Geometric limitations of objects manufactured using the Electron Beam Melting additive technology for the Ti6Al4V alloy

KAROL KOBIELA

Wroclaw University of Science and Technology, Faculty of Mechanical Engineering, karol.kobiela@pwr.edu.pl

Abstract: *Aim of the investigation was to check limitations of the process proceed on EBM (Electron Beam Melting) 3D printing technology using prepared build with benchmark 3D model parts. Used benchmark models tested capabilities of production minimal rod diameters, width of thin walls and holes through depending on their depth. Process parameters gave the highest density of manufactured part with overall porosity value below 0,2%.*

Keywords: *rapid prototyping, EBM, 3D model parts*

Ograniczenia geometryczne wytwarzanych obiektów z użyciem technologii addytywnej Electron Beam Melting dla stopu Ti6Al4V

Streszczenie: *Głównym celem prowadzonych prac było opracowanie i wytworzenie zestawu elementów testowych (benchmarków) które określiłyby możliwości budowy elementów dla technologii addytywnego wytwarzania Electron Beam Melting (EBM). Opracowane części miały za zadania sprawdzenie możliwości budowy przestrzennych prymitywów geometrycznych jak pręty, cienkie ściany czy możliwości wytwarzania przelotowych otworów w zależności od grubości elementu. Jednocześnie badania uwzględniały analizę odwzorowania wytworzonych modeli względem modeli referencyjnych CAD. Badania przeprowadzone były dla stopu tytanu Ti6Al4V z użyciem parametrów dla których wyznaczona porowatość była najniższa w trakcie badań nad zestawem parametrów zmiennych procesu i wynosiła poniżej 0,2%.*

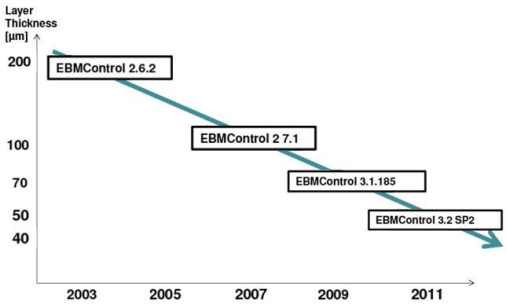
Słowa kluczowe: *rapid prototyping, EBM, 3D model parts*

1. Wstęp

Powszechnie przyjęło się iż technologie addytywnego wytwarzania pozwalają na wytwarzanie dowolnych struktur geometrycznych bez ograniczeń w kształcie, nieosiągalnych przy tradycyjnych metodach wytwarzania np. z użyciem obróbki ubytkowej. Jest to bardzo duże uproszczenie i projektując element zorientowany na wytwarzanie z użyciem technologii addytywnych należy zwrócić uwagę na szereg ograniczeń zarówno tych wpływających na jakość powierzchni obiektu ale też na ograniczenia fizyczne samego urządzenia/technologii. Przekroczenie limitów sprawiania iż wykonanie elementu jest niemożliwe w odniesieniu do obiektu referencyjnego CAD. W niniejszej pracy została podjęta próba sprawdzenia ograniczeń geometrycznych wytwarzanych obiektów z użyciem technologii EBM, która jest jedną z metod mikrometalurgii proszków typu „powder bed" w której to energia potrzebna do przetopienia warstwy proszku jest dostarczana za pomocą wiązki elektronów [1]. Technologia charakteryzuje się bardzo dobrą wydajnością wytwarzania (w odniesieniu do innych technologii wytwarzania), oraz ze względu na wykorzystanie próżni do procesu jest interesująca dla materiałów takich jak tytan i jego stopy [2], intermetale [3] oraz super stopy na bazie niklu [4]. Proces wytwarzania jest „gorący" a dla stopu Ti6Al4V wstępne podgrzanie wynosi 730^0C. W celu przeprowadzenia badań opracowane zostały benchmarki będące elementami/częściami zawierającymi szereg prymitywów geometrycznych o różnych zakresach wielkości fizycznych których

wytworzenie jednoznacznie w sposób empiryczny pozwoliłoby określić granice wielkości geometrycznych możliwych do wytworzenia. Do badań zostały opracowane 3 benchmarki geometryczne, które pozwoliły na zbadanie możliwości budowy średnic pręcików, grubości cienkich ścianek oraz przelotowości otworów w zależności od ich głębokości. Należy zwrócić uwagę iż początkowo zarówno na możliwości geometryczne wytwarzanych detali jak również i na jakość końcową elementów ogromny wpływ miała grubość pojedynczej warstwy wykorzystanej przy budowie obiektów. Od 2003 roku wartość ta zmniejszyła się 4 krotnie z wartości 200 um do 50um. Rys. 1 przedstawia wielkość grubości warstwy w zależności od układu sterowania.

Obecnie na rynku tylko jedna firma dostarcza urządzenia typu powder bed wykorzystujących wiązkę elektronów jako narzędzie do wytwarzania obiektów[6].



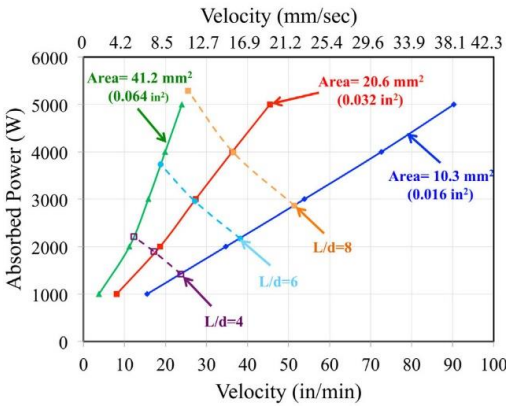
Rys. 1. Zmiana grubości pojedynczej warstwy w technologii EBM w zależności o sterowania [5]

2. Materiały i metody

W celu opracowania elementów testowych (benchmarki) przeanalizowano parametry procesu oraz właściwości fizyczne materiału używanego do procesu wytwarzania, którym był stop tytanu Ti6Al4V. W przypadku parametrów zmiennych procesu starano się odszukać zmienne, które jednoznacznie wyznaczałyby minimalne wielkości geometryczne możliwe do wytworzenia. Przyjęto że głównym parametrem ograniczającym możliwości geometrycznego wytworzenia obiektu jest parametr offsetu wiązki, który steruje wielkością plamki (µm) wiązki elektronów wyrażony w mA która może być sterowana w zakresie wielkości od 100 do 1000 µm [7]. Dla opracowanego zestawu parametrów wytwarzania wartość offsetu wynosi 19 mA co przekłada się na plamkę o średnicy 500 µm. Parametr wielkości plamki determinuje minimalną szerokość pojedynczego obiektu jak ścianka, przez co wybudowanie obiektu cieńszego niż szerokość plamki jest niemożliwe. Dodatkowym czynnikiem poddanym analizie była zależność pomiędzy mocą a prędkością skanowania wiązki warstwy budowanego obiektu. Analiza literaturowa wykazała iż zostały przeprowadzone badania wykazujące zależność pomiędzy prędkością skanowania oraz absorbowaną energią przy stałej wielkości plamki na wielkość jeziorka przetopu co również przekłada się na fizyczną wartość szerokości pojedynczego ściegu[8].

Właściwości fizyczne używanego materiału również mają znaczący wpływ na odwzorowanie geometryczne obiektu finalnego. Kluczowymi parametrami są zarówno wielkość używanej frakcji oraz sam kształt cząsteczek proszku. Problemem pojawiającym się przy wytwarzaniu obiektów w technologii powder bed jest nieprzetopiony proszek, który stanowi swojego rodzaju skorupę znajdującą się na powierzchniach zewnętrznych wytwarzanego obiektu. Nieprzetopione cząstki proszku na konturze zewnętrznym wytwarzanego obiektu zostają uwięzione w wyniku krzepnięcia ciekłego jeziorka metalu. Wartość grubości takiej skorupy jest zbliżona do wielkości frakcji cząstek proszku używanych w procesie wytwarzania i wynosi ona od 40 do 100 µm [6]. Na bazie zebranych informacji wyznaczono wartości minimalne prymitywów geometrycznych. Dla elementów prętowych przyjęte wartości średnicy wynosiła od 0,8 mm do 2 mm i są one składową wielkości używanej plamki, powierzchni podlegającego procesowi przetopienia, mocy procesu, strategii wytwarzania obiektów litych która składa się z operacji konturu i późniejszego wypełnienia oraz analizy właściwości samego proszku. Bardzo mała powierzchnia przetapianego przekroju ze względu na schemat procesu wytwarzania (skanowanie liniowe) przekłada się na bardzo dużą energię zabsorbowaną przez materiał w krótkim czasie co zwiększa powierzchnię ciekłego jeziorka a tym samym długość obwodowa na której powstanie w wyniku procesu skorupa nieprzetopionego proszku zwiększa się.

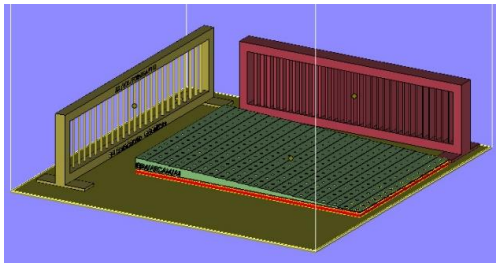
W przypadku testu dla elementów cienkościennych wartość minimalna była równa średnicy plamki (0,5mm) a maksymalna wynosiła 2 mm. Mniejsza wartość niż w przypadku elementów prętowych pośrednio wynika z większej powierzchni podlegającemu przetopieniu. Badanie możliwości kształtowania otworów w zależności od ich głębokości zostało przeprowadzone z użyciem macierzy o zmiennej grubości od 0,3 do 6 mm gdzie na każdym poziomie zostało umieszczone 16 otworów o średnicach w zakresie od 0,5 do 2 mm (skok 0,1 mm). Wszystkie zaprojektowane benchmarki zostały przedstawione na rys.3



Rys. 2. Mapa procesu wielkości płynnego jeziorka metalu w zależności od mocy zaabsorbowanej oraz prędkości skanowania wiązki dla Ti64 [8]

Rys. 3 Modele CAD benchmarków dla A) cienkich ścianek B) elementów prętowych C) drożności kanałów w zależności od grubości elementu

Budowa obiektów oraz ich zorientowanie na platformie roboczej urządzenia zostało przedstawione na rys. 4. Obiekty A i B zostały wytworzone bez żadnych struktur podporowych natomiast obiekt C został podparty strukturą wsporczą, zabieg ten miał na celu zmniejszenie powierzchni kontaktu samego modelu z płytą roboczą, co przekłada się na zmniejszenie ryzyka deformacji obiektu w wyniku zbyt szybkiego odprowadzania ciepła szczególnie w zakresie grubości 0,3-1 mm. Modele nie zostały przeskalowane w celu próby kompensacji skurczu materiału.



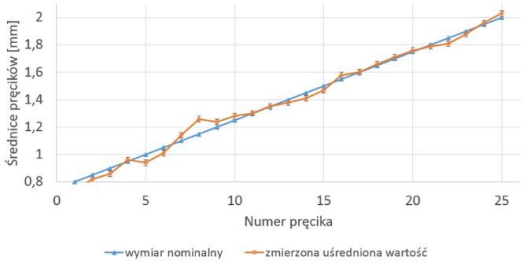
Rys. 4 Widok platformy roboczej wraz z ułożeniem modeli testowych

4. Wyniki (Dyskusja)

Obiekt testowy dla elementów prętowych oraz cienkich ścian został wybudowany poprawnie w całym zaplanowanym zakresie wielkości geometrycznych. Na rys. 5 pokazane zostały wytworzone obiekty A i B do testów geometrii prętów oraz cienkich ścianek

Rys. 5 Zdjęcia wykonanych modeli testowych dla elementów prętowych (góra) i cienkich ścian (dół)

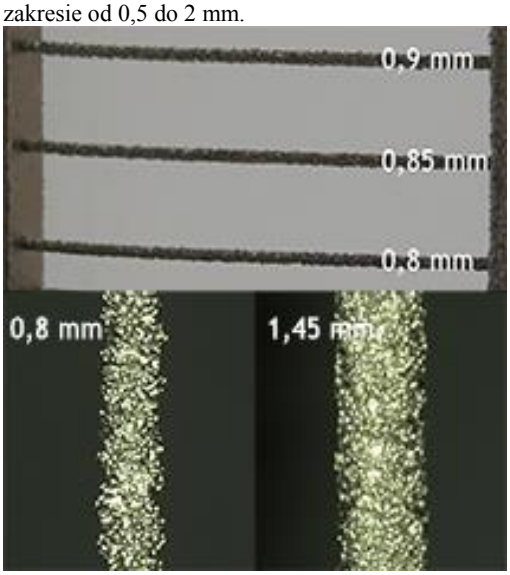
W celu weryfikacji jakości odwzorowania fizycznych wielkości geometrycznych w odniesieniu do wymiaru nominalnego wykonano pomiar wszystkich prymitywów z użyciem mikroskopu świetlnego co zostało zobrazowane na poniższym rysunku.



Rys. 6 Pomiar średnicy pręcików w odniesieniu do wartości nominalnej modelu CAD

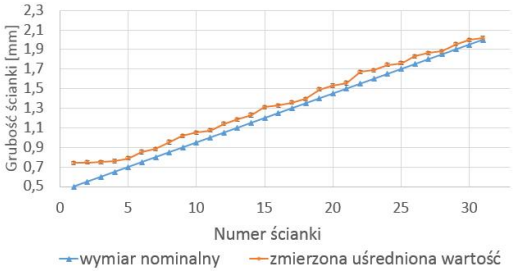
Dla wykonanych pomiarów zaobserwowano że w zakresie od 0,8 do 1,2 mm uśredniona średnica wybudowanych pręcików jest rozbieżna od wartości nominalnej modelu CAD, różnica wymiaru

przekracza wartości błędu statystycznego a sam wymiar zmienia się z wartości ujemnej (mniejsza od nominalnej) do wartości dodatniej (większa od nominalnej). Dla średnic powyżej 1,2 mm uśredniony pomiar średnicy pręcików kształtuje się podobnie do wartości nominalnej, a sama zmierzona wartość nie przekracza błędu statystycznego próby.
Zakładając że zarówno dla elementów o najmniejszej średnicy oraz tych maksymalnych na powierzchni zewnętrznej znajduje się warstwa nieprzetopionego proszku co przedstawiono na rys. 7. Można przyjąć że wraz ze wzrostem nominalnej średnicy proces ulega stabilizacji a średnica wyjściowa elementu wraz z uwzględnieniem skurczu i skorupy z nieprzetopionego proszku kształtuje się na poziomie wartości nominalnej.
W przypadku cienkich ścian zmierzone wartości były większe od wartości nominalnej w całym badanym zakresie od 0,5 do 2 mm.



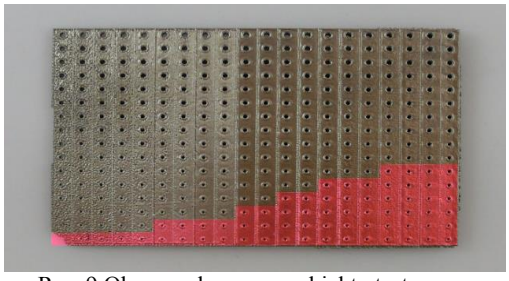
Rys. 7 Obraz pręcików dla wartości od 0,8 do 0,95 mm wraz ze zdjęciami

Uśredniona różnica od wymiaru nominalnego wynosiła 0,11 mm. Maksimum rozkładu dyfrakcji laserowej dla proszku Ti64 używanego w procesie kształtuje się na poziomie 85 µm. Nieprzetopiony proszek przyklejony do powierzchni zewnętrznych modelu jest częściowo wtopiony, zakładając iż mierzony wymiar opiera się na dwóch powierzchniach z częściowo nieprzetopionym proszkiem tak duża różnica wymiarów w stosunku do nominalnego może wynikać właśnie z sumy naddatków na obu stronach mimo zjawiska skurczu. Rys. 8 przedstawia wynik pomiar grubości ścianek w odniesieniu do wymiaru nominalnego modelu CAD.



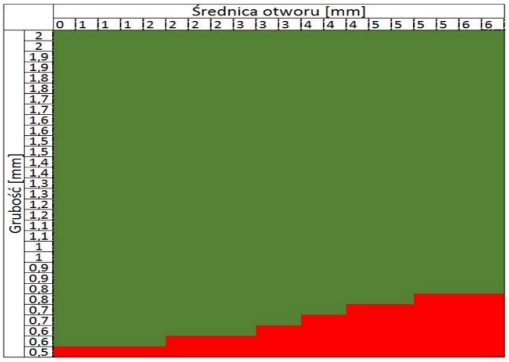
Rys. 8 Wyniki pomiaru grubości ścianki w odniesieniu do wartości nominalnej modelu CAD

Dla modelu testowego macierzy otworów wykonano analizę sprawdzenia drożności kanału na całej jego długości. Wykonane otwory sprawdzano pod kątem jakości odwzorowania kształtu na powierzchni czołowej elementu. Zaobserwowano iż proszek przylegający do ścian bocznych kanału wpływa na jakość odwzorowania kształtu elementu w odniesieniu do referencji. Na rys. 9 zostało zamieszczone zarówno same zdjęcie wykonanego obiektu testowego (benchmarka) jak również naniesiony został obszar otworów dla których nie zaobserwowano drożności.



Rys. 9 Obraz wykonanego obiektu testowego drożności kanałów wraz z naniesionym obszarem gdzie otwory wykazywały brak przelotu

Dla grubości elementu powyżej 0,8 mm wszystkie otwory od średnicy 0,3mm do 2 mm były przelotowe. Szczegółowe wyniki dla wszystkich średnic oraz grubości materiału zostały zestawione na rys. 10



Rys. 10 Macierz wyników dla benchmarka drożności kanałów

Oględziny powierzchni samego detalu dla najmniejszych grubości od 0,5 do 0,55 mm wykazywały błędy budowy dla jednego z narożników detalu. Dla grubości w zakresie od 0,5 do 0,8 mm na powierzchni można było zaobserwować występującą miejscowo porowatość.

5. Wnioski

Przeprowadzone badania pokazały możliwości wytwórcze technologii EBM. Dla elementów prętowych zaobserwowano iż rozrzut wartości zmierzonych względem nominalnej średnicy dla prętów od 1,2 mm jest w granicach błędu pomiaru. Dla pręcików w zakresie od 0,8 do 0,95 mm zaobserwowano jego pocienienie u podstawy oraz jego boczne ugięcie. Dla elementów cienkościennych zmierzone wielkości geometryczne elementów w całym zakresie były większe od wartości nominalnej. Spowodowane jest to występowaniem skorupy opisanej wcześniej na powierzchni elementu. Należałoby przeprowadzić dodatkowy proces wykańczający w postaci obróbki strumieniowo ściernego powierzchni w celu poprawy zarówno samej chropowatość elementu jak i usunięciu luźnego nieprzetopionego proszku. Dla zaprojektowanej w eksperymencie orientacji budowy elementów wszystkie prymitywy wybudowały się poprawnie. W przypadku drożności kanałów wykazano iż dla grubości materiału większej niż 0,8 wszystkie średnice otworów i ich kanały były przelotowe. Dalszy bieg badań powinien uwzględniać kolejne orientacje modeli testowych względem platformy roboczej (0^0 i 45^0) oraz jej wpływ na możliwości wytwarzania obiektów.

Literatura / References

[1] Scharowsky T., Singer R. F., Körner C., Tailored Ti-6Al-4V Parts Built by Selective Electron Beam Melting (SEBM), Faunhofer Digital Direct Manufactruring Conference, 2014, p 20-25
[2] Heinl P., Rottmair A., Körner C., Singer RF. Cellular titanium by selective electron beam melting. Advanced Engineering Materials 2007:9:360–4.
[3] Biamino S, Penna A, Ackelid U, Sabbadini S, Tassa O, Fino P, Pavese M et al. Electron beam melting of Ti–48Al–2Cr–2Nb alloy: Microstructure and mechanical properties investigation. 3rd IRC International Workshop 13-14 May 2010 2011:19:776–81.
[4] Cormier D., Harrysson O., West H. Characterization of H13 steel produced via electron beam melting. Rapid Prototyping Journal 2004:10:35–41
[5] U. Ljungblad, P. Ohldin, S. Thundal, Arcam AB, Additive Manufacturing with EBM - The Route, Faunhofer Digital Direct Manufactruring Conference, 2014, p 20-25
[6] list of Arcam patents www: http://www.arcam.com/technology/patent/
[7] Arcam A1 – The future in implant manufacturing, ARCAM AB Sweden, www.arcam.com
[8] Gockel J., Integrated Control of Solidification Microstructure and Melt Pool Dimensions In Additive Manufacturing Of Ti-6Al-4V, Pittsburgh, PA: Carnegie Mellon University, 2014.