

Szczecin 07.09.2023 rok

Prof. dr hab. inż. Bartosz Powałka
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki

OPINIA

o rozprawie doktorskiej mgr. inż. Wojciecha Stopyry

pt. „Modelowanie, symulacja i weryfikacja procesu przyrostowego wytwarzania stopów aluminium serii 7XXX pod kątem minimalizacji wad materiałowych”

1. Ocena wyboru tematu rozprawy

Wytwarzanie przyrostowe LPBF jest technologią, która w ostatnim dziesięcioleciu podlega dynamicznemu rozwojowi. Technologia ta jest stosowana w przemyśle przy wytwarzaniu złożonych metalowych części, zwłaszcza podczas produkcji małoseryjnej. Wytwarzanie przyrostowe LPBF jest coraz częściej stosowane w przemyśle lotniczym, kosmicznym i motoryzacyjnym. Rozwój ten wynika przede wszystkim z możliwości „drukowania” złożonych części, w dowolnym miejscu na świecie bez konieczności budowy fabryk, konstruowania oprzyrządowania obróbkowego, redukcji czasów przygotowawczych oraz ilości odpadów. Wśród materiałów stosowanych w technologii przyrostowej LPBF dominują stale, stopy tytanu oraz aluminium. Najczęściej przetwarzanymi stopami aluminium są stopy z serii 4xxx. Stopy o znacząco lepszych właściwościach wytrzymałościowych, jak np. z serii 7xxx są trudno przetwarzalne, co wynika ze skłonności do pęknięcia na gorąco. Jednym ze sposobów zapobiegania temu zjawisku jest modyfikacja składu stopów. Podejście takie, w przypadku przekroczenia norm dotyczących składu chemicznego stopu, wiąże się z koniecznością certyfikacji materiału, co jest procesem długotrwałym. Dlatego Autor rozprawy dążąc do wyeliminowania zjawiska pęknięcia na

gorąco, postanowił skoncentrować się na odpowiednim doborze parametrów procesu LPBF oraz wysokotemperaturowym podgrzewaniu platformy roboczej. Podsumowując, rozprawa porusza nie w pełni rozwiązane zagadnienia, leży w obszarze nowoczesnych i wciąż rozwijanych technologii wytwarzania przyrostowego a zatem uważam wybór tematu za trafny i jak najbardziej aktualny.

2. Charakterystyka rozprawy i jej merytoryczna ocena

Rozprawa składa się z sześciu rozdziałów, oraz spisu literatury. W rozdziale pierwszym Autor opisuje etapy wytwarzania przyrostowego LPBF i dokonuje podziału parametrów procesu wpływających na jakość wytwarzanych przedmiotów. Dokonuje porównania własności stopów aluminium i omawia mechanizmy pęknięcia na gorąco, na które szczególnie podatne są wysokowytrzymałościowe stopy aluminium serii 7xxx. W rozdziale tym, na podstawie gruntownego przeglądu literatury, Autor opisuje metody zapobiegania powstawaniu pęknięć na gorąco. Zwracając uwagę na czasochłonność certyfikacji nowo opracowanych materiałów mgr inż. Wojciech Stopyra postanawia w swych badaniach koncentrować się na doborze parametrów procesu i wysokotemperaturowym podgrzewaniu platformy roboczej. Uzasadnienie to ujęto w rozdziale 2. W konsekwencji jako cel swoich badań stawia opracowanie technologii przyrostowego wytwarzania stopów aluminium 7xxx z zastosowaniem wysokotemperaturowego podgrzewania platformy roboczej w celu eliminacji platformy roboczej. Cel pracy, ściśle z nim związana teza oraz metodyka badań zostały przedstawione w rozdziale 3 rozprawy.

Rozdział 4 opisuje metody i zakres badań technologicznych. W podrozdziale 4.1 dokonano charakterystyki proszku w stanie dostawy oraz odzyskanego po procesie: cząstki pobrano przy otworach wylotowych z komory roboczej urządzenia („spatter”) oraz pobrany z miejsc pomiędzy próbkami („proszek spomiędzy próbek”). Badania te obejmowały określenie składu chemicznego proszku, morfologię i rozkład frakcji proszku, absorpcyjność wiązki lasera, oraz dynamiczną sypkość proszku. Wnioskiem z przeprowadzonych w tym podrozdziale badań było stwierdzenie zdatności proszku do użycia. W podrozdziale 4.2. omówiono przeprowadzone symulacje termodynamiczne. Pozwoliły one Autorowi na określenie objętościowego udziału oraz temperatury przemian fazowych dla poszczególnych faz w stanie równowagi, objętościowego udziału faz podczas nierównowagowego procesu krzepnięcia oraz wpływu poszczególnych pierwiastków na podatność materiału na pęknięcie na gorąco. Wyniki tych badań stanowiły podstawę do

określenia temperatury podgrzewania platformy roboczej. W podrozdziale 4.3. Autor omówił charakterystyki geometryczne defektów, których pomiary przeprowadził z zastosowaniem tomografii komputerowej. W dalszej części tego podrozdziału omówiono eksperyment, który został przeprowadzony w trzech etapach zarówno w zakresie niskich jak i wysokich prędkości skanowania. W pierwszym etapie (badania przesiewowe) określono zakres stosowanych parametrów. Dotyczył on przede wszystkim sformułowania ograniczeń w zakresie mocy lasera oraz prędkości skanowania. Następnie, w drugim etapie przeprowadzono właściwe badania, w wyniku których nie stwierdzono występowania pęknięć na gorąco w zakresie niskich oraz wysokich prędkości skanowania. Jako miarę jakości uzyskanych próbek przyjęto sumaryczną porowatość. Określono wpływ grubości warstwy, prędkości skanowania, odległości między liniami i mocy lasera na średnią porowatość. Ostatnim etapem badań był eksperyment, w którym sprawdzano wpływ temperatury podgrzewania platformy roboczej i średnicy próbki na podatność na pękanie. Rozdział 4 podsumowano wnioskami dotyczącymi wpływu parametrów procesu na porowatość oraz podatność na pękanie na gorąco.

Parametry procesu pozwalające wytwarzać próbki bez pęknięć określone w rozdziale 4 zostały przyjęte w doświadczeniach opisywanych w rozdziale 5. W rozdziale tym omówiono wyniki przeprowadzonej analizy składu chemicznego, identyfikacji mikrostruktury oraz badań mechanicznych czyli porowatości, twardości, wytrzymałości na rozciąganie, wydłużenie. W podrozdziale 5.3. Autor rozprawy przedstawił „finalny produkt” swoich prac badawczych w postaci wykonanego demonstratora – wspornika podłogi samolotu M28B Bryza. Pracę kończy podsumowanie, w którym zawarto wnioski poznawcze, użyteczne oraz sformułowano kierunki dalszych prac.

Podsumowując układ rozprawy stwierdzam, że jest on logiczny i ostatecznie doprowadził do realizacji założonego celu pracy. Układ rozprawy w dużej mierze jest odbiciem przyjętej metodyki badań. Metodyka badań była bowiem, w mojej ocenie, kluczowa w realizacji celu pracy, gdyż poszczególne jej etapy pozwalały na eliminację parametrów nie wpływających na występowanie pęknięcia na gorąco oraz prowadziły do zawężania ich zakresów. Na słowa uznania zasługuje formułowanie wniosków, którymi Autor rozprawy podsumowuje prowadzone badania. Wnioski te dotyczą przede wszystkim parametrów procesu i są punktem wyjścia do kolejnego etapu badań.

Do wartościowych i oryginalnych osiągnięć rozprawy zaliczyć należy:

- Opracowanie metodyki badań prowadzącej do identyfikacji parametrów prowadzących do eliminacji defektów w procesie LPBF
- Określenie wpływu parametrów procesu na sumaryczną długość i średnią szerokość pęknięć oraz porowatość
- Określenie parametrów procesu charakteryzującego się stabilnym przebiegiem i niewielkim (<1%) udziałem defektów
- Wyjaśnienie przyczyn zaobserwowanych zależności tzn. wpływu ciśnienia powietrza oraz momentu dokręcania na tłumienie drgań.

Oceniając pozytywnie opiniowaną rozprawę, mam również uwagi krytyczne, do których zaliczam:

- Str. 40: niezrozumiałe jest stwierdzenie: „...które dla niskich warstw przesuwane są przez zgarniacz wzdłuż całej długości warstwy”, co oznacza „niska warstwa”?
- Str. 45: Wzór (2) przedstawia równanie różniczkowe, natomiast wzór (3). Gdzie zatem jest Cs w równaniu (2)
- Str 45: Praca [101] korzysta z rozwiązania, które zostało przedstawione w: „E. Scheil, Z. Metallkd., 34 (1942) 70–72
- Str. 51: Na wykresie brak zakresu liczbowego osi (Wagowy udział pierwiastków)
- Str 53/54: W jaki sposób wyznaczono powierzchnię i objętość defektów?
- Str 54: W jakich jednostkach zdefiniowana jest wielkość V/P?
- Str 54: Dlaczego jeden z punktów (defekt kolumnowy) różni się znacznie pod względem sferyczności?
- Str. 59: Co oznacza „wyrastające próbki ponad warstwę nakładanego proszku”?
- Str. 60: Autor stwierdza, że „w odróżnieniu od testu pierwszego próbka o mocy równej 250 W została oceniona pozytywnie” podczas gdy w tabeli na 4 próby 250 W tylko jedna jest pozytywna.
- Str. 68: Jak odczytywać wykresy świecowe? Co oznacza wysokość „pudełka”, co oznacza punkt między ciemną a jasną częścią „pudełka”? Według mnie ujęcie tych danych w takiej formie jest mało czytelne.

- Str. 69: Autor przedstawił fragment analizy wariancji. Szkoda, że nie pokazano wpływu poszczególnych czynników a także przedziałów ufności na rysunku 40.
- Str 90 , 91: Nie do końca zrozumiałe wykresy. Tak jak w uwadze dotyczącej wykresów świecowych nie wiadomo co oznaczają poszczególne elementy tych wykresów.
- Str. 96: Autor podaje wartości grubości ścianki przed i po piaskowaniu. Nie wiadomo jednak czym to było mierzone w jakim punkcie. Szkoda, że nie podano więcej wartości.
- Str. 97: Strzałka żółta oznacza pęknięcia – mało widoczne
- Str. 97: Autor stwierdza, że porowatość dla powierzchni równej 11,68 mm² porowatość wynosiła 0,46% zaś dla powierzchni 82,40 mm² wynosiła 2,96%. Jak to rozumieć: porowatość zależy od powierzchni?

Drobne uwagi redakcyjne:

- Słowo „Rysunek” nie jest w pracy odmieniane przez przypadki,
- Str. 24: „prędkość szybkość 1400 mm/s”
- Str. 27: „Zdanie: „ Z racji tego, że ich skład chemiczny...” wydaje się niedokończone.

Opiniowana rozprawa ma charakter w symulacyjno-doświadczalny. Jej ogólna ocena mimo pewnych uwag krytycznych, dotyczących zwłaszcza statystycznego opracowania wyników, jest pozytywna. Rozprawa doktorska mgr. inż. Wojciecha Stopyry wnosi istotny wkład w rozwój metod wytwarzania przyrostowego.

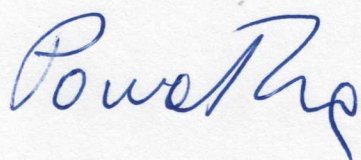
Redakcyjne opracowanie rozprawy nie budzi większych zastrzeżeń. Stylistyka rozprawy jest na akceptowalnym poziomie.

3. Końcowa ocena rozprawy

Końcowa ocena rozprawy doktorskiej mgr. inż. Wojciecha Stopyry jest pozytywna. Autor wykazał się wiedzą z zakresu symulowania procesów termodynamicznych, opracowania metodyki badań doświadczalnych, planowania eksperymentów oraz umiejętnością interpretowania uzyskanych wyników. Posiada bardzo dobrą wiedzę w

zakresie wpływu parametrów procesu LPBF na defekty wytwarzanych tą technologią części.
Udowodnił, że jest przygotowany do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr. inż. Wojciecha Stopyry spełnia wszystkie wymagania odpowiedniej ustawy - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574 z późn. Zm) i może być dopuszczona do publicznej obrony.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Poważny'.