

TŁUMACZENIE UWIERZYTELNIONE DOKUMENTU SPORZĄDZONEGO W JĘZYKU ANGIELSKIM

[dokument na papierze firmowym, na każdej stronie w każdej dane teleadresowe Uniwersytetu]
[logo VSB]

Uniwersytet Techniczny w Ostrawie
Wydział Mechaniczny
Katedra Mechaniki Stosowanej

prof. dr inż. Radim HALAMA
Katedra Mechaniki Stosowanej
Wydział Inżynierii Mechanicznej
VSB – Uniwersytet Techniczny w Ostrawie
708 00 Ostrava – Poruba, 17. listopada 2172/15
Republika Czeska

Ostrawa, 5.5.2025

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Jafara Amraei, zatytułowanej
„**Thermomechanical fatigue life assessment of polymer-matrix composites
under temperature control and different loading regimes**”.

Podstawa prawna:

Recenzja została przygotowana na wniosek Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Alicji Piaseckiej-Belkhat - pismo znak RDIME.512.69.2025 z dnia 27 marca 2025 roku.

1. Ogólna i formalna charakterystyka pracy

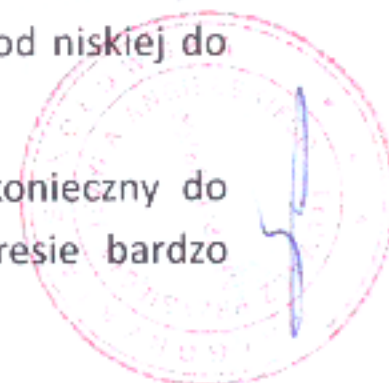
Praca doktorska zatytułowana „Thermomechanical fatigue life assessment of polymer-matrix composites under temperature control and different loading regimes [Termomechaniczna ocena trwałości zmęczeniowej kompozytów z matrycą polimerową pod kontrolą temperatury i przy różnych reżimach obciążenia]” autorstwa Pana Jafara Amraei dotyczy bardzo istotnego i aktualnego tematu w dziedzinie inżynierii materiałów konstrukcyjnych. Kompozyty z matrycą polimerową (ang. *polymer-matrix composites*, PMC), w tym polimery wzmacniane włóknem węglowym (ang. *carbon fiber-reinforced polymers*, CFRP) i polimery wzmacniane włóknem szklanym (ang. *glass fiber-reinforced polymers*, GFRP), są coraz częściej wykorzystywane w sektorze energetycznym (np. turbiny wiatrowe) i różnych dziedzinach transportu (np. motoryzacja, lotnictwo, kolejnictwo i żegluga morska) ze względu na ich korzystne połączenie wysokiego stosunku wytrzymałości do masy, trwałości, odporności na środowisko i elastyczności projektowania.

Pomimo tych zalet, powszechne stosowanie PMC jest utrudnione przez ograniczone zrozumienie ich zachowania zmęczeniowego w warunkach cyklicznego obciążenia. Ten brak wiedzy często prowadzi do zbyt zachowawczych praktyk projektowych, skutkujących niepotrzebnie ciężkimi i kosztownymi konstrukcjami, które z kolei ograniczają optymalizację wydajności. Kluczowym wyzwaniem jest uchwycenie wydajności zmęczeniowej PMC w różnych reżimach, od niskiej do bardzo wysokiej liczby cykli zmęczenia.

Jednym z podstawowych wąskich gardeł w tym obszarze jest zbyt długi czas konieczny do przeprowadzenia konwencjonalnych testów zmęczeniowych, szczególnie w zakresie bardzo

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 19.05.2025
RDIME1571511 2025

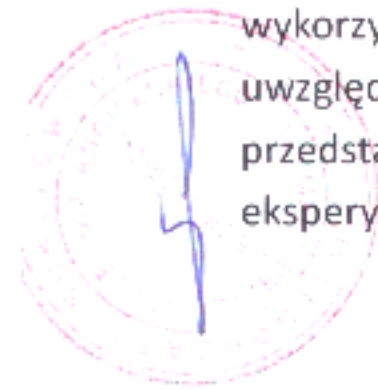


[koniec strony 1 z 5]

Niniejsza praca doktorska stanowi kompilację artykułów badawczych opublikowanych w czasopiśmie naukowych, które są powiązane tematycznie. Osiem artykułów badawczych, które składają się na ten zbiór, podzielono na siedem rozdziałów w oparciu o ich znaczenie tematyczne. Załączniki zawierają pełne teksty tych opracowań.

Prezentowana praca zawiera następującą treść:

Rozdział 2 koncentruje się na modelowaniu zjawiska samonagrzewania w obciążonych zmęczeniowo kompozytach z matrycą polimerową (PMC), oferując zarówno teoretyczne, jak i numeryczne spostrzeżenia. Rozpoczyna się od przeglądu podstawowych zasad termomechanicznych (sekcja 2.1), po którym następuje opracowanie modelu termosprężystego z wykorzystaniem kompleksowej 44-terminowej reprezentacji szeregu Prony'ego (sekcja 2.2), która uwzględnia zarówno zależność od temperatury, jak i częstotliwości. Wyniki symulacji zostały przedstawione i zweryfikowane w sekcji 2.3, wykazując dobrą zgodność z danymi eksperymentalnymi. Szczególnie ważnym wkładem jest identyfikacja radiacyjnego strumienia



ciepła jako istotnego czynnika wpływającego na odpowiedź termiczną, który musi zostać uwzględniony w celu przeprowadzenia dokładnego modelowania. Ponadto analiza potwierdza, że w przypadku cienkich PMC gradienty temperatury na całej grubości pozostają pomijalne, co potwierdza zasadność stosowania pomiarów temperatury powierzchni za pomocą termografii w podczerwieni. Rozdział kończy się jasnym podsumowaniem (sekcja 2.4), które potwierdza znaczenie i solidność proponowanego podejścia do modelowania.

Rozdział 3 przedstawia dogłębną analizę zmęczenia termomechanicznego wzmocnianych włóknem węglowym kompozytów polieteroketonowych (ang. *carbon fiber-reinforced polyether ether ketone composites*, CF/PEKK) w różnych warunkach obciążenia, w szczególności w testach zmęczeniowych o niskiej częstotliwości (ang. *low-frequency fatigue testing*, LFFT) i ultradźwiękowych testach zmęczeniowych (ang. *ultrasonic fatigue testing*, UFFT). W rozdziale zbadano ograniczenia tradycyjnych krzywych S-N w uchwyceniu odpowiedzi materiału w pełnym spektrum zmęczenia, szczególnie w strefie przejściowej pomiędzy LCF i VHCF. Aby sprostać temu wyzwaniu, autor wprowadza innowacyjne podejście oparte na szybkości rozpraszania ciepła, które umożliwia integrację danych zarówno z reżimów LFFT, jak i UFFT. Podejście to ułatwia również identyfikację krytycznego zakresu temperatur samonagrzewania (50-65°C), zapewniając praktyczne kryterium uszkodzenia dla eksperymentów zmęczeniowych o wysokiej częstotliwości. Ogólnie rzecz biorąc, rozdział ten pokazuje silne połączenie wglądu eksperymentalnego i innowacji metodologicznych.

[koniec strony 2 z 5]

Rozdział 4 oferuje wieloaspektową ocenę termomechanicznej trwałości zmęczeniowej PMC poprzez wprowadzenie i porównanie kilku innowacyjnych metodologii. Centralnym elementem rozdziału jest zastosowanie analizy opartej na entropii, która jest badana poprzez modelowanie szybkości rozpraszania ciepła, monitorowanie emisji akustycznej i śledzenie degradacji sztywności. W rozdziale wykazano, że same standardowe krzywe S-N są niewystarczające do uchwycenie ewolucji uszkodzeń przy różnych częstotliwościach obciążenia. W odpowiedzi autor przedstawia udoskonalone techniki szacowania trwałości zmęczeniowej z wykorzystaniem entropii zmęczeniowej (ang. *fracture fatigue entropy*, FFE), wskaźnika uszkodzeń opartego na entropii (ang. *entropy-based damage index*, EDI) i degradacji sztywności (ang. *stiffness degradation*, SD). Podejścia te pozwalają na bardziej zniuansowaną ocenę zachowania zmęczeniowego w różnych reżimach i etapach uszkodzenia, oferując praktyczne alternatywy dla przewidywania trwałości zmęczeniowej i testowania kryteriów końcowych. Integracja danych termograficznych i emisji akustycznej zwiększa solidność analizy, a proponowany trójliniowy model $\dot{q} - \sigma$ stanowi znaczący postęp w modelowaniu zmęczenia opartym na entropii.

Rozdział 5 bada rolę wypełniaczy opartych na materiałach nanowęglowych - w szczególności nanopłytek grafenowych (ang. *graphene nanoplatelets*, GNP) i nanowłókien węglowych (ang. *carbon nanofibers*, CNF) - w zwiększaniu wytrzymałości zmęczeniowej zmodyfikowanych kompozytów GFRP. Odkrycia wskazują na pełną niuansów interakcję: podczas gdy GNP mogą pogarszać wytrzymałość zmęczeniową, systemy nanocząstek hybrydowych (ang. *hybrid nanoparticle*, HNP) oferują wymierną poprawę w różnych reżimach zmęczeniowych. Analizy termograficzne i mechaniczne ujawniają, że implementacja termoprzewodzących nanowypełniaczy pomaga złagodzić efekty samonagrzewania, zmniejszając w ten sposób degradację termiczną i wydłużając żywotność. W rozdziale tym przedstawiono również podejścia

$\Delta T - \sigma$ oraz $\dot{q} - \sigma$ oparte na MPD jako dokładniejsze alternatywy dla tradycyjnych metod szacowania wytrzymałości zmęczeniowej opartych na MCR. Wyniki te wspierają wykorzystanie dostosowanych systemów nanowypełniaczy jako pasywnej strategii kontrolowania wzrostu temperatury - szczególnie cennej tam, gdzie aktywne chłodzenie jest niewykonalne.

Rozdział 6 koncentruje się na rozszerzeniu podejścia opartego na samonagrzewaniu w kierunku nieniszczącej oceny uszkodzeń PMC. Wykorzystując samonagrzewającą się wibrotermografię (ang. *self-heating vibrothermography*, SHVT), badanie potwierdza, że niewielkie wzrosty temperatury (poniżej 2°C) nie wpływają na integralność materiału, potwierdzając nieniszczący charakter metody. Kluczowym wkładem tego rozdziału jest opracowanie skutecznej strategii selekcji nieprzetworzonych termogramów, umożliwiającej wyraźną wizualizację uszkodzeń z dużych zbiorów danych. Jest to dodatkowo ulepszone dzięki dedykowanemu algorytmowi przetwarzania końcowego, który znacznie poprawia identyfikację i lokalizację uszkodzeń. Przedstawiona metodologia rozszerza praktyczną użyteczność SHVT, szczególnie w zastosowaniach o ograniczonej dostępności, takich jak inspekcje komponentów lotniczych.

Ostatni rozdział podsumowuje kluczowe wnioski z pracy, podkreślając postępy w modelowaniu samonagrzewania, ocenie trwałości zmęczeniowej i wykrywaniu uszkodzeń w PMC. W rozdziale podkreślono pomyślną realizację celów badawczych i nakreślono przyszłe kierunki badań skoncentrowane na złożonych scenariuszach obciążenia, zaawansowanej kwantyfikacji uszkodzeń, zoptymalizowanych systemach materiałowych, skutecznych strategiach chłodzenia i dalszym rozwoju SHVT dla realistycznych i trójwymiarowych struktur kompozytowych.

2. Ocena tematu i celu zakresu pracy doktorskiej

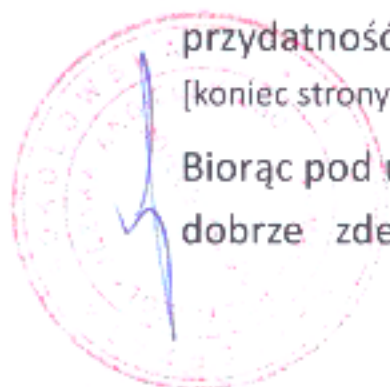
Praca doktorska dotyczy innowacyjnego i bardzo istotnego tematu skoncentrowanego na termomechanicznym zachowaniu zmęczeniowym i ocenie uszkodzeń kompozytów z matrycą polimerową (PMC), ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska samonagrzewania. Praca jest silnie motywowana kluczowymi ograniczeniami obecnych metod przewidywania trwałości zmęczeniowej i oceny nieniszczącej. Postawiona hipoteza jest jasna, dobrze uzasadniona i bezpośrednio ukierunkowana na główne wyzwanie: poprawę oceny zmęczenia poprzez uwzględnienie i złagodzenie efektu samonagrzewania.

Cele badawcze są logicznie wyprowadzone ze zidentyfikowanych luk w wiedzy i kompleksowo obejmują zarówno aspekty modelowe, jak i eksperymentalne, w tym modelowanie zmęczenia, przenoszalność między reżimami, szacowanie trwałości zmęczeniowej za pomocą nowych wskaźników, projektowanie materiałów poprzez hybrydyzację nanowypełniaczy oraz rozszerzenie SHVT na płytkowe struktury kompozytowe. Cele te są dobrze skonstruowane i odpowiadają jasno zdefiniowanym kamieniom milowym, z których każdy jest bezpośrednio omówiony w rozdziałach pracy doktorskiej.

Zakres pracy jest ambitny, ale realistyczny i dobrze dostosowany do ogólnej hipotezy badawczej. Kamienie milowe odzwierciedlają rygorystyczne i metodyczne podejście do walidacji hipotezy i realizacji celów badawczych, potwierdzając silne podstawy koncepcyjne pracy i wysoką przydatność zarówno dla badań akademickich, jak i stosowanych materiałów.

[koniec strony 3 z 5]

Biorąc pod uwagę powyższe, można stwierdzić, że wybrany temat pracy doktorskiej jest aktualny, dobrze zdefiniowany i ma duże znaczenie dla dziedziny oceny trwałości zmęczeniowej



kompozytów z matrycą polimerową. Cele są wystarczająco ambitne, a jednocześnie realistyczne do osiągnięcia w ramach badań doktoranckich. Praca wyróżnia się interdyscyplinarnym podejściem, które łączy charakterystykę materiałów, modelowanie mechaniczne, zaawansowane techniki eksperymentalne (w tym LFFT, UFFT i SHVT), przetwarzanie sygnałów oraz opracowanie nowych metodologii oceny. W rezultacie praca przyczynia się zarówno do pogłębienia zrozumienia podstawowych zjawisk fizycznych, jak i do stworzenia praktycznych narzędzi i metod o dużym potencjale zastosowania w lotnictwie, motoryzacji i monitorowaniu stanu konstrukcji.

3. Ocena pracy doktorskiej

Komentarze towarzyszące poszczególnym artykułom są ogólnie dobrze napisane i skutecznie łączą artykuły w spójną narrację. Jednak z perspektywy czytelnika pewnym wyzwaniem było jasne określenie, który artykuł jest omawiany w danym miejscu tekstu głównego. Częste odwoływanie się do początkowych sekcji - w szczególności do oświadczenia o wkładzie autora i listy publikacji - było konieczne, aby dopasować każdy komentarz do odpowiedniej publikacji. Bardziej wyraźny system odniesień (np. poprzez numerowanie artykułów i konsekwentne odwoływanie się do nich w całym komentarzu) znacznie poprawiłby czytelność i przejrzystość pracy.

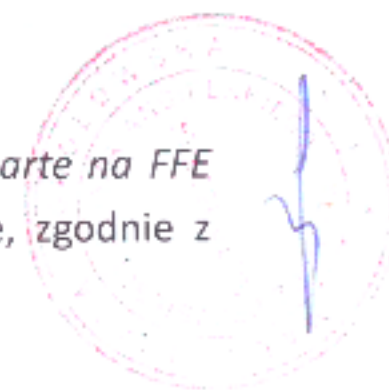
Drobna, ale zauważalna kwestia formalna dotyczy stosowania skrótów w tekście głównym. Zwyczajowo w pracach naukowych każdy skrót wprowadza się, podając najpierw pełny termin, a następnie skrót w nawiasie przy pierwszym wystąpieniu (np. polimer wzmocniony włóknem węglowym, CFRP). W niniejszej pracy autor często używa skrótów bez ich wcześniejszego zdefiniowania w tekście głównym, zakładając, że czytelnik je zna lub wymagając od niego zapoznania się z ich wykazem. Chociaż skróty są rzeczywiście wymienione, praktyka ta może zakłócać proces czytania i zmniejszać dostępność, szczególnie dla odbiorców interdyscyplinarnych. Bardziej przyjaznym dla czytelnika podejściem byłoby zdefiniowanie wszystkich skrótów w wierszu przy ich pierwszej wzmiance. Na przykład skrót SD nie został uwzględniony w wykazie skrótów, chociaż został prawidłowo wprowadzony w tekście głównym.

Pomimo tych drobnych problemów, ogólna jakość i znaczenie pracy pozostają wyjątkowo wysokie. Kandydat wykazał się dogłębnym zrozumieniem tematu, o czym świadczy autorstwo dwóch obszernych artykułów przeglądowych - jeden z nich jest już wysoko cytowany w tej dziedzinie. Projekt eksperymentalny jest dobrze przemyślany i obejmuje odpowiednie metodologie, które łączą testy zmęczeniowe o niskiej i wysokiej częstotliwości z zaawansowanymi technikami termograficznymi. Co więcej, praca wykorzystuje rygorystyczne ramy numeryczne wspierane przez modelowanie oparte na fizyce i metody kwantyfikacji uszkodzeń. Interdyscyplinarny charakter pracy - obejmujący naukę o materiałach, inżynierię mechaniczną, analizę termiczną i przetwarzanie sygnałów - wzmacnia zarówno jej wkład naukowy, jak i praktyczne zastosowanie.

Podsumowując, drobne niedociągnięcia formalne nie umniejszają wysokiej wartości naukowej pracy. Stanowi ona istotny i oryginalny wkład w dziedzinę charakterystyki zmęczeniowej i nieniszczącej oceny kompozytów z matrycą polimerową. Jej wyniki mają bezpośrednie znaczenie dla praktyki technologicznej, szczególnie w zastosowaniach lotniczych i konstrukcyjnych, gdzie przewidywanie trwałości i zaawansowana diagnostyka mają kluczowe znaczenie.

Pytania:

- 1) W komentarzu towarzyszącym rysunkowi 4.8 stwierdzono, że „krzywe S-N oparte na FFE nieznacznie zaniżają liczbę cykli w reżimie LCF (poniżej 10^5 cykli)”. Jednakże, zgodnie z



rysunkiem, stwierdzenie to wydaje się dokładne dla przypadku 40 Hz, ale nie dla przypadku 50 Hz, gdzie krzywa oparta na FFE wydaje się zawyżać trwałość zmęczeniową w reżimie LCF. Czy autor mógłby wyjaśnić tę pozorną rozbieżność i doprecyzować możliwe przyczyny odmiennego zachowania przy 50 Hz?

[koniec strony 4 z 5]

- 2) W pracy przedstawiono obiecujące wyniki przewidywania trwałości zmęczeniowej przy użyciu metod maksymalnego współczynnika kumulacji (ang. *Maximum Cumulative Rate*, MCR) i maksymalnego uszkodzenia zmęczeniowego (ang. *Maximum Fatigue Damage*, MFD), szczególnie w stałych warunkach obciążenia z dolną granicą maksymalnego naprężenia ustawioną na 50 MPa (rys. 5.1). Jednak w celu praktycznego zastosowania w projektowaniu inżynierskim lub monitorowaniu stanu konstrukcji konieczne jest zrozumienie solidności tych metod w szerszym zakresie warunków obciążenia. Czy autor mógłby wyjaśnić wrażliwość modeli MCR i MFD na zmiany maksymalnego poziomu naprężenia? W szczególności, jak wpłynęłoby to na przewidywaną trwałość zmęczeniową, gdyby maksymalne naprężenie było znacznie wyższe (lub niższe) niż 50 MPa? Odpowiedź na to pytanie może dostarczyć ważnych informacji na temat możliwości uogólnienia i zastosowania proponowanych podejść w świecie rzeczywistym.

4. Wnioski końcowe

Pomimo wymienionych powyżej mankamentów, treść i forma pracy doktorskiej Pana Jafara Amraei jednoznacznie wskazują na jego specjalistyczną wiedzę z zakresu termografii i zmęczenia materiałów kompozytowych. Sposób, w jaki praca została skonstruowana i zaprezentowana, potwierdza, że kandydat jest w stanie samodzielnie zaplanować, przeprowadzić i zakończyć zaawansowane badania naukowe z wykorzystaniem współczesnych metod naukowych i inżynierskich.

Praca zawiera oryginalne rozwiązania dobrze sformułowanych problemów naukowych, poparte solidnymi podstawami teoretycznymi i interdyscyplinarną metodologią. Wszystkie postawione cele pracy zostały w pełni zrealizowane, a postawione hipotezy zostały odpowiednio zweryfikowane wynikami badań eksperymentalnych i modelowych. W mojej ocenie, publikacja spełnia kryteria pracy doktorskiej i wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Spełnia zatem wymogi ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 r. poz. 1571) art. 187. Rekomenduję przyjęcie pracy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Pod warunkiem, że Pan Jafar Amraei z powodzeniem obroni swoją pracę przed komisją egzaminacyjną, rekomenduję przyznanie mu stopnia naukowego doktora.

[podpis odręczny nieczytelny]

[koniec strony 5 z 5]

Ja, Małgorzata Sokołowska, tłumacz przysięgły języka angielskiego w Gliwicach, nr wpisu na listę tłumaczy przysięgłych TP/1509/05. Poświadczam zgodność niniejszego tłumaczenia z okazanym mi dokumentem pdf sporządzonym w języku angielskim. Gliwice, dnia 19 maja 2025 r. Repertorium nr 214/2025.

