

Wytwarzanie przyrostowe stopów amorficznych metodą selektywnego stapiania laserowego

Additive manufacturing of amorphous alloys via laser melting

ŁUKASZ ŻRADOWSKI
BARTŁOMIEJ WYSOCKI
PIOTR BŁYSKUN
RAFAŁ WRÓBLEWSKI
WOJCIECH ŚWIĘSZKOWSKI *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.1.7>

W artykule opisano proces optymalizacji stapiania proszków szkła metalicznego na bazie żelaza. Stapianie prowadzono przy różnych parametrach mocy lasera i strategiach przyrostowego wytwarzania – tak, aby uzyskać wysoką zawartość fazy amorficznej. Wyniki badań potwierdzają istotny wpływ mieszania jeziorka ciekłego metalu oraz szybkości nagrzewania wierzchniej warstwy materiału na amorfizację.

SŁOWA KLUCZOWE: laserowe stapianie, szkła metaliczne

In the paper optimization process for selective laser melting of Fe-based metallic glass powder has been described. Melting process has been conducted with various laser power and parameters to increase materials amorphisation degree. Results showed strong influence of melt pool mixing and heating rate on amorphisation.

KEYWORDS: selective laser melting, metallic glasses

Szkła metaliczne dzięki wysokiej wytrzymałości i odporności korozyjnej są obiecującymi materiałami konstrukcyjnymi. Ich wytwarzanie wymaga stopienia materiału, a następnie szybkiego schłodzenia ze stanu ciekłego w czasie wystarczająco krótkim do powstrzymania krystalizacji. Obecnie większość szkieł metalicznych produkuje się metodą rozprowadzania ciekłego metalu na wirujący bęben miedziany lub odlewania do form miedzianych. Metody te pozwalają jedynie na otrzymanie niewielkich elementów, co istotnie ogranicza możliwość stosowania szkieł metalicznych. Nową techniką wytwarzania szkieł metalicznych jest selektywne stapianie proszków, gdzie w serii powtarzalnych przejść wiązki lasera proszek jest stapiany, a następnie łączy się z resztą materiału i ulega szybkiemu chłodzeniu [1]. Uzyskanie struktury amorficznej jest osiągalne, jeżeli stopiony materiał zostanie ochłodzony z szybkością większą od krytycznej oraz gdy nie zajdzie krystalizacja w bezpośredniej strefie wpływu ciepła wiązki lasera [2]. Celem pracy była optymalizacja procesu stapiania pod kątem osiągnięcia wysokiego stopnia zeszklenia (amorfizacji materiału).

Materiał i metoda

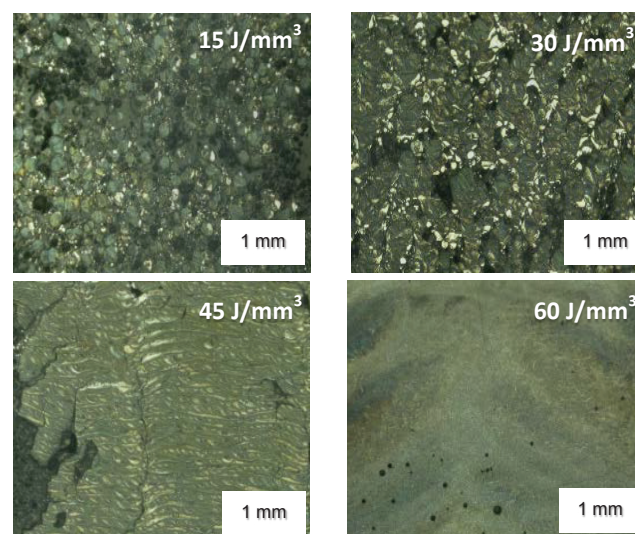
W pracy wykorzystano proszek o nazwie handlowej Kuamet 52 (Atmix, Japonia) i składzie nominalnym $Fe_{71}Si_{10}B_{11}C_6Cr_2$. Proszek stapiano na platformie maszyny SLM 50 (Realizer, Niemcy). Na pierwszym etapie dokonano wstępnego doboru parametrów, zmieniając moc lasera

* Inż. Łukasz Żrodowski (lukasz.zrodowski@gmail.com), mgr inż. Bartłomiej Wysocki (bartlomiej.wysocki@wimpw.edu.pl) – Wydział Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej, Materialscare Sp. z o.o.; mgr inż. Piotr Błyskun (p.blyskun@inmat.pw.edu.pl), dr inż. Rafał Wróblewski (rwroblew@inmat.pw.edu.pl), Krzysztof Jan Kurzydłowski (kjk@inmat.pw.edu.pl), Wojciech Święszkowski (wswieszk@inmat.pw.edu.pl) – Wydział Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej

(P), odległość między stapianymi punktami (PD) i czas ekspozycji lasera w punkcie (EXP). Na kolejnym etapie wprowadzono dodatkowe stapianie każdej warstwy z różnymi strategiami skanowania. Pełny proces optymalizacji został opisany w [3].

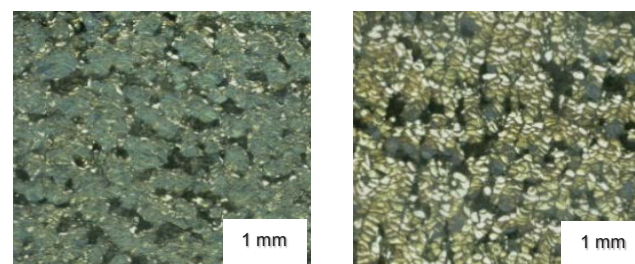
Wyniki

Pierwsze próby ujawniły, że zwiększanie energii dostarczanej przez laser zmniejsza porowatość materiału, natomiast powyżej pewnego progu zawartość fazy szklistej maleje (szkło widoczne jest na obrazach mikroskopowych jako jasny, niewytrawiony obszar). Dla gęstości energii powyżej ok. 45 J/mm^3 przy $10 \mu\text{s} < EXP < 40 \mu\text{s}$ materiał całkowicie krystalizuje (rys. 1).



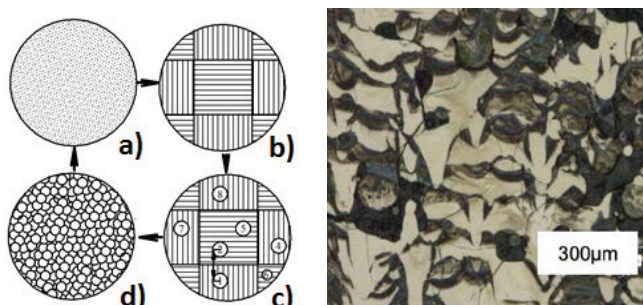
Rys. 1. Typowe mikrostruktury przy różnych gęstościach energii

Na dalszym etapie, przy zachowaniu identycznej prędkości wiązki lasera, zwiększono dwudziestokrotnie odległość między punktami i czas ekspozycji. Doprowadziło to do zdecydowanego wzrostu zawartości fazy szklistej (rys. 2).



Rys. 2. Typowe mikrostruktury otrzymane przy małych odległościach między punktami (po lewej: $PD = 4 \mu\text{m}$, $EXP = 20 \mu\text{s}$) oraz dużych odległościach między punktami (po prawej: $PD = 100 \mu\text{s}$, $EXP = 500 \mu\text{s}$)

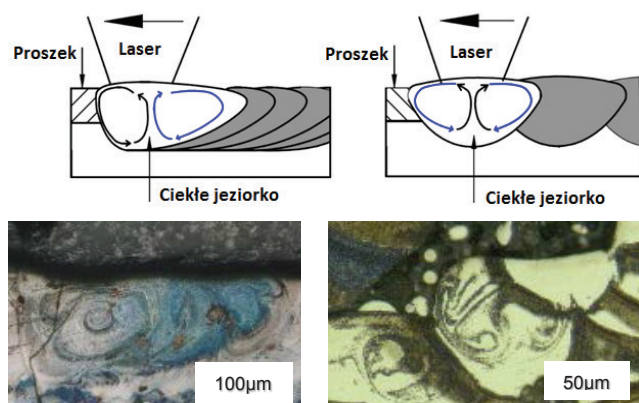
Na trzecim etapie przyjętej optymalizacji wprowadzono duże odległości między punktami PD i dobrano metodę podwójnego stapiania każdej warstwy proszku. Ostatecznie, aby zachować wysoką zawartość fazy szklistej, drugi przetop zrealizowano według strategii impulsowo-losowej (rys. 3). Wynikiem zastosowania takiej strategii jest połączenie amorficznych przetopów, ograniczenie krystalizacji w strefie wpływu ciepła i wzrost zawartości fazy amorficznej.



Rys. 3. Schemat działań w strategii impulsowo-losowej (po lewej) i otrzymana mikrostruktura (po prawej): a) nałożona warstwa proszku, b) przetapianie w trybie szachownicy z mocą 20 W i prędkością wiązki 200 mm/s, c) przetapianie pojedynczymi impulsami z mocą 120 W, w odległości minimalnej 1 mm, d) pełna przetopiona warstwa

Dyskusja

W przypadku wielu materiałów metalicznych poddawanych procesowi laserowego stapiania zwiększenie gęstości energii podczas obróbki zmniejsza porowatość materiału. Wynika to z lepszej zwilżalności poprzedniej warstwy przez roztopiony proszek oraz z głębszego wtopienia w tę warstwę [4]. Szkła metaliczne ze względu na swoją nierównowagową strukturę mogą krystalizować, jeżeli zostaną przegrzane i gdy będą spełnione inne warunki do zajścia krystalizacji, np. wystarczająco długi czas wytrzymania w wysokiej temperaturze lub obecność zarodków heterogenicznych. Dlatego w przypadku standardowego skanowania zwiększenie gęstości energii przynosi dwa przeciwstawne efekty w postaci zmniejszenia porowatości oraz zawartości fazy amorficznej. W drugiej części procesu wspomnianej optymalizacji odkryto, że przy zachowaniu identycznej średniej prędkości wiązki lasera i jego mocy można uzyskać różną zawartość fazy amorficznej, pod warunkiem rozdzielenia pojedynczych jeziorek laserowych.



Rys. 4. Idea mechanizmu mieszania ciekłego metalu przy pracy quasi-ciągłej (po lewej) i przy rozdzielonych jeziorkach (po prawej) wraz z odpowiadającymi obrazami mikrostruktury

Na rys. 4 można zauważyć charakterystyczne ślady po mieszanii cieczy w jeziorku laserowym. W przypadku

małych wartości PD pracę lasera można traktować jako ciągłą – powstaje wtedy silne zawirowanie, które prowadzi do podrywania zarodków z dna jeziorka i przyspieszonej krystalizacji [5]. W przypadku dużych wartości PD laser należy traktować jako impulsowy, co ogranicza mieszanie i krystalizację na poderwanych z dna jeziorka zarodkach. Prowadzi to do powstania materiału dwufazowego, gdzie szkło metaliczne otoczone jest materiałem krystalicznym w strefie wpływu ciepła. Na trzecim etapie optymalizacji dodatkowe skanowanie każdej warstwy pozwoliło zachować ciągłość fazy amorficznej. Zastosowanie wysokiej mocy lasera umożliwiło zwiększenie głębokości przetopu i połączenie dwóch warstw dzięki częściowemu odparowaniu materiału. W przypadku bardzo szybkiego nagrzewania szkła metalicznych możliwe jest przekroczenie temperatury topnienia materiału bez jego wcześniejszej krystalizacji [6]. Zastosowanie krótkiego czasu naświetlania zapobiegło krystalizacji w strefie wpływu ciepła i pozwoliło na połączenie obszarów amorficznych.

Wnioski

W trakcie doświadczeń metodą laserowego stapiania uzyskano próbki o wysokiej zawartości szkła metalicznego ze stopu o małej zdolności do zeszklenia. Udało się to przez zapobieżenie krystalizacji zarówno w czasie chłodzenia, jak i w czasie grzania. Za główny mechanizm powodujący krystalizację podczas chłodzenia należy uznać wzrost krystalitów na poderwanych zarodkach z jeziorka laserowego. Sposobem na redukcję wpływu tego zjawiska jest ograniczenie konwekcji wewnątrz jeziorka laserowego przez zwiększenie odległości między stapianymi punktami. Za mechanizm powodujący krystalizację podczas grzania należy uznać odszklenie w strefie wpływu ciepła. Zjawisko to można ograniczyć dzięki zwiększeniu szybkości grzania przez zastosowanie drugiego przetopu z mocą wystarczającą do wytworzenia kanału parowego i minimalnym czasem naświetlania.

Praca współfinansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu „Innowacyjna technologia laserowego kształtowania przyrostowego LENS w zastosowaniu do modyfikacji geometrii i biofunkcjonalizacji warstwy powierzchniowej bezcementowych implantów stawu biodrowego” o numerze PBS3/A5/53/2015, realizowanego w ramach Programu Badań Stosowanych. Strategia skanowania została zgłoszona jako wynalazek do Urzędu Patentowego.

LITERATURA

1. Pauly S. et al. "Processing metallic glasses by selective laser melting". *Mater Today*. (2013): s. 37–41.
2. Yang G. et al. "Laser solid forming Zr-based bulk metallic glass". *Intermetallics*. (2011): s. 110–115.
3. Żrodowski Ł. „Selektywne laserowe przetapianie szkieł metalicznych” (praca inżynierska). Warszawa: Wydział Inżynierii Materiałowej PW, 2016.
4. Vandenbroucke B. et al. "Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts". *Rapid Prototyping Journal*. (2007): s. 196–203.
5. Li X.P. et al. "Selective laser melting of an Al 86 Ni 6 Y 4.5 Co 2 La 1.5 metallic glass: Processing, microstructure evolution and mechanical properties". *Materials Science & Engineering*. (2014): s. 370–379.
6. Johnson W.L., Kaltenboeck G., Demetriou M.D. "Beating crystallization in glass-forming metals by millisecond heating and processing". *Science*. (2011): s. 828–833.