

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).

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-pelzaniowe i zmęczeniowo-relaksacyjne, które mogą wpływać na trwałość i wydajność kompozytu.

Rozdział siódmy przedstawia wnioski z rozprawy.

Analizując rozprawę doktorską Pana mgr inż. Goftila 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?

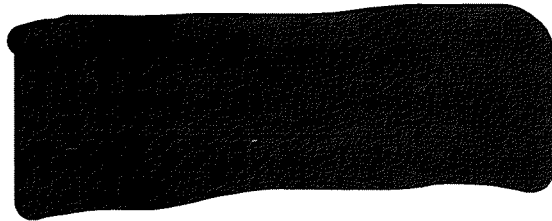
Dodatkowo, zauważyłam, że rysunki 18, 26 oraz 38 nie wnoszą żadnej wartości merytorycznej do pracy. W jakim celu zostały umieszczone w części badawczej?

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. Goftila Gudeta Sirata do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej.



Rzeszów, 1 lipca 2024 r.

Dr hab. inż. Maciej Motyka, prof. ucz.
Katedra Nauki o Materiałach
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska
Al. Powstańców Warszawy 12
35-959 Rzeszów

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Goffila Gudeta SIRATA

pt.: *Influence of combined relaxation, creeping and low-cycle fatigue on the final durability and structure of material*

przygotowanej pod kierunkiem dr. hab. inż. Krzysztofa Wacławiaka
oraz dr. inż. Grzegorza Junaka

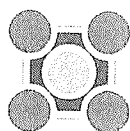
Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej – pismo z dnia 28.05.2024 r. (RDIMa.512.1.2024 RM).

Podstawa prawna – art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (z późn. zm.).

Problematyka i cele pracy

Kompozyty stanowią ważną grupę nowoczesnych i zaawansowanych materiałów inżynierskich. Ich rozwój w dużym stopniu jest determinowany przez tendencję zmniejszania masy elementów konstrukcji – szczególnie pojazdów samochodowych i statków powietrznych. Mimo niewątpliwej dominacji w technice kompozytów o osnowie polimerowej (PMC – *Polymer Matrix Composites*), kompozyty o osnowie metalicznej (MMC – *Metallic Matrix Composites*) znajdują coraz większe zastosowanie, wypierając metale czy ich stopy. Dotyczy to głównie metali o małej gęstości, najczęściej wybieranych na osnowę kompozytów MMC. Kompozyty o osnowie aluminiowej czy magnezowej wzmacniane są najczęściej cząstkami ceramicznymi – jak tlenki, węgliki czy węgiel w różnej postaci, np. nanorurek. Dobór składników kompozytu, ich postać oraz objętość względna determinują jego właściwości użytkowe, często ograniczane do wytrzymałości doraźnej oraz odporności na ścieranie. Specyfika pracy elementów konstrukcji wymusza niejednokrotnie konieczność poszerzania spektrum określanych cech materiału i uwzględnienia np. jego trwałości w warunkach cyklicznie zmiennej temperatury i obciążenia mechanicznego. Ten aspekt, mogłoby się wydawać, jest dość dobrze poznany w przypadku materiałów metalicznych,



jednak opracowane charakterystyki pełzania czy zmęczenia metali stanowiących podstawę kompozytów okazują się niewystarczające dla opisu tych zjawisk w materiałach hybrydowych. Rozprawa doktorska mgr. inż. Goftila Sirata dobrze wpisuje się w tę tematykę, którą bez wątpienia można uznać za aktualną.

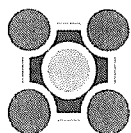
Przedstawiona do recenzji dysertacja dotyczy zagadnień charakteryzowania mikrostruktury i właściwości mechanicznych kompozytu MMC o podstawie stopu z układu Al-Si, wzmacnianego cząstkami węgla krzemowego – Al-Si/SiC_p. O ile badania kompozytów MMC są ciągle rozwijane i zaliczane są do trendów współczesnej inżynierii materiałowej, to sama koncepcja wzmacniania Al i ich stopów (w tym Al-Si) cząstkami SiC nie należy do nowatorskich – kompleksowe badania w tym zakresie prowadzono już kilkanaście lat temu (np. <https://doi.org/10.1007/s43207-022-00242-9> czy <https://doi.org/10.1007/s11249-011-9819-1>). Niemniej jednak, aspekty badawcze poruszone w rozprawie Pana Goftila Sirata można uznać za oryginalne, dlatego nie podważam zasadności ich podjęcia.

W pracy dokonano oceny wpływu oddziaływania złożonego obciążenia mechanicznego i cieplnego na trwałość kompozytu Al-Si/SiC_p. Przeprowadzono badania właściwości mechanicznych w temperaturze pokojowej i podwyższonej, mikroskopowe oraz fraktograficzne. Przyjęty plan badań i dobór metod instrumentalnych uznaję za adekwatny do podjętej problematyki badawczej. Uważam, że praca stanowi rozwiązanie konkretnego problemu naukowego w obszarze inżynierii materiałowej, rozszerzając wiedzę z zakresu kształtowania makrostruktury i właściwości mechanicznych kompozytów MMC.

Charakterystyka i ocena rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr. inż. Goftila Sirata stanowi zwarte opracowanie naukowe. Jej tytuł: *Influence of combined relaxation, creeping and low-cycle fatigue on the final durability and structure of material* jest zbyt ogólny – nie oddaje jednak istoty przeprowadzonych badań przez brak nawiązania do konkretnej grupy materiałów – tj. kompozytów MMC. Treść pracy podzielono na 7 rozdziałów, nie licząc abstraktów, podziękowań, list rysunków i tabel, słownika skrótów, bibliografii i załączników. Opracowanie liczy 124 stron – zawiera 62 rysunki i 5 tablic, a także wykaz materiałów źródłowych (*References*) liczący 211 pozycji.

Rozdział 1. *Introduction* spełnia swoją rolę, przedstawiając podstawowe zagadnienia z zakresu klasyfikacji i ogólnej charakterystyki materiałów kompozytowych. Na jego początku (str. 2), przedstawiono autorski – sądząc po braku odniesień do literatury – opis materiałów tradycyjnych i zaawansowanych. Nie jest dla mnie do końca zrozumiały, dlatego prosiłbym o podanie przyjętych kryteriów takiego podziału. W dalszej części pracy przedstawiono natomiast kryteria klasyfikacji kompozytów, jednak w sposób budzący wątpliwości – nie mogę zgodzić się z Autorem, że włókno (długie lub krótkie) czy cząstka to „reinforcement material” – zdecydowanie jest to postać wzmocnienia „reinforcement form” (rys. 1). Również polemizowałbym ze stwierdzeniem, że



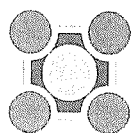
”Ceramic Matrix Composites are nonmetallic materials” (str. 4) – a co w przypadku gdy wzmocnienie jest wykonane z metalu? Natomiast, co do samej osnowy, to sformułowanie „The matrix in MMCs is a metal such as aluminum, magnesium, or titanium” (str. 5) jest zbyt ogólne – pominięto stopy tych metali. Uzupełnienia wymaga również klasyfikacja kompozytów MMC według ich wzmocnienia – rys. 3, str. 7 – krótkie włókna mogą być uporządkowane lub nie. Ogólny opis kompozytów uzupełniają bardzo lakoniczne informacje na temat zjawisk relaksacji, pełzania i zmęczenia – istotnych dla podjętej tematyki badawczej. Mimo to stwierdzam, że Autor w tym rozdziale uwzględnił większość zagadnień dotyczących tematyki rozprawy, bardziej je sygnalizując niż omawiając, jak ma to zwykle miejsce w przypadku klasycznego przeglądu literatury (któremu w tej pracy poświęcono rozdział 3).

Rozdział 2. *Research aims and objectives* przedstawiono główne cele pracy. Najważniejszym było zbadanie wpływu zjawisk pełzania, relaksacji i zmęczenia na trwałość w podwyższonej temperaturze kompozytów AlSi/SiCp. Budzi to moją wątpliwość, bo jak sam Autor twierdzi „Even though AlSi alloys and AlSi composite have good mechanical properties and are employed in manufacturing light mechanical structures, their mechanical properties deteriorate at elevated temperatures” (str. 10). Czy należy rozumieć, że spodziewał się poprawy tych właściwości dzięki obecności cząstek SiC? – prosiłbym o komentarz w tej kwestii. Niezależnie od sposobu przedstawienia założeń pracy, uszczegółowienie celów badawczych w zakresie sporządzenia charakterystyki – oddzielnie materiału osnowy i kompozytu – wydaje się zasadne.

Swoją motywację do podjęcia badań Autor skorelował z problemem zmęczenia materiału – które uznał za główną przyczynę jego zniszczenia w zastosowaniach inżynierskich. Nawiązał również do pełzania, które także stanowi częsty powód uszkodzeń elementów konstrukcji, szczególnie w wysokiej temperaturze. Zgodzę się z Autorem, że przewidywanie złożonego wpływu tych zjawisk na trwałość materiałów jest trudnym zadaniem i pomimo licznych prób, wciąż wymagające wyjaśnienia. W moim odczuciu, przyjęty w pracy zakres badań dawał podstawy na uzyskanie wyników poszerzających wiedzę w tym zakresie.

Literature review (rozdz. 3) obejmuje węższy zakres zagadnień w porównaniu z rozdziałem *Introduction*, ściślej związanych z tematyką badawczą. Przedstawia charakterystykę stopów aluminium, z uwzględnieniem ich podziału na stopy do przeróbki plastycznej i odlewnicze, skupiając się na tych ostatnich, do których należy przyjęty do badań stop Al-Si. Opisano metody wytwarzania kompozytów MMC o osnowie aluminium i jego stopów. Dobrze oceniam część rozdziału dotyczącą odkształcalności stopów aluminium w warunkach relaksacji naprężeń, pełzania i zmęczenia – stanowi solidną podstawę do interpretacji uzyskanych wyników badań własnych. Przegląd literatury, w mojej ocenie, został przeprowadzony rzetelnie, na podstawie aktualnych i istotnych dla podjętej tematyki publikacji naukowych.

W rozdziałach 4 i 5 opisano badania i uzyskane rezultaty w zakresie właściwości mechanicznych stopu AC-AlSi12CuNiMg, stanowiącego osnowę badanego materiału

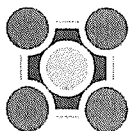


kompozytowego, oraz kompozytu AlSi/SiC_p, odpowiednio. Moją uwagę zwrócił fakt, że w próbie statycznej rozciągania stosowano względnie małą prędkość odkształcania – $6,7 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ – wg jakich kryteriów dobrano warunki próby? Ponadto, powszechnie wiadomo, że siluminy cechuje mała plastyczność, a tym bardziej kompozyty na ich podstawie wzmacniane cząstkami ceramicznymi – czy wg Autora badań nie byłoby bardziej zasadne przeprowadzenie prób ściskania i czy je rozważał? Realizacja prób statycznych rozciągania pozwoliła określić wartości wytrzymałości na rozciąganie, granicy plastyczności, modułu Younga i odkształcenia całkowitego w zakresie temperatury 25-350°C. Pomiary twardości wykazały jej korelację z wytrzymałością na rozciąganie w przyjętym zakresie temperatury. W badaniach zjawisk relaksacji naprężeń i pełzania uwzględniono analizę z użyciem modelu reologicznego SLSM (*Standard Linear Solid Model*). Zakres badań stopu AC-AlSi12CuNiMg zamyka analiza metalograficzna i fraktograficzna. Kontrowersje moje budzi umieszczanie w rozprawie zdjęć próbek – względnie akceptowalne jeszcze w przypadku próby statycznej rozciągania czy pomiarów twardości – natomiast zupełnie nieuzasadnione dla zglądów metalograficznych (rys. 26).

Mikrostrukturę kompozytu Al-Si/SiC_p badano metodami mikroskopii świetlnej i skaningowej elektronowej. Mimo to, trudno o jednoznaczną identyfikację fazy SiC w materiale kompozytowym – w pracy pada jedynie stwierdzenie „The SiC particles appear as dark spots and are uniformly dispersed throughout the aluminum matrix” bez odwołania się do konkretnego obrazu mikrostruktury. Pomocna w tym przypadku byłaby znajomość rozmiaru cząstek SiC użytych w procesie wytwarzania kompozytu – stosownej informacji nie doszukałem się w pracy dlatego prosiłbym Autora o uzupełnienie. Na podstawie analizy wyników próby statycznej rozciągania stwierdzono, że kompozyt na większą wytrzymałość w porównaniu z materiałem osnowy – w całym przyjętym zakresie temperatury. Szkoda, że w pracy nie zamieszczono chociaż jednej krzywej rozciągania badanego kompozytu Al-Si/SiC_p. Analiza tych wyników (rys. 36 i 37) wskazuje również, że obecność cząstek ceramicznych w kompozycie zmniejsza jego plastyczność – szczególnie w zakresie temperatury 250-350°C – co potwierdza moje wątpliwości, które wyraziłem dokonując oceny przyjętych celów badawczych (w rozdziale 2).

W rozdziale 6 *Study of loading sequence on the structure and durability of the AlSi composite reinforced with SiC particles* przeprowadzono analizę mechanizmów zniszczenia z uwzględnieniem energii odkształcenia plastycznego badanego kompozytu w warunkach sekwencyjnego obciążenia, a także możliwości prognozowania jego trwałości zmęczeniowej. Przedstawione wyniki i ich dyskusja, w mojej ocenie, stanowią najwartościowszą część opiniowanej rozprawy – dotyczą jej sedna. Rozszerzają wiedzę w zakresie charakteryzowania właściwości mechanicznych kompozytów MMC w warunkach złożonego obciążenia cieplno-mechanicznego.

W rozdziale 7 *Conclusions and recommendations*, wbrew jego nazwie, raczej podsumowano uzyskane wyniki badań niż sformułowano wnioski końcowe. Autor potwierdził tezę, że połączone oddziaływanie relaksacji naprężeń, pełzania i sekwencyjnego obciążenia zmęczeniowego powoduje



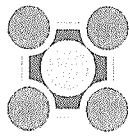
istotne zmniejszenie trwałości badanego kompozytu Al-Si/SiC_p. Ponadto oszacował stopień zmniejszenia trwałości zmęczeniowej w zależności od sekwencji obciążenia. Na podkreślenie zasługuje fakt, że Doktorant zdaje sobie sprawę ze złożoności podjętej tematyki badań i widzi konieczność prowadzenia dalszych prac badawczych, które formułuje.

Podsumowując ocenę merytoryczną rozprawy mgr. inż. Goñila Sirata, stwierdzam iż zawiera oryginalne wyniki badań w zakresie charakteryzowania kompozytów MMC Al-Si/SiC_p. W głównej mierze mają charakter poznawczy, choć niepozbawiony walorów aplikacyjnych – analizowany stan obciążenia odpowiada warunkom pracy elementów konstrukcji silników spalinyowych. Do głównych osiągnięć Autora zaliczam:

- określenie zmiany właściwości mechanicznych stopu AC-AlSi12CuNiMg w wyniku wzmocnienia cząstkami SiC,
- scharakteryzowanie trwałości kompozytu Al-Si/SiC_p w warunkach jednoczesnego oddziaływania zjawisk relaksacji naprężeń, pełzania i zmęczenia.

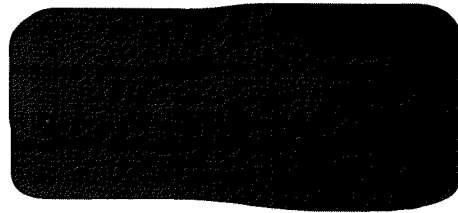
Dysertację cechuje całkiem staranne sformatowanie tekstu i opracowanie szaty graficznej. Autor nie ustrzegł się jednak błędów edycyjnych oraz terminologicznych, które w mojej ocenie nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy. Licząc, że Autor będzie unikał ich popełniania przygotowując kolejne opracowania naukowe, uznałem za stosowne przytoczyć niektóre z nich:

- w podpisie rysunku 2 (str. 5) brakuje opisu zdjęć a-d,
- w przedstawionym sposobie oznaczania stopów aluminium (str. 14) brakuje informacji, że dotyczy stopów do przeróbki plastycznej,
- rysunek 5 (str. 20) przedstawia część układu równowagi Al-Si (nie cały) i zawiera błąd – w stopach nadeutektycznych pomiędzy liniami likwidus i solidus powinna być mieszanina faz L+β (lub L+Si),
- zdanie „To improve the mechanical properties of Al-Si alloy castings, two commonly used techniques are grain refinement and grain modification” (str. 22) implikuje pytanie: jaka jest różnica pomiędzy „grain refinement” i „grain modification”?
- rysunek 6 (str. 23) nie przedstawia „Heat treatment cycle of typical precipitation” tylko schemat umacniania wydzieleniowego,
- w podpisie tabeli 2 (str. 37) powinno być „wt. %” zamiast „weight percentage” (w tabeli pominięto zawartość Al),
- co Autor rozumie pod pojęciem „normal temperature” w podpisie rysunku 11 (str. 38)?
- wyniki referencyjne na rysunku 15 (str. 41) pochodzą z pozycji [152] czy [153]?
- rozdział 4.7 (str. 52) nazwano enigmatycznie „Microstructural surface analysis” – o którą powierzchnię chodzi?
- podobnie rozdział 5.4 (str. 65) – co oznacza termin „Tensile fractography”?
- schematy na rysunkach 41 (str. 71) i 42 (str. 72) są koncepcją Autora czy opracowaniem własnym istniejących schematów?



Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Goftila Sirata, zatytułowana *Influence of combined relaxation, creeping and low-cycle fatigue on the final durability and structure of material*, według mojej wiedzy jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowo-badawczego. Powstała w efekcie dobrze zaplanowanych i konsekwentnie realizowanych prac badawczych. Autor zdefiniował ich cele, które w mojej ocenie zostały osiągnięte. Sposób realizacji badań potwierdza Jego dobry warsztat badawczy, a także umiejętność poprawnej interpretacji uzyskanych wyników badań. Recenzowana rozprawa ma charakter opracowania naukowego i spełnia, w mojej ocenie, wymagania art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dyscyplinie inżynieria materiałowa.



Wrocław, 30.06.2024 r.

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Naplocha
Katedra Inżynierii Elementów Lekkich, Odlewnictwa i Automatyki
Wydział Mechaniczny
Politechnika Wrocławska

Recenzja

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Goftili Gudeta Sirata pt.: „Influence of combined relaxation, creeping and low-cycle fatigue on the final durability and structure of material”,

którego promotorem jest dr hab. inż. Krzysztof Waclawiak z Politechniki Śląskiej,
a promotorem pomocniczym dr inż. Grzegorz Junak z Akademii Górniczo-Hutniczej im. S. Staszica w Krakowie.

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzja została opracowana na podstawie pisma RDIMa.512.1.2024 RM prof. dr hab. inż. Marii Sozańskiej Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej z dnia 28 maja 2023 r. oraz uchwały nr 49/2024 podjętej przez Radę Dyscypliny Inżynieria Materiałowa w dniu 28 maja 2024 r.

2. Tematyka pracy i jej cel

Przedłożona do recenzji praca doktorska mgr inż. Goftili Gudeta Sirata zawiera oryginalne wyniki badań dotyczące właściwości mechanicznych materiałów kompozytowych na bazie stopu aluminium umacnianych cząstkami SiC. Zastosowany proces odlewania z mieszaniem do produkcji kompozytów jest wydajną metodą wytwarzania wysokiej jakości kompozytów o ulepszonych właściwościach, jednolitym rozkładzie umocnienia oraz opłacalną w produkcji. Tworzenie odpowiedniego wiru w stopionej osnowie pozwala równomiernie rozprowadzić cząstki SiC w całej objętości. Wstępne podgrzanie cząstek oraz zapewnienie dobrej zwilżalności umożliwia wytworzenie dobrego połączenia z osnową bez porowatości i konglomeratów.

Zniszczenie elementu spowodowane zmęczeniem materiału pod wpływem obciążeń cyklicznych jest krytycznym problemem w zastosowaniach inżynierskich. Podobnie pełzanie prowadzi do degradacji materiału, szczególnie w wysokich temperaturach, a relaksacja naprężeń powoduje dodatkowe trwałe odkształcenie. Pomimo szeroko zakrojonych badań, dokładne wyznaczenie trwałości materiału kompozytowego w warunkach złożonego obciążenia nadal nie

jest do końca rozpoznane. Zmęczenie, pełzanie i relaksacja naprężeń wpływają na strukturę materiału poprzez złożone mechanizmy, według specyficznych zależności. Przedstawione badania mają na celu wypełnienie tej luki, a analiza efektów tych czynników na trwałość i strukturę kompozytów wzmocnionych cząstkami ceramicznymi wnosi interesujące i wartościowe informacje.

Kompozyty te charakteryzują się wysoką wytrzymałością, odpornością na zmęczenie i korozję, dzięki czemu nadają się do zastosowań motoryzacyjnych, lotniczych, morskich i obronnych. Choć są przedmiotem badań od wielu lat i zostały dobrze rozpoznane, to jednak, nadal brakuje informacji na temat ich długotrwałego obciążania i zachodzących zjawisk, co ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia bezpiecznego użytkowania.

Głównym celem pracy jest określenie wpływu pełzania, relaksacji i zmęczenia na trwałość materiałów kompozytowych w podwyższonych temperaturach. Zostanie zbadany wpływ tych zjawisk oddzielnie jak i w połączeniu, w układzie sekwencyjnych obciążeń, z analizą zmian struktury i jej zniszczenia.

Chociaż kompozyty wykazują dobre właściwości mechaniczne i są szeroko stosowane w lekkich konstrukcjach mechanicznych, ich wytrzymałość pogarsza się w podwyższonych temperaturach. Dlatego też do kluczowych zadań niniejszych badań należy:

1. Charakterystyka materiału z oceną podstawowych właściwości mechanicznych i mikrostruktury nieumocnionego stopu AlSi (EN AC-Al Si12CuNiMg) w temperaturze otoczenia oraz podwyższonej.
2. Analiza zjawisk fizycznych, struktury stopu w warunkach relaksacji naprężeń i pełzania.
3. Badania właściwości mechanicznych materiału kompozytowego w szerokim zakresie temperatur wraz z odniesieniem do stopu osnowy.
4. Analiza wpływu sekwencji obciążeń (relaksacji, pełzania i zmęczenia) na trwałość i zmiany strukturalne materiału kompozytowego.
5. Badania mikrostrukturalne przed i po poddaniu materiału kompozytowego złożonym warunkom obciążenia.
6. Analiza mechanizmu zniszczenia i pęknięcia materiałów zarówno w prostych, jak i połączonych warunkach obciążenia.

Tak sformułowane zadania o charakterze naukowym i użytecznym, jak również zdefiniowane cele pracy, w moim przekonaniu zawierają pierwiastek nowości i będą stanowić oryginalny wkład do inżynierii kompozytów zawieszinowych. Zakres prac obejmuje dwa zasadnicze obszary: badania właściwości mechanicznych połączone z analizą mechanizmów zniszczenia oraz badania strukturalne materiałów przed i po każdym etapie badań zmęczeniowych i pełzania.

3. Ocena redakcyjnej formy rozprawy

Przedłożona do oceny praca doktorska liczy 123 strony, z klasyczną sekwencją rozdziałów, obejmującą studium literaturowe oraz badania własne. Studium wraz ze spisem treści, wykazem oznaczeń i wprowadzeniem przedstawiono na 46 stronach. Zawiera ono 4 zasadnicze

podrozdziały przedstawiające między innymi charakterystykę odkształceń wywołanych relaksacją naprężeń, płużaniem oraz obciążeniem zmeczniovym. Na wstępie Autor opisuje właściwości mechaniczne stopów aluminium w tym osnowy EN AC-Al Si12CuNiMg oraz kompozytów umacnianych cząstkami SiC. W kolejnej części przechodzi do bardziej złożonego stadium wpływu obciążeń cyklicznych na zmiany strukturalne i trwałość materiału. Nadaje to pracy dużą przejrzystość, pozwala zrozumieć problem badawczy, a także poznać sposób postępowania w jego rozwiązaniu. W zamykającym podsumowaniu części teoretycznej zaakcentowano złożoność zjawisk, ich synergiczne oddziaływanie w zastosowaniach metalowych materiałów kompozytowych. Podkreślono, że choć zjawiska te są szeroko badane to jednak nadal nie można zdefiniować jednoznacznych kryteriów dla trwałości bądź zniszczenia materiału. Dlatego też praca koncentruje się na analizie wpływu połączonego oddziaływania relaksacji, płużania i zmęczenia na trwałość materiałów kompozytowych. Zadanie trudne i złożone co świadczy o dojrzałości naukowej doktoranta, który badał już podobne zagadnienia przy realizacji pracy magisterskiej.

Badania własne, które stanowią ok. 2/3 całości, są opisane w kilku rozdziałach, logicznie ze sobą powiązanych, z wiodącym wątkiem i celem badań. Czytelnik bez trudu może wyodrębnić kolejne etapy prac, zapoznać się z ich wynikami i interpretacją. Każdy etap badań jest częścią spójnej całości dającej pogląd na temat właściwości osnowy aluminiowej, materiałów kompozytowych, ich cech i przemian strukturalnych wywołanych analizowanym stanem naprężeń. Większość badań jest udokumentowanych graficznie, a ich wyniki uporządkowane na wykresach, dając możliwość szybkiego wglądu w uzyskane efekty. Całość dysertacji jest starannie opracowana i napisana z użyciem właściwej terminologii. Należy podkreślić, że Doktorant właściwie łączy różne wątki badań, kładzie nacisk na istotne zagadnienia wykazując się dojrzałością i doświadczeniem w prowadzeniu pracy naukowej. Pomimo przeanalizowania różnych czynników i podawania dużej ilości danych ich przyswajanie nie wymaga większego wysiłku. Jakość fotografii czy licznie udokumentowanych obrazów mikroskopii elektronowej jest bardzo dobra. Należałoby jednak dodać fotografie mikrostruktur przy większym powiększeniu, wskazać na nich omawiane zjawiska, typu porowatości, mikropeknięcia, odspojenia. Może podczas obrony doktoratu i dyskusji wyników te zagadnienia zostaną przedstawione szerzej. Ogólnie praca sprawia wrażenie rzetelnej dokumentacji badawczej, bez zbędnych ozdorników i nieprzydatnych odniesień.

4. Wyniki badań i wnioski

Rozprawa zawiera kompleksowe i szczegółowe badania właściwości mechanicznych oraz przemian strukturalnych kompozytu na osnowie siluminu wzmocnionego cząstkami węgla krzemu w różnych warunkach obciążenia, w tym połączonej relaksacji naprężeń, płużania i zmęczenia. Głównym celem badań jest określenie trwałości i integralności strukturalnej kompozytu, a tym samym zebranie informacji na temat jego potencjalnych zastosowań w środowiskach narażonych na duże obciążenia.

Prace rozpoczynają się od gruntownego zbadania nieumocnionego stopu osnowy, tak aby określić punktu odniesienia i umożliwić porównanie właściwości wyjściowych z materiałem kompozytowym. Za pomocą mikroskopii świetlnej i skaningowej zidentyfikowano podstawowe składniki strukturalne, takie jak fazę α -Al, eutektyczne kryształy Si oraz związki międzymetaliczne. Obserwacje i analiza dendrytycznej budowy osnowy, wskazują na nierównowagowe warunki krzepnięcia podczas odlewania, co jest naturalne i często zapobiega sedymentacji cząstek umocnienia. Dodatkowo zaobserwowano mikropory, które mogą wynikać ze skurezu w procesie krzepnięcia. Wady te mogą mieć istotny wpływ na ogólną wytrzymałość i odporność zmęczeniową materiału. Już na tym etapie badań, można zauważyć u Doktoranta duże zrozumienie zachodzących zjawisk, swobodne poruszanie się w warsztacie laboratoryjnym i właściwie podejście do zagadnień badawczych.

W kolejnej części pracy próbki poddano jednoosiowemu rozciąganiu w zakresie temperatur 20-350°C. Analizowano wpływ temperatury na wytrzymałość na rozciąganie, granicę plastyczności i moduł Younga. Wykonane badania pokazały relatywnie powolny spadek zarówno wytrzymałości na rozciąganie, jak i granicy plastyczności do temperatury 250°C. Powyżej tej wartości Autor zaobserwował znaczny spadek wytrzymałości na rozciąganie, wskazując krytyczny zakres temperatur 250-350°, w którym właściwości mechaniczne stopu są niewielkie. Wartości moduł Younga zmieniały się w inny sposób, początkowo wzrastając do temperatury około 150°C, co jest interesującym spostrzeżeniem i powinno być szerzej przeanalizowane. Powyżej tej temperatury wystąpił zrozmiały spadek jego wartości, przypuszczalnie w wyniku większej plastyczności osnowy. Również w tej części Doktorant konsekwentnie realizował zadania badawcze zmierzając do wyznaczonego celu. Przeprowadził wnikliwą ocenę uzyskanych rezultatów, przedstawiając je formie graficznej co ułatwia zapoznanie się zachodzącymi tendencjami. Wyniki są przedstawione przejrzysto, analiza wykresów jest zwięzła, a wnioski zrozumiałe dla czytelnika.

W celu uzyskania pełnej charakterystyki materiału, przeprowadził badania mikroskopowe próbek po zrywaniu. Obserwacje powierzchni przełomów powstałych w temperaturze pokojowej wskazywały na pękanie międzykrystaliczne. Dodatkowo bruzdy i wgłębienia były charakterystyczne dla pękania półkruchego. W podwyższonych temperaturach, powyżej 300°C, wgłębienia były wyraźniejsze, powstawały mikro pustki, co wskazywało na bardziej plastyczny tryb pękania. Należy podkreślić, że umiejętność prowadzenia obserwacji mikroskopowych, często na bardzo złożonych materiałach, i skorelowanie ich z wynikami testów wytrzymałościowych świadczy o dojrzałości naukowej doktoranta i jego gotowości do samodzielnej pracy badawczej.

W kolejnej części rozprawy Doktorant analizował podatność stopu na pełzanie i relaksację naprężeń w temperaturach 150°C, 250°C i 350°C. Wykorzystując standardowy model SLSM (ang. Standard Linear Solid Model) wykonał niezbędne obliczenia i zestawil uzyskane rezultaty teoretyczne z danymi eksperymentalnymi. Badania wykazały, że parametry modelu różnią się nieznacznie w całym zakresie temperatur, co wystarczająco odzwierciedla i prognozuje relaksację naprężeń oraz podatność stopu na pełzanie. W początkowym okresie, przez ok. 2h, zaobserwowano gwałtowny spadek naprężeń, po czym nastąpiła ich stabilizacja. Autor nie unika

trudnych dociekań naukowych i tłumaczy to zjawisko początkowym szybkim przegrupowaniem dyslokacji w strukturze krystalicznej stopu. Podatność materiału na pełzanie wzrasta w sposób ciągły wraz ze wzrostem temperatury, co wskazuje na postępujące odkształcenie plastyczne pod długotrwałym obciążeniem. Faza stanu ustalonego charakteryzuje się równowagą pomiędzy ruchem dyslokacyjnym a umocnieniem materiału. Wykonanie tak kompleksowych badań, wraz z analizą zachodzących zjawisk oraz zastosowanie modelu teoretycznego świadczy o dużym doświadczeniu doktoranta w tej dziedzinie i właściwym zintegrowaniu wszystkich czynników w spójną koncepcję naukową.

Po wykonaniu pełnej charakterystyki stopu osnowy Doktorant przeprowadził, podobnie jak wcześniej, analizę mikrostrukturalną kompozytu umocnionego cząstkami SiC. Zaobserwował jednorodny rozkład cząstek SiC, z silnym wiązaniem międzyfazowym z osnową. Testy mechaniczne w szerokim zakresie temperatur (20-350°C) pokazały, że kompozyt posiada wyraźnie wyższą wytrzymałość na rozciąganie oraz granicę plastyczności w stosunku do stopu nieumocnionego. Odnotował również wzrost modułu Younga, choć w tym przypadku wpływ temperatury jest niejednoznaczny. Materiał kompozytowy charakteryzuje się mniejszą plastycznością, w stosunku do osnowy wydłużenie jest wyraźnie mniejsze, szczególnie w podwyższonej temperaturze. Silnie połączone z osnową cząstki SiC powstrzymują deformację osnowy i zwiększają kruchość materiału. Ponadto występuje rozdrobnienie ziaren osnowy co ma również przełożenie na wzrost twardości o ok 20% i z pewnością przyczyni się do poprawy odporności na ścieranie. Choć we wszystkich przypadkach poprawa właściwości mechanicznych jest wyraźna, to należałoby jednak podjąć dyskusję nad aspektem ekonomicznym. W przybliżeniu oszacować wzrost kosztów materiału kompozytowego, uwzględniając proces wytwarzania oraz nakłady inwestycyjne. Szczególnie, że Doktorant na wszystkich etapach pracy tworzy spójny, wzajemnie się uzupełniający zestaw badań i dociekań naukowych. Dałoby to czytelnikowi pełen wgląd w charakterystyki badanego materiału i pozwoliło ocenić zasadność podjętych działań.

Obserwacje mikroskopowe przełomów próbek kompozytowych po testach mechanicznych wykazały, że na powierzchni występują mniejsze zagłębienia, materiał trudniej się odkształca między innymi w wyniku dobrego połączenia cząstek z osnową. Ze wzrostem temperatury plastyczność osnowy wzrasta, przełom jest bardziej nieregularny, co może również świadczyć o osłabieniu wiązań międzyfazowych.

W ostatniej części pracy Doktorant zastosował złożoną sekwencję obciążeń mechanicznych, potwierdzając tym samym duże doświadczenie laboratoryjne i wysoki poziom wiedzy. Po dobraniu odpowiednich parametrów i wykonaniu testów, przeprowadził wnikliwą i wymagającą ocenę wyników cyklicznych testów. Połączony wpływ relaksacji naprężeń, pełzania i sekwencyjnego obciążenia zmęczeniowego na trwałość kompozytu dowiódł, że obciążenie zmęczeniowo-pełzające znacząco zmniejsza trwałość materiału. Obniżenie to, Doktorant przypisał degradacji granic ziaren i zwiększonej propagacji pęknięć. Ponadto podczas relaksacji naprężeń następuje łączenie się pęknięć pierwotnych i wtórnych wokół cząstek SiC. W tych warunkach zmęczeniowa odporność materiału kompozytowego zmniejsza się o około 65%.

Tak jak poprzednio, wyniki badań mechanicznych zostały uzupełnione analizą mikroskopową. Przy obciążeniu zmęczeniowym występują liczne pęknięcia międzykrystaliczne, również wtórne, co wskazuje na złożone mechanizmy degradacji materiału, obejmujące procesy o charakterze plastycznym i kruchym. Podczas relaksacji naprężeń rozwijają się mikropęknięcia i dekohezja cząstek z osnową, co dodatkowo osłabia i zmniejsza żywotność materiału.

Przeprowadzone badania wnoszą istotny wkład w dziedzinę materiałów kompozytowych, zawierają informacje na temat ich odporności i trwałości w złożonych układach obciążeń. Pan mgr inż. Gofili Gudeta Sirata wykonał żmudne obserwacje przełomów próbek, próbując zdefiniować rolę umocnienia w przenoszeniu obciążeń i rozwoju pęknięć. Porównał przełomy materiałów kompozytowych z materiałami referencyjnymi co świadczy o właściwym zrozumieniu złożoności procesu i praktycznej umiejętności Doktoranta poruszania się w trudnym warsztacie inżynierii materiałowej i badań strukturalnych. Należy podkreślić, że przeprowadzone badania oraz opracowane metody połączonych testów mechanicznych posiadają bardzo duży potencjał użytkowy. Z powodzeniem mogą być wykorzystane w innych grupach materiałów kompozytowych, zarówno wytwarzanych metodami odlewniczymi, jak i metodami metalurgii proszków.

Podsumowując, na podstawie analizy przedłożonej rozprawy doktorskiej, do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktoranta zaliczam:

- określenie temperatury, przy której następuje wyraźny spadek wytrzymałości na rozciąganie kompozytu oraz wskazanie, że w tym samym zakresie temperatur wzrasta odkształcalność stopu osnowy,
- wyznaczenie liczby cykli, przy których dochodzi do zniszczenia materiału i stwierdzenie, że połączony efekt obciążenia zmęczeniowego i pełzania prowadzi do ponad 60% zmniejszenia żywotności materiału,
- wykazanie, że materiał kompozytowy jest podatny na odkształcenia w większym stopniu podczas testów na pełzanie niż gdy poddawany jest cyklicznym obciążeniom zmęczeniowym,
- stwierdzenie, że w materiale kompozytowym poddanym naprzemiennie testom na pełzanie i zmęczenie dochodzi do szybszej degradacji struktury między innymi w wyniku ruchu dyslokacji, propagacji pęknięć i dekohezji na granicy ziaren,
- zbadać efekt synergii obciążenia zmęczeniowego oraz relaksacyjnego naprężeń i stwierdzenie, że łącznie przyczyniają się one do 60% zmniejszenia trwałości materiału, znacznie większego niż w przypadku kiedy te czynniki działałyby osobno,
- wykonanie obszernych obserwacji mikroskopowych przełomów próbek i stwierdzenie, że obciążenie zmęczeniowo-pełzające prowadzi do licznych pęknięć międzykrystalicznych i wtórnych, znacznie intensywniejszych niż pod samym obciążeniem zmęczeniowym.

Należy podkreślić, że wymienione osiągnięcia naukowe są wynikiem trafnie dobranej ścieżki badawczej, wnikliwych obserwacji i pomiarów. Doktorant wykorzystał nowoczesne metody badawcze, w tym skaningową mikroskopię elektronową, testy mechaniczne w komorze cieplnej, a także model SLSM do analizy relaksacji naprężeń i pełzania materiałów. Wykonał kompleksowe badania właściwości mechanicznych oraz obserwacje mikroskopowe struktur i

przełomów próbek. Użycie tych wszystkich narzędzi jest dowodem bogatego warsztatu badawczego jaki zdobył Doktorant, a umiejętność dogłębnej analizy otrzymanych wyników badań świadczy o jego dużej wiedzy i dojrzałości naukowej.

Zapoznając się z przedłożoną pracą, która jest bardzo wartościowym studium nad fundamentalnymi zjawiskami towarzyszącymi testom zmęczeniowym oraz pełzania materiałów kompozytowych, zauważyłem pewne zagadnienia, które moim zdaniem powinny być poszerzone lub doprecyzowane. Uwagi te nie podważają merytorycznej wartości pracy, mam nadzieję przysłużą się dalszemu pogłębianiu prowadzonych analiz, a zostały sformułowane następująco:

- opis niektórych zagadnień, często na poziomie podstawowym, jak np. klasyfikacja stopów czy wpływ dodatków stopowych na właściwości stopu aluminium ma ograniczony związek z tematem badań, zmniejsza przejrzystość pracy i powinien być ograniczony. Choć trzeba przyznać, że świadczy o staranności Doktoranta i znajomości czynników wpływających pośrednio na właściwości materiałów kompozytowych,
- Doktorant zaznacza, że w próbki zostały wykonane według procedury opracowanej przez pracowników naukowych Katedry Technologii Materiałowych Politechniki Śląskiej. Wskazane byłoby zaznaczenie jaki jest wkład Doktoranta, jeśli jest, w przygotowaniu tych próbek, kształtowaniu struktury, podkreślenie własnych dokonań, których przecież nie brakuje w przedstawionej rozprawie,
- w pracy podkreśla się, że przyczyną umocnienia jest rozdrobnienie struktury czy też uzyskanie dobrego połączenia osnowy umocnieniem. Wskazana byłaby dyskusja jakie mechanizmy umocnienia mogą występować w materiałach kompozytowych i które są dominujące w tym przypadku,
- wspomniane przez Doktoranta termiczne niedopasowanie i potencjalna przyczyna dekohezji została słusznie poruszona i wymagałaby szerszego omówienia. Poczynając od procesu wytwarzania, kiedy osnowa kurczy się i zaciska na umocnieniu co wprowadza szereg naprężeń rozciągających, a kończąc na cyklach cieplnych, redukcji naprężeń resztkowych i wprowadzaniu na przemian ściskania i rozciągania,
- autor zauważa, że moduł Younga zarówno dla osnowy jak i kompozytu wzrasta do temperatury ok 150°C, a potem maleje. Interesująca byłaby interpretacja tego zjawiska. Podobnie jak wyjaśnienie przyczyny braku przewężenia, szyjki, w miejscu powstawania przełomu w próbie rozciągania w podwyższonych temperaturach.

5. Wniosek końcowy

W oparciu o analizę przedłożonej rozprawy doktorskiej należy stwierdzić, że Pan mgr. inż. Goftili Gudeta Sirata po przedstawieniu zakresu i celu pracy konsekwentnie realizował przyjęty program badań materiałowych i mechanicznych. Posługując się zaawansowanym aparatem badawczym przeprowadził obszerny i złożony cykl badań zarówno osnowy jak i materiałów kompozytowych. Doktorant osiągnął postawione cele pracy, stawiając zrozumiałe i jednoznaczne wnioski. Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa

doktorska pt. „Influence of combined relaxation, creeping and low-cycle fatigue on the final durability and structure of material” spełnia wymagania określone w ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (dz.U. z 2017 r. poz. 1789, z późn. zm.). Praca stanowi nowatorskie rozwiązanie problemu naukowego i potwierdza gruntowną wiedzę teoretyczną Doktoranta w zakresie badań właściwości mechanicznych materiałów kompozytowych i inżynierii materiałowej. Wnioskuje zatem o dopuszczenie Pana mgr inż. Gořtli Gudea Sirata do publicznej obrony rozprawy doktorskiej przed Radą Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej.

Krzysztof Naplocha

