialną klasyfikację struktur komórkowych, korzystając z niezbyt czytelnego zarówno od strony graficznej, jak i opisowej, rysunku 2.8 oraz wybrane oprogramowanie wykorzystywane do projektowania i implementacji tychże struktur. W krótkim, dwustronicowym opisie dotyczącym analizy numerycznej struktur komórkowych Doktorant skupił się przede wszystkim na metodach symulacji omawianych struktur, w szczególności na metodach: bryłowej - opartej na elementach belkowych i homogenizacji numerycznej. Rozdział drugi zamyka zbiór informacji dotyczących weryfikacji jakości wytworzonych (a nie jak napisano w tytule podrozdziału 2.5 „...jakości wytworzenia...”) struktur komórkowych w zakresie charakteryzujących je: struktury, porowatości, odchyłek wymiarowych, chropowatości i naprężeń własnych.

Ocena aktualnego stopnia zaawansowania badań dotyczących właściwości mechanicznych i wybranych wyników symulacji numerycznych struktur komórkowych stanowią zasadniczą część rozdziału trzeciego zatytułowanego *Przegląd stanu wiedzy*.

Wykorzystując 49 źródeł literaturowych w postaci artykułów naukowych opublikowanych po 2017 roku, w zwięzłej formie, bo liczącej 8 stron, Doktorant odniósł się do zakresu opublikowanych wyników badań dokonując ostatecznie, na zakończenie rozdziału, podsumowania stanowiącego syntezę tychże wyników i formułując wnioski z tej syntezy płynące. Zdaniem recenzenta, można było uniknąć w tymże rozdziale powtórzenia tytułu podrozdziału 3.2. *Analiza numeryczna struktur komórkowych*, w brzmieniu identycznym, jak tytuł podrozdziału 2.4.

Zamieszczony w rozdziale trzecim przegląd stanu wiedzy wskazuje na złożoność tematyki wytwarzania przyrostowego struktur komórkowych i szerokie spektrum zagadnień badawczych dotyczących między innymi: wpływu kształtu komórki jednostkowej na właściwości mechaniczne tego typu struktur, oceny ich jakości, w tym defektów i niedoskonałości, a także standaryzacji procedur eksperymentalnych zapewniającej porównywalność i integrację wyników badań. Uzasadnia to sprecyzowanie w następnym, czwartym rozdziale celu i zakresu rozprawy oraz sformułowanie hipotezy badawczej.

Jako cel naukowy rozprawy przyjęto ocenę wpływu takich czynników jak: topologia, wielkość oraz gęstość względna komórki elementarnej na właściwości makroskopowe całej struktury komórkowej. Doktorant przyjął, że osiągnięcie tak sformułowanego celu będzie wymagało realizacji zakresu badań obejmujących:

1. Opracowanie wyników uzyskanych z badań wytrzymałościowych (statycznych prób rozciągania i ściskania) wybranych struktur komórkowych wytworzonych techniką przyrostową SLM/DMLS;
2. Ocenę jakościową wytworzonych struktur komórkowych przy parametrach domyślnych procesu druku;
3. Wyznaczenie charakterystyk właściwości wytrzymałościowych dla szerokiego zakresu parametrów struktury komórkowej;
4. Weryfikację właściwości mechanicznych struktur komórkowych za pomocą analizy numerycznej.

Należy jednak zwrócić uwagę na zauważalny brak spójności między sformułowanym celem i tytułem pracy, jak i hipotezą badawczą zakładającą, że „*Na właściwości mechaniczne struktur komórkowych wpływają takie czynniki jak: topologia pojedynczej komórki, gęstość względna oraz rozmiar pojedynczej komórki. Biorąc pod uwagę liczbę zmiennych parametrów przy projektowaniu struktur komórkowych występuje możliwość uzyskania określonej kombinacji właściwości materiałów w makroskali*”. W drugiej części hipotezy jest mowa o kombinacji bliżej nieokreślonych właściwości materiałów, jednak analizując treść rozprawy

należy się domyślać, że finalnie chodzi przede wszystkim o właściwości wytrzymałościowe. Takie rozumienie zasadniczego problemu badawczego potwierdza tytuł rozprawy „*Kształtowanie właściwości wytrzymałościowych struktur komórkowych wytworzonych przyrostową techniką SLM/DMLS*”. Z jakiego zatem powodu w celu pracy Doktorant sprowadził obszar swoich poszukiwań do właściwości makroskopowych i co rozumie pod pojęciem tych właściwości? Z pewnością będzie to stanowiło przyczynek do dyskusji podczas obrony recenzowanej rozprawy.

Rozdział piąty, liczący 10 stron, poświęcono opisowi metod badawczych i procesowi wytwarzania poddanych badaniom struktur komórkowych. W początkowej części rozdziału Doktorant wprowadza jednostronicowy tekst wiszący, który z uwagi na swoje znaczenie, z racji opisu procedury badawczej zastosowanej w pracy, powinien mieć numer i tytuł. W dalszej części rozdziału Doktorant powtarza tekst wiszący pod tytułami podrozdziałów 5.1 i 5.2 używając między innymi pojęcia skaningowego mikroskopu optycznego (str. 49<sup>2</sup>), mając z pewnością na myśli skaningowy mikroskop elektronowy (SEM). Po zwięzłej identyfikacji i analizie morfologii oraz rozkładu wielkości cząstek proszków stali narzędziowej MS1 i stopu tytanu Ti64 oferowanych przez producenta maszyny przyrostowej EOS, opisane zostały etapy projektowania i wytwarzania badanych struktur komórkowych. Wydzielono geometrię próbek do badań właściwości wytrzymałościowych w warunkach osiowego rozciągania (z litego materiału wytworzonego konwencjonalnie oraz o strukturze komórkowej) i próbek do badań wytrzymałościowych w warunkach osiowego ściskania. Dokonano również wyboru badanych struktur komórkowych w postaci: BCC, Diamond, Fluorite, Kelvin, Schwarz TPMS i Fischer-Koch TPMS, identyfikując ich konfiguracje topologiczne i podając ich parametry. Na tym etapie wprowadzone zostają również informacje dotyczące trzeciego materiału w postaci poliamidu PA12, z którego wykonana została partia próbek do osiowego rozciągania techniką SLS, jednak jak podkreśla Doktorant na str. 54<sub>6-4</sub> - „*Próbki wytworzone metodą SLS, z uwagi na zewnętrzne źródło produkcji, nie zostały objęte szczegółową analizą w ramach tej pracy.*” Zachodzi zatem pytanie, po co włączono do opisu wyniki tych badań, skoro zgodnie z tytułem pracy, kształtowanie właściwości wytrzymałościowych powinno dotyczyć struktur komórkowych wytworzonych techniką stapiania proszków metalicznych, a nie spajania kolejnych warstw proszków poliamidowych? Podczas wydruku elementów modelowych zastosowano zalecane przez producenta wartości parametrów przyrostowego wytwarzania, takie jak: moc wiązki lasera, prędkość skanowania, grubość warstwy i odstęp między ścieżkami laserowego przetopu.

Celem badań opisanych w rozdziale szóstym, zatytułowanym *Analiza numeryczna struktur komórkowych*, było zasymulowanie zachowania rozpatrywanych struktur komórkowych podczas statycznych prób rozciągania i ściskania, wykorzystując metodę bryłową i homogenizację numeryczną. Na 18 stronach zamieszczono wyniki symulacji przeprowadzonych dla modeli: pojedynczej komórki elementarnej, struktury złożonej z minimalnej liczby komórek i wygenerowanej przy użyciu oprogramowania nTopology oraz struktury złożonej z minimalnej liczby komórek, uzyskanej na podstawie wyników przeprowadzonej na obiekcie rzeczywistym tomografii komputerowej – z uwzględnieniem odchyłek wymiarowych i porowatości. Należy podkreślić, że pojęcie minimalnej liczby komórek dotyczy struktury zawierającej wystarczającą ich liczbę do uzyskania stabilnej wartości efektywnego modułu sprężystości wzdłużnej. Identyfikacji tej liczby dokonano na podstawie wyników przeprowadzonej analizy numerycznej ograniczając się do przypadku obciążeń rozciągających. Efektem opisanych wyników obliczeń numerycznych i badań eksperymentalnych są zestawione w formie tabelarycznej (tabele 6.3-6.6) wartości efektywnego modułu sprężystości wzdłużnej. Niezbyt fortunnie sformułowano jednak tytuły tych tabel, jako „*Analiza numeryczna struktur komórkowych ...*”, a więc identycznie jak tytuł rozdziału w którym zostały te tabele zamieszczone. Przyjęta forma prezentacji uzyskanych wartości  $E_{eff}$  (rezygnacja z formy graficznej) również nie pozwala na jednoznaczne wnioskowanie, a ograniczona liczba przeprowadzonych prób uniemożliwiła jakąkolwiek analizę statystyczną tychże wyników. Należy mieć na uwadze, że zgodnie z zapisami normy dotyczących materiałów konwencjonalnych, przewiduje się badanie przynajmniej pięciu próbek - i to w sytuacji monolitycznych, izotropowych materiałów.

W rozdziale siódmym, zatytułowanym *Badania właściwości mechanicznych struktur komórkowych*, na 14 stronach zamieszczono i opisano de facto wyniki badań właściwości wytrzymałościowych w postaci efektywnego modułu Younga i efektywnej umownej granicy plastyczności rozważanych struktur komórkowych. Wielkości te wyznaczono w warunkach osiowego ściskania i osiowego rozciągania, a uzyskane wyniki w postaci przebiegów zmian naprężenia efektywnego w funkcji efektywnego odkształcenia oraz zestawień tabelarycznych uśrednionych właściwości wytrzymałościowych zamieszczono w podrozdziałach 7.1 i 7.2, których tytuły zawierają błędy frazeologiczne (7.1. *Badania statycznej próby ściskania* i 7.2. *Badania statycznej próby rozciągania*). W przypadku struktury komórkowej typu Schwarz wykonanej ze stali MS1 dokonano dodatkowej oceny badanych właściwości wytrzymałościowych z uwzględnieniem postprocesowej obróbki cieplnej polegającej na wygrzaniu próbek w temperaturze 490°C przez 4 godziny. Doktorant nie wyjaśnia jednak jak

przebiegało nagrzewanie i chłodzenie tychże próbek, ani nie uzasadnia przyjęcia takiego właśnie cyklu zmian temperatury. Należy mieć na uwadze, że każdy zabieg cieplny składa się z trzech okresów: nagrzewania, wygrzewania i chłodzenia. Trudno również uzasadnić zamieszczenie wśród prezentowanych wyników danych dotyczących struktur komórkowych wytworzonych z poliamidu PA12 techniką SLS. Rozdział zamyka próba uogólnienia wyników badań doświadczalnych ograniczonych do wartości efektywnego modułu sprężystości wzdłużnej różnych struktur komórkowych wyznaczonych dla stali narzędziowej MS1 przed i po obróbce cieplnej oraz stopu tytanu Ti64. Jako zmienne potraktowano kształt i wielkość poszczególnych komórek oraz gęstość względną wytworzonej przyrostowo struktury. Opracowane i zaprezentowane na rys. 7.6-7.8 charakterystyki właściwości wytrzymałościowych zbadanych struktur komórkowych, z uwzględnieniem różnych konfiguracji wymienionych powyżej parametrów tychże struktur, posłużyły Doktorantowi do wysunięcia wniosków, w części nie znajdujących wystarczającego uzasadnienia w uzyskanych wynikach lub o zbyt dużym stopniu uogólnienia. Tak należy bowiem ocenić konkluzję wieńczącą przeprowadzoną w podrozdziale 7.3 analizę w brzmieniu „*Podsumowując, hierarchia wpływu różnych czynników na właściwości mechaniczne struktur komórkowych układa się następująco: materiał, z którego wykonana jest struktura, ma największy wpływ, następnie gęstość względna, kształt pojedynczej komórki, a na końcu wielkość pojedynczej komórki.*” (str. 89<sup>7-10</sup>).

Rozdział ósmy poświęcono ocenie jakościowej wytworzonych trójwymiarowych struktur komórkowych w oparciu o wyniki badań metodą tomografii rentgenowskiej. Również w tej części pracy badaniom rentgenowskim poddano zarówno zestawy struktur komórkowych wytworzonych z proszków metalicznych (stal MS1 oraz stop tytanu Ti64), jak i z poliamidu PA12. Na podstawie wyników tych badań określono rzeczywiste zewnętrzne i wewnętrzne powierzchnie wytworzonych elementów a w konsekwencji odchyłki wymiarów modeli rzeczywistych względem założonych, wyznaczono gęstość względną materiałów struktur komórkowych oraz dokonano oceny ich porowatości. Zbiór tych informacji stanowi z pewnością podstawę do wynikającej z tytułu rozdziału, oceny jakości wytworzonych struktur komórkowych, jednak Doktorant o tejsze jakości wspomina jedynie doraźnie – w odniesieniu do rozkładów normalnych wartości odchyłek wymiarowych dla rozpatrywanych struktur komórkowych oraz w podrozdziale 8.3, poświęconym analizie porowatości wytworzonych przyrostowo materiałów. Rozdział zamyka, wykonana na podstawie obrazów z tomografu rentgenowskiego, analiza mechanizmów niszczenia wybranej struktury komórkowej typu TPMS Schwarz poddanej badaniom wytrzymałościowym

w warunkach osiowego rozciągania. Utrwalone w formie graficznej i opisane mechanizmy deformacji i niszczenia badanej struktury komórkowej stanowią znaczącą wartość składową całości pracy i wnoszą istotny wkład w stan wiedzy na temat właściwości wytrzymałościowych struktur komórkowych wytwarzanych techniką SLM/DMLS. Pewne uwagi budzi jedynie usytuowanie niniejszego opisu w rozdziale poświęconym ocenie jakościowej badanych struktur.

Opisane w rozdziałach 5-8 wyniki badań legły u podstaw sformułowania wniosków końcowych, które Doktorant zamieścił w rozdziale dziewiątym, po syntetycznym podsumowaniu zakresu przeprowadzonych badań i ich wyników.

### **3. Ocena rozprawy**

Materiały o budowie komórkowej charakteryzują się regularną budową struktury, uzależnioną od parametrów tworzących je komórki elementarne. Cechą charakterystyczną tego typu materiałów jest między innymi izotropowość lub ortotropowość właściwości mechanicznych. Obserwowany na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat intensywny proces wdrażania w praktyce inżynierskiej druku 3D otworzył nowe możliwości wytwarzania tego typu różnorodnych struktur z możliwością modelowania ich topologii już na etapie projektowania wyrobu. Należy podkreślić, że tematyka projektowania i badania regularnych materiałów komórkowych jest obecnie szeroko podejmowana w wielu ośrodkach badawczych zarówno w kraju, jak i za granicą. Podjęta przez Doktoranta problematyka oceny wpływu takich czynników jak topologia, wielkość oraz gęstość względna komórki elementarnej na właściwości wytrzymałościowe wytworzonych przyrostowo struktur komórkowych jest zatem nader aktualna i zasługuje na uwagę.

Opracowana metodyka badań jak i układ pracy nasuwają pewne uwagi, jednak ich waga nie jest na tyle znacząca, aby negatywnie ocenić ich dostosowanie do zaprezentowanych etapów osiągnięcia zamierzenia badawczego. Praca posiada znaczący potencjał aplikacyjny a jej układ w przeważającej części jest przemyślany, logiczny i spójny. Krytyczne uwagi dotyczące obszaru merytorycznego rozprawy wynikają przede wszystkim z konieczności uściślenia niektórych zagadnień, pominiętych lub przedstawionych zbyt ogólnie. Dyskusji oraz dodatkowych wyjaśnień wymagają następujące kwestie:

- 1) Co uzasadnia zamieszczenie w pracy wyników badań struktur komórkowych wytworzonych techniką SLS (spajania kolejnych warstw proszków poliamidowych) z poliamidu PA12, skoro zarówno w tytule pracy, jak i w zakresie badawczym jest



mowa jedynie o technice przyrostowej SLM/DMLS (stapiania proszków metalicznych)?

- 2) Minimalizacja udziału wad materiałowych elementów wytwarzanych techniką selektywnego stapiania laserowego SLM może zostać osiągnięta poprzez przeprowadzenie procesu doboru parametrów wytwarzania opartego o dogłębną analizę strukturalną oraz wytrzymałościową wytworzonych próbek. W pracy zdecydowano się jednak na zastosowanie standardowych ustawień zalecanych przez producenta proszków, bez wystarczającego uzasadnienia takiego podejścia. Jeśli Autor zastosował parametry rekomendowanych przez producentów, to należał mimo wszystko je przytoczyć.
- 3) Wskazany byłoby co najmniej odniesienie się w rozprawie do stosowanych najczęściej empirycznych metod doboru parametrów przyrostowego wytwarzania z wykorzystaniem techniki SLM. Poza parametrami wytwarzania, wyjaśnienia wymaga również zastosowana strategia naświetlania stapianego proszku, mająca istotny wpływ między innymi na wartość i ukierunkowanie naprężeń własnych powstałych w wyniku skurczu termicznego.
- 4) Część próbek ze stali MS1 wytworzonych techniką SLM poddano obróbce cieplnej polegającej na wygrzewaniu przez 4 godziny w temperaturze 490 °C. Doktorant nie podaje celu tejże obróbki, ani nie weryfikuje uzyskanych po tej obróbce mikrostruktury i twardości. W pracy generalnie pominięto kwestię badań mikrostruktur wytworzonych materiałów.
- 5) Uwaga o mniejszym znaczeniu dotyczy wielokrotnie powtarzanego błędu rzeczowego. W rozprawie naprzemiennie Doktorant posługuje się sformułowaniami „*właściwości wytrzymałościowe*” i „*właściwości mechaniczne*”, co stwarza wrażenie utożsamiania ich ze sobą. Realizowane badania, zgodnie z tytułem pracy, skupiają się jednak na właściwościach wytrzymałościowych wytworzonych struktur komórkowych.
- 6) W rozdziale dziewiątym zatytułowanym *Podsumowanie i wnioski* Doktorant zaznacza, że symulacje numeryczne dotyczące efektywnych właściwości wytrzymałościowych badanych struktur komórkowych podczas ściskania i rozciągania przeprowadzono „... w celu walidacji wyników uzyskanych z eksperymentów.” (str105<sup>9-11</sup>). Niewątpliwie wyjaśnienia wymaga tak rozumiane pojęcie walidacji wyników badań.

Na krytyczną ocenę zasługują dość liczne niedociągnięcia natury edytorskiej, do których zaliczyć można m.in.:

- niektóre zapisy, np.: „... gęstość warstw proszku ...” – str. 174 (nieznane pojęcie), „... wykres, który pokazuje ...” – str. 205, „... wykres pokazuje ...” – str. 936, „Krzywa kumulatywna potwierdza ...” – str. 50<sup>5</sup>, „Rysunek 5.4 przedstawia ...” – str. 512, „Wykres na rysunku 6.8 pokazuje ...” – str. 717, „Wytwarzanie addytywne stanowi idealną technologię do tworzenia struktur komórkowych ...” – str. 105<sup>1-2</sup>, czy zamienne stosowanie pojęć *kategoryzacja* i *klasyfikacja* – str. 26<sup>4-6</sup> i rys. 2.8,
- zakończenia podrozdziałów rysunkami (np.: rys. 2.12 – str. 30, rys. 5.1 – str. 48, rys. 5.3 – str. 50, rys. 5.5 – str. 53, rys. 6.4 – str. 66) oraz tabelami (np. Tabela 5.2 – str. 51 i Tabela 5.8 – str. 55),
- literówki (np.: „... zasada ...” zamiast „... zasadę ...” bez wyjaśnienia czego ta zasada dotyczy – str. 19<sup>16</sup>, „... umożliwi na kombinację ...” zamiast „... umożliwi kombinację ...” – str. 282, „... podczas którego ...” zamiast „... podczas której ...” – str. 212),
- podpisów pod rysunkami w brzmieniu np.: „Analiza morfologii proszków metalicznych...” – rys. 5.2 str. 49, „Projektowanie próbek wytrzymałościowych ...” – rys. 5.4 str. 52, „Analiza porównawcza porowatości ...” – rys. 8.8 str. 100 i 8.9 str.101, czy „Analiza mechanizmu deformacji ...” – rys. 8.10 str. 103 i rys. 8.11 str. 104,
- nieczytelne opisy osi pionowej na rys. 6.4 str. 66 oraz legend na rys. 2.16 str. 36, rys. 8.4 str. 96 i rys. 8.10 str. 103,
- wypunktowanie wniosków końcowych z wykorzystaniem cyfr rzymskich po zastosowaniu cyfry arabskiej w tytule tego rozdziału,
- wprowadzenie pojęcia *skaningowy mikroskop optyczny* (str. 49<sup>2</sup>), zamiast *skaningowy mikroskop elektronowy*,
- nadużywanie spójnika *Natomiast*, wykorzystywanego niejednokrotnie na początku zdania, bez wyrażania przeciwieństwa i kwestionowania tego, co zostało zapisane w zdaniu poprzednim. Łącznie 30 takich przypadków,
- wprowadzanie tekstów wiszących, np. podrozdziały 5.1 (str. 49), czy 5.2 (str. 51),
- wielokrotne stosowanie pojęcia *moc lasera* zamiast np. *moc (wiązki) promieniowania laserowego* (np.: str. 20<sup>3</sup>, str. 20<sup>10</sup>, str. 20<sup>13</sup>, str. 23<sup>5</sup>, str. 34<sup>3</sup>, str. 35<sup>1</sup>, str. 36<sup>2</sup> str. 98<sup>2</sup>),
- na stronach 24-25 trzykrotnie zapisano definicję gęstości względnej struktury komórkowej, za każdym razem w innym brzmieniu.

W trakcie czytania pracy zauważono również nieliczne błędy interpunkcyjne, dotyczące najczęściej braku przecinków, które przekazano bezpośrednio Doktorantowi do wykorzystania podczas przygotowywania publikacji.

Przytoczone uwagi, skądinąd świadczące o niezachowaniu należytej staranności w sferze redakcyjnej tekstu pracy, nie wpływają znacząco na ogólnie pozytywną ocenę poziomu merytorycznego recenzowanej rozprawy, zawierającej szereg wartościowych wyników i analiz. Szkoda jednak, że Autor nie skorzystał z możliwości sformułowania i wyeksponowania w końcowej części rozprawy najważniejszych, oryginalnych osiągnięć własnych, będących efektem badań zrealizowanych dotychczas oraz kierunków dalszych badań wytworzonych przyrostowo struktur komórkowych, leżących wszakże w głównym nurcie zainteresowań naukowych Doktoranta.

Doktorant wykazał się dużym opanowaniem występujących w pracy zagadnień teoretycznych i metodyk badawczych oraz wiedzą w zakresie przyrostowych technik wytwarzania, a do jego oryginalnych osiągnięć zaliczam:

- 1) Efektywne wytworzenie techniką przyrostową SLM/DMLS, ale i techniką SLS, struktur komórkowych, w postaci zintegrowanego zbioru komórek elementarnych o różnorodnych konfiguracjach topologicznych typu: BCC, Diamond, Fluorite, Kelvin, Schwarz TPMS i Fischer-Koch TPMS, uwzględniając różne wymiary tych komórek.
- 2) Określenie, przy wykorzystaniu tomografii komputerowej, rzeczywistych parametrów jakości struktur komórkowych i odniesienie ich do modelowej geometrii oraz ocenę defektów powstałych podczas druku z zachowaniem parametrów rekomendowanych przez producentów urządzeń przyrostowych.
- 3) Identyfikację czynników wywierających największy wpływ na kształtowanie właściwości wytrzymałościowych rozpatrywanych struktur komórkowych, do których zaliczono: rodzaj materiału bazowego oraz gęstość względną – powiązaną ściśle z topologią regularnych struktur komórkowych o powtarzalnej komórce elementarnej.
- 4) Ocenę wpływu kształtu i wielkości pojedynczej komórki oraz gęstości względnej badanych struktur komórkowych na ich wybrane właściwości wytrzymałościowe w warunkach osiowego rozciągania i ściskania, w szczególności na efektywną granicę plastyczności  $\sigma_{0,2}^{eff}$  i efektywny moduł Younga  $E_{eff}$ .
- 5) Opracowanie kryterium stabilności struktur komórkowych warunkującego minimalną liczbę komórek, przy której struktury te zachowuje się jako jednorodny, homogeniczny materiał, umożliwiającego zarazem standaryzację procedur

badawczych, a w konsekwencji możliwość prowadzenia analiz porównawczych właściwości wytrzymałościowych badanych materiałów w warunkach osiowego rozciągania i ściskania.

- 6) Zaproponowanie metody analizy numerycznej struktur komórkowych, wykorzystującej technikę homogenizacji numerycznej na podstawie modeli uzyskanych z tomografii komputerowej, zwiększającą dokładność oceny właściwości wytrzymałościowych materiałów porowatych, w szczególności w warunkach osiowego rozciągania.

#### 4. Wniosek końcowy

Z przedstawionej wyżej oceny rozprawy Pana mgr. inż. Kevina Moj wynika, że:

- wybór tematyki pracy został przeprowadzony w sposób trafny i odnosi się do aktualnej wiedzy i praktyki,
- podjęte w rozprawie trudne zadania zostały zrealizowane na zadowalającym poziomie,
- przeprowadzone analizy skomplikowanych zagadnień z zakresu technik przyrostowego wytwarzania i badań materiałowych, opracowanie wyników i forma wniosków nie budzą istotnych zastrzeżeń,
- treść rozprawy stanowi zamkniętą całość, posiada poprawnie opracowaną szatę graficzną oraz stojącą na odpowiednim poziomie dokumentację z badań własnych.

Przytoczone fakty świadczą o dostatecznych kompetencjach Doktoranta w zakresie prowadzenia badań naukowych oraz wskazują na jego zadawalającą wiedzę ogólną i umiejętności praktyczne w dyscyplinie naukowej Inżynieria mechaniczna, w której mieszczą się zagadnienia objęte rozprawą. Stwierdzam zatem, że praca mgr. inż. Kevina Moj pt. „*Kształtowanie właściwości wytrzymałościowych struktur komórkowych wytworzonych przyrostową techniką SLM/DMLS*” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „*Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*” (Dz.U. 2023.742). Jednocześnie wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Opolskiej o dopuszczenie Autora do jej publicznej obrony.

