

TLUMACZENIE 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

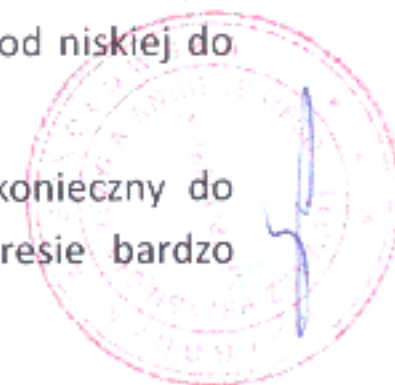
Praca doktorska zatytułowana „Thermomechanical fatigue life assessment of polymer-matrix composites under temperature control and different loading regimes [Termomechaniczna ocena trwałości zmęczeniowej kompozytów z matrycą polimerową pod kontrolą temperatury i przy różnych reżimach obciążenia]” autorstwa 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
RDIME15715112025



wysokiej liczby cykli ($\geq 10^9$ cykli), gdzie testy przeprowadzane przy typowych częstotliwościach obciążenia (≤ 5 Hz) mogą trwać kilka lat. Testy zmęczeniowe o wysokiej częstotliwości oferują praktyczne rozwiązanie poprzez znaczne skrócenie czasu ich trwania. Jednak ze względu na lepkosprężystą naturę PMC, takie reżimy obciążenia wywołują efekty samonagrzewania, które generują złożone interakcje termomechaniczne. Interakcje te mogą prowadzić albo do stabilnej pracy, albo do znacznej degradacji materiału, w zależności od stopnia wzrostu temperatury, komplikując w ten sposób analizę i modelowanie uszkodzeń wywołanych zmęczeniem.

[koniec strony 1 z 5]

Recenzowana praca doktorska ma na celu sprostanie temu wieloaspektowemu wyzwaniu poprzez opracowanie modeli opartych na fizyce, aby zrozumieć i modelować zjawisko samonagrzewania się PMC poddawanych cyklicznym obciążeniom. Ponadto przedstawia ona innowacyjne metodologie oceny i łagodzenia szkodliwych skutków samonagrzewania oraz bada możliwość wykorzystania tego zjawiska jako narzędzia diagnostycznego do oceny integralności strukturalnej. Biorąc pod uwagę rosnącą zależność przemysłu od PMC i pilną potrzebę niezawodnych, efektywnych czasowo technik oceny zmęczenia, niniejsza praca stanowi znaczący i aktualny wkład zarówno w badania akademickie, jak i praktykę inżynierską.

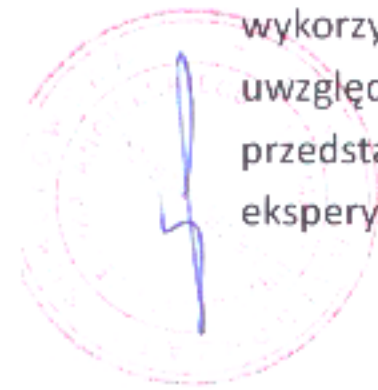
Niniejsza praca doktorska stanowi kompilację artykułów badawczych opublikowanych w czasopismach naukowych, które są powiązane tematycznie. Osiem artykułów badawczych, które składają się na ten zbiór, podzielono na siedem rozdziałów w oparciu o ich znaczenie tematyczne. Załączniki zawierają pełne teksty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

Oceniana praca doktorska liczy 81 stron i zawiera bibliografię ze 126 odnośnikami. Składa się z siedmiu rozdziałów przedstawiających dyskusję i wyniki, poprzedzonych przedmową, listą rysunków, listą tabel, listą skrótów i podziękowaniami.

Prezentowana praca zawiera następującą treść:

Rozdział 1 stanowi dobrze zorganizowane i kompleksowe wprowadzenie do tematu, skutecznie kontekstualizując zjawisko samonagrzewania w szerszym zakresie analizy zmęczeniowej kompozytów z matrycą polimerową (PMC). Rozdział logicznie przechodzi od podstawowego opisu zjawiska samonagrzewania (sekcja 1.1) poprzez jego wpływ na zachowanie zmęczeniowe (sekcja 1.2), obecne strategie modelowania i ich ograniczenia (sekcja 1.3) oraz praktyczne podejścia do przyspieszonej oceny zmęczenia (sekcja 1.4). Uwzględnienie strategii łagodzących (rozdział 1.5) i potencjału badań nieniszczących opartych na termografii (rozdział 1.6) świadczy o świadomości autora zarówno w wymiarze teoretycznym, jak i praktycznym. Końcowe sekcje (1.7 i 1.8) jasno definiują cele badawcze i ramy metodologiczne, tworząc solidne podstawy dla pozostałej części pracy.

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

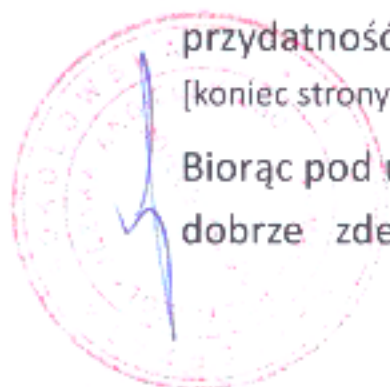
Praca doktorska dotyczy innowacyjnego i bardzo istotnego tematu skoncentrowanego na termomechanicznym zachowaniu zmęczeniowym i ocenie uszkodzeń kompozytów z matrycą polimerową (PMC), ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska samonagrzewania. Praca jest silnie motywowana kluczowymi ograniczeniami obecnych 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 zdefiniowanemu 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.

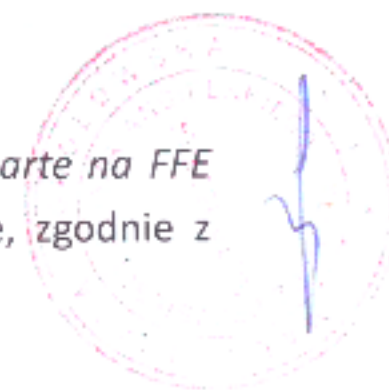
Drobna, ale zauważalna kwestia formalna dotyczy stosowania skrótów w tekście głównym. Zwyczajowo w pracach naukowych każdy skrót wprowadza się, podając najpierw pełny termin, a następnie skrót w nawiasie przy pierwszym wystąpieniu (np. polimer wzmocniony włóknem węglowym, CFRP). W niniejszej pracy autor 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 Sokółowska, 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.

TŁUMACZ PRZYSIĘGŁY
JĘZYKA ANGIELSKIEGO

mgr Małgorzata Sokółowska

