

Warszawa, dn. 26.08.2019 r.

Prof. dr hab. inż. Konstanty Skalski
Sieć Badawcza Łukasiewicz –
Instytut Mechaniki Precyzyjnej
ul. Duchnicka 3, 01-796 Warszawa
Emerytowany profesor Politechniki Warszawskiej

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Andrzeja STWORA nt.: „Optymalizacja procesu wytwarzania metodami przyrostowymi SLS/SLM ze względu na wybrane właściwości fizyczne wykonywanych elementów”

Recenzję wykonałem na podstawie pisma Dyrektora Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa w Warszawie z dn. 30.05.2019 r.

1. Wstęp - ocena wyboru tematu monografii

Technologie Szybkiego Prototypowania, (RP – Rapid Prototyping) alternatywnie określane jako Przyrostowe Wytwarzanie (AM – Additive Manufacturing) należą wciąż do dynamicznie rozwijanych procesów wytwórczych. Badanie i projektowanie tych technologii, w szczególności z uwagi na złożoną geometrię i zmienność strukturalną wyrobów, wymaga optymalizacji procesów. Jest to także uwarunkowane szerokimi aplikacjami i wymaganiami w przemyśle lotniczym, samochodowym, medycznym, czy też w przemyśle przetwórstwa tworzyw sztucznych. Optymalizacja procesów technologicznych Selektynego Laserowego Spiekania/Topienia (SLS/SLM), które należą do technologii przyrostowych AM wiąże się często z wielokryterialną, czasochłonną, warunkową optymalizacją. Jedną z metod pozwalającą na zmniejszenie czaso-pracochłonności badań jest metoda matematycznego planowania doświadczeń. Metoda ta pozwala też na szybkie tworzenie modelu matematycznego procesu i znalezienie optymalnych warunków jego realizacji. W szczegółowych badaniach podjętych w rozprawie wykorzystano stosowny (wielo: 5 – cio poziomowy) plan modelu wielomianowego (postępowego).

Zaproponowanie oryginalnej tematyki badawczej, ukierunkowanej na optymalizację parametrów technologicznych celem uzyskania wyrobów o właściwościach odpowiadających materiałom mikrostrukturalnym, jest uzasadnione pod względem poznawczym, jak i aplikacyjnym.

2. Charakterystyka ogólna rozprawy

Podjęte w rozprawie badania teoretyczne i eksperymentalne dotyczą optymalizacji procesów technologicznych przyrostowego wytwarzania AM wyrobów z proszków metalicznych poprzez ich spiekanie i topienie (SLS/SLM). Proszkami tymi są proszki ze stopu tytanu, stopu aluminium oraz stali austenitycznej. Badania te mają umożliwić realizację wymienionego celu pracy. Rozprawa zawiera łącznie:

- 197 stron obejmujących 10 rozdziałów zawierających 137 rysunków, 48 tabel oraz 95 wzorów (wzrażeń matematycznych),
- 191 pozycji bibliograficznych z 13-stoma publikacjami współautorskimi doktoranta, w tym: 2 pozycje anglojęzyczne w wysoko notowanym czasopiśmie międzynarodowym, 7 pozycji publikowanych w czasopiśmie krajowym *Mechanik*, 1 pozycję będącą rozdziałem w monografii, zaś pozostałe 3 pozycje stanowią publikacje konferencyjne.

Rezultaty pracy uwidocznione są w poszczególnych rozdziałach, w których przedstawiono:

- Rozdz. 1 – opisy technologii przyrostowych,
- Rozdz. 2 – przegląd literatury pod kątem technologii laserowych,
- Rozdz. 3 – cel i zakres rozprawy,
- Rozdz. 4 – modelowanie matematyczne zjawisk termicznych,
- Rozdz. 5. – opis badań doświadczalnych,
- Rozdz. 6,7,8 – plany badań nad proszkami materiałów: Ti6Al4V, AlSi10Mg oraz 316L wraz z prezentacją aplikacji wykonywanych wyrobów,
- Rozdz. 9 – przykładową optymalizację procesową parametrów technologicznych SLS/SLM.
- Rozdz. 10 – analizę wyników badań i wnioski końcowe.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Ad. Rozdz. 1

Przedstawiono chronologicznie technologie przyrostowe z etapami ich rozwoju. Wskazano, że istotnymi czynnikami postępu jest rozwój technik CAD-CAM, obrazowania 3D, technologii laserowych oraz inżynierii materiałowej (technologie przyrostowe). Technologie AM mimo zalet nie mogą konkurować z metodami konwencjonalnymi pod względem produkcji wieloseryjnej, jak też gabarytowej czy wydajności.

Przedstawiono etapy rozwoju AM, pokazano czynniki sprzedaży produktów AM, wydajności produkcji i udziałów AM w produkcji światowej. Klasyfikując sposoby AM (alternatywnie nazywanych jako RP), omówiono technologie znamienne dla pojedynczych serii (technologie Rapid Manufacturing) oraz dla poszczególnych narzędzi (technologie Rapid Tooling). Zestawiono porównanie wykonywania wyrobów różnymi technologiami z uwagi na geometrię oraz wielkość produkcji wyrobów z metali i ich stopów. Szczegółowo omówiono procesy SLS/SLM oraz nowy proces LENS realizowany na mieszaninie różnorodnych proszków metali i stopów.

Rozdział ten jest wartościowym opracowaniem wprowadzającym w tematykę metod przyrostowych i wskazuje on także na zainteresowanie badawcze autora.

Ad. Rozdz. 2

Przeglądu literatury dokonano od pierwszych prac w Katholieke Universiteit Leuven (Belgia), który liderował technologie RP (AM). Jednakże akcent w przeglądzie literatury położono na poziomie charakterystyk procesu SLS/SLM oraz określenie wpływu parametrów zmiennych (jak moc, prędkość skanowania, odległość między wiązkami lasera) na uzyskiwaną jakość wyrobu. Wskazano też na pierwsze prace badawcze (lata 90 XX w.) nad

materiałami metalicznymi w Austin (USA – Texas). Obszernym obszarem badawczym były technologie laserowe (lasery plazmowe YAG, molekularne CO₂, gazowe Ar, He – NO) i ich aplikacje w procesy SLS/SLM, które prowadzono w różnych ośrodkach USA, Japonii, Niemiec, Belgii i Szwajcarii.

W procesach AM ważne były technologie wytwarzania proszków umożliwiające wytwarzanie materiałów znormalizowanych specjalnego zastosowania o dobrych właściwościach mikrostrukturalnych i materiałowych. Badano aspekty termiczne i naprężeniowe.

W końcowej fazie przeglądu Autor podkreśla brak informacji na temat przebiegu procesu dla urządzeń laserowych pracujących w trybie impulsowym (laser włóknowy), co było jednym z celów pracy.

Przedmiotowy, szczegółowy przegląd literatury należy ocenić dobrze. Przytaczane pozycje to wartościowe prace publikowane w prestiżowych, międzynarodowych czasopismach. Jednakże słabą stroną przeglądu jest brak ważnych aspektów dotyczących optymalizacji procesów technologicznych SLS/SLM, ich niedokładnością oraz badaniami nad materiałami stopów 16L oraz AlSi10Mg.

Ad. Rozdz. 3

Do wartościowych opisów tego rozdziału zaliczam sformułowanie zakresu i celu pracy. Rozprawa obejmuje bowiem wyznaczenie charakterystyk procesów oraz współzależności między parametrami technologicznymi. Badania te pozwoliły na opracowanie metodyk doboru modeli w tych procesach oraz optymalizację parametrów procesu minimalizującego czas wykonywania warstw przyrostowych o wysokiej gęstości. Generalnie złożonym celem w rozprawie było pogłębianie i rozszerzanie wiedzy o procesach przyrostowych SLS/SLM poprzez praktyczne wytwarzanie parametrów technologicznych spieków o wysokiej jakości.

Ad. Rozdz. 4

Modelowanie matematyczne i symulacja selektywnego spiekania i topienia laserowego są mocną stroną rozprawy z uwagi na analizę termiczną. Określenie rozkładu temperatur w procesie SLS/SLM jest istotne z uwagi na dobór parametrów technologicznych. Analiza termiczna uwzględnia trzy formy wymiany ciepła, tj. przewodzenie, konwekcji i promieniowania, które pozwalają na sformułowanie:

- równań bilansu cieplnego i stosowanych współzależności między parametrami procesu SLS/SLM,
- równań wymiany ciepła (przewodnictwa cieplnego) uzupełniającego opis zjawisk cieplnych w analizie termicznej.

Obszerna literatura dokumentuje tę analizę i modelowanie matematyczne proszkowych procesów laserowych z rozkładem normalnym gęstości wiązki (Gaussa). Prace Krutha, Wanga, Zhenga, Rosenthalla legły u podstaw rozwiązań analitycznych numerycznych rozkładu temperatur. Szerokie modelowanie i rozwiązywanie zagadnień jedno i trójwymiarowych wraz z badaniem pomiaru temperatury wskazuje na spektrum i interdyscyplinarność zagadnień w analizie termicznej. W badaniach własnych nad jednowymiarowym modelem termicznym z rozkładem równomiernym (jednorodnym) i

normalnym (gaussowskim) wiązki Autor przedstawił model matematyczny procesu i jego symulację w celu oszacowania czasu topienia materiału proszkowego. Rezultaty badań nad wpływem mocy lasera (100÷400 W) uwidocznił na stosownych wykresach Rozdz. 4 wskazując, że czas topienia z wiązką Gaussa jest 3 – krotnie dłuższy niż z wiązką jednorodną, co może prowadzić do istotnej niedokładności przy wyborze warunków procesu.

W ocenie merytorycznej rozdziału do wartościowych rezultatów rozprawy zaliczam model określający czas topienia z emisją wiązki laserowej w sposób ciągły lub impulsowy.

Ad. Rozdz. 5

W rozdziale badań doświadczalnych przedstawiono stanowisko AM250 będące urządzeniem firmy Renishaw do spiekania oraz topienia proszków. Uszczegółowiono parametry urządzenia oraz warunki jego pracy. Opisano aparaturę i metody badań gęstości, twardości, mikrostruktury, struktury geometrycznej uzyskiwanej powierzchni oraz właściwości mechanicznych na stosownych i zgodnych z normami próbkach. Z uwagi na szerokie spektrum zastosowań technologii AM, w rozdziale zaprezentowano wybrane czynniki zewnętrzne związane z urządzeniem oraz technologią spiekania, które określono poprzez: wektorową strategię skanowania, plamkę wiązki lasera, liczbę naświetleń warstwy przyrostowej, odległości między wiązkami moc spiekania/topienia, prędkość odległości skanowania laserem o pracy ciągłej (alternatywnie impulsowej), czas oddziaływania wiązki itp.

Wybór i selekcja czynników przez Autora wskazuje na jego dojrzałość badawczą.

Ad. Rozdz. 6, 7, 8

Rozdz. 6, 7, 8 należą do kluczowych w rozprawie. Metodyka badawcza rozdziałów łącznie z aparaturą jest bardzo zbliżona (omal ta sama) i dotyczy opisu technologii SLS/SLM dla 3-ch materiałów, tj. ze stopu tytanu i aluminium oraz stali austenitycznej. Mając na uwadze zróżnicowane właściwości badanych proszków oraz otrzymywanych z nich metodą przyrostową materiałów, przeprowadzono dla każdego nich badania w zakresie: mikrostruktury (w tym gęstości i porowatości), twardości, topografii powierzchni oraz standardowej wytrzymałości mechanicznej. Metodyka badawcza jest inicjowana oceną materiałów proszkowych. Porównano 2 materiały proszkowe firmy EOC (Elektro Optical Components) oraz Renishaw. W ocenie proszków szczególną uwagę należało zwrócić na potencjalne ich własności mechaniczne oraz zależnie od aplikacji na dobrą korozyjność, biokompatybilność, przewodność cieplną, ciężar właściwy oraz odporność zmęczeniową. Z uwagi na kryteria jakościowe wyrobów elementy materiałowe wykonane metodą AM wymagają idealnie sferycznego proszku bez wtrąceń płatkowych czy nieregularnych. Plan badań jest w metodyce ważnym etapem optymalizacji. Obejmuje on poprzez parametry procesu SLS/SLM analizę czynników wejściowych i wynikowych, które odnoszą się do lasera (narzędzia), materiału wsadowego (tj. proszku), parametrów procesu (spiekania, topienia). Parametry wynikowe są określone poprzez wymienione badania mikrostrukturalne i wytrzymałościowe. Modelowanie matematyczne zgodnie z analizą statystyczną dla poszczególnych materiałów obejmowało optymalizację parametrów w oparciu o plan statystyczny. Efektywnym planem z uwagi na modele regresyjne okazał się plan zdeterminowany, selekcyjny, rotalnie – uniformalny. W ten sposób możliwe było wyznaczenie

różnych charakterystyk w postaci funkcji potęgowych 2-3 zmiennych. Omawiane rozdziały prezentują następnie interesujące wyniki obliczeń tych charakterystyk. Na szczególne wyróżnienie zasługują też przykładowe elementy wykonane w technologii AM dla 3-ch rozważanych materiałów, pokazujące bogaty dorobek poznawczy rozprawy.

Ad. Rozdz. 9

Rozdz. ten zwięźca problematykę optymalizacyjną w rozprawie. Z uwagi na aplikacje przemysłowe technologii SLS/SLM czynniki ekonomiczne mają większe znaczenie niż wymogi techniczne. Stąd oszacowanie kosztów wytwarzania wyrobów z proszków metali ma istotne znaczenie poznawcze, jak i aplikacyjne. Analiza komponentów wytwarzania związanych w wyceną pozwala na opracowanie uproszczonego modelu kosztów, bilansującego m.in. koszty wsadowe SLS/SLM, przygotowanie urządzeń (aparatury) dla potrzeb procesu, koszty obsługi, koszty obróbki wykańczającej czy w szczególności koszty pracy urządzenia i zużycia materiałów. Rezultaty w Rozdz. 6, 7, 8 pozwalają też na odpowiedni, optymalny dobór parametrów technologicznych procesu i ich wpływ na czas wytwarzania. Założono, że do pracy wykorzystane było urządzenie wyposażone w laser dyskretny (włóknowy). Wyprowadzono zależności pozwalające określić czas wytwarzania pojedynczych warstw przyrostowych, a następnie czas budowania elementu. Zagadnienie optymalizacji zostało sprowadzone do minimalizacji funkcji czasu wykonania elementu o określonej powierzchni z zewnętrznym ograniczeniem na naświetlanie i odległości między przejściami wiązki lasera. W optymalizacji zastosowano metodę funkcji kary w programie Solver-Excel. Przykładowe obliczenia czasu wykonania komponentów przedstawiono dla monobloku i wkładki z konformalnymi kanałami. Ważnym stwierdzeniem Autora jest znaczące skrócenie czasu wytwarzania w zaprezentowanej metodzie optymalizacji. Zainicjowana tematyka szacowania kosztów wytwarzania w procesach SLS/SLM przez Rickenbachera, Baumersa i Ruffo oraz doświadczenia własne są znaczącą wartością Rozdz. 9. Opracowany własny model kosztów, jego opis matematyczny i rozwiązanie oraz przedstawiona przykładowa symulacja dla stopu aluminium są oryginalnym osiągnięciem badawczym Autora.

Ad. Rozdz. 10

Przedstawiona w rozdziale tematyka badawcza miała na celu poznanie zależności pomiędzy warunkami prowadzenia procesu obróbki dla 3-ch ważnych aplikacyjnie materiałów (Ti6Al4V, AlSi10Mg, stal 316L) a ich właściwościami użytkowymi. Przedstawione wyniki badań wskazują na osiągnięcie założonego celu. Pozwalają one także na sformułowanie stosownych wniosków dotyczących m.in. wpływu materiałów proszkowych na jakość wytwarzanych komponentów, minimalizacji parametrów procesu, czy jego oceny energetycznej (cieplnej) w procesie.

W zakończeniu oceny merytorycznej rozprawy przedstawiam kilka uwag o charakterze ogólnym i szczegółowym, które nasunęły mi się podczas jej czytania, a które mogą poprawić jej stronę edytorską w potencjalnych publikacjach.

Uwagi ogólne i szczegółowe

- str. 7 – proponuję szersze określenie: materiały konwencjonalne, nie lite/walcowane.
str. 11 – brak jednostek w oznaczeniach utrudnia ich interpretację fizyczną.
str. 14 – Rys. 1.1 winno być: technologii przyrostowej – nie przemysłowej.
str. 16 – Rys. 1.4 winna być przytoczona literatura [9] nie [4].
str. 18 – Rys. 1.6 szybka produkcja czy wytwarzanie?
str. 19 – RT to szybkie wytwarzanie narzędzi – tutaj nie produkcja – patrz też str. 29
str. 21 – brak nr rysunku - winno być Rys. 1.7.
str. 23 – przytoczyć należy Rys. 1.9.
str. 25 – Rys. 1.1 przytoczyć literaturę [26].
str. 31 – opisać diagram CCT.
str. 39 – winno być – równanie przepływu ciepła (7) nie (6) z wewnętrznymi źródłami q.
str. 40 – winno być równanie (2 – 10) nie (1 – 10).
str. 45 – winno być w równaniach (9) i (10)
str. 50/51 – przytoczenie Rys. 4.4, a jego podpis?
str. 53 – przytoczyć należy autorów [67].
str. 69/70 – brak przytoczeń Rys. 5.16÷5.18.
str. 73 – uzasadnić należy przyjęty plan statystyczny.
str. 79 – dyskusyjnie; nie jest spełniony warunek w teście Fishera – wyjaśnić dopasowanie ?
str. 85 – Rys. 6.7 – podpis „w oparciu”?
str. 92 – za Rys. ? winna być przytoczona Tab. 6.9
str. 93 – wyjaśnić skalę twardości HB/HV?
str. 116/117 – brak przytoczenia Rys. 7.7 (patrz też przytaczanie dalej).

4. Podsumowanie oceny rozprawy

Do innowacyjnych i wartościowych elementów rozprawy należy zaliczyć:

- modelowanie matematyczne i fizyczne zjawisk termicznych w procesach selektywnego spiekania i topienia laserowego,
- analizę statystyczną wyznaczania charakterystyk procesu SLS/SLM dla materiałów ze stopów tytanu, aluminium oraz stali austenitycznej,
- optymalizację procesu technologicznego z uwagi na minimalizację kosztów wytwarzania.

Ocena formalna

Rozprawa napisana poprawnie pod względem językowym. Zawarty materiał nie budzi zastrzeżeń.

5. Wniosek końcowy

Rozprawę cechuje wysoki poziom merytoryczny, co świadczy o dojrzałości naukowej mgr. inż. Andrzeja Stwora . Wykazał się On bardzo dobrymi umiejętnościami samodzielnego rozwiązywania trudnych zagadnień optymalizacji procesów przyrostowych ze względu na wybrane właściwości fizyczne wykonywanych elementów. W rozprawie Doktorant

przedstawił wyniki mające duże znaczenie poznawcze i uytitarne, które wniosły w mojej ocenie wyróżniający się wkład w obecny i dalszy rozwój technologii przyrostowych Additive Manufacturing.

Uwzględniając powyższe wyrażam opinię, że rozprawa spełnia ustawowe wymagania w rozumieniu art. 13.1 Ustawy z dn. 14 marca 2003 r. o stopniach i tytułach naukowych i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Andrzeja STWORA do publicznej obrony rozprawy.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'KSU'.