

Bydgoszcz, 28.05.2025 r.

Dr hab. inż. Adam Lipski
Profesor PBS

Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji

Al. prof. Sylwestra Kaliskiego 7
85-796 Bydgoszcz

e-mail: Adam.Lipski@pbs.edu.pl

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr. inż. Adama Brodeckiego
pt. „Monitorowanie stopnia rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych stali kotłowych
wspomagane optycznymi systemami pomiarowymi”

Podstawa opracowania recenzji:

Pismo Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego, nr RN-D-0002.8.2024 z dnia 31.03.2025 r. w sprawie powołania na recenzenta rozprawy doktorskiej w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora mgr. inż. Adamowi Brodeckiemu.

1. Charakterystyka ogólna pracy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska obejmuje 176 stron, w tym 12 tabel i 99 rysunków. Podzielona jest na 6 rozdziałów. Oprócz nich zamieszczono spis treści, spisy literatury, rysunków i tabel, wykaz stosowanych oznaczeń oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Zawiera ona również 2 dodatki. Sposób podziału treści i kolejności rozdziałów odpowiada tego typu pracom. W opinii recenzenta jedynie spis ilustracji i spis tabel lepiej byłoby umieścić na końcu pracy.

Oprócz wymienionych wyżej elementów na końcu opracowania zamieszczono listę publikacji autorstwa lub współautorstwa Doktoranta, listę abstraktów konferencyjnych oraz zgłoszenia patentowe i patenty. Nie podlegały one ocenie w ramach niniejszej recenzji.



Rozdział 1 (8 stron) „Wstęp” przedstawia cel i zakres pracy, tezę (w zasadzie trzy tezy) oraz ogólne tło podjętego zagadnienia w formie opisu wybranych charakterystyk zmęczeniowych oraz krótkiej prezentacji materiałów stosowanych w energetyce i problemów wynikających z ich eksploatacji.

Rozdział 2 (48 stron) zatytułowany „Usytuowanie tematyki rozprawy w świetle aktualnego stanu wiedzy” poświęcono omówieniu wpływu degradacji materiałów na ich eksploatację, parametrom uszkodzenia powiązanych z procesem zmęczenia i degradacji oraz ich monitorowaniu w oparciu o metody nieniszczące. W rozdziale tym zdefiniowano zastosowany w pracy parametr D oparty o wskaźnik uszkodzenia ϕ opisany addytywnym związkiem uwzględniającym odkształcenia wywołane cykliczną plastycznością i ratchettingiem.

Rozdział 3 (25 stron) zawiera charakterystykę materiałów badanych w ramach rozprawy: próbek pobranych z odcinków rurociągów ze stali P91 oraz stali 10H2M w stanie dostawy oraz po długotrwałej eksploatacji (odpowiednio: 80 tys. godzin oraz 280 tys. godzin) w temperaturze 540 °C oraz ciśnieniu wewnętrznym (odpowiednio: 8,4 MPa oraz 2,9 MPa). Rozdział ten zawiera również program badań, metodykę oraz podstawy teoretyczne zastosowanych optycznych metod eksperymentalnych: cyfrowej korelacji obrazu DIC oraz elektronicznej interferometrii plamkowej ESPI. Zdecydowanie niepotrzebnymi w opinii recenzenta fragmentami tej części pracy jest zamieszczenie dosyć szczegółowych instrukcji obsługi wykorzystanych systemów badawczych.

Rozdział 4 (21 stron) przedstawia badania wstępne przeprowadzone na próbkach ze stali P91: próby statycznego rozciągania, badania zmęczeniowe oraz analizę mikrostruktury. W punkcie 4.2 tego rozdziału nie przedstawiono mikrostrukturalnej analizy rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych, a jedynie dokonano porównania mikrostruktury: w stanie dostawy, po eksploatacji oraz analizę fraktograficzną przełomów po badaniach zmęczeniowych. W punkcie 4.3 i 4.4 zamieszczono założenia „alternatywnego sposobu analizy rozwoju uszkodzenia podczas zmęczenia” opartego o zjawisko cyklicznej plastyczności i ratchettingu oraz „sposobu określania granicznej wartości amplitudy naprężenia zmęczeniowego na podstawie uszkodzenia”. W dalszej części przeprowadzono badania weryfikujące przydatność metody cyfrowej korelacji obrazu oraz elektronicznej interferometrii plamkowej do realizacji założonego programu badań wskazując na istotne ograniczenia w zastosowaniu tej ostatniej metody podczas pracy z serwohydraulicznymi maszynami wytrzymałościowymi. W związku z tym dalszej części rozprawy do badań zastosowano jedynie system DIC.



W Rozdziale 5 (38 stron) Doktorant zamieścił własną propozycję kompleksowej analizy rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych na przykładzie stali 10H2M. Jest to najobszerniejsza część pracy zawierająca wyniki badań właściwości wytrzymałościowych oraz badań zmęczeniowych stali 10H2M w stanie dostawy oraz po długotrwałej eksploatacji. Przeprowadzone podczas prób zmęczeniowych badania metodą cyfrowej korelacji obrazu posłużyły do wyznaczenia zmiany w czasie wcześniej zdefiniowanego w Rozdziale 2 odkształceniowego wskaźnika uszkodzenia zmęczeniowego ϕ oraz parametru uszkodzenia zmęczeniowego D. Wyznaczone przebiegi parametrów posłużyły do wyznaczenia „granicznej amplitudy naprężenia przy zmęczeniu”.

Pracę podsumowuje Rozdział 6 (6 stron) zawierający uwagi końcowe i wnioski.

W spisie literatury oznaczonym jako Rozdział 7 pracy zamieszczono 201 pozycji, z czego 2 są publikacjami współautorskimi Doktoranta.

Do pracy dołączono 2 dodatki prezentujące zmiany parametrów ϕ oraz D w trakcie obciążenia cyklicznego wyznaczone dla stali P91 oraz 10H2M określone przez Doktoranta mianem „bazy danych”. W opinii recenzenta wyniki badań przedstawione w tabelach A.1 oraz B.1 stanowią bardzo ważny element pracy i powinny być w niej bezpośrednio zamieszczone.

2. Ocena pracy

Oceniając wybór tematu pracy wskazać należy, iż ze względu na wciąż istotne uzależnienie nie tylko krajowej energetyki od bloków energetycznych i elektrociepłowni niejednokrotnie pracujących już poza założonym w trakcie projektowania czasem eksploatacji bardzo dobrze wpisuje się ona w aktualną tematykę badawczą realizowaną przez krajowe zespoły badawcze, m.in. z Politechniki Częstochowskiej czy Politechniki Bydgoskiej.

Autor rozprawy postawił trzy tezy, których prawdziwość w dalszej części opracowania odpowiednio wykazał. Odnośnie do poprawności ich sformułowania należy wskazać, że teza nie formułuje się w formie przypuszczającej (teza druga: „(...) wskaźniki uszkodzenia zmęczeniowego mogą stanowić konkurencyjną alternatywę (...))”, a w przypadku tezy pierwszej nie można przypisać mocy sprawczej w stosunku do poziomu degradacji materiału, a jedynie powiązanie pomiędzy tym poziomem a zmianami w mikrostrukturze materiału.

W związku z postawionymi tezami pracy jej cele zdefiniowano jako „(...) ocenę możliwości wykorzystania optycznych systemów pomiarowych podczas badania próbek

materiałów, poddanych długotrwałej eksploatacji w warunkach podwyższonej temperatury i ciśnienia wewnętrznego na ich wytrzymałość, ze szczególnym uwzględnieniem wysoko i niskocyklowego zmęczenia. Dodatkowo podjęto próby określenia dynamiki rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego, używając w tym celu parametrów uszkodzenia materiału (...)".

Przytoczonym powyżej tezom oraz zdefiniowanym celom została podporządkowana struktura pracy: zaczynając od przeglądu aktualnego stanu wiedzy, poprzez opis badanych materiałów, plan badań i opis metodyki, po badania wstępne zrealizowane na próbkach ze stali P91 przy zastosowaniu metody cyfrowej korelacji obrazu oraz elektronicznej interferometrii plamkowej i badania zasadnicze na próbkach ze stali 10H2M wykonane przy zastosowaniu jedynie metody cyfrowej korelacji obrazu. Uznać ją należy za logiczną i w pełni odpowiadającą tego typu pracom naukowym.

Rozdział 1 oraz Rozdział 2 przedstawionej rozprawy zawierają krótką charakterystykę procesu zmęczenia, w tym: zależności opisujących relację obciążenie lub odkształcenie – liczba cykli do zniszczenia, wpływu wybranych parametrów i warunków eksploatacji na właściwości wytrzymałościowe i strukturę materiałów, parametrów stosowanych do oceny stopnia uszkodzenia materiałów poddanych obciążeniom zmiennym oraz metod nieniszczących wykorzystywanych do monitorowania tego uszkodzenia. Te elementy pracy wraz z zamieszczonymi w Rozdziale 2 i Rozdziale 3 podstawami teoretycznymi optycznych metod eksperymentalnych w niej użytych wskazują na to, że **Doktorant w obszarze tematyki objętej zakresem pracy prezentuje wymagany poziom ogólnej wiedzy teoretycznej umiejscowionej w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.**

Program badań przedstawiony na Rys. 3.8 obejmuje zróżnicowane pod względem obiektów badań, jaki i warunków próby rozciągania w temperaturze pokojowej, próby zmęczeniowe stałoamplitudowe z wykorzystaniem optycznych systemów pomiarowych, jak i analizy mikrostruktury i fraktograficzne. Zamieszczony w pracy opis zrealizowanych prac wskazuje na wykonany na odpowiednim poziomie proces badawczy przebiegający od zaprojektowania i pobrania próbek, wykonania badań przy zastosowaniu zaawansowanych maszyn i systemów badawczych, po analizę ich wyników i próbę ich uogólnienia. Możliwe jest więc na tej podstawie stwierdzenie, że **Doktorant wykazał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.**

Przedstawiona rozprawa zawiera elementy oryginalne, wśród których, oprócz oryginalnych wyników badań, wskazać należy przede wszystkim:



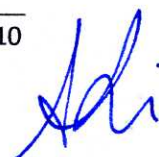
1. Propozycję addytywnej miary uszkodzenia ϕ uwzględniającej kumulacyjny charakter związany z szerokością pętli histerezy („cykliczna plastyczność”) oraz cyklicznym pełzaniem („ratchetting”) wykorzystanej do wyznaczenia parametru uszkodzenia D.
2. Propozycję metody wyznaczania granicy zmęczenia w oparciu o wykładnik funkcji potęgowej opisującej fragment krzywej prezentującej zmianę parametru ϕ lub D wraz ze wzrostem liczby cykli zmęczeniowych.

Zaproponowana miara uszkodzenia ϕ oraz oparty na niej parametr uszkodzenia D zostały w pracy wyznaczone eksperymentalnie na podstawie połowych pomiarów odkształceń zrealizowanych metodami optycznymi. Wyznaczona za ich pomocą wartość granicy zmęczenia jest porównywalna do wartości odczytanej bezpośrednio z wyznaczonych wykresów zmęczeniowych.

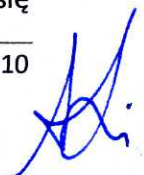
Pomimo wymienionych poniżej uwag krytycznych odnoszących się m.in. do tej części rozprawy stwierdzić można, że **stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.**

Przechodząc do uwag krytycznych lub wątpliwości, w dużej mierze dyskusyjnych, poniżej wymieniono ważniejsze z nich w kolejności ich powstawania podczas analizy niniejszej rozprawy doktorskiej:

1. Norma PN-EN ISO 6892-1:2009 w wersji polskiej definiuje R_m jako „wytrzymałość na rozciąganie” a nie „*granice wytrzymałości*”; późniejsze wydania w wersji angielskiej tej normy definiują tę wielkość jako „tensile strength” – np. str. 18. Niepoprawnie oznaczano w pracy umowną granicę plastyczności ($R_{0,2}$ zamiast $R_{p0,2}$) – np. rys. 4.1 na str. 99.
2. W pracy Autor w opisie materiałów stosowanych w energetyce wskazuje na stale przeznaczone do pracy w podwyższonej temperaturze (str. 23) nie określając jaki zakres temperatury pod tym pojęciem rozumie. Czy temperatura eksploatacji stali badanych w pracy wynosząca 540 °C nie odnosi się już do zakresu temperatur wysokich?
3. Autor czasem myli bardzo istotne pojęcia „amplituda naprężenia” oraz „zakres naprężenia” i stosuje je zamiennie, np. w Rozdziale 5.5 na rys. 5.9 350 MPa to „zakres”, a na rys. 5.10 to „amplituda”. Ponadto nieprawidłowo oznacza amplitudę naprężenia poprzedzając jej wartość znakiem „ \pm ” (np. rys. 2.1 – str. 27).
4. Na rys. 2.11a na str. 36 wartość granicy plastyczności jest wyższa niż wartość wytrzymałości na rozciąganie – dlaczego?
5. Tabela 2.2 została opracowana na podstawie pozycji literatury [64], a nie [55].



6. Jak należy rozumieć uśrednione parametry mechaniczne postaci np. „903 (± 16)” – tab. 4.1 str. 99? Dlaczego w tym przypadku zawierają one wartości umieszczone w nawiasach zwykłych w odróżnieniu od wartości bez nawiasu umieszczonych np. w tab. 2.3 str. 38?
7. Czy zmęczenie wysokocyklowe definiuje się na podstawie wartości amplitudy naprężenia o wartości niższej niż granica plastyczności materiału? – str. 47.
8. Parametr uszkodzenia D zdefiniowany wzorem (2.42) nie umożliwia monitorowania stopnia uszkodzenia materiału w czasie rzeczywistym jak na to wskazano w Rozdziale 6, gdyż wymaga on znajomości wartości końcowej miary uszkodzenia φ_{\max} występującej w mianowniku wzoru, a odpowiadającej ostatniemu niszczącemu cyklowi obciążenia.
9. Nieprawidłowo zdefiniowano wielkości $(\varphi_N)_{\min}$ oraz $(\varphi_N)_{\max}$ w opisie wzoru (2.42) jako wartości odkształcenia całkowitego odpowiednio w pierwszym i ostatnim cyklu. Zgodnie ze wzorami (2.41) i (2.44) oraz (2.45) wielkości te stanowią skumulowaną wartość zakresu odkształcenia plastycznego oraz skumulowaną wartość odkształcenia stanowiącego wynik cyklicznego pełzania wyznaczonych dla wszystkich pętli histerezy. W pracy Autor nie przedstawił przebiegów zmian wartości wymienionych odkształceń składowych w funkcji liczby cykli, stąd nie można jednoznacznie określić charakteru wielkości przyjętych do wyznaczania wartości parametru uszkodzenia D. Stanowi to istotny brak w przedstawionej rozprawie.
10. Generalnie przedstawione w pracy mapy odkształceń wyznaczone metodą ESPI nie określają jednoznacznie jednostki (mm/mm lub %), co istotnie utrudnia ich interpretację. Podobnie brak jednostek dotyczących odkształcenia występuje np. na rys. 4.6 (str. 103). Takiego problemu nie ma w przypadku wyników zaprezentowanych np. na rys. 4.12 (str. 111).
11. W jaki sposób przeprowadzono skalowanie osi odciętych na rys. 2.18 – str. 59?
12. *„Porównanie prostych będących aproksymacją punktów uzyskanych na drodze eksperymentu pozwala określić tzw. trwałość zmęczeniową, czyli wartość amplitudy naprężenia, przy której materiał osiągnął 10^7 cykli bez pęknięcia próbki”* – porównanie jakich prostych i czy chodzi tutaj na pewno o trwałość zmęczeniową? – str. 98.
13. Jakie odkształcenie zamieszczono w tabeli 4.1 (str. 99) oraz tabeli 4.3? – str. 109.
14. Brak jest opisu krzywych zmęczeniowych przedstawionych na rys. 4.2 (str. 100). Dlaczego w układzie semilogarytmicznym nie są one liniami prostymi?
15. Niejasny lub w ogóle nie opisany w pracy jest sposób wyznaczenia odkształceń przedstawionych na rys. 4.6 (str. 103) oraz rys. 4.7 (str. 104). Pomiar odbywał się



- za pomocą ekstensometru czy polową metodą optyczną?
16. Co oznacza sformułowanie ze str. 105 „Zmiany parametru (...) w całym zakresie wartości amplitudy naprężenia (...)” odnoszące się do rys. 4.8 (str. 106)? Czy nie były to badania stałoamplitudowe?
 17. Rozdział 4.4 powinien zawierać tabele zamieszczone w dodatkach do rozprawy. Ułatwiłoby to znacząco analizę tego fragmentu pracy. Ponadto w przypadku aproksymacji wyników badań warto przedstawić uzyskaną postać funkcji aproksymującej oraz miarę jakości dopasowania R^2 (np. rys. 4.9, rys. 4.10, rys. 4.11). Dlaczego na rys. 4.10a brak jest jednego wyniku (420 MPa) dla materiału eksploatowanego?
 18. Jeżeli w trakcie eksploatacji rury ciepłowniczej poddawana ona jest obciążeniom o charakterze odzerowo-tętniącym dodatnim, to dlaczego badania stali P91 zrealizowano dla obciążeń wahadłowych? – str. 109.
 19. W opisie badań procesu zmęczenia wspomaganych metodami optycznymi (Rozdział 4.5) brak jest informacji dotyczących planu badań: co najmniej przyjętych poziomów obciążenia i liczby próbek.
 20. Generalnie nieprawidłowo opisano polowe rozkłady odkształceń wyznaczone metodą ESPI (np. rys. 4.12 str. 111 i dalej). Czy wysokość i szerokość obszaru podlegającemu analizie zmieniała się czy była stała? Lepiej byłoby umieścić rysunek pokazujący umiejscowienie obszaru pomiarowego na próbce wraz z układem współrzędnych, np. X dla kierunku wzdłuż jego szerokości oraz Y dla kierunku wzdłuż jego wysokości.
 21. Wartość na osi rzędnych na rys. 4.19 (str. 116) to nie „zakres naprężenia” a wartość naprężenia w trakcie realizacji cyklu obciążenia, na osi odciętych brak jednostki odkształcenia. Brak jest informacji jak na podstawie polowego rozkładu odkształcenia uzyskano wartości umożliwiające narysowanie pętli histerezy. Opisu tej części metodyki opracowywania wyników badań brakuje również w dalszej części rozprawy oraz dodatkach.
 22. Na str. 120 Autor wskazuje na brak zmiany wartości modułu Younga w przypadku stali 10H2M poddanej długotrwałej eksploatacji, jednakże brak jest tego parametru w tab. 5.1.
 23. Czy krzywe zastosowane do określenia „granicznej amplitudy naprężenia przy zmęczeniu” to krzywe wykładnicze? – rys. 5.8 na str. 129. Ponownie brak opisu zależności.
 24. W jaki sposób na podstawie rys. 5.9 (str. 131) wyznaczono dla stanu po eksploatacji wartość naprężenia odpowiadającą trwałości 10 mln cykli równą 245 MPa – tab. 5.2? Jakie są równania krzywych aproksymujących oraz R^2 ? Wielkość na osi rzędnych to zakres?

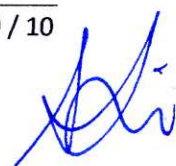


25. Trwałość próbki w stanie dostawy (ok. 1 300 000 cykli) w stosunku do trwałości próbki po eksploatacji (ok. 430 000 cykli) przedstawiona na rys. 5.10 jest o 200 %, a nie 300 % większa (lub 3 razy wyższa) – str. 133.
26. Ponownie (podobnie jak w uwadze 20) nieprawidłowo określono wielkość na osi odciętych jako „długość profilu” – rys. 5.12–5.16, str. 134-138.
27. Na podstawie wartości współczynników zamieszczonych w tab. 5.3 (str. 156), korzystając z równania (5.1), nie można wyznaczyć zamieszczonych w niej wartości wytrzymałości zmęczeniowej odpowiadających trwałości 10^8 cykli (dlaczego w tym przypadku 10^8 , a nie 10^7 jak poprzednio?). Dlaczego dla stali P91 wartości te poprzedzone są znakiem mniejszości?

Redakcję przedstawionej pracy należy ogólnie ocenić pozytywnie, chociaż niektóre elementy z pewnością mogłyby być przedstawione w sposób bardziej czytelny. Ważniejsze uwagi redakcyjne zamieszczono poniżej:

1. W pracy występują przypadki niezgodnej z Rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 5 czerwca 2020 r. w sprawie legalnych jednostek miar (Dz. U. 2020 poz. 1024) pisowni wartości wielkości bez spacji pomiędzy wartością liczbową a oznaczeniem jednostki (np. „2,9MPa” zamiast „2,9 MPa” na str. 2, „600°C” zamiast „600 °C” na str. 23) oraz niezgodna z zaleceniami Głównego Urzędu Miar dotyczącymi zasad zapisu liczb pisownia łączna liczby wraz z symbolem „%” (np. „3%” zamiast „3 %” na str. 28 i dalej). Ponadto jednostek nie należy umieszczać w nawiasach jak na rys. 2.1.
2. Praca zawiera wiele nieprecyzyjnych sformułowań oraz kolokwializmów:
 - a) „zmęczenie w warunkach dynamicznych” – str. 17,
 - b) należy unikać sformułowań typu „powszechnie wiadomo” – str. 19,
 - c) „uszkodzenie (...) jest wynikiem więcej niż jednego rodzaju procesu rozkładu” – str. 24,
 - d) „nacięcia mechaniczne, nacięcia strukturalne” określa się jako „karby” – str. 25,
 - e) co to są „naturalne warunki pracy”? – str. 25, czy „symulacje komputerowe z wykorzystaniem różnych kodów numerycznych”? – str. 26,
 - f) czy na rys. 2.1 widoczny jest „stopniowy spadek akumulacji odkształcenia materiału”? – str. 27,
 - g) „Najczęstszą formą charakteryzacji materiałów” – str. 30,
 - h) „można zaobserwować zmiany w długotrwałości (...) etapu pełzania” – str. 30,

- i) „Metoda termiczna polega na monitorowaniu zmian temperatury wokół materiałów konstrukcyjnych” – raczej temperatury próbek – podobnie dla metody wizualnej i akustycznej – str. 51,
 - j) „efekt Barkhausena jest powszechnie stosowany” – str. 55,
 - k) „moce przerobowe” czy moce obliczeniowe komputerów – str. 57,
 - l) „Seria płaskich próbek (...) poddana została warunkom zmęczeniowym” – str. 63,
 - m) „akumulacja składowych odkształcenia” – str. 68,
 - n) „badania zmęczeniowe symetryczne” oraz „badania zmęczeniowe odzerowo-tętniące” – str. 75,
 - o) czy można „przyspieszać dynamikę”? – str. 106.
3. We wzorach (1.9), (1.11), (1.13) występują błędy dotyczące zapisu wielkości zawierających indeksy dolne – str. 21.
 4. Brak w tekście pracy odwołania do rys. 2.2 ze str. 28. Jest natomiast odwołanie do nieistniejącego rys. 1.3.
 5. Wg spisu symboli tensor Cauchy’ego powinien być zapisany z indeksem – wzór (2.3) str. 41. Brak opisu wielkości występujących we wzorach (2.4) i dalej. Brak odwołań do literatury.
 6. Brak konsekwencji w oznaczaniu miary uszkodzenia - φ_N we wzorach (2.41), (2.42), (2.44), (2.45) - φ w dalszej części pracy.
 7. Jak rozumieć zdanie „Obie omawiane techniki optyczne pozwalają na rozwiązanie problemów, których konwencjonalne czujniki kontaktowe (...) nie są w stanie ujawnić.” – str. 95.
 8. „Różnice w wielkości odkształcenia po pierwszym cyklu testu są szczególnie widoczne przy zmianie wartości naprężenia (...)” – nie zmieniano wartości naprężenia, natomiast badania przeprowadzono na różnych poziomach naprężenia – str. 137.
 9. Co Autor miał na myśli w zdaniu „Stosunkowo płaski charakter przestrzenny materiału wyjściowego został powiązany (...)” – str. 150.
 10. Ponadto praca zawiera niewielką liczbę innych błędów – stylistycznych i interpunkcyjnych, np. „widoczne jest ciągle zainteresowanie modernizacją i inwestycjami aktualnie działających bloków energetycznych” – str. 22, „użyto lasera jako źródła płamki generowanej z powierzchni obiektów” – str. 86.
 11. Literatura – nieprawidłowe znaki w [10] i [101], dwukrotnie nazwisko „Golański” w [160].



3. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że analizy w niej zaprezentowane wykonane zostały na poziomie naukowym odpowiednim dla prac doktorskich. Zamieszczone w pracy uwagi krytyczne i redakcyjne, w dużej mierze dyskusyjne, mogą zostać wykorzystane przez Autora w realizacji przyszłych badań naukowych lub publikacji dotychczas uzyskanych wyników. Co najważniejsze nie obniżają one ogólnej pozytywnej oceny pracy.

Przedstawiona do recenzji praca spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 2018 poz. 1668) i może być dopuszczona do publicznej obrony, a mgr inż. Adam Brodecki może ubiegać się o stopień naukowy doktora w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna*.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Adam Brodecki', is centered on the page.