

Wpływ efektów wymiarowych indukowanych odkształceniem na strukturę i właściwości mechaniczne niejednorodnych stopów AlSi10Mg wytwarzanych metodą L-PBF

Streszczenie rozszerzone

Wprowadzenie

Stale rosnące zapotrzebowanie na lekkie materiały o wysokich właściwościach w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym stymuluje rozwój zaawansowanych technik wytwarzania, takich jak wytwarzanie przyrostowe (AM). Jednym z czołowych procesów w tej dziedzinie jest selektywne topienie laserowe w łożu proszku (PBF-LB/M), które umożliwia produkcję geometrycznie złożonych komponentów z wysokowytrzymałych stopów aluminium, takich jak AlSi10Mg.

Proces PBF-LB/M nadaje stopowi AlSi10Mg unikalną, hierarchiczną mikrostrukturę, charakteryzującą się drobną, ciągłą siecią eutektycznego krzemu (Si) osadzoną w ciągliwej osnowie α -Al. Taka architektura, mimo iż zapewnia wysoką wytrzymałość, skutkuje niską plastycznością, co stanowi barierę dla zaawansowanych zastosowań konstrukcyjnych. Ten fundamentalny konflikt między wytrzymałością, a plastycznością jest kluczowym wyzwaniem inżynierii materiałowej.

W niniejszej pracy opracowano nowatorską strategię wieloetapowej obróbki cieplno-mechanicznej w celu świadomego ukształtowania heterogenicznej mikrostruktury. Pozwoliło to na uzyskanie bezprecedensowej kombinacji właściwości mechanicznych, prowadząc do jednoczesnego podwyższenia wytrzymałości i plastyczności stopu.

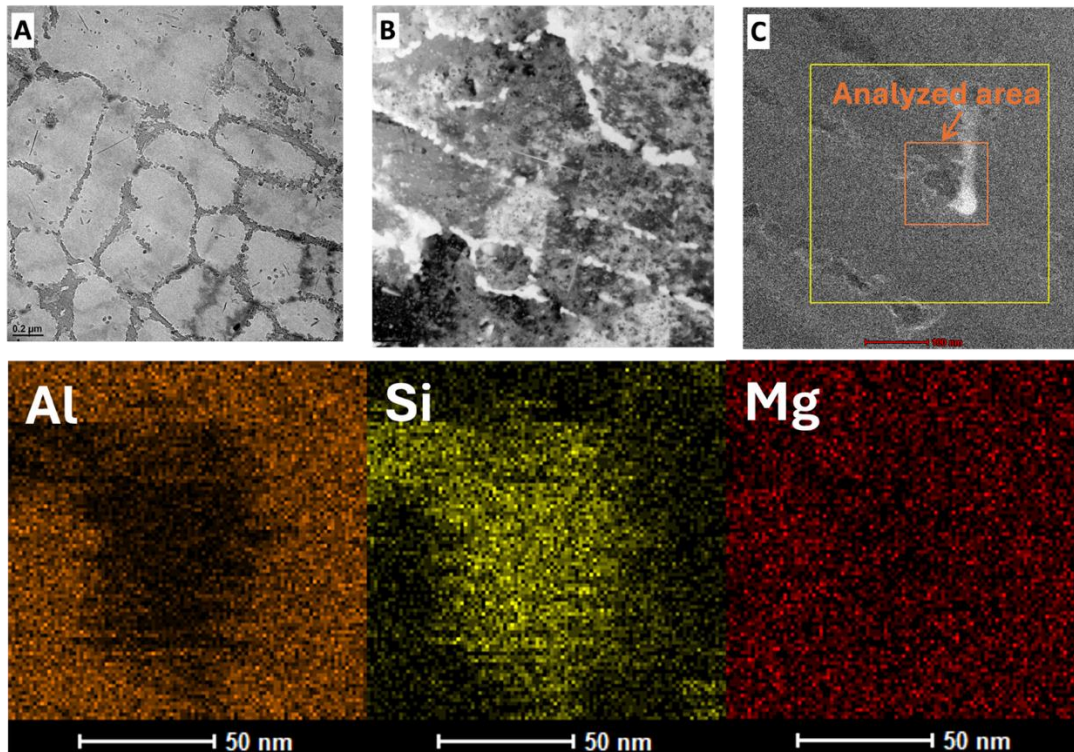
Metodologia

W niniejszej pracy połączono zaawansowaną technologię wytwarzania przyrostowego z obróbką cieplną w celu kontroli mikrostruktury stopu AlSi10Mg, a tym samym jego właściwości mechanicznych. Próbkę wytworzono metodą PBF-LB/M, a następnie, w celu uzyskania zróżnicowanych stanów początkowych, poddano je dwóm wariantom wyżarzania niskotemperaturowego (LTA): krótkotrwałemu w 280°C przez 9 minut (LTA_280) oraz długotrwałemu w 300°C przez 30 minut (LTA_300).

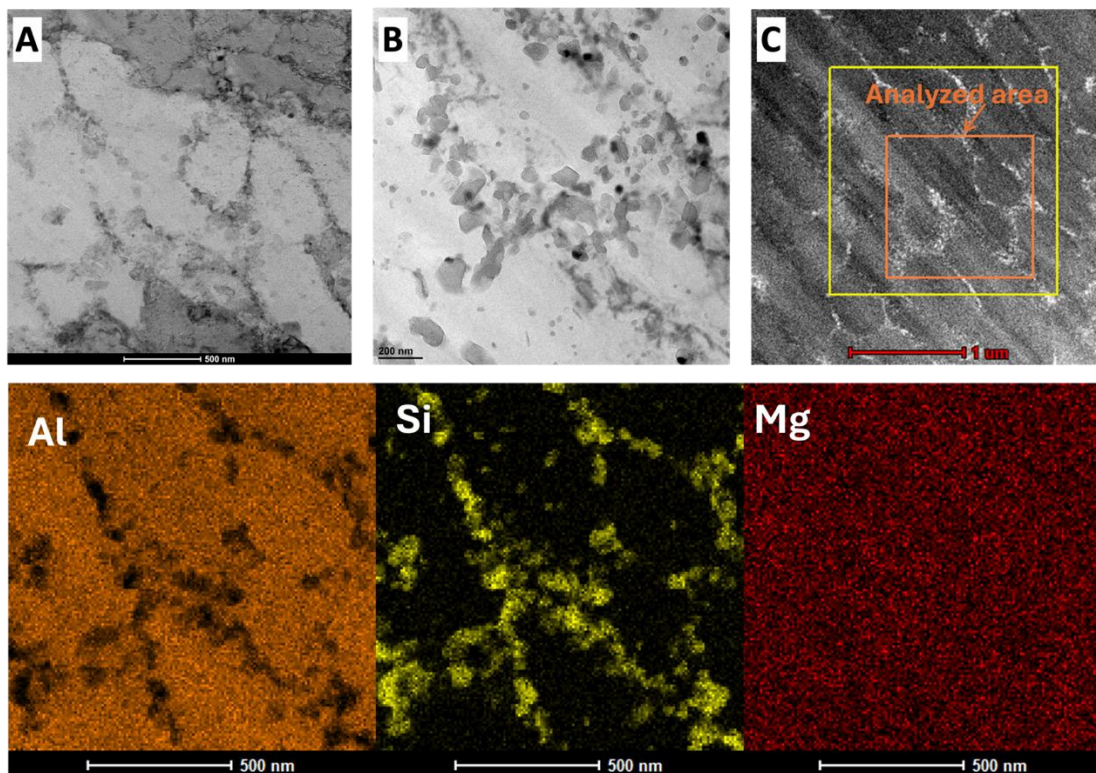
W rezultacie otrzymano trzy materiały o odmiennych mikrostrukturach:

- Stan as-built: charakteryzujący się ciągłą, drobno-komórkową siecią eutektycznego krzemu (Si).
- Stan po wyżarzaniu LTA_280: z częściowo rozdrobnioną siecią Si.
- Stan po wyżarzaniu LTA_300: z w pełni rozdrobnioną siecią i sferoidalnymi cząstkami Si.

Rysunki 1 i 2 przedstawiają zdjęcia TEM, które ilustrują fundamentalne różnice pomiędzy mikrostrukturą w stanie as-built oraz LTA300.



Rysunek 1. Struktura komórkowa materiału AlSi10Mg w stanie wyjściowym (as-built), wytworzonego metodą PBF-LB/M, obrazy uzyskane z pomocą transmisyjnej mikroskopii elektronowej (TEM): A. Obraz TEM przedstawiający powiększony widok pełnej struktury komórkowej, B. Obraz TEM przy większym powiększeniu ukazujący splątanie dyslokacji wewnątrz komórek, C. Obraz STEM wraz z mapowaniem EDS, przedstawiający segregację krzemu (Si) na granicach komórek.



Rysunek 2. Struktura komórkowa próbki po obróbce cieplnej LTA_300, obrazy uzyskane z pomocą transmisyjnej mikroskopii elektronowej (TEM): A. Obraz TEM przedstawiający podzieloną strukturę komórkową, B. Obraz TEM przy większym powiększeniu ukazujący podział i rozrost cząstek krzemu (Si) na granicach komórek, C. Obraz STEM wraz z mapowaniem EDS przedstawiający pofragmentowane granice komórek.

W celu zbadania ewolucji mikrostruktury i mechanizmów umocnienia, trzy zestawy próbek poddano dwóm rodzajom odkształcenia plastycznego:

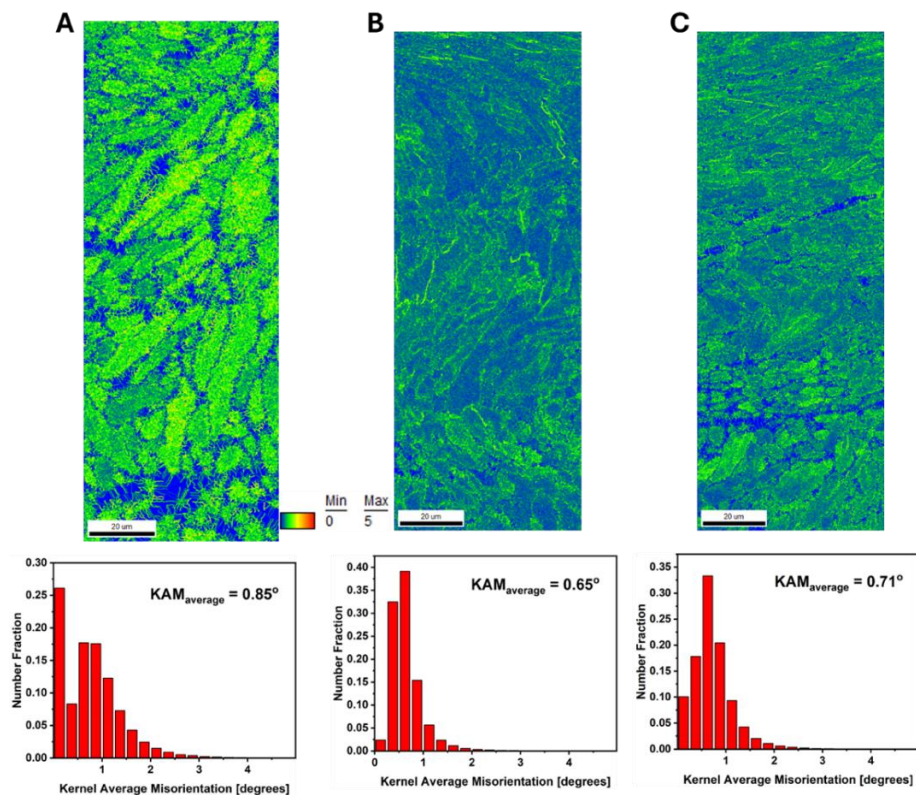
- Jednoosiowemu ściskaniu: do zadanych poziomów odkształcenia (5%, 20% oraz do utraty spójności), w celu analizy ewolucji podstruktury dyslokacyjnej.
- Intensywnemu odkształceniu plastycznemu (SPD): stosując procesy przeciskania przez kanał kątowy (ECAP) oraz (TCAP), w celu zbadania odpowiedzi mechanicznej materiału w warunkach silnej akumulacji odkształcenia plastycznego.

Związek między procesem, mikrostrukturą, a właściwościami mechanicznymi określono przy użyciu szeregu komplementarnych technik badawczych: mikroskopii świetlnej (LOM), skaningowej i transmisyjnej mikroskopii elektronowej (SEM, TEM) z mikroanalizą rentgenowską

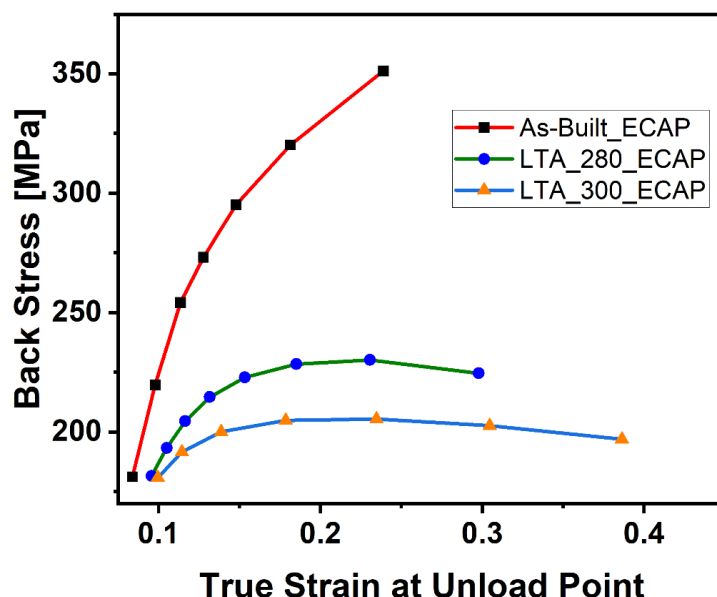
(EDS), dyfrakcji wstecznie rozproszonych elektronów (EBSD) oraz dyfraktometrii rentgenowskiej (XRD). Kluczowym elementem pracy były cykliczne testy obciążenie-odciążenie (LUR), które pozwoliły na ilościową ocenę umocnienia kinematycznego i ewolucji naprężeń wstecznych.

Wyniki i dyskusja

Badania wykazały, że ciągłość eutektycznej sieci krzemowej (Si) jest kluczowym czynnikiem determinującym odpowiedź mechaniczną stopu, a jej modyfikacja stwarza możliwości optymalizacji jego właściwości. Wykazano, że początkowy stan mikrostruktury narzuca dominujący mechanizm umocnienia. W materiale w stanie *as-built*, ciągła i twarda sieć Si wywołuje znaczną niezgodność odkształceń plastycznych z miękką osnową Al. Wymusza to generowanie wysokiej gęstości dyslokacji geometrycznie niezbędnych (GNDs) w celu akomodacji odkształcenia na granicy faz Al/Si. Analiza map Kernel Average Misorientation (KAM) potwierdziła największą akumulację GNDs w tym stanie już po 5% odkształcenia (Rys. 3). Dyslokacje te generują silne, dalekozasięgowe naprężenia wsteczne, prowadząc do znacznego umocnienia kinematycznego, które po procesie ECAP osiągnęło wartość ~ 351 MPa (Rys. 4).



Rysunek 3. Analiza średniej dezorientacji w obszarze (KAM) dla próbek po 5% odkształceniu w próbie ściskania: A. W stanie wyjściowym, B. LTA_280 i C. LTA_300.



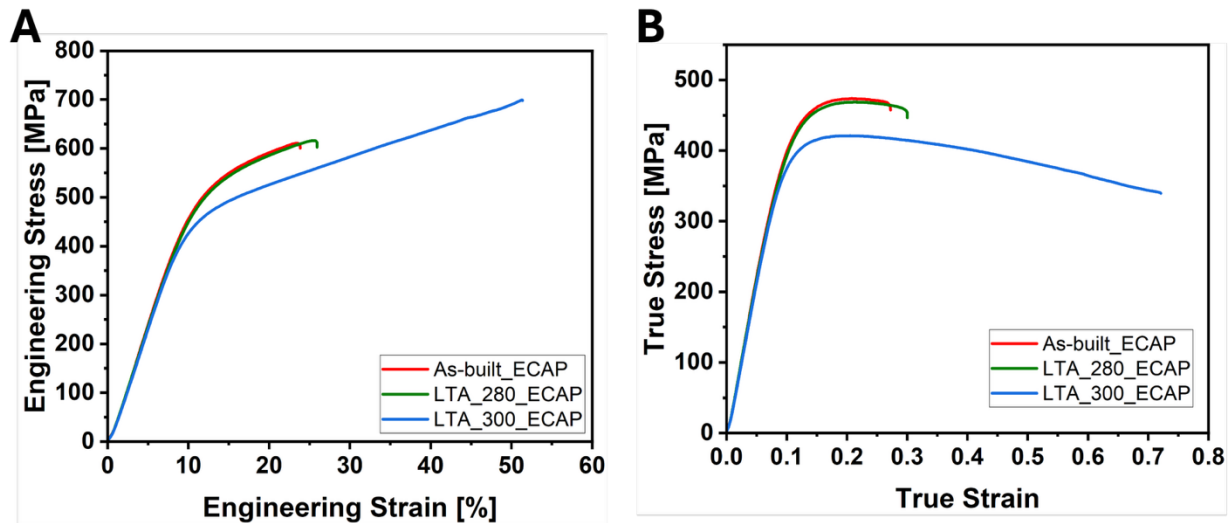
Rysunek 4. Napężenie powrotne wyznaczone z każdego cyklu LUR dla próbek po procesie ECAP.

Natomiast w przypadku próbki w stanie LTA_300, modyfikacja morfologii sieci eutektycznego krzemu, wpływa na jej odmienne zachowanie mechaniczne. Mechanizm odkształcenia nie jest już zdominowany przez generowanie dyslokacji geometrycznie koniecznych (GNDs) na granicy faz Al/Si. Zamiast tego, ruchliwe dyslokacje oddziałują z pojedynczymi cząstkami Si poprzez mechanizm Orowana.

Ten proces, w przeciwieństwie do umocnienia kinematycznego w stanie *as-built*, generuje silne umocnienie izotropowe w całej objętości osnowy. Umożliwia to bardziej jednorodne odkształcenie i intensywną akumulację dyslokacji statystycznie zmagazynowanych (SSDs), których gęstość przy zerwaniu osiągnęła $1,48 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$. W efekcie, przy zachowaniu wysokiej wytrzymałości, plastyczność materiału drastycznie wzrasta (odkształcenie graniczne z 35,1% do 47,2%).

Badania dowodzą, że kluczem do sterowania właściwościami mechanicznymi stopu jest świadoma modyfikacja eutektycznej sieci krzemu (Si) przed intensywnym odkształceniem plastycznym. Próba przetworzenia materiału w stanie *as-built*, z jego ciągłą i twardą siecią, nie pozwala na uzyskanie korzystnych właściwości z powodu niskiej plastyczności. Natomiast

wstępne rozdrobnienie sieci (wariant LTA_300) całkowicie zmienia odpowiedź materiału na odkształcenie. Drobne cząstki Si intensyfikują rozdrobnienie ziarna. Pozwala to na zaprojektowanie materiału o unikalnej kombinacji wytrzymałości i plastyczności (Rysunek 5).



Rysunek 5. Wykresy naprężenie-odkształcenie: umowne (A) i rzeczywiste (B) dla ściskanych próbek po procesie ECAP.

Wnioski

Niniejsza praca ustanawia ramy projektowania wytrzymałych stopów wytwarzanych metodami przyrostowymi (AM). Wykazano, że kompromis między wytrzymałością, a plastycznością w stopie AlSi10Mg (PBF-LB/M) można skutecznie osiągnąć poprzez synergiczną, dwuetapową ścieżkę obróbki cieplno-mechanicznej:

- Etap 1: Kontrolowana obróbka cieplna (LTA). Wyżarzanie w temperaturze 300°C przez 30 minut rozdrabnia kruchą sieć krzemową. Zapewnia to materiałowi wyjątkową plastyczność przy jedynie niewielkim spadku początkowej wytrzymałości.
- Etap 2: Intensywne odkształcenie plastyczne (SPD). Zastosowanie odkształcenia (np. metodą TCAP) na materiale po obróbce LTA prowadzi do jednoczesnego rozdrobnienia ziaren osnowy i intensywnego umocnienia dyslokacyjnego, co skutkuje znacznym wzrostem wytrzymałości.