

Prof. dr hab. inż. **Adam RUSZAJ**
Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nowym Sączu
Instytut Techniczny
Ul. Zamenhofa 1/a, 33-300 Nowy Sącz
Senior profesor - POLITECHNIKA KRAKOWSKA

RECENZJA

rozprawy doktorskiej pt.:

OPTIMALIZACJA PROCESU WYTWARZANIA METODAMI PRZYROSTOWYMI SLS/SLM ZE WZGLĘDU NA WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE WYKONYWANYCH ELEMENTÓW

Autor: mgr inż. **Andrzej Stwora**

Promotor: prof. dr hab. inż. **Jerzy Kozak**

Podstawa opracowania recenzji:

Zlecenie

Dyrektora Instytutu Lotnictwa w Warszawie

1. CHARAKTERYSTYKA PRACY

Opiniowana praca poświęcona jest zagadnieniom wytwarzania przyrostowego. Metody wytwarzania przyrostowego rozwijają się bardzo dynamicznie i coraz szerzej są stosowane nie tylko na etapie przygotowania produkcji (Rapid Prototyping, Rapid Tooling), ale również w procesach produkcyjnych (Rapid Manufacturing). Wiedza o tych procesach w stosunku do procesów tradycyjnych jest ograniczona szczególnie w zakresie oceny a'priori właściwości wytwarzanych przy ich zastosowaniu wyrobów. Z tego względu omawiane w recenzowanej pracy badania ukierunkowane na wyznaczenie wskaźników technicznych i ekonomicznych wyrobów wykonywanych przyrostowo oraz optymalizację procesu wytwarzania są bardzo ważne i potrzebne.

W Rozdziale 1 (Wprowadzenie) została przedstawiona krótka historia rozwoju i charakterystyka wytwarzania przyrostowego obejmująca: klasyfikację sposobów kształtowania przyrostowego (SLA, SGC, LOM, FDM, SLS/SLM, 3DP), specyfikę wytwarzania przyrostowego elementów metalowych z wykorzystaniem takich procesów jak: Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM) oraz metodę nanoszenia laserowo stopionego proszku metalowego (LENS). **W Rozdziale 2**

(Aktualny stan problemu w świetle danych literaturowych) Autor na podstawie danych literaturowych przedstawił bardzo zwięźle stan badań procesów wytwarzania przyrostowego SLS i SLM. Wynikiem przeglądu literaturowego jest stwierdzenie, że tylko nieliczne publikacje dotyczą procesów SLS i SLM realizowanych z wykorzystaniem laserów impulsowych (taki laser autor stosuje w swoich badaniach). Na podstawie tej analizy stanu badań Autor w **Rozdziale 3** sformułował **cel i zakres pracy** obejmujący:

- wyznaczenie podstawowych charakterystyk procesu SLS/SLM opisujących relacje pomiędzy wydajnością, chropowatością, porowatością, wytrzymałością, jakością warstwy wierzchniej a parametrami procesu,
- wyznaczenie zależności pomiędzy parametrami technologicznymi procesu (moc, prędkość prowadzenia wiązki, czas naświetlania warstwy a czasem wymaganym do przetopienia warstwy proszku;
- porównanie wskaźników cena/czas wykonania elementu (np. forma wtryskowa, element lotniczy) wykonanych przyrostowo z wykonanymi metodami tradycyjnymi;
- opracowanie metodyki doboru modelu kosztu wytworzenia przyrostowo elementów (w postaci parametrów SLS/SLM) dla stopu AlSi10Mg,
- optymalizacja parametrów procesu, ze względu na osiągnięcie możliwie najkrótszego czasu wykonania pojedynczej warstwy przy zachowaniu gęstości elementu nie spadającej poniżej 95% gęstości litego materiału.

Autor założył opracowanie:

- matematycznych modeli dedukcyjnych wyrażających zależność pomiędzy mocą wiązki laserowej a czasem spiekania,
- przeprowadzenie badań doświadczalnych (również badań weryfikujących matematyczny model dedukcyjny) na urządzeniu AM 250 wyposażonym w laser włóknowy działający impulsowo.

Modelownie matematyczne oraz weryfikację doświadczalną przeprowadzono dla takich materiałów jak: Ti_6Al_4V , AlSi10Mg oraz stal narzędziowa 3161.

Zdaniem Autora osiągnięcie powyżej sformułowanego celu pracy spowoduje dalsze pogłębienie i poszerzenie wiedzy o procesach wytwarzania przyrostowego SLS/SLM.

Kolejny **Rozdział 4 (Modelowanie matematyczne i symulacja selektywnego spiekania i topienia laserowego)** poświęcony jest modelowaniu matematycznemu i symulacji komputerowej selektywnego spiekania i topienia laserowego. W rozdziale tym autor przeprowadził najpierw, na podstawie danych literaturowych, przegląd metod analizy termicznej zjawisk zachodzących podczas procesu obróbki laserowej a szczególnie w procesach SLS/SLM proszków metalowych. W procesach SLS/SLM wiązka światła laserowego jest częściowo absorbowana przez ziarenka proszku nie tylko

na powierzchni warstwy ale również w głębi warstwy (światło laserowe przechodzi pomiędzy ziarenkami proszku). Z tego względu analiza zjawisk w obszarze oddziaływania wiązki na proszek jest realizowana wieloaspektowo z uwzględnieniem absorpcji promieniowania, przewodności termicznej oraz kinetyki konsolidacji ziarenek proszku. Wynikiem tych zjawisk jest odpowiedni rozkład temperatury w warstwie proszku powodujący spieknięcie czy topienie jego ziarenek. Na podstawie wnikliwego przeglądu danych literaturowych Autor opracował jednowymiarowy model termiczny badanego procesu. W modelu tym przy założeniu równomiernego i normalnego (Gaussowskiego) rozkładu gęstości mocy wyznaczono równania opisujące etapy nagrzewania proszku a następnie jego topienia. Na podstawie tych rozważań opracowano model matematyczny umożliwiający oszacowanie czasu potrzebnego do przetopienia warstwy proszku. W modelowaniu tym a następnie w symulacji uwzględniono: długość fali promieniowania laserowego, gęstość mocy dostarczonej na powierzchnie materiału (proszku), rodzaj promieniowania (ciągły, impulsowy). W wyniku symulacji (dla przyjętego zakresu zmienności parametrów procesu) otrzymano graficzne zależności pomiędzy czasem niezbędnym do stopienia warstwy proszku o grubości 50 μm a gęstością mocy promieniowania laserowego. Charakterystyki takie wyznaczono dla trzech materiałów i dla dwóch modeli rozkładu mocy: rozkład jednorodny oraz Gaussowski. W zależności od gęstości mocy i rodzaju materiału czas stopienia warstwy o grubości 50 μm zmienia się od kilku do 500 μs . Zależności te zostały zweryfikowane doświadczalnie.

Badania doświadczalne (Rozdział 5) przeprowadzono na stanowisku AM250 Firmy Renishaw przeznaczonym dla wytwarzania elementów w procesach SLS oraz SLM. Urządzenie jest wyposażone w półprzewodnikowy laser włóknowy o mocy maksymalnej 400 W i długości fali 1060-1070 nm. System sterowania wiązką (ScanLab) zapewnia wysoką rozdzielczość pozycjonowania wiązki laserowej rzędu 1 μm przy dokładności pozycjonowania rzędu 20 μm , prędkości ruchu wiązki do 2 m/s oraz średnicy plamki zmiennej w granicach: 75 – 225 μm ,

Celem badań doświadczalnych było wyznaczenie zależności pomiędzy mocą promieniowania laserowego, prędkością skanowania, wielkością ziarna proszku, odległością ścieżek skanowania, grubością warstwy, składu chemicznego na właściwości spiekanych próbek: gęstość pozorną (porowatość), twardość, mikrostruktura i skład chemiczny proszków, struktura geometryczna powierzchni, właściwości mechaniczne (wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie). Parametry (wskaźniki) właściwości próbek wykonanych przyrostowo (SLS/SLM) wyznaczono z zadowalającą dokładnością stosując poprawną metodykę oraz nowoczesny sprzęt pomiarowy.

Następnie przeprowadzono charakterystykę SLS/SLM ze względu na optymalizację parametrów procesu. W tej charakterystyce podkreślono, że czynnikiem ograniczającym zakres przemysłowych zastosowań badanych procesów są między innymi wysokie koszty wytwarzania. Ponadto w tej kompleksowej charakterystyce uwzględniono takie elementy i czynniki jak: strategia skanowania, średnica plamki laserowej, liczbę naświetleń warstwy, odległość pomiędzy przejściami wiązki skanującej,

moc wiązki laserowej, prędkość skanowania, czas oddziaływania wiązki w punkcie, odległość między punktami spiekania.

Wykorzystując wyniki dotychczasowych rozważań Autor zrealizował badania doświadczalne spiekania proszku z materiału Ti6Al4V (**Rozdział 6**), proszku z materiału AlSi10Mg (**Rozdział 7**) oraz stali 316L (**Rozdział 8**). Opracowanie programu badań oraz opracowanie uzyskanych wyników zrealizowano poprawnie zgodnie z zasadami statystycznego planowania i opracowania wyników badań. W badaniach wytwarzano próbki o wymiarach: 10x10x10 oraz próbki dla prób wytrzymałościowych (zgodnie z zaleceniami norm). Wyniki badań przedstawiono kompleksowo w postaci równań regresji oraz w postaci wykresów. Opisano również metody i sprzęt wyznaczania wskaźników procesu dla wymienionych powyżej materiałów (np. pomiary gęstości i porowatości oraz struktury geometrycznej powierzchni (przede wszystkim chropowatości powierzchni), twardości, badania wytrzymałościowe, analiza EDS itp.). Wyniki badań zostały kompleksowo przeanalizowane i zinterpretowane z uwzględnieniem zjawisk zachodzących w przestrzeni obróbki. W analizie uwzględniono również aspekty ekonomiczne wytwarzania przyrostowego dla różnych wyżej wymienionych materiałów. Przedstawiono również dla każdego materiału przykłady elementów przemysłowych wykonanych w Laboratorium Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie. W kolejnych rozdziałach Autor przedstawia wyniki optymalizacji parametrów technologicznych procesów SLS/SLM (**Rozdział 9 – Optymalizacja parametrów technologicznych SLS/SLM**) oraz analizę końcową wyników badań oraz wnioski (**Rozdział 10 – Analiza końcowa wyników badań i wnioski**). Optymalizacja parametrów procesu ukierunkowana była na skrócenie czasu wytwarzania elementów wielkogabarytowych przy jednoczesnym zachowaniu właściwości elementu (np. gęstość materiału spiekane go na poziomie 95 % gęstości materiału z produkcji hutniczej).

Z tej krótkiej (w stosunku do objętości) charakterystyki pracy wynika, że sformułowane przez Autora cele pracy zostały w pełni osiągnięte a praca została zrealizowana w założonym zakresie. Pragnę również podkreślić poprawność metodyczną wynikającą z sekwencji działań: analiza stanu badań → modelowanie matematyczne (model dedukcyjny) → weryfikacja doświadczalna modelu dedukcyjnego (opracowanie matematycznego modelu statystycznego) → opracowanie i analiza wyników badań doświadczalnych → podsumowanie i wnioski. Pragnę również podkreślić wysoki poziom techniczny stanowiska do badań oraz zastosowanego sprzętu pomiarowego, poprawne przeprowadzenie pomiarów oraz poprawne metodycznie zaplanowanie i przeprowadzenie badań.

Powyższa charakterystyka pracy potwierdza również, że doktorant Andrzej Stwora posiada szeroką wiedzę o badanych procesach, metodyce rozwiązywania problemów badawczych, umiejętności prowadzenia badań i pomiarów oraz rozwiązywania złożonych problemów inżynierskich, z ich ukierunkowaniem na zastosowania praktyczne (przemysłowe).

2. OCENA PRACY

2.1 Ocena wyboru tematu

Metody wytwarzania przyrostowego rozwijają się bardzo dynamicznie od lat 70-dziesiątych 20-tego wieku. Najpierw były stosowane do wytwarzania prototypów wizualizujących wyrób. Następnie zostały zastosowane do wytwarzania narzędzi a w ostatnich latach w coraz większym zakresie stosuje się je do wytwarzania pełnowartościowych wyrobów. Szczególny obszar zastosowania to produkcja jednostkowa (implanty, części do samochodów formuły 1 itp.). W zasadzie jedynymi barierami szerszego zastosowania ich w produkcji przemysłowej są jakość wyrobu, czas wykonania oraz wynikające stąd koszty. Właściwości użytkowe i estetyka wyrobów wykonanych metodami przyrostowymi zależą istotnie od struktury wewnętrznej wyrobu oraz właściwości warstwy wierzchniej. Te z kolei zależą od rodzaju materiału oraz sposobu (strategii) budowania elementu metodą przyrostową oraz zjawisk występujących w obszarze obróbki (spiekanie, stapianie, sklejanie, uplastycznianie, fotopolimeryzacja). Szeroko rozumiana jakość i własności użytkowe wyrobu w wytwarzaniu przyrostowym zależą istotnie od wyżej wymienionych czynników, które należy powiązać z wytrzymałością, zużyciem materiału, czasem wytwarzania, kosztami czyli wskaźnikami techniczno-ekonomicznymi wytwarzania wyrobu. Autor koncentruje się w swojej pracy na badaniach i optymalizacji szeroko już stosowanego procesu selektywnego spiekania (stapiania) laserowego proszków takich zaawansowanych materiałów jak: Ti6Al4V (Rozdział 6), AlSi10Mg (Rozdział 7) oraz 316L (Rozdział 8) Zagadnienia te są niezwykle ważne a nie zostały jeszcze wystarczająco poznane.

Dlatego stwierdzam, że tematyka opiniowanej rozprawy dotyczy jeszcze nie zbadanych i rozwiązanych ostatecznie problemów wytwarzania i optymalizacji procesów SLS/SLM a jej wybór uważam za słuszny zarówno ze względów poznawczych jak i użytecznych

2.2. Ocena merytoryczna

Celem podstawowym opiniowanej rozprawy było:

- wyznaczenie podstawowych charakterystyk procesu SLS/SLM opisujących relacje pomiędzy wydajnością, chropowatością, porowatością, wytrzymałością, jakością warstwy wierzchniej a parametrami procesu,
- wyznaczenie zależności pomiędzy parametrami technologicznymi procesu (moc, prędkość prowadzenia wiązki, czasu naświetlania warstwy a czasem wymaganym do przetopienia warstwy proszku;
- porównania wskaźników cena/czas wykonania elementu (np. forma wtryskowa, element lotniczy) wykonanych przyrostowo z wykonanymi metodami tradycyjnymi;
- opracowanie metodyki doboru modelu kosztu wytwarzanych przyrostowo elementów (w postaci parametrów SLS/SLM) dla stopu AlSi10Mg,

- optymalizacja parametrów procesu, która pozwala na osiągnięcie możliwie najkrótszego czasu wykonania pojedynczej warstwy przy zachowaniu gęstości elementu nie spadającej poniżej 95% gęstości litego (?) materiału

Tak sformułowany cel Autor zrealizował kompleksowo w założonym zakresie. Z uwagi na to, że wytwarzanie przyrostowe jest wciąż stosunkowo nową i dynamicznie rozwijającą się dziedziną wyniki rozważań teoretycznych oraz wyniki badań doświadczalnych istotnie poszerzają wiedzę o badanych procesach.

Badania zostały przeprowadzone wzorcowo i zgodnie z zasadami metodyki prowadzenia badań doświadczalnych. Rozprawa doktorska mgr inż. Andrzeja Stwory charakteryzuje się również wieloma aspektami nowości i oryginalności. Autor podejmuje wiele aktualnych i trudnych zagadnień: np. zagadnienie racjonalnego konstytuowania właściwości wyrobu kształtowanego przyrostowo jest tematem aktualnym i trudnym do opisu ze względu na wielowariantowość np. możliwych trajektorii wiązki laserowej spiekającej lub stapiającej proszki materiałów. Doktorant w pracy wykazał się: szeroką wiedzą (wykorzystał ją racjonalnie do analizy zjawisk i opracowania matematycznego modelu dedukcyjnego procesu) i umiejętnościami posługiwania się zarówno nowoczesną aparaturą jak i nowoczesnymi metodami badawczymi, między innymi: wykorzystaniem matematycznych zasad planowania eksperymentu i statystycznego opracowania uzyskanych wyników. Znaczącym osiągnięciem Autora jest to, że wyniki jego badań doświadczalnych mogą być efektywnie wykorzystane w praktyce do projektowania optymalnych procesów technologicznych SLS/SLM ukierunkowanych na uzyskanie założonych a priori właściwości wyrobów.

Autor w swoich rozważaniach wykazał, że zastosowana przez niego metodologia postępowania przy analizie, modelowaniu, badaniach doświadczalnych, prezentacji i analizie uzyskanych wyników w badaniach procesu SLS/SLM powinna być wzorem do badania innych metod przyrostowego wytwarzania. Istotne różnice mogą wynikać tylko ze specyfiki zjawisk zachodzących w obszarze kształtowania wyrobu.

Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta, które stanowią **oryginalny wkład w rozwój procesów wytwarzania przyrostowego zaliczam**.

1. Opracowanie modelu dedukcyjnego procesu SLS/SLM opisującego zależność pomiędzy czasem spiekania warstwy proszku a mocą wiązki laserowej; obliczenia i weryfikację doświadczalną modelu przeprowadzono dla materiałów: Ti_6Al_4V , AISi10Mg, stal narzędziowa 3161.
2. Zbudowanie stanowiska do badań, zrealizowanie badań oraz zastosowanie nowoczesnych i wiarygodnych metod pomiarowych i aparatury pomiarowej,
3. Opracowanie podstaw teoretyczno-doświadczalnych procesu SLS/SLM, zbudowanie bazy danych doświadczalnych przydatnej do optymalizacji i projektowania procesów technologicznych z wykorzystaniem jako materiału wyjściowego proszków zaawansowanych materiałów Ti_6Al_4V , AISi10Mg, stal narzędziowa 3161 (często stosowanych w przemyśle kosmicznym czy lotniczym),

Uwzględniając powyższe uwagi stwierdzam, że praca została przygotowana na bardzo dobrym poziomie merytorycznym i zawiera wiele elementów nowości i oryginalności oraz informacji usprawniających projektowanie i optymalizację procesów technologicznych.

Pragnę również podkreślić, że w realizacji pracy Autor wykazał się szeroką interdyscyplinarną wiedzą oraz umiejętnością wnikliwej i krytycznej oceny uzyskanych wyników.

2.3. Ocena formalnej strony rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa, obejmuje 197 stron, w tym: 4 strony streszczeń w j. polskim i w j. angielskim, 2 strony głównych oznaczeń, 4 strony spisu treści, 20 stron wykazu literatury (197 pozycji). Brak wykazu skrótów stosowanych w pracy – utrudnia czytanie pracy osobom nie związanym bezpośrednio z badaniami w obszarze technik wytwarzania. Praca składa się z 10 rozdziałów o istotnie różnej objętości: od 1.5 str. (Rozdział 3 – **Cel i zakres pracy**) do 33 str. (Rozdział 6 – **SLS/SLM dla materiału Ti₆Al₄V**). Należy podkreślić, że w wykazie literatury jest 13 pozycji, których współautorem jest Doktorant, co świadczy o tym, że prezentowane w pracy wyniki badań były już poddawane weryfikacji przez szersze grono uczestników konferencji, czy też recenzentów oceniających zgłoszone do publikacji w czasopiśmie artykuły. Stosowane przez Autora definicje, nazwy i określenia są generalnie poprawne, a tytuł rozprawy odpowiada jej treści. Materiał ilustracyjny jest odpowiedni i charakteryzuje się bardzo dobrym poziomem graficznym. Sporadycznie występują drobne niedociągnięcia; np. mało czytelne opisy na Rys.:9.1, różna liczba cyfr po przecinku w opisach osi współrzędnych: np. Rys. 6.20, 6.21, 7.16 czy w Tabeli 7.3. Zdarzają się również potknięcia językowe i stylistyczne. Uwagi dotyczące strony formalnej pracy nie obniżają znacząco jej dużej wartości merytorycznej.

3. UWAGI

Generalnie praca jest przygotowana na bardzo dobrym poziomie merytorycznym i edytorskim. Zaprezentowane w pracy wyniki rozważań ogólnych, metodyka badań, metodyka pomiarów metrologicznych, wyniki badań oraz ich analiza z nadmiarem spełniają wymagania stawiane pracom doktorskim. **Dlatego istotnych krytycznych uwag merytorycznych nie zgłaszam.** Pewnym niedociągnięciem redakcyjnym pracy są duża rozpiętość objętości poszczególnych rozdziałów, nieprecyzyjne sformułowania oraz stosunkowo liczne potknięcia językowe. Dla przykładu podaję poniżej uwagi dotyczące tylko kilku stron pracy (24 – 34)

1. Str. 24₈ Autor stwierdza, że procesami SLS/SLM można wytwarzać elementy o „**nieograniczonej złożoności geometrycznej**”, co jest **merytorycznie nieprawdziwe** a wynikać może z zafascynowania Autora osiągniętymi wynikami badań.

2. Str. 25 W₁ Autor stwierdza, że procesami SLM/SLS można wytwarzać elementy czy struktury „o dowolnej geometrii i stopniu złożoności” jest to podobnie jak powyżej stwierdzenie merytorycznie nieprawdziwe bo geometria, dokładność i złożoność wytwarzanego elementu są ograniczone np. objętością spiekane go proszku w jednym impulsie laserowym. Wymiary tej „dodawanej” objętości decydują o dokładności i rozdzielczości wymiarowej wytwarzanego elementu czy wytwarzanej struktury.
3. Str.26. W₃₋₄: jest „Krzyżowanie warstw” powinno być „krzyżują się tory skanowania” w kolejnych warstwach.
4. Na Rozdziale 2 (str.: 28 – 31) „Aktualny stan problemu w świetle danych literaturowych” poświęcił Autor tylko 4 strony przy objętości pracy ok. 200str. W rozdziale tym Autor powołuje się na ok. 20% publikacji (w wykazie literatury jest ich 191). Już pomijając tak skromną objętość bardzo **ważnego dla dalszych rozważań** Rozdziału, powinien on przynajmniej zawierać „Wnioski”, które byłyby podstawą do sformułowania „Celu i zakresu pracy”. Oczywiście Autor przedstawia również fragmenty analizy literatury w innych rozdziałach. Na przykład analiza literatury na wstępie Rozdziału 4. dotyczy „metod analizy termicznej” procesu obróbki laserowej. Tym niemniej Rozdział 2 jest zbyt lakoniczny i nie ujmuje wielu aspektów przedstawionych w kolejnych rozdziałach rozważań i badań.
5. **Cel i zakres pracy** (objętość ok. 1,5 strony: Str. 33-34): Sformułowany bardzo ogólnie i skrótowo. Powinien on wynikać z analizy stanu badań, ale jak już podkreśliłem analiza stanu badań w oparciu o dane literaturowe (Rozdział 2) jest lakoniczna i nie ma spójności merytorycznej z celem i zakresem pracy.
6. Str.33 W¹⁻⁵, „Autor twierdzi, że zmiana parametrów wpływających na proces nie tylko prowadzi do poprawy właściwości fizyko – mechanicznych spieków ale.....” „Nie każda zmiana parametrów procesu poprawia jakość spiekane go elementu”
7. Str. 33, W¹²⁻¹⁷. Dlaczego zależność pomiędzy parametrami technologicznymi i czasem wymaganym do przetopienia warstwy, Autor nie zaliczył do charakterystyk procesu?
8. Str.34, W₅₋₄ Zdanie niezrozumiałe: „Znaczenie praktyczne wyraża się w opanowaniu, poprzez opracowanie technologicznych spieków wysokiej jakości”

To tylko przykłady pewnych niedociągnięć redakcyjnych – należy je usunąć w dalszych publikacjach.

4. OCENA KOŃCOWA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Przedstawiona rozprawa doktorska należy do **bardzo ważnego** i wciąż nie w pełni poznanego obszaru badawczego, związanego z wytwarzaniem przyrostowym i wdrażaniem nowych, innowacyjnych osiągnięć innych dziedzin: *(np. wdrożenie inspirowanych biologicznie struktur czy kształtów (Bionika) jest możliwe zwykle tylko dzięki zastosowaniu przyrostowych technologii wytwarzania)*.

Doktorant opanował na wymaganym poziomie merytorycznym metodologie prowadzenia prac badawczych, metody planowania i opracowania wyników badań, metody i techniki pomiarów wielkości fizycznych w aspekcie rozwiązywania złożonych problemów inżynierskich. Opiniowana rozprawa doktorska, zawiera również istotne elementy nowości a uzyskane wyniki rozszerzają zakres poznania i praktycznych zastosowań procesu SLS/SLM do wytwarzania przyrostowego. **Z tego względu wnioskuję o wyróżnienie opiniowanej rozprawy doktorskiej.**

Uważam również, że Autor realizując badania wykazał się niezbędną interdyscyplinarną wiedzą, umiejętnością analizy i krytycznej oceny uzyskanych wyników, co pozytywnie świadczy o Jego predyspozycjach do realizacji prac naukowo-badawczych. W związku z powyższymi uwagami stwierdzam, że **rozprawa doktorska mgra inż. Andrzeja Stwory pt.:**

**OPTIMALIZACJA PROCESU WYTWARZANIA METODAMI PRZYROSTOWYMI
SLS/SLM ZE WZGLĘDU NA WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE
WYKONYWANYCH ELEMENTÓW**

spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

