

Częstochowa, 20.06.2024

Prof. dr hab. inż. Agata Dudek  
Katedra Inżynierii Materiałowej  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów  
Politechnika Częstochowska  
42-202 Częstochowa  
ul. Armii Krajowej 19

## **RECENZJA**

rozprawy doktorskiej mgr inż. Goftila Gudeta Sirata

pt.: „Wpływ sekwencji relaksacji, pełzania i zmęczenia niskocyklowego na końcową trwałość i strukturę materiału”

„Influence of combined relaxation, creeping and low-cycle fatigue on the final durability and structure of material”

### **PODSTAWA OPRACOWANIA RECENZJI**

Recenzja została sporządzona w odpowiedzi na pismo prof. dr hab. inż. Marii Sozańskiej Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej z dnia 28.05.2024 r. oraz uchwały nr 49/2024 podjętej przez Radę Dyscypliny Inżynieria Materiałowa w dniu 28 maja 2024 r.

### **AKTUALNOŚĆ PODJĘTEGO TEMATU**

Postęp technologiczny stawia przed inżynierami coraz większe wyzwania, które wynikają z potrzeby opracowania materiałów o wyjątkowych właściwościach mechanicznych i termicznych. Tradycyjne stopy metali coraz częściej nie spełniają wymagań współczesnych aplikacji, szczególnie w kluczowych sektorach takich jak lotnictwo, motoryzacja, elektronika i medycyna, gdzie niezbędne jest jednocześnie zapewnienie wysokiej wytrzymałości, lekkości oraz trwałości materiałów.

W odpowiedzi na te wyzwania, kompozyty o osnowie metalowej, zwłaszcza te wzmocnione cząstkami ceramicznymi, takimi jak węgiel krzemu (SiC), zyskują na znaczeniu.

Dzięki swojej unikalnej kombinacji właściwości, te zaawansowane materiały nie tylko oferują wyższą wytrzymałość mechaniczną i termiczną, ale są także lżejsze od tradycyjnych stopów metali. Ich rosnąca popularność wynika ze zdolności do spełniania surowych wymagań współczesnych aplikacji, gdzie istotne są maksymalna wydajność przy minimalnej masie oraz wysoka odporność na zmęczenie i korozję.

Zastosowanie materiałów kompozytowych, w tym kompozytów o osnowie stopu aluminium wzmocnionych SiC, stanowi kluczowy krok w kierunku dostosowania materiałów do wymagań współczesnego świata technologii. Materiały te zapewniają inżynierom nowe możliwości projektowe i produkcyjne, niezbędne do osiągnięcia zaawansowanych celów inżynierskich.

Przedmiotem niniejszej pracy doktorskiej, zatytułowanej "Wpływ sekwencji relaksacji, pełzania i zmęczenia niskocyklowego na końcową trwałość i strukturę materiału", autorstwa mgr inż. Goftila Gudeta Sirata, jest niezwykle istotne zagadnienie związane z wytrzymałością nowoczesnych materiałów kompozytowych. Uważam, że temat podjęty przez Pana mgr inż. Goftila Gudeta Sirata jest wyjątkowo aktualny, interesujący oraz istotny z punktu widzenia potrzeb współczesnej inżynierii, nie tylko z teoretycznego, ale i praktycznego punktu widzenia. Praca została przygotowana pod kierunkiem dr hab. inż. Krzysztofa Waclawiaka oraz dr inż. Grzegorza Junaka i napisana w języku angielskim.

## **CEL I ZAKRES RECENZOWANEJ PRACY**

Praca doktorska ma charakter doświadczalny, z tradycyjnym dla tego typu opracowań układem. Posiada przejrzysty, logiczny i chronologiczny układ i liczy w sumie 110 stron. Praca podzielona została na siedem rozdziałów: Wprowadzenie, Cele i zadania badawcze, Przegląd literatury, Eksperymentalne badania właściwości mechanicznych stopu AlSi (EN AC-Al Si12CuNiMg), Eksperymentalne badania właściwości mechanicznych kompozytu na bazie stopu aluminium wzmocnionego cząstkami węgla krzemu, Badanie wpływu sekwencji obciążeń na strukturę i trwałość kompozytu Al-Si wzmocnionego cząstkami SiC, Wnioski i rekomendacje. Na początku opracowania Doktorant umieścił streszczenie w języku angielskim i polskim. Praca zawiera ponadto: Spis rysunków, Spis Tabel, Zestawienie symboli i skrótów, Spis treści, Wykaz literatury obejmujący 211 pozycji, dwa załączniki: CV oraz osiągnięcia Doktoranta.

Pierwszy rozdział zatytułowany „Wprowadzenie” to dziewięć stron, na których Doktorant przedstawił podstawowe informacje na temat klasyfikacji oraz szerokiego

zastosowania tradycyjnych i zaawansowanych materiałów, koncentrując się szczególnie na kompozytach o osnowie metalowej (MMCs). Doktorant przedstawia różne typy kompozytów, podkreślając ich wyjątkowe cechy, takie jak wysoka wytrzymałość, sztywność, odporność na korozję oraz zdolność do dostosowania do specyficznych wymagań aplikacyjnych. Dodatkowo, porusza istotne zjawiska takie jak relaksacja, pełzanie i zmęczenie, które są kluczowe dla oceny długoterminowej wytrzymałości i niezawodności materiałów.

Rozdział drugi „Cele i zadania badawcze”, przedstawia główny cel pracy, którym było wykazanie wpływu połączonej relaksacji, pełzania oraz zmęczenia na końcową trwałość kompozytów AlSi wzmocnionych cząstkami SiC. Ponadto badania miały na celu analizę wpływu relaksacji, pełzania i zmęczenia na strukturę materiału kompozytowego. Praca obejmuje szczegółową analizę strukturalną, w tym badania metalograficzne i fraktograficzne kompozytu przed i po obciążeniu. Celem pracy była również ocena właściwości mechanicznych stopu AlSi i materiału kompozytowego przy obciążeniach rozciągających, pełzająco-relaksacyjnych i cyklicznych w podwyższonej temperaturze. Pan mgr inż. Goftila Gudeta Sirata słusznie zauważa, że procesy takie jak: zmęczenie, pełzanie i relaksacja to główne przyczyny awarii materiałów w zastosowaniach inżynierskich, szczególnie w warunkach wysokotemperaturowych. Połączenie takich zjawisk jak relaksacja i zmęczenie, a także pełzanie i zmęczenie, może spowodować przedwczesne uszkodzenie wywołane zmianą struktury materiału. Kompozyt AlSi/SiC posiada doskonałe właściwości mechaniczne, co czyni go idealnym do zastosowań w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym i obronnym, dlatego też poznanie reakcji tego materiału na zmęczenie oraz ocenę jego trwałości i struktury podczas różnych warunków obciążenia ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa i długoterminowej wydajności. Przedmiotem badań były odlewy wykonane ze stopu EN AC-Al Si12CuNiMg oraz kompozytu Al-Si wzmocnionego cząstkami SiC o 10% udziale masowym.

Rozdział trzeci, zatytułowany „Przegląd literatury”, obejmuje teoretyczne omówienie stopów aluminium oraz kompozytów o osnowie aluminiowej (AMMCs). W ramach tego przeglądu w celu lepszego zrozumienia najnowszych osiągnięć i trendów w tej dziedzinie, zaprezentowano opis prac innych autorów zajmujących się poprawą właściwości mechanicznych tych materiałów. Przegląd literatury dokonany przez Doktoranta jest rzetelny i kompleksowy, uwzględniając istotne publikacje z obszaru tematyki badawczej. W pracy zostały dokładnie omówione kluczowe aspekty dotyczące stopów aluminium oraz kompozytów na bazie aluminium. Analiza literatury nie tylko obejmuje istotne publikacje, ale również prezentuje ich wkład w rozwój wiedzy na temat poprawy właściwości mechanicznych tych

materiałów. Doktorant wykazał się umiejętnością krytycznej oceny istniejących danych oraz odpowiednim kontekstualnym ujęciem wyników badań poprzedników, co stanowi solidną podstawę dla własnych eksperymentów i wniosków.

Rozdział czwarty „Eksperymentalne badania właściwości mechanicznych stopu EN AC-Al Si12CuNiMg” koncentruje się na technikach eksperymentalnych, które zastosowano do analizy właściwości mechanicznych badanego stopu. W rozdziale tym, Doktorant omawia metody wytwarzania, procedury eksperymentalne i szczegółową analizę mikrostruktury i właściwości mechanicznych stopu. Jako metody badawcze wykorzystano jednoosiową próbę rozciągania, pomiar twardości metodą Brinella oraz testy relaksacji naprężenia i pełzania. Do przeprowadzenia tych badań użyto następujących urządzeń m.in.: maszyny wytrzymałościowej Zwick/Roel Z100, mikroskopu świetlnego oraz skaningowego mikroskopu elektronowego. Ponadto metoda najmniejszych kwadratów została wykorzystana do dopasowania krzywych relaksacji naprężenia i pełzania uzyskanych z testów eksperymentalnych do standardowego liniowego modelu reologicznego materiału (SLSM).

Rozdział piąty „Eksperymentalne badania właściwości mechanicznych kompozytu na bazie stopu aluminium wzmocnionego cząstkami węgla krzemu” przedstawia porównanie struktury i właściwości mechanicznych stopu Al Si12CuNiMg i kompozytu AlSi/SiCp.

Rozdział szósty „Badanie wpływu sekwencji obciążeń na strukturę i trwałość kompozytu Al-Si wzmocnionego cząstkami SiC” przedstawia wpływ sekwencji obciążeń na ostateczną trwałość i strukturę kompozytu AlSi/SiCp. Analizie poddawane zostały różne sekwencje obciążeń, szczególnie obciążenia zmęczeniowo-pełzaniowe i zmęczeniowo-relaksacyjne, które mogą wpływać na trwałość i wydajność kompozytu.

Rozdział siódmy przedstawia wnioski z rozprawy.

Analizując rozprawę doktorską Pana mgr inż. Gofila Gudeta Sirata, należy stwierdzić, że problem badawczy został sformułowany prawidłowo, a dobór technik badawczych oraz interpretacja wyników badań są właściwe. Praca jest napisana poprawnym językiem z użyciem odpowiedniej terminologii technicznej, co świadczy o solidnym przygotowaniu merytorycznym autora.

Doktorant wykazał umiejętność rozpoznawania i formułowania problemów badawczych oraz doboru nowoczesnych metod badawczych, które wzajemnie się uzupełniają. Zrealizowane cele badawcze i naukowe oraz uzyskane rezultaty mają istotne znaczenie aplikacyjne, co dodatkowo podnosi wartość pracy.

Rozprawa jest starannie dopracowana redakcyjnie i edytorsko. Układ rozdziałów jest logiczny, a treści przedstawione są w sposób przemyślany. Wyniki przeprowadzonych

doświadczeń zostały opisane jasno i czytelnie, z wykorzystaniem właściwej terminologii stosowanej w inżynierii materiałowej.

Oceniając wartość merytoryczną pracy do najważniejszych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć:

- Ocenę wpływu temperatury na właściwości wytrzymałościowe stopu, takie jak wytrzymałość na rozciąganie, granica plastyczności, moduł Younga i plastyczność. Wykazanie, że wytrzymałość stopu maleje wraz ze wzrostem temperatury do 250°C, a następnie gwałtownie spada w zakresie 250-350°C.
- Wykorzystanie metody najmniejszych kwadratów do dopasowania krzywych relaksacji naprężeń i pełzania do modelu liniowego ciała stałego (SLSM). Wyznaczenie parametrów modelu SLSM i ich zmienności w zależności od temperatury.
- Ocena właściwości wytrzymałościowych kompozytu w różnych temperaturach, stwierdzenie wyższej wytrzymałości na rozciąganie, granicy plastyczności oraz modułu Younga w porównaniu do stopu niewzmacnianego, przy jednoczesnym obniżeniu plastyczności.
- Wykazanie, że połączenie obciążeń zmęczeniowych i pełzania przyspiesza degradację materiału poprzez mechanizmy takie jak propagacja pęknięć i degradacja granic ziaren, co skutkuje skróceniem trwałości rozumianej jako czas do zniszczenia. Sekwencyjne stosowanie obciążeń cyklicznych i długotrwałego naprężenia podczas fazy pełzania powoduje zmiany mikrostrukturalne, prowadząc do przedwczesnego zniszczenia.
- Dowiedzenie eksperymentalne, że kombinacja obciążeń zmęczeniowych i pełzania znacząco skraca żywotność materiału, zmniejszając ją o około 65% w porównaniu do pełnego testu zmęczeniowego. Podobnie, sekwencyjne obciążenie zmęczeniowo-relaksacyjne obniża żywotność materiału do około 30%.

Należy zauważyć, że przeprowadzone badania dostarczyły cennych informacji na temat zachowania kompozytu AlSi/SiC pod wpływem złożonych warunków obciążeniowych. W pracy wykazano, że kombinacja relaksacji naprężeń, pełzania i zmęczenia prowadzi do znaczącego skrócenia żywotności materiału oraz złożonych mechanizmów uszkodzeń, co ma istotne znaczenie dla zastosowań inżynierskich, gdzie kompozyty te są narażone na złożone warunki eksploatacyjne.

Na zakończenie swojej rozprawy doktorskiej Pan mgr inż. Goftila Gudeta Sirata przedstawił rekomendacje do przyszłych prac badawczych, które są trafne i mogą stanowić cenną perspektywę dla dalszego rozwijania tematyki poruszonej w pracy doktorskiej. Zaproponowane kierunki badawcze, takie jak badanie zachowania się kompozytów Al-Si/SiCp przy różnych poziomach naprężenia i temperatur oraz wpływ różnych ilości cząstek SiC na trwałość materiału, są odpowiedzią na istniejące luki w literaturze oraz otwierają nowe możliwości w zakresie optymalizacji materiałowej.

Dodatkowo, sugestie dotyczące badania alternatywnych typów wzmocnień oraz wpływu czynników środowiskowych, takich jak korozja, na trwałość kompozytów, są kluczowe dla zrozumienia pełnego spektrum wyzwań, z jakimi mogą się one spotkać w praktycznych zastosowaniach. Podsumowując, rekomendacje Pana mgr inż. Goftila Gudeta Sirata są uzasadnione i mają potencjał do wzbogacenia dyskusji naukowej oraz przyczynienia się do dalszego rozwoju dziedziny inżynierii materiałowej.

Pragnę przekazać kilka uwag do pracy. W nawiązaniu do rozdziału 4.1, w którym stwierdzono, że próbki do badań zostały przygotowane i dostarczone przez pracowników naukowych Katedry Technologii Materiałowych Politechniki Śląskiej, chciałabym prosić o doprecyzowanie tej informacji. Czy Doktorant brał udział merytoryczny w procesie wytwarzania tych próbek?

Dodatkowo, zauważyłam, że rysunki 18, 26 oraz 38 nie wnoszą żadnej wartości merytorycznej do pracy. W jakim celu zostały umieszczone w części badawczej?

## **OPINIA KOŃCOWA**

Na podstawie dokonanej oceny rozprawy doktorskiej pt. „Influence of combined relaxation, creeping and low-cycle fatigue on the final durability and structure of material” mgr inż. Goftila Gudeta Sirata, przygotowanej pod opieką promotora dr hab. inż. Krzysztofa Waclawika oraz promotora pomocniczego dr inż. Grzegorza Junaka, stwierdzam, że stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Mgr inż. Goftila Gudeta Sirata w dysertacji naukowej rozwiązał trudne zadania badawcze i wykazał tym samym bardzo dobre opanowanie warsztatu badawczego w zakresie metod i technik typowych dla dyscypliny naukowej inżynieria materiałowa. Doktorant posiada dogłębną znajomość przedmiotowej problematyki, umiejętność precyzyjnego formułowania problemów badawczych, krytyczne podejście do analizy wyników oraz zdolność do właściwego dobierania metod badawczych i efektywnej prezentacji uzyskanych wyników.

Praca doktorska spełnia, wymagania określone w art. 190 ust. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późn. zm.) i na tej podstawie stawiam wniosek o dopuszczenie mgra inż. Gofila Gudeta Sirata do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej.



Podpisała: prof. dr hab. inż. Agata Dudek