

[wpis odręczny o treści: „RDJMa.512.33.2025”]

[nagłówek w języku trzecim]

Opinia na temat pracy doktorskiej

Deformation - Induced Size Effects on the Structure and Mechanical Properties of Heterogenous L-PBF Fabricated AlSi10Mg Alloys”

**[Wpływ efektów wymiarowych indukowanych odkształceniem na strukturę i właściwości
mechaniczne niejednorodnych stopów AlSi10Mg wytwarzanych metodą L-PBF] “,
autorstwa Augustine Nana Sekyi Appiaha,
Politechnika Śląska**

Niżej podpisany, Nedelcu Dumitru, profesor na Politechnice im. Gheorghe Asachi w Jassach, Wydział Technologii Produkcji Maszyn, został wyznaczony pismem (RDJMa.512.33.2025) przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej, profesora Adama Grajcara, z dnia 8 lipca 2025 r., do przygotowania opinii jako recenzent zewnętrzny pracy doktorskiej zatytułowanej „Deformation - Induced Size Effects on the Structure and Mechanical Properties of Heterogenous L-PBF Fabricated AlSi10Mg Alloys”, opracowanej przez Pana mgr inż. Augustine Nana Sekyi Appiaha pod kierunkiem profesora Marcina Adamiaka z udziałem promotora pomocniczego doktora Przemysława Snopińskiego. Po zapoznaniu się z treścią rozprawy doktorskiej sformułowałem następujące oceny i wnioski.

1. Znaczenie i aktualność badań

Rozprawa doktorska opracowana przez Pana mgr inż. Augustine Nana Sekyi Appiaha jest dobrze zaprojektowana i podzielona na sześć rozdziałów, którym towarzyszy seria trzech załączników. Wszystkie rozdziały mają logiczną strukturę, która pozwala osiągnąć początkowo wyznaczone cele badań eksperymentalnych. W rozdziale wprowadzającym, oprócz niektórych aspektów ogólnych, przedstawiono właściwości mechaniczne stopów Al-Si wytwarzanych metodą odlewania i addytywną (spawanie proszkowe – wiązka laserowa/metal, PBF- LB/M), biorąc pod uwagę [stopy] AlSi7Mg, AlSi10Mg i AlSi12Mg. Ze względu na swoje optymalne właściwości użytkowe, AlSi10Mg stał się szczególnie popularny wśród stopów Al-Si. Spójnej konsolidacji warstw sprzyja 10% zawartość krzemu, która poprawia płynność stopu podczas przetwarzania i zmniejsza występowanie wad związanych z niepełnym stopieniem lub zjawiskiem kulkowania.

[pieczęć Biura Dziekana z datą wpłynięcia pisma: „11.09.2025” oraz sygnaturą „RDJMa/1381 512.33.2025”]

[podpis nieczytelny]

[koniec strony 1 z 5]

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 19.09.2025
RDJMa/144/511/2025
nr zał.

Ponadto, podczas późniejszych procesów starzenia, dodatek magnezu umożliwia wytworzenie osadu Mg_2Si , który zwiększa twardość i wytrzymałość na rozciąganie. W porównaniu z innymi preparatami, takimi jak $AlSi7Mg$ i $AlSi12Mg$, ta charakterystyka mikrostrukturalna sprawia, że $AlSi10Mg$ jest zrównoważonym składem zapewniającym korzystne połączenie wytrzymałości i plastyczności w zastosowaniach konstrukcyjnych. Te zalety sprawiają, że $AlSi10Mg$ jest głównym materiałem rozważanym w niniejszej pracy doktorskiej.

Ze względu na swoje niezwykle wartości wytrzymałości właściwej i przewodności cieplnej, struktury stopów Al-Si są bardzo poszukiwane w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym, co sprawia, że badania te są istotne. W porównaniu z ich tradycyjnymi odlewanyymi odpowiednikami, te syntetyzowane addytywnie materiały Al-Si wzbudziły szczególne zainteresowanie ze względu na swoje wysokie właściwości mechaniczne, które obejmują poprawioną wytrzymałość, plastyczność i trwałość.

Główny cel pracy doktorskiej, którym jest strategiczna optymalizacja heterogeniczności mikrostruktury $AlSi10Mg$ w PBF-LB/M poprzez kontrolowaną obróbkę końcową, jest dobrze uzasadniony przez autora pracy. Badania te mają na celu zidentyfikowanie podstawowych zasad regulujących utwardzanie przez zgniatanie w tych konkretnych heterostrukturach, poprzez metodyczne powiązanie warunków obróbki końcowej z dogłębną charakterystyką mikrostruktury i oceną właściwości mechanicznych. Celem jest zapewnienie opartego na mechanizmach zrozumienia procesu projektowania lekkich elementów dla przemysłu lotniczego i motoryzacyjnego, które przewyższają tradycyjne stopy aluminium, bez ograniczania możliwości recyklingu po zakończeniu okresu użytkowania.

2. Rozważania analityczne

Rozdział „Wprowadzenie” wyróżnia się jasnym uzasadnieniem wybranego kierunku badań, jak wspomniano powyżej.

Aktualny stan wiedzy w dziedzinie badań lub przegląd literatury stanowi część rozdziału II niniejszej pracy. Na samym początku przedstawiono plan działania w zakresie procesów produkcji addytywnej (AM). Technologie AM obejmują szeroki zakres procesów, z których każdy wyróżnia się unikalnymi metodami dostarczania energii i zarządzania materiałami. Szczególnie ważna jest znajomość technologii spiekania proszków (PBF), która obejmuje PBF-LB/M i topienie wiązką elektronów (EBM), do tworzenia niezwykle gęstych i wytrzymałych mechanicznie elementów metalowych. Dlatego [metoda] PBF-LB/M jest powszechnie używana w zastosowaniach wymagających dużej dokładności, ponieważ topi proszki metalowe warstwa po warstwie, tworząc elementy o dokładnej geometrii i złożonych kształtach. W przemyśle lotniczym i produkcji urządzeń medycznych, gdzie integralność komponentów i dokładność wymiarowa mają kluczowe znaczenie, ta precyzja i możliwość tworzenia elementów o drobnych elementach są bezcenne. Niemniej jednak, pomimo tych zalet, technologie AM mają

kilka wad. Trudno jest zagwarantować stałą jakość komponentów wytwarzanych metodą AM ze względu na problemy, takie jak porowatość i anizotropia drukowanych elementów, które mogą negatywnie wpływać na ich właściwości mechaniczne i trwałość. W poniższych rozdziałach szczegółowo przedstawiono etapy procesu drukowania 3D PBF-LB/M, a następnie mikrostrukturę, wady resztkowe, które mogą wystąpić, oraz aspekty związane z drukowaniem 3D stopu AlSi10Mg.

[podpis nieczytelny]

[koniec strony 2 z 5]

Autor pracy wniósł już wcześniej pewien wkład poza badaniami nad uzyskiwaniem struktur z tych stopów poprzez odlewanie, przedstawiając jasne uwagi na temat powstałej mikrostruktury. Rozdział zawiera również informacje teoretyczne dotyczące dyslokacji pojawiających się podczas odkształcania, szybkości zanikania dyslokacji na poszczególnych etapach odkształcania, granic jeziorka stopionego metalu w porównaniu z jego wnętrzem, akumulacji dyslokacji i rozdrobnienia ziarna, silnego odkształcenia plastycznego (SPD) oraz mechanizmów wzmacniania. Na końcu rozdziału przedstawiono główny cel badań oraz cele drugorzędne, które doprowadziły do rozwiązania problemu badawczego.

Rozdział III, zatytułowany „*Metodologia*”, ma logiczną strukturę, a plan eksperymentalny podzielony jest na cztery główne etapy: wstępną produkcję addytywną i dobór materiałów, kondycjonowanie próbek, przetwarzanie odkształceniowe oraz kompleksową charakterystykę. Chciałbym podkreślić ten kompleksowy i złożony plan eksperymentalny, który jest bardzo dobrze skonstruowany, szczegółowo opisany i przedstawiony. W ten sposób dokładnie opisano metody, sprzęt i materiały użyte w części eksperymentalnej.

Wyniki eksperymentów przedstawiono w rozdziale IV pracy doktorskiej. Badanie porównawcze struktur uzyskanych w wyniku drukowania 3D ze stopów AlSi7Mg, AlSi10Mg i AlSi12Mg, oparte na analizie mikrostruktury, porowatości i mikrotwardości, potwierdziło słuszność wyboru stopu AlSi10Mg do badań. Stopy AlSi10Mg charakteryzują się zatem doskonałą płynnością i spójnością morfologiczną z punktu widzenia metalurgii proszkowej, co ma zasadnicze znaczenie dla stabilnego osadzania warstw i redukcji defektów podczas przetwarzania PBF-LB/M. Ponadto proszek AlSi10Mg wykazał największy rozkład wielkości cząstek w obecnym badaniu porównawczym z AlSi7Mg i AlSi12Mg, co bezpośrednio przyczyniło się do jego wyższej jakości struktury. Zgodnie z badaniem mikrostruktury po obróbce, AlSi10Mg miał najniższą porowatość i najbardziej wyrafinowaną strukturę komórkową spośród trzech stopów, co było silnie skorelowane z wyższymi wartościami mikrotwardości Vickersa. AlSi10Mg został wybrany ze względu na swoje podstawowe właściwości. Dlatego proponowane badania skupią się na tym, w jaki sposób początkowa mikrostruktura komórkowa AlSi10Mg [po obróbce] PBF-LB/M determinuje jego zachowanie podczas utwardzania przez zginiatanie i rozdrobnienie ziarna podczas procesu SPD. W dalszej części rozdziału przedstawiono wyniki badań właściwości mechanicznych trzech różnych stanów początkowych: po wytworzeniu [as-built] (sieć Si), po obróbce cieplnej (sieć częściowo pęknięta, wyżarzanie w niskiej temperaturze, LTA_280°C przez

9 minut oraz fragmentaryczna i sferoidalna struktura cząstek Si, LTA_300°C przez 30 minut) PBF-LB/M z AlSi10Mg. Aby ocenić wpływ obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne, w badaniu uwzględniono testy mikrotwardości Vickersa, testy ściskania jednoosiowego oraz analizę zachowania podczas utwardzania przez zgniatanie. Wyniki badań mechanicznych są połączone z uzupełniającymi badaniami mikrostrukturalnymi, aby zapewnić mechanistyczny wgląd w obserwowane zmiany właściwości. Połączonym celem tych analiz jest wyjaśnienie, w jaki sposób ciągłość sieci subkomórek wpływa na mechanizmy odkształcenia plastycznego kontrolujące wytrzymałość i utwardzanie przez zgniatanie w stopach AlSi10Mg [po obróbce] PBF-LB/M. Uzyskane wyniki są zebrane w tabeli, która pokazuje, że najlepsze rezultaty uzyskano w przypadku próbek w stanie surowym, z wartością mikrotwardości $115,8 \pm 4,5$ i dobrym rozszaniem wyników.

[podpis nieczytelny]

[koniec strony 3 z 5]

Próbki te zostały następnie poddane zarówno stopniowemu ściskaniu jednoosiowemu, jak i silnemu odkształceniu plastycznemu (SPD) za pomocą prasy kątovej z równymi kanałami (ECAP) i prasy kątovej z kanałami skręcanymi (TCAP) w różnych temperaturach i przy różnej obróbce. Doceniam scentralizowanie wyników dla każdej technologii odkształcania, co pokazuje, w jakich sytuacjach uzyskiwane są najlepsze wyniki. Wyniki pokazują, że głównym czynnikiem kontrolującym właściwości mechaniczne stopu jest ciągłość sieci Si. Ciągła sieć w stanie as-built sprzyja silnemu początkowemu utwardzeniu przez odkształcenie i znacznemu utwardzeniu kinematycznemu (naprężenie wsteczne do około 351 MPa po ECAP). Za kluczowy etap wstępnego kondycjonowania uznano obróbkę LTA_300, która rozbija kruchą sieć. Zastosowanie SPD do plastycznego materiału LTA 300 poddanego wstępnemu kondycjonowaniu okazało się kluczem obiecującym uzyskanie lepszych właściwości. Z drugiej strony, obróbka SPD materiału w stanie as-built spowodowała jego kruchość. Odkryto, że stosowanie ECAP w wysokiej temperaturze (2350°C) jest szkodliwe. Wyniki te stanowią sprawdzoną metodę tworzenia lekkich i odpornych na uszkodzenia elementów aluminiowych do zastosowań w najnowocześniejszych pojazdach samochodowych i lotniczych.

W niniejszym rozdziale dokładnie przeanalizowano i zinterpretowano dane eksperymentalne przedstawione w rozdziale IV. Celem dyskusji jest wyjaśnienie złożonych interakcji między składem stopu, zachowaniem termicznym i przetwarzaniem odkształceniowym a rozwojem mikrostruktury i wynikającymi z tego właściwościami mechanicznymi stopów Al-Si-Mg wytwarzanych metodą produkcji addytywnej. Wyniki wyjaśniono w kontekście silnego odkształcenia plastycznego, teorii dyslokacji i metalurgii fizycznej. Omówiono absolutnie wszystkie uzyskane wyniki i wyjaśniono je w bardzo jasny sposób.

W ostatnim rozdziale pracy doktorskiej przedstawiono ogólne wnioski i wkład autora, Pana Augustine Nana Sekyi Appiaha.

3. Oceny i wnioski

Poziom naukowy rozprawy doktorskiej opracowanej przez inżyniera Augustine Nana Sekyi Appiaha jest wysoki, o czym świadczą uzyskane oryginalne wyniki. Uważam, że poziom ten odpowiada wymaganiom stawianym rozprawie doktorskiej, a podstawą tego stwierdzenia są aspekty przedstawione wcześniej w szczegółowy sposób.

a. Prezentacja pracy

- Przejrzysta prezentacja zastosowanych metod i technik, sposób napisania rozdziałów, opracowanie materiału graficznego charakteryzują się wysokim standardem, co świadczy o prawdziwych zdolnościach badawczych autora;
- Struktura pracy doktorskiej jest bardzo dobrze ukierunkowana na realizację początkowo wyznaczonych celów i charakteryzuje się korzystnym stosunkiem między częścią pisemną a graficzną, między częścią analityczną i syntetyczną obecnego etapu badań a częścią dotyczącą ich oryginalności;
- Pan Augustine Nana Sekyi Appiah wykazuje się bardzo dobrym przygotowaniem teoretycznym, przejawiającym się w sposobie opracowania i realizacji programu badawczego, a także w umiejętności analizowania i syntezy zarówno badanych artykułów, jak i własnych badań.

[podpis nieczytelny]

[koniec strony 4 z 5]

b. Wkład autora

W niniejszej pracy odnotowałem następujący wkład autora:

- przeprowadzenie ważnego badania w literaturze technicznej na temat wykorzystania stopów AlSiMg do uzyskiwania struktur poprzez druk 3D w dobrze zdefiniowanej równoległości ze stopami przetwarzanymi konwencjonalnie;
- widma ED i ilościowy skład chemiczny proszków Al-Si;
- mikrostruktury PBF-LB/M AlSi7Mg, AlSi10Mg, AlSi12Mg pod mikroskopem optycznym i skaningowym mikroskopem elektronowym;
- wykresy porowatości wszystkich wyżej wymienionych stopów;
- wykresy mikrotwardości Vickersa wzdłuż przekroju poprzecznego dla stopów Al-Si;
- mikrostruktury stopu AlSi10Mg [przez] PBF-LB/M w stanie po wytworzeniu na podstawie analizy EBSD i TEM;
- mikrostruktury po wyżarzaniu w temperaturze 280°C przez 9 minut, LTA_280 pod mikroskopem optycznym, SEM, EBSD oraz to samo w przypadku LTS_300;
- wykresy zachowania naprężenia i odkształcenia przy różnych poziomach odkształcenia (odkształcenie ściskające 5%, 20% i maksymalne odkształcenie ściskające przed i po obróbce cieplnej);
- widma XRD po ściskaniu przy odkształceniach 5%, 20% i maksymalnych;
- mikrostruktury, wykresy mikrotwardości po obróbce ECAP i TCAP.

Wyniki pracy mogą znaleźć zastosowanie w wymagających gałęziach przemysłu, takich jak lotnictwo i motoryzacja, do produkcji lekkich, oszczędnych i odpornych na uszkodzenia wsporników, elementów podwozia i innych elementów konstrukcyjnych, które obecnie są wykonywane z bardziej skomplikowanych zespołów wielomateriałowych lub cięższych materiałów.

Na podstawie powyższych uwag i ocen stwierdzam, że praca doktorska opracowana przez Pana Augustine Nana Sekyi Appiaha ma wysoki poziom naukowy i praktyczny, w związku z czym w analizę i syntezę specjalistycznych źródeł oraz realizację własnych badań włożona została znaczna ilość pracy. Rozprawa doktorska zawiera liczne dowody na oryginalny wkład pracy jej autora. Spełnia wymagania oczekiwane od takiej pracy i zalecam jej przyjęcie do obrony. Podsumowując, przedłożona rozprawa spełnia wymogi prawne dotyczące stopnia doktora i może przejść do kolejnych etapów.

Jassy, 3 września 2025 r.

Profesor dr Dumitru Nedeleu

[podpis nieczytelny]

Politechnika im. Gheorghe Asachi w Jassach

Katedra Technologii Produkcji Maszyn

Ja, Małgorzata Sokołowska, tłumacz przysięgły języka angielskiego w Gliwicach, nr wpisu na listę tłumaczy przysięgłych TP/1509/05. Poświadczam zgodność niniejszego tłumaczenia z okazanym mi dokumentem sporządzonym w języku angielskim. Gliwice, dnia 17 września 2025 r. Repertorium nr 387/2025.