

Dr hab. inż. Grażyna Mrówka – Nowotnik prof. PRz
Katedra Nauki o Materiałach
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska
Al. Powstańców Warszawy 12
35-959 Rzeszów

Rzeszów, 05.09.2025r

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej

Mgr. Augustine Nana Sekyi Appiah

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

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny (RDJMa.512.33.2025), Pana prof. dr. hab. inż. Adama Grajcara z dnia 8 lipca 2025r informujące, że Rada Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej powołała mnie na recenzenta pracy doktorskiej mgr. Augustine Nana Sekyi Appiah, w przewodzie prowadzonym w dyscyplinie „Inżynieria Materiałowa”. Dokumentację otrzymałam w dniu 15.07.2025 r.

2. Ocena celowości i aktualności tematyki badawczej

Tematyka rozprawy doktorskiej dotyczy procesów wytwarzania wyrobów ze stopów aluminium metodą przyrostową, tj. selektywnego topienia wiązką laserową (PBF-LB/M), a więc obszaru, który w ostatnich latach znajduje się w centrum zainteresowania nauki i przemysłu. Wybrany przez Doktoranta podeptyktyczny stop aluminium AlSi10Mg jest jednym z najczęściej stosowanych odlewniczych stopów (siluminów) w technologiach przyrostowych. Stop ten w stanie wyjściowym wykazuje niskie właściwości plastyczne w stosunku do właściwości wytrzymałościowych. Doktorant w pracy realizował badania mające na celu opracowanie technologii kształtowania właściwości mechanicznych stopu poprzez opracowanie parametrów niskotemperaturowej obróbki cieplnej, co w połączeniu z zastosowaniem procesów przeróbki plastycznej z użyciem wysokich wartości odkształcenia (SPD), miało zagwarantować osiągnięcie parametrów wytrzymałościowych stopu AlSi10Mg niemożliwych do uzyskania w konwencjonalnych procesach przeróbki cieplno-plastycznej.

Biurowo Dziekana

Tym samym praca doktorska odpowiada na rzeczywiste problemy aplikacyjne związane z wytwarzaniem elementów konstrukcyjnych o wysokiej wytrzymałości i jednocześnie odpowiedniej plastyczności ze stopów aluminium grupy 4xxx. Stwierdzam, że temat jest aktualny, biorąc pod uwagę dynamiczny rozwój technologii przyrostowych oraz rosnące zapotrzebowanie na lekkie, wytrzymałe i trwałe wyroby przeznaczone do pracy w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym. Warto jednak zauważyć, że podjęta przez Doktoranta problematyka badawcza jest od wielu już lat przedmiotem badań i licznych opracowań w literaturze światowej, a zatem oryginalność podejścia do celów pracy powinna być oceniana w kontekście intensywnie rozwijającej się konkurencyjnej działalności badawczej w obszarze kształtowania właściwości elementów wytwarzanych ze stopu AlSi10Mg w technologiach przyrostowych.

Podsumowując, tematyka rozprawy jest celowa i dobrze osadzona we współczesnych trendach badań nad materiałami wytwarzanymi metodami addytywnymi.

3. Ogólna charakterystyka i układ rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska Pana mgr. Augustine Nana Sekyi Appiah pt.: *„Deformation-Induced Size Effects on the Structure and Mechanical Properties of Heterogenous L-PBF Fabricated AlSi10Mg Alloys”* została zrealizowana w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa pod opieką Promotora dr hab. inż. Marcina Adamiaka, prof. PŚ. oraz Promotora pomocniczego dr inż. Przemysława Snopińskiego. Przygotowana została w ramach projektu nr 2021/43/D/ST8/01946 pt. „Nowa generacja heterogenicznych nanostrukturalnych stopów Al-Si – badania struktury, własności mechanicznych i mechanizmów odkształcenia plastycznego” finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki (NCN).

Praca napisana jest w języku angielskim, liczy 207 stron i obejmuje 6 rozdziałów, w których zaprezentowano 117 rysunków oraz 7 tabel. Struktura pracy odpowiada klasycznie przyjętemu układowi – została podzielona na część literaturową oraz doświadczalną. Część teoretyczna, oparta na analizie literatury (rozdziały 1–2, s. 11–44), poprzedzona jest streszczeniem w języku angielskim i polskim, wykazem skrótów oraz spisem treści. W rozdziale 3 Doktorant przedstawił plan badawczy, omówił metody doboru i wytwarzania materiałów do badań, a także warunki i metodykę badań eksperymentalnych. Kolejne części pracy obejmują prezentację wyników badań (rozdział 4), ich analizę i dyskusję (rozdział 5) oraz wnioski końcowe (rozdział 6). Na końcu rozprawy zamieszczono obszerny spis literatury, a następnie spis rysunków i tabel. Bibliografia obejmuje 182 pozycje literaturowe, z których dwie to prace współautorskie z udziałem Doktoranta. Zdecydowana większość cytowanych prac pochodzi z ostatnich kilku lat (2019–2025), natomiast starsze odniesienia stanowią uznane klasyki teoretyczne, co potwierdza aktualność i właściwe osadzenie rozprawy w najnowszym stanie wiedzy.

Praca autorstwa mgr. Augustine Nana Sekyi Appiah jest spójna, kolejne rozdziały tworzą logiczną całość, a tytuł rozprawy – *„Deformation-Induced Size Effects on the Structure and Mechanical Properties of Heterogenous L-PBF Fabricated AlSi10Mg Alloys”* w pełni odzwierciedla jej treść i zakres merytoryczny.

4. Charakterystyka szczegółowa rozprawy doktorskiej

Studium literaturowe wprowadzające w zagadnienia teoretyczne związane z tematyką rozprawy Pan mgr Augustin Nana Sekyi Appiah zawarł w dwóch pierwszych rozdziałach pracy. W rozdziale 1 („1.0 Wprowadzenie”) Autor nakreślił szeroki kontekst badań, wskazał na znaczenie redukcji masy w transporcie i potrzebę poszukiwania materiałów zdolnych do pogodzenia wysokiej wytrzymałości z plastycznością. Jako rozwiązanie przedstawił materiały wytwarzane metodą przyrostową – selektywnego topienia laserowego w łożu proszku (PBF-LB/M), wykazujące unikalną, hierarchiczną mikrostrukturę, charakteryzującą się drobną, ciągłą siecią eutektycznego krzemu (Si) osadzoną w ciągłej osnowie α -Al. Następnie przedstawił zagadnienia dotyczące technologii addytywnych, koncentrując się na procesie PBF-LB/M. Opisał jego przebieg, parametry decydujące o jakości, a także typowe wady i zalety. Szczególną uwagę poświęcił mikrostrukturze stopu AlSi10Mg, wskazując różnice pomiędzy materiałem odlewanym a wytwarzanym przyrostowo. Przedstawił charakterystyczną budowę komórkową z siecią bogatą w krzem na granicach komórek, omówił rolę dyslokacji geometrycznie koniecznych, mechanizmy ich generacji, akumulacji i anihilacji oraz wpływ obróbki cieplnej na ewolucję mikrostruktury i własności mechaniczne. Osobny fragment poświęcił granicom jezierek przetopu jako potencjalnym miejscom inicjacji uszkodzeń i koncentracji naprężeń, a także procesom rozdrobnienia ziaren i dynamicznej rekrytalizacji. Całość zamknął omówieniem intensywnych technik odkształcania plastycznego stosowanych do dalszej modyfikacji mikrostruktury oraz przeglądem głównych mechanizmów umacniania w stopach Al-Si.

Doktorant w sposób nietypowy umieścił główne cele swojej pracy w podrozdziale 2.12. W kolejnym podrozdziale 2.12.1 „*Podejście badawcze*” przedstawił uzasadnienie wyboru tematyki, a następnie w podrozdziale 2.12.2 sformułował trzy szczegółowe cele badawcze. Zazwyczaj w ocenianych przeze mnie rozprawach informacje dotyczące tezy i celów badawczych są wydzielone w odrębnym rozdziale, co sprzyja większej przejrzystości i podkreśla wagę tej części pracy. W analizowanym przypadku Doktorant, opierając się na szczegółowym przeglądzie literatury, wskazał na istotną lukę badawczą dotyczącą ograniczonej wiedzy o wpływie obróbki cieplnej w niskiej temperaturze oraz intensywnych procesów kształtowania mikrostruktury przy użyciu dużych wartości odkształcenia (SPD) na ewolucję mikrostruktury oraz wynikające z niej właściwości mechaniczne stopów Al-Si wytwarzanych metodami przyrostowymi. Zagadnienia te mają kluczowe znaczenie dla kształtowania właściwości mechanicznych stopów AlSi10Mg wytwarzanych metodami przyrostowymi. W rozprawie słusznie podkreślono, że zrozumienie synergicznego oddziaływania procesów LTA (low-temperature annealing) i SPD na ewolucję pierwotnych kryształów krzemu, wydzielen krzemu eutektycznego oraz sieci dyslokacyjnej generowanej w trakcie odkształcenia stanowi podstawę do projektowania nowych procesów technologicznych, pozwalających poprawić zarówno wytrzymałość, jak i plastyczność materiału.

Pan mgr Augustine Nana Sekyi Appiah sformułował hipotezę badawczą, zgodnie z którą zastosowanie sekwencji „proces PBF-LB/M, następnie niskotemperaturowa obróbka

cieplna LTA i finalna przeróbka plastyczna SPD (ECAP/TCAP)“ umożliwi wytworzenie w badanym siluminie mikrostruktury zapewniającej wysoką wytrzymałość przy zachowaniu relatywnie dużej plastyczności. W celu weryfikacji hipotezy Doktorant zdefiniował zakres badań obejmujący:

- a) charakterystykę proszków oraz próbek w stanie „as-built” otrzymanych metodą PBF-LB/M;
- b) analizę wpływu krótkotrwałego wyżarzania w 280°C przez 9 minut (LTA_280) oraz długotrwałego w 300°C przez 30 minut (LTA_300) na morfologię pierwotnych kryształów krzemu i twardość stopu AlSi10Mg;
- c) zastosowanie procesów ECAP i TCAP przy różnych wartościach temperatury i liczbie przejść oraz ocenę ich wpływu na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne stopu AlSi10Mg;
- d) analizę wpływu obróbki cieplno-plastycznej na ewolucję gęstości dyslokacji i porowatość;
- e) badania właściwości mechanicznych obejmujące mikrotwardość, próby ściskania oraz testy LUR (loading-unloading-reloading).

Doktorant wskazał także na konieczność opracowania metodyki badawczej i adaptacji istniejących technik analitycznych (EBSD, TEM, XRD, CT) do specyfiki badanego stopu. Podkreślił przy tym trudności wynikające z niejednorodności pierwotnych kryształów krzemu, których morfologia odzwierciedla kierunek krystalizacji wzdłuż ścieżki procesu przyrostowego, co prowadzi do powstania sieciowej struktury i anizotropii mikrostrukturalnej typowej dla materiałów wytwarzanych metodą PBF-LB/M. Zaplanowane badania miały na celu nie tylko potwierdzenie możliwości opracowania parametrów technologicznych kształtowania właściwości siluminów, niedostępnych przy użyciu klasycznych metod przeróbki cieplno-plastycznej (co Doktorant określa jako wypełnienie luki wiedzy), ale także uzupełnienie danych dotyczących wpływu składu fazowego na właściwości mechaniczne stopu AlSi10Mg wytwarzanego technologią PBF-LB/M.

W części pracy poświęconej wynikom badań Doktorant w pierwszej kolejności dokonał świadomego wyboru stopu AlSi10Mg spośród trzech analizowanych (AlSi7Mg, AlSi10Mg, AlSi12Mg). Udowodnił, że stop o składzie bliskim eutektycznemu cechuje się największą przydatnością technologiczną do procesu PBF-LB/M, wynikającą z korzystnych warunków krzepnięcia i najdrobniejszej struktury komórkowej. Analiza porowatości i twardości potwierdziła, że AlSi10Mg stanowi optymalny materiał modelowy, co nadało dalszym badaniom solidne podstawy.

W kolejnym etapie Doktorant scharakteryzował efekty wyżarzania niskotemperaturowego (LTA). Wykazał, że wyżarzanie w temperaturze 280°C przez 9 minut powoduje jedynie częściowe osłabienie sieci krzemowej, natomiast w temperaturze 300°C przez 30 minut prowadzi do jej pełnej fragmentacji i sferoidyzacji. Wyniki jednoznacznie dowodzą, że obróbka LTA_300 nie jest zwykłym procesem odprężania, lecz kluczowym etapem kondycjonowania mikrostruktury, przygotowującym materiał do dalszej obróbki plastycznej. Doktorant powiązał zmianę architektury fazy krzemowej z wyraźnym wzrostem plastyczności (z 35% do 47%), co wiązał z ograniczeniem łatwych ścieżek propagacji pęknięć.

Cenne są również badania mechanizmów odkształcenia. Doktorant wykazał, że ciągła sieć krzemowa generuje intensywne umocnienie indukowane heterogeniczną deformacją poprzez tworzenie dyslokacji geometrycznie niezbędnych (GNDs) i wysokiego naprężenia

zwrotnego (ang. *back stress*), co skutkuje wzrostem granicy plastyczności, ale sprzyja przedwczesnemu pękaniu. Po fragmentacji sieci (LTA_300) Doktorant zaobserwował dominację mechanizmów akumulacji dyslokacji swobodnych (SSD), które osłabiają efekt naprężeń zwrotnych, a jednocześnie umożliwiają bardziej jednorodny przepływ plastyczny i zwiększoną zdolność do odkształceń. Zjawiska te zilustrował analizą KAM oraz pomiarami gęstości dyslokacji, co nadaje pracy pogłębiony wymiar mechanistyczny.

Zasadniczym osiągnięciem rozprawy są badania nad zastosowaniem procesów SPD. Doktorant udowodnił, że skuteczność ECAP i TCAP jest silnie uzależniona od stanu wyjściowego materiału. W przypadku próbek w stanie as-built oraz po LTA_280 procesy SPD prowadziły do kruchości wskutek wtórnego rozrywania sieci Si i powstawania lokalnych koncentratorów naprężeń. Natomiast próbki po obróbce LTA_300, w których krucha faza została ustabilizowana w postaci rozproszonych cząstek, podczas SPD ulegały korzystnemu rozdrobnieniu ziarna do skali ultradrobnoziarnistej (ok. 400 nm), osiągając wyjątkową kombinację wytrzymałości ($R_e \approx 403$ MPa) i plastyczności ($\epsilon_f \approx 51\%$). Tym samym Doktorant zaproponował spójną ścieżkę technologiczno-materiałową, w której sekwencja LTA_300 + TCAP pozwala przełamać klasyczny kompromis wytrzymałość–plastyczność w stopach AlSi10Mg.

Na uwagę zasługują także badania nad określeniem krytycznej temperatury dla procesu ECAP. Doktorant wykazał, że powyżej 350 °C proces traci efektywność, gdyż wskutek rekrytalizacji dynamicznej i rozrostu cząstek krzemu dochodzi do degradacji właściwości mechanicznych sięgającej 70% względem stanu wyjściowego. To ustalenie ma istotne znaczenie praktyczne i stanowi jednoznaczną wytyczną technologiczną dla zastosowania SPD w stopach wytwarzanych addytywnie.

Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. Augustine N.S. Appiaha wnosi istotny wkład w badania nad materiałami wytwarzanymi metodami przyrostowymi, koncentrując się na problemie technologicznym kształtowania stopów odlewniczych w celu uzyskania materiału funkcjonalnego o podwyższonych właściwościach wytrzymałościowych przy zachowaniu relatywnie wysokiej plastyczności. Zastosowana metodyka badawcza obejmowała szeroki zakres technik charakteryzacji mikrostruktury (LOM, SEM, EBSD, TEM, XRD, CT) oraz badań właściwości mechanicznych (mikrotwardość, próba ściskania, testy LUR). Uzyskane wyniki pozwoliły na jednoznaczne udokumentowanie korzystnych efektów obróbki cieplnej niskotemperaturowej i przeróbki plastycznej w kontekście poprawy właściwości mechanicznych stopu AlSi10Mg.

Mocną stroną rozprawy jest kompleksowa charakterystyka materiału, obejmująca zarówno stan wyjściowy (*as-built*), jak i kolejne etapy obróbki cieplnej oraz przeróbki plastycznej. W części badawczej należy podkreślić duży nakład pracy eksperymentalnej, znajdujący odzwierciedlenie w bogatym materiale ilustracyjnym w postaci obrazów mikroskopowych, map EBSD oraz wyników pomiarów twardości. Pozytywnie oceniam również podjętą przez Doktoranta próbę ilościowej analizy gęstości dyslokacji oraz uwzględnienia efektu Bauschingera, co nadaje pracy dodatkową wartość poznawczą.

Biorąc pod uwagę analizę literatury, znajomość metod badawczych, sposób opracowania wyników oraz sformułowane wnioski, należy stwierdzić, iż Doktorant wykazał się gruntowną wiedzą merytoryczną oraz umiejętnością krytycznej oceny uzyskanych rezultatów. Tym samym zaprezentował zasób wiedzy i kompetencji badawczych w pełni odpowiadający poziomowi rozprawy doktorskiej, stanowiący solidne podstawy do dalszych rozważań naukowych.

5. Uwagi o charakterze merytorycznym oraz pytania do Autora

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr Augustine Nana Sekyi Appiah jest bez wątpienia opracowaniem oryginalnym, o istotnym potencjale aplikacyjnym, które w znaczący sposób poszerza dotychczasowy stan wiedzy w badanym obszarze. Uzyskane przez Doktoranta wyniki badań, jak również sformułowane na ich podstawie wnioski, oparte zostały na szerokim zakresie eksperymentów, co świadczy o rzetelności podejścia i dużym nakładzie pracy badawczej. Jednak po lekturze pracy pojawiają się także wątpliwości, które wymagają od Autora uzupełnienia i wyjaśnienia. Proszę odnieść się do poniższych uwag:

1. W pracy zastosowano analizę składu chemicznego proszków metodą SEM/EDS. Należy jednak podkreślić, że technika ta ma charakter jakościowy lub półilościowy i silnie zależy od miejsca wykonania analizy. W szczególności w przypadku proszków metalicznych kluczowe znaczenie ma liczebność próby – ile cząstek poddano badaniu i czy przeprowadzono analizę statystyczną wyników. Brak tej informacji uniemożliwia ocenę reprezentatywności uzyskanych danych. SEM/EDS może stanowić użyteczne narzędzie do wstępnej charakterystyki, natomiast do jednoznacznego i ilościowego określenia składu proszków właściwe są metody spektrometryczne, takie jak OES (*Optical Emission Spectroscopy*), XRF (*X-ray Fluorescence*) czy ICP-OES/MS (*Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy*). Ich zastosowanie pozwoliłoby na pełną weryfikację deklarowanego składu chemicznego i znacząco zwiększyłoby wiarygodność części eksperymentalnej
2. Wyniki badań właściwości mechanicznych moim zdaniem są niepełne ponieważ ograniczają się jedynie do statycznej próby ściskania i badań typu LUR (*loading–unloading–reloading*). Brakuje natomiast wyników chociażby ze statycznej próby rozciągania, które są kluczowe do jednoznaczonej oceny własności konstrukcyjnych stopu i umożliwiłyby porównanie z danymi literaturowymi. Wyniki uzyskane w próbie ściskania nie odzwierciedlają zachowania materiału w eksploatacji, szczególnie w zastosowaniach lotniczych i motoryzacyjnych, gdzie dominują obciążenia rozciągające oraz naprężenia cykliczne. Co więcej, brak badań zmęczeniowych czy oceny odporności na kruche pękanie czyni prezentowane wyniki niepełnymi i ogranicza ich aplikacyjność.
3. Przedstawiony dobór poziomów jednoosiowego ściskania (5%, 20% oraz do zniszczenia) ma sens poznawczy, ponieważ pozwala uchwycić ewolucję mikrostruktury na różnych etapach odkształcenia. Jednak w obecnej postaci opis metodyki jest zbyt ogólny i pozostawia istotne luki, które utrudniają weryfikację poprawności i porównywalności wyników. Brakuje szczegółów dotyczących warunków prowadzenia prób ściskania – Autor nie podaje, czy procedura była zgodna z normą (np. ASTM E9), jaka była szybkość odkształcenia ani jak zdefiniowano kryterium „zniszczenia”, co uniemożliwia porównanie wyników z literaturą. Ponadto nie określono sposobu rejestracji odkształceń

(ekstensometr, DIC, pomiar przemieszczenia tłoka), przez co nie wiadomo, czy uzyskane wartości są rzeczywistym odzwierciedleniem deformacji materiału, czy też obciążone są błędami wynikającymi z podatności układu badawczego.

4. Ponadto wyniki badań ze statycznej próby ściskania ograniczają się tylko do próbek wytworzonych w orientacji osi budowy (z-axis), mimo że sam Autor podkreśla istotną anizotropię właściwości w materiałach otrzymywanych metodą PBF-LB/M. Przy braku wyników z prób statycznego rozciągania, badań zmęzeniowych oraz analizy w innych kierunkach orientacji budowy, formułowanie wniosków o potencjale aplikacyjnym materiału należy uznać za przedwczesne.
5. Kryterium zniszczenia w próbach ściskania nie zostało jednoznacznie zdefiniowane. W tabelach podano wartości „*strain at failure*”, lecz brak informacji, czy odnoszą się one do momentu powstania pęknięcia ścinającego, do zaobserwowanej zmiany kształtu próbki (tzw. *barreling*) wynikającego z tarcia na czołowych powierzchniach kontaktu, czy też do granicznego odkształcenia plastycznego przyjętego arbitralnie jako warunek zakończenia próby. Brak precyzji ogranicza możliwość porównywania wyników badań z danymi literaturowymi.
6. Analiza wyników z pomiarów mikrotwardości jest niespójna, ponieważ Doktorant stosuje różne obciążenia (HV0.1 i HV0.3), co utrudnia porównywalność wyników. W pracy brakuje spójnych analiz statystycznych (np. odchyłeń standardowych, liczby próbek), co powoduje, że różnice pomiędzy poszczególnymi wariantami obróbki nie zawsze są w pełni przekonujące. Ponadto zastosowanie pomiarów mikrotwardości HV w przypadku materiałów o miękkiej osnowie oraz bardzo twardych wydzieleniach krzemu czy pierwotnych faz międzymetalicznych nie jest właściwe, gdyż wyniki pomiarów silnie zależą od miejsca wykonania odcisku. W zależności od tego, czy odcisk trafi w osnowę czy w wydzielenie, uzyskiwane wartości twardości charakteryzują się dużym rozrzutem, co ogranicza wiarygodność tej metody w analizowanym materiale. W tym przypadku bardziej adekwatne byłoby zastosowanie pomiarów twardości metodą Brinella, ponieważ wykorzystuje ona znacznie większe obciążenie i kulisty wgłębnik, co pozwala na uśrednienie odpowiedzi mechanicznej większej objętości materiału. Dzięki temu wpływ lokalnej niejednorodności mikrostruktury (miękką osnowa kontra twarde wydzielenia krzemu i fazy międzymetaliczne) zostaje zredukowany, a uzyskane wyniki są bardziej reprezentatywne dla całego materiału.
7. W pracy zastosowano dwa warianty wyżarzania niskotemperaturowego: krótkotrwały w 280 °C przez 9 minut (LTA_280) oraz długotrwały w 300 °C przez 30 minut (LTA_300). Tak krótki czas obróbki cieplnej, zwłaszcza w wariantcie LTA_280, budzi poważne wątpliwości co do możliwości modyfikacji mikrostruktury w całej objętości próbki i uzyskania wiarygodnych oraz powtarzalnych wyników. Brak uzasadnienia doboru tych parametrów stanowi słaby punkt metodyki i utrudnia porównanie z literaturą. Zasadne jest zatem pytanie, czy po 9-ciu minutach wyżarzania można rzeczywiście spodziewać się istotnych zmian w mikrostrukturze, zwłaszcza w zakresie fragmentacji i sferoidyzacji sieci krzemowej? Ponadto należy poddać w wątpliwość określenie 30-minutowego

wyżarzania określeniem *długotrwałego*. Na jakiej podstawie dokonano wyboru tak zdefiniowanych warunków obróbki cieplnej?

8. Nie zweryfikowano stabilności uzyskanych właściwości stopu, co znacząco osłabia część wniosków aplikacyjnych. W przypadku materiałów przeznaczonych do zastosowań w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym kluczowe znaczenie ma utrzymanie właściwości mechanicznych w podwyższonej temperaturze oraz po długotrwałej eksploatacji. Autor nie przeprowadził jednak żadnych testów starzeniowych ani prób wygrzewania, które pozwoliłyby ocenić trwałość ultradrobnoziarnistej mikrostruktury uzyskanej po TCAP. Jest to poważne ograniczenie, ponieważ właśnie niestabilność mikrostruktury UFG stanowi jedną z głównych przeszkód w jej implementacji przemysłowej. Deklaracje o potencjalnym znaczeniu aplikacyjnym wyników nie zostały w ten sposób potwierdzone. Autor kilkakrotnie wskazuje na możliwość wykorzystania sekwencji (AM + LTA + SPD) w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym (np. rozdz. 6 – *Conclusions*), lecz nie przedstawił żadnych badań w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych. Brak testów zmęczeniowych, korozyjnych oraz wysokotemperaturowych sprawia, że uzyskane wyniki mają charakter wyłącznie laboratoryjny, a część wniosków należy uznać za nadinterpretację.
9. Słabą stroną prezentacji wyników jest także opis procesów SPD (ECAP i TCAP). Autor przedstawia przebieg badań i warunki prowadzenia procesu, tj. temperaturę, jednak analiza wpływu parametrów procesu na właściwości materiału nie została ujęta w spójny sposób. Brakuje zestawień tabelarycznych, które pozwoliłyby jednoznacznie porównać efekty różnej temperatury i liczby przejść na mikrostrukturę i wytrzymałość. Co więcej, obserwowane pogorszenie właściwości w przypadku ECAP w wysokiej temperaturze zostało przypisane zjawiskom rekrytalizacji, jednak brak jest wyników mikrostrukturalnych (np. EBSD ukazujących wzrost ziaren) potwierdzających ten wniosek. Dyskusja w tym miejscu ma charakter deklaracyjny, nie bazujący na uzyskanych wynikach.
10. Dodatkowo należy wskazać na uchybienia merytoryczne w sposobie analizy wyników. Przykładowo, definicja „*back stress*” przyjęta przez Autora w badaniach LUR jest nie do końca uzasadniona, obliczenia wykonano jako średnią wartości granicy plastyczności przy odciążaniu i ponownym obciążaniu, podczas gdy w literaturze przyjęta jest definicja z teorii umocnienia kinematycznego jako połowa różnicy progów uplastycznienia w przeciwnych kierunkach. Przyjęta metodyka obliczeń odbiega od klasycznej definicji i może skutkować otrzymaniem wartości obarczonych błędem systematycznym. Podobnie, Autor odnosi się do efektu Bauschingera, mimo że nie zastosowano odwrócenia kierunku obciążenia, co sprawia, że wyciągnięte wnioski są metodologicznie nieuzasadnione. W innych miejscach pojawiają się błędne sformułowania, jak np. stwierdzenie o „wzroście granicy plastyczności przy maksymalnym odkształceniu”, gdzie faktycznie chodzi o wzrost naprężenia płynięcia. W pracy również można zauważyć niespójność w stosowaniu terminologii badań właściwości mechanicznych materiałów. Autor posługuje się terminem „granica plastyczności” nawet przy dużych wartościach

- odkształceń, gdzie poprawnie należałoby mówić o naprężeniu płynięcia (*flow stress*) (np. strona 125. Takie sformułowania mogą wprowadzać w błąd co do interpretacji wyników.
11. Interpretacja wyników metody Williamsona–Halla jest uproszczona. Autor przypisuje uzyskane wartości gęstości dyslokacji do udziału SSD, podczas gdy w tej metodzie nie ma możliwości odróżnienia SSD od GND. Dodatkowo analiza wyników dotyczących gęstości dyslokacji opartych na KAM jest wspomniana w tekście, lecz nie przedstawiono danych liczbowych, które potwierdzałyby mechanizmy SSD i GND, do których Autor odwołuje się w dyskusji.

Przytoczone powyżej uwagi należy traktować jako konstruktywny wkład do dalszej dyskusji z Doktorantem oraz jako punkt wyjścia do ewentualnych uzupełnień, doprecyzowania lub pogłębienia niektórych aspektów rozprawy. Nie podważają one w żadnym stopniu merytorycznej wartości przedstawionej pracy, nie naruszają jej zasadniczej treści ani nie zmieniają mojej pozytywnej oceny całości wysiłku badawczego oraz uzyskanych rezultatów. Uwagi te mają charakter pomocniczy i ukierunkowane są na wspieranie dalszego rozwoju naukowego Pana mgr Augustine Nana Sekyi Appiah.

6. Wniosek końcowy

Podsumowując moją opinię stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr. Augustine Nana Sekyi Appiah pt. *“Deformation-induced size effects on the structure and mechanical properties of Heterogenous L-PBF fabricated AlSi10Mg Alloys”* stanowi wartościowe opracowanie, wnoszące znaczący wkład w rozwój wiedzy dotyczącej zależności pomiędzy technologiami wytwarzania addytywnego, procesami obróbki cieplnej i plastycznej, a właściwościami mechanicznymi stopów aluminium Al-Si-Mg. Uzyskane wyniki mają nie tylko wymiar poznawczy, lecz także praktyczny, gdyż wskazują kierunki dalszej optymalizacji lekkich materiałów konstrukcyjnych o korzystnym połączeniu wytrzymałości i plastyczności.

Autor rozprawy wykazał się bardzo dobrą znajomością zagadnień będących przedmiotem badań, umiejętnością doboru nowoczesnych metod i technik badawczych oraz zdolnością do samodzielnej, krytycznej analizy i twórczej interpretacji uzyskanych rezultatów. Praca poszerza aktualny stan wiedzy w dziedzinie inżynierii materiałowej i stanowi zauważalny wkład w rozwój tej dyscypliny.

Na tej podstawie stwierdzam, że rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane tego rodzaju pracom, określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz. U. 2024 poz. 1571). Wnioskuje zatem do Wysokiej Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej o przyjęcie rozprawy, kontynuowanie dalszych etapów przewodu doktorskiego oraz dopuszczenie Pana mgr Augustine Nana Sekyi Appiah do publicznej obrony.

Prof. G. Mrówka_Nowotnik

/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)