

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr. inż. TOMASZA ZAKRZEWSKIEGO
pt.: Optymalizacja warunków procesu SLS/SLM
w celu minimalizacji niedokładności wyrobu

*Recenzję wykonałem na podstawie pisma Dziekana Wydziału Mechanicznego
Technologicznego Politechniki Warszawskiej w Warszawie z dn. 14.06.22 r.*

1. Ocena wyboru tematu monografii

Technologie przyrostowego wytwarzania AM (ang. Additive Manufacturing) należą do dynamicznie rozwijanych procesów wytwórczych. Szczególnymi wariantami tych technologii są metody Selektywnego Laserowego Spiekania/Topienia SLS/SLM (ang. Selective Laser Sentering/Melting). Metody SLS/SLM należą do grupy metod wytwarzania wykorzystujących proszek stopów metali. Tworzenie wyrobu odbywa się poprzez oddziaływanie wiązki laserowej na złożę proszku. Wiązka laserowa porusza się po ustalonych ścieżkach tworząc wyrób warstwa po warstwie. W przypadku SLM następuje całkowite topienie ziaren proszku, natomiast w procesie SLS następuje łączenie ziaren poprzez ich natopienie. W obu metodach wytwarza się cienkie warstwy rzędu kilkudziesięciu mikrometrów.

Zarówno w przypadku technologii SLS, jak i SLM niezbędny jest model 3-D, na podstawie którego definiowane są liczby warstw oraz ich grubość. Zapis konstrukcji w postaci modelu 3-D otrzymuje się wykorzystując w procesie projektowania systemy CAD (CATIA, NX, SOLID WORKS, itp.). Kolejnym krokiem jest konwersja modelu 3-D do formatu STL (ang. Standard Triangulation Language). Dobór parametrów procesu SLS/SLM kończy etap przygotowania produkcji.

Badanie i projektowanie tych technologii, w szczególności z uwagi na złożoną geometrię wyrobów, wymaga optymalizacji procesów. Podjęcie się tematu, dotyczącego opracowania modelu matematycznego, opisującego powiązania pola temperatur podczas nagrzewania, topnienia proszku wiązką laserową z parametrami procesu, stwarza możliwości na optymalizację procesu ze względu na jego energochłonność, stereometrię powierzchni oraz niedokładności geometryczne wyrobu.

Zaproponowanie przez Doktoranta oryginalnej tematyki powiązania opisu analitycznego i badawczego procesu, ukierunkowanego na optymalizację parametrów technologicznych procesu, jest uzasadnione pod względem poznawczym jak i aplikacyjnym.

2. Charakterystyka ogólna rozprawy

Podjęte w rozprawie analizy teoretyczne i badania eksperymentalne dotyczą optymalizacji parametrów w procesach technologicznych przyrostowego wytwarzania AM wyrobów z proszków metalicznych poprzez ich topienie (SLM). Proszkami tymi są proszki ze stopu tytanu, kobaltu, chromu, stopu niklu i stopu aluminium. Badania mają umożliwić realizację celu pracy.

Rozprawa zawiera łącznie:

1. 178 stron obejmujących 11 rozdziałów zawierających tekst z rysunkami, tabelami oraz wzorami (wyrażenia matematyczne),
2. 157 pozycji bibliograficznych, w tym:
 - 4 pozycje anglojęzyczne z publikacjami współautorskimi Doktoranta zgodnie z tematyką rozprawy,
 - 115 pozycji w j. angielskim,
 - 23 pozycji w j. polskim,
 - 10 pozycji z Internetu,
 - 5 pozycji stanowią Normy,

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

- Rozdział 1 – Charakterystyka metod przyrostowych AM.
- Rozdział 2 – Sformułowanie problemu.
- Rozdział 3 – Aktualny stan problemu w świetle prac publikowanych.
- Rozdział 4 – Dokładność wyrobów wytworzonych metodami przyrostowymi.
- Rozdział 5. – Cel i zakres pracy.
- Rozdział 6 – Modele matematyczne i symulacja procesu SLM.
- Rozdział 7 – Badania doświadczalne.
- Rozdział 8 – Optymalizacja warunków procesu wytwarzania.
- Rozdział 9 –. Wnioski.
- Rozdział 10 – Przykłady wyrobów wykonanych w Instytucie Lotnictwa.
- Rozdział 11- Literatura.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Rozdz. 1 Charakterystyka metod przyrostowych

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

Przedstawiono etapy rozwoju AM, pokazano czynniki wydajności produkcji i udziałów AM w produkcji światowej. Klasyfikując sposoby AM omówiono technologie:

- FDM (ang. fused deposition,modeling) technika druku 3-d z materiałów niemetalowych.
- SLA Stereolitografia, utwardzanie warstw żywicy.
- MJ Material Jetting, kropelki materiałów konstrukcyjnych natryskiwane na platformę roboczą i utwardzane światłem ultrafioletowym tworząc obiekt 3-D.

- SLM (ang. Selective Laser Melting) Selektywne Topienie Laserowe.
- SLS (ang. Selective Laser Sintering) Selektywne Spiekanie Laserowe.

W końcowej części rozdziału omówiono zalety i wady obu technologii.

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

Rozdz. 2 Sformułowanie problemu

W rozprawie podjęto się zadania opisu analitycznego i optymalizacji technologii topienia laserowego SLM (ang. Selective Laser Melting). Proces polega na dostarczeniu do złoża proszku energii niezbędnej do topienia materiału, powstaje jezioro stopionego materiału przemieszczając się z wiązką lasera tworząc ścieżkę. Bezpośrednio za nią rozpoczyna się proces krzepnięcia. Zakrzepła ścieżka ulega deformacji wskutek naprężeń termicznych. W pracy podjęto się zadania opracowania modelu matematycznego opisującego powiązanie pola temperatur podczas nagrzewania i topienia proszku z parametrami procesu. W celach weryfikacyjnych wykonuje się pomiary wartości parametrów chropowatości powierzchni (R_a, R_z) i odchyłek wymiarów wyrobu, mierzonych dla ustalonych parametrów procesu według zasad planowanego eksperymentu. Wyznaczone zależności analityczne między parametrami procesu SLM a kryteriami, którymi są na przykład: porowatość, chropowatość, dokładność wymiarowa, pozwalają na sterowanie i optymalizację procesu SLM.

Rozdz. 3 Aktualny stan problemu w świetle prac publikowanych

Do wartościowych opisów tego rozdziału zaliczam sformułowanie też zakresu i celu pracy. Rozprawa obejmuje bowiem zagadnienia związane z wpływem warunków procesu na dokładność wyrobu. Autor przedstawia problematykę niedokładności wyrobu, omawianą w publikacjach, związaną z innymi przyczynami niedokładności. Są to drukarka (układ optyczny, mechaniczny), oprogramowanie 3-D (generowanie warstw, ścieżek), zjawiska związane z topieniem proszku, topieniem i skurczem ścieżki, kształtem i rozkładem ziaren (warstwa proszku).

Rozdz. 4 Dokładność wyrobów wytworzonych metodami przyrostowymi

Dokładność wyrobu rozumiana jest przez Autora jako stopień zgodności wyrobu z cyfrowym modelem 3_D. Autor omawia składowe czynniki wpływające na tę niezgodność. Są to: stopień odwzorowania modelu 3-D przez siatkę trójkątów w formacie STL (ang. Standard Triangulation Language)), parametry procesu SLM, właściwości proszku, układ opto-mechaniczny drukarki, oprogramowanie 3-D. Wyżej wymienione czynniki składają się na błędy stereometryczne występujące na powierzchni. Autor wskazuje dwa rodzaje powierzchni: powierzchnie boczne wyrobu powstałe w wyniku nakładania kolejnych warstw oraz powierzchnie górne wynikające ze śladu zakrzepłych ścieżek, po których poruszała się wiązka lasera. Przy ocenie jakości powierzchni Autor ocenia stereometrię powierzchni przez parametry chropowatości i falistości oraz niedokładność wymiarową wyrobu mierzoną na współrzędnościowych maszynach pomiarowych CMM (ang. Coordinate Measuring Machine).

Rozdz. 5 Cel i zakres pracy

Na podstawie przeprowadzonej analizy stanu wiedzy na temat dokładności wyrobu wytwarzanego technologią przyrostową SLM oraz własnych badań wstępnych formułuje Autor temat wyznaczenia parametrów procesu (okna procesu, tj. szybkiego szacowania parametrów) za pomocą modelu matematycznego i symulacji komputerowej. Parametry procesu znajdujące się wewnątrz obszaru okna (ang. Process Operational Window) powinny zapewniać stabilność procesu, co gwarantuje też dokładność wyrobu.

Sformułowanie i wybór kryteriów przez Autora, wpływających na dokładność wyrobu, wskazuje na jego dojrzałość badawczą.

Rozdz. 6 Modele matematyczne i symulacja procesu SLM

Laser jest źródłem energii. Stosowano laser neodymowy Nd: YAG o długości fali $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ oraz mocy 200 W, charakteryzujący się pracą ciągłą. Do opracowania modeli matematycznych, związanych z transferem ciepła w strefie oddziaływania wiązki laserowej na materiał warstwy ziaren, wykorzystano publikacje. Na potrzeby modelu matematycznego wykorzystano parametry fizyczne proszku CoCr. Energia wiązki laserowej jest absorbowana przez złożę proszku. Przedstawiono model matematyczny topienia proszku przez wiązkę laserową. Wykorzystano równania zachowania masy, pędu i energii. Uzyskano zależności na prędkość przemieszczenia frontu topienia jako funkcji prędkości skanowania. W miarę przemieszczenia jeziorka stopionego metalu postępuje proces krzepnięcia. Prędkość przemieszczenia się frontu krzepnięcia jest związana z prędkością posuwu wiązki laserowej. Przedstawiono w zapisie analitycznym model stygnięcia ścieżki z towarzyszącym skurczem. Skurczowi towarzyszy stan naprężeń. Na podstawie otrzymanych modeli matematycznych przeprowadzono symulację komputerową, pozwalającą poznać wpływ parametrów procesu na kształt i położenie ścieżki konturowej oraz deformację próbki w wyniku krzepnięcia. Symulację komputerową modelu matematycznego wykonano przy wykorzystaniu oprogramowania COMSOL Multiphysics.

Autor omawia możliwości programu COMSOL Multiphysics do symulacji procesu SLM na podstawie modeli matematycznych z zakresu transferu ciepła, przemian fazowych proszku, przepływu masy i deformacji geometrii próbki. W sposób analogiczny autor omawia wykorzystanie programu CATIA do komputerowego wspomagania działań związanych z wykonaniem modeli 3-D. Modele próbek zostały wytworzone w module PART DESIGN.

Na szczególne wyróżnienie zasługuje wykonanie w programie CATIA-3D złoża proszku oraz w programie COMSOL symulacji transferu ciepła, tj. nagrzewania i topienia proszku oraz deformacji ścieżki.

Do tworzenia modeli matematycznych kryteriów w wyniku przeprowadzonych eksperymentów zastosowano metodę Analizy Wymiarowej, punkt 6.5 str. 66 rozprawy.

Podane zależności według Analizy Wymiarowej na odchyłkę szerokości próbki skanowanej w procesie SLM wymagają znajomości wartości wykładników potęg, które wyznaczono eksperymentalnie. Nie podano w pracy (str. 87), jakiego dotyczą eksperymentu. Ponieważ Autor realizuje badania według planowanego eksperymentu w celach weryfikacyjnych,

wydaje się, że w przyszłości można by z metody Analizy Wymiarowej zrezygnować na korzyść metod statystycznych. Zaletą ich jest ocena istotności pozyskanych modeli, czego brakuje w modelach pozyskanych w Analizie Wymiarowej.

Ocena kryteriów zastosowana w Analizie Wymiarowej ma charakter wykreślny w przestrzeni 2D. Wydaje się, że lepszą oceną byłaby postać analityczna kryteriów. Ocena na płaskim wykresie (2D) jest mało dokładna.

Rozdz. 7 Badania doświadczalne

Celem badań doświadczalnych była weryfikacja wyników otrzymanych na drodze symulacji komputerowej modeli matematycznych topienia proszku, krzepnięcia, skurczu wyrobu, a także modeli matematycznych uzyskanych metodą Analizy Wymiarowej. Przedstawiono w pracy plan eksperymentu 5-co poziomowy z ramieniem gwiazdowym $r=2$. Liczba eksperymentów $N=31$. Kryteriami były parametry procesu SLM, tj. moc wiązki strumienia lasera P [W], prędkość skanowania V [mm/s], odległość pomiędzy kolejnymi ścieżkami P_d [μm], grubość warstwy proszku h [μm]. Wartości graniczne parametrów procesu przyjęto: P [70 – 190], V [100 – 1200], P_d [45 – 105], h [20 – 40]. Na str. 108 przedstawiono macierz planowania eksperymentu dla czterech zmiennych: (x_1, x_2, x_3, x_4) w postaci zakodowanej, dla 31 eksperymentów (str. 108, 109). Macierz planowania czterech zmiennych: (x_1, x_2, x_3, x_4) powinna mieć kolejną numerację tabel. Jest to plan statyczny zdeterminowany, selekcyjny, rotacyjno-uniformalny PS/DS.-P: λ/λ . Należałoby również zamieścić macierz planowania z wartościami naturalnymi parametrów, tj. dla poziomów: 1,0,+1, co podano w tabelicy 5 str.107. Wartości kryteriów odpowiadające wierszom, które przedstawiają parametry chropowatości $R_{a\text{ max}}$ oraz R_z zamieszczono w tabeli 10 na str. 140, 141. Wartości odchyłek geometrii próbek, mierzonych w punktach macierzy planowania doświadczeń zamieszczono w tabeli 9, str.119. Wydaje się, że byłoby bardziej przejrzyste, gdyby wykonał Autor dodatkowe tabele, w których w ostatniej pozycji byłyby wartości kryteriów odpowiadające eksperymentom, tj. parametry chropowatości i odchyłek wymiarowych. Taką postać wprowadza się do programów regresji wielokrotnej IBM lub STATISTICA. Dalej Autor opisuje sposób wykonania próbek 3-D za pomocą oprogramowania komputerowego CATIA V5. Świadczy to o jego dużym doświadczeniu eksperymentalnym. Dotyczy to również pomiarów parametrów struktury geometrycznej powierzchni, tj. parametrów chropowatości i falistości na CMM typ COORD3 o konstrukcji mostowej. Zakres pomiarowy X, Y, Z (2000, 1000, 800), głowica pomiarowa PH20, niepewność pomiaru rzędu 0,0001 mm należałoby sprawdzić.

Pomiar geometrii próbek wykonano na CMM na podstawie modelu 3-D wyrobu, na którym określono położenie punktów pomiarowych. Program pomiarowy przeprowadzono przy wykorzystaniu oprogramowania MODUS w trybie automatycznym (CNC). Opis świadczy o nabyciu przez Autora dużych umiejętności związanych z pomiarami w trybie automatycznym na CMM. Wykonano pomiary parametrów chropowatości $R_{a\text{ max}}$ oraz R_z na powierzchni bocznej próbek, odpowiadających punktom macierzy planowania. Celem tych pomiarów było zbadanie wpływu gęstości energii wiązki laserowej na stereometrię geometryczną powierzchni.

Opracowanie wyników pomiarowych (R_a, R_z) w funkcji parametrów procesu wykonano wykreślnie w trybie płaskim (2D). Przy czterech parametrach dla uzyskania wykresu 2D

zachodzi potrzeba ustalenia trzech zmiennych. Powoduje to konieczność wykonania wielu wykresów, które przedstawiono na str. 121-146.

Proponuje się w przyszłości wykonanie wykresów 3D (co skróci ilość wykresów) lub przedstawienia wyników w postaci zależności funkcyjnych.

Wykonano pomiary gęstości materiałowej szkieletu w Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie metodą zanurzeniową. Oznaczenie mas próbek suchej przez m_1 , nasyconej w wodzie przez m_2 oraz powierzchniowo suchej przez m_3 jest błędne, gdyż różnica ($m_1 - m_2$) we wzorze 110 str 147 jest ujemna. Wyniki pomiarów gęstości szkieletu i porowatości otwartej wyrobu (Tabela 11 str. 147-148) przedstawiono na wykresach 2D str. 149.

Rozdz. 8 Optymalizacja warunków procesu wytwarzania

Autor podjął się opracowania modelu kosztów wytwarzania wyrobów. Model ma zapewnić poprzez optymalizację parametrów procesu osiągnięcie maksymalnej dokładności wyrobu przy zachowaniu możliwie największej gęstości wyrobu, najmniejszej chropowatości powierzchni oraz najniższej energochłonności, co wiąże się z najkrótszym czasem t [min] wytwarzania. Ze względu na charakter pracy ciągłej lasera wyprowadzono postać analityczną czasu t [min] procesu wytwarzania jako funkcję nieliniową parametrów procesu SLM (wzór 118 str.152). Do optymalizacji parametrów procesu SLM związanych z czasem procesu wytwarzania t (zależność 118) wykorzystano metodę zredukowanego gradientu GRG, ang. Generalized Reduced Gradient. Wprowadzono do programu czas t jako funkcję wektorową. Warunkami ograniczającymi były graniczne wartości $\langle \min, \max \rangle$ parametrów procesu SLM: P [W], V [mm/s], P_d [μm], h [μm] oraz odchyłkę szerokości wyrobu d (str. 154). Realizację obliczeń wykonano przy wykorzystaniu Solver'a programu Exel. W wyniku obliczeń otrzymano optymalne wartości parametrów proces SLM (P , V , P_d , h), odchyłkę szerokości d i czas wytwarzania t . Wyniki obliczeń porównano z wartościami badań eksperymentalnych (str. 157, 158). Obliczone wartości parametrów procesu przez program GRG: P [W]- moc, t [min]- czas wykonania, E [j/mm^3] – energochłonność, cechuje duża rozbieżność w odniesieniu do wartości stosowanych w eksperymencie. Oznacza to, że przyjęta postać analityczna funkcji (wzór 118) jest mało dokładna. Bardziej przydatna byłaby postać funkcji uzyskana przy użyciu programu regresji wielokrotnej na bazie przeprowadzonego eksperymentu, w którym mierzyłoby się czas t [min] wykonania warstw na próbce.

Rozdz. 9 Wnioski

Z przeprowadzonej przez Autora analizy modelu matematycznego procesu SLM oraz jego badań doświadczalnych wynikają następujące wnioski:

1. Opracowany model matematyczny procesu SLM pozwala wyznaczyć granice przedziału parametrów (P , V , P_d , h) ze względu na stabilność procesu zwanego oknem parametrów.
2. Opracowany model matematyczny oraz symulacja komputerowa może służyć do określenia odchyłek od wymiarów nominalnych wyrobu.
3. Analiza wymiarowa jest użytecznym narzędziem do wyznaczenia modeli opisujących zależności między parametrami procesu a chropowatością i dokładnością wymiarową.
4. Weryfikacja doświadczalna i symulacja komputerowa potwierdziły użyteczność modeli matematycznych do doboru parametrów procesu.

5. Wykonano optymalizację parametrów procesu za pomocą programu GRG w celu uzyskania minimalnej odchyłki wymiarowej oraz chropowatości na powierzchni bocznej przy minimalnej energochłonności oraz maksymalnej gęstości właściwej wyrobu.
6. Modele matematyczne oraz symulacja komputerowa są przydatne przy doborze parametrów procesu w czasie projektowania procesu technologicznego.

Rozdz. 10 Przykłady wyrobów wykonanych w Instytucie Lotnictwa

Technologia przyrostowa ma szczególne zastosowania do produkcji wyrobów o złożonych profilach wewnętrznych w przemyśle lotniczym. Dotyczy to szczególnie: łopatek wirników turbin, które wymagają chłodzenia wewnętrznego przez strumień powietrza tłoczony przez sprężarki osiowe, części o złożonych kształtach, takich jak rozdzielacze płynu hydraulicznego, dysze silników raketowych, itp. Na rys. 174-180 przedstawiono przykłady wyrobów wykonanych technologią SLM w Sieci Badawczej Łukasiewicz Instytut Lotnictwa w Warszawie.

4. Uwagi

Proponuje się:

- 1 Zastąpić metodę Analizy Wymiarowej generowania postaci analitycznej kryteriów na modele statystyczne na bazie planowanego 5-cio poziomowego eksperymentu, albowiem zaletą oprogramowania statystycznego są wartości współczynników istotności zależności analitycznych R^2 oraz F Snedecora.
2. Do optymalizacji parametrów procesu SLM (dla kryteriów takich jak minimalna odchyłka wymiarowa parametrów, chropowatość powierzchni bocznej R_a oraz minimalna energochłonność) można wykorzystać programy krokowej regresji wielokrotnej, dostępne w oprogramowaniu IBM lub STATISTICA.

5. Podsumowanie i ocena rozprawy

Do innowacyjnych i wartościowych elementów rozprawy należy zaliczyć:

- Modelowanie matematyczne i fizyczne zjawisk termicznych w procesach topienia laserowego SLM.
- Optymalizację procesu technologicznego z uwagi na parametry procesu SLM, zapewniające minimalizację: kosztów, czasu wykonania wyrobu oraz energochłonności procesu.
- Podjęcie tematyki badawczej w zakresie zjawisk cieplnych i naprężeniowych.

Elementy powyższe stanowią oryginalny dorobek Doktoranta.

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

6. Wniosek końcowy

Rozprawę cechuje wysoki poziom merytoryczny, co świadczy o dojrzałości naukowej mgr. inż. Tomasza Zakrzewskiego. Wykazał się On bardzo dobrymi umiejętnościami samodzielnego rozwiązywania trudnych zagadnień optymalizacji technologii selektywnego topienia laserowego SLM ze względu na dokładność i mikrogeometrię powierzchni wyrobów. W rozprawie Doktorant przedstawił wyniki mające duże znaczenie poznawcze i użyteczne, które wniosły w mojej ocenie wyróżniający się wkład w obecny i dalszy rozwój technologii przyrostowych AM. **Wnioskuje zatem o wyróżnienie rozprawy..**

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 wnioskuje o dopuszczenie mgr. inż. Tomasza Zakrzewskiego do publicznej obrony rozprawy.

