

Gliwice 20.06.2025

**Prof. dr hab. inż. Janusz Dobrzański**  
Sieć Badawcza Łukasiewicz  
Górnośląski Instytut Technologiczny  
44-100 Gliwice ul. K. Miarki 12-14  
Tel. 32 2345236; 605204002  
e-mail janusz.dobrzanski @ git.luksiewicz.gov.pl

***Recenzja***  
***pracy doktorskiej***  
***Pana mgr inż. Adama Brodeckiego***  
***pod tytułem***  
***„Monitorowanie stopnia rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych stali kotłowych***  
***wspomagane optycznymi systemami pomiarowymi”***  
***wykonanej pod opieką promotora***  
***Pana Prof. dr hab. inż. Zbigniewa Kowalewskiego***  
***oraz promotora pomocniczego Pana dr hab. inż. Mateusza Kopcia***  
***opracowana na zlecenie Dyrektora Instytutu Podstawowych Problemów***  
***Techniki***  
***Pana Prof. dr hab. inż. Tadeusza Burczyńskiego na podstawie uchwały Rady***  
***Naukowej IPPT PAN z dnia 27 marca 2025 roku, pismo nr RN-D-0002.8.2024***  
***z dnia 31 marca 2025 r.***

Energetyka jest obszarem polskiej gospodarki mającym kluczowy wpływ na jej funkcjonowanie a bezpieczeństwo energetyczne podstawowym warunkiem wzrostu gospodarczego kraju. Natomiast sprawą zasadniczą dla jakości życia ludzi i funkcjonowania gospodarki państwa są stabilne, niczym niezakłócone, dostawy energii.

Podtrzymanie istniejącego stanu posiadania zapewniającego bezpieczeństwo energetyczne kraju wymagałoby, co roku w Polsce, dodatkowego oddawania do eksploatacji nowych bloków energetycznych o sumarycznej mocy min. 1000 MW. Natomiast aby sprostać stale rosnącemu zapotrzebowaniu na energię zapewniając bezpieczne funkcjonowanie krajowego systemu energetycznego, wymagane jest zwiększenie zainstalowanej mocy od 3000 do 5000 MW.

W rozwoju polskiej energetyki istnieje jednak szereg uwarunkowań. Do najistotniejszych należy zaliczyć:

- czynniki prawne wynikające z polityki UE,
- czynniki hamujące proces krajowych inwestycji,
- zbyt niskie wskaźniki techniczno-ekonomiczne pracujących jednostek,
- ograniczenia w stosowaniu nowoczesnych technologii produkcji energii elektrycznej.

Niezbędny jest rozwój krajowej energetyki, który powinien nadążać za, a najlepiej wyprzedzać, prognozowany wzrost PKB.

W zależności od poziomu temperatury i ciśnienia dla poszczególnych rodzajów bloków energetycznych istotny jest udział i zastosowanie różnych grup materiałów na tzw. elementy krytyczne, czyli pracujące w najtrudniejszych warunkach temperaturowo-naprężeniowych. Udział tych materiałów w elementach części ciśnieniowej kotłów: na parametry podkrytyczne (przy ciśnieniu do 18 MPa i w temperaturze do 590°C o sprawności powyżej 30%) kształtuje się: 80% stale niskostopowe, 20% wysokochromowe stale martenzytyczne, na parametry nadkrytyczne (przy ciśnieniu do 28,5 MPa, i temperaturze do 620°C o sprawności powyżej 40%) kształtuje się: 52% stale niskostopowe, 31% wysokochromowe stale martenzytyczne oraz 17% stale austenityczne.

Rozwój sektora energetycznego winien zatem uwzględniać instalowanie najbardziej efektywnych bloków; o dużej sprawności (min. 40-45 %), wysokiej niezawodności, minimalnym negatywnym oddziaływaniu na środowisko naturalne oraz zdolności do pracy w układzie regulacyjnym.

Możliwości takie stwarzają bloki energetyczne na parametry nadkrytyczne. Efektem projektowania i budowania takich bloków jest stały wzrost parametrów temperaturowo-naprężeniowych pracy elementów części ciśnieniowej kotłów. Kotły tych bloków energetycznych wymagają stosowania materiałów o coraz wyższych właściwościach użytkowych. Szczególnie dotyczy to odporności na pełzanie przy odpowiednio wysokich innych właściwościach mechanicznych oraz odporności na korozję w temperaturze i w środowisku pracy.

Trudną do pokonania dla materiałów jest spełnienie wysokich oczekiwanych wymagań w zakresie charakterystyk materiałowych przy zdolności do ich przetwarzania oraz wykonywania z nich elementów takich instalacji zapewniających ich bezpieczną pracę przez wymagany obliczeniowy **czas pracy 200 000 godzin przy pracy w układzie regulacyjnym.**

W budowaniu bloków energetycznych, projektowanych na coraz wyższe temperaturowo-naprężeniowe parametry pracy odniesione do wymaganego obliczeniowego czasu **pracy 200 000 godzin oraz pracy w układzie regulacyjnym**, są materiały o oczekiwanych charakterystykach materiałowych oraz wymaganej zdolności do przetwarzania i wykonywania z nich elementów takich instalacji.

Dla zapewnienia bezpiecznej pracy urządzeń ciśnieniowych pracujących w podwyższonej temperaturze, w których stosowane są materiały żarowytrzymałe, niezbędnym jest posiadanie wyników szeregu badań, umożliwiających ocenę ich przydatności do eksploatacji w czasie obliczeniowym i poza obliczeniowym czasem pracy w określonych warunkach temperaturowo-naprężeniowych. Wyniki takich badań umożliwiają tworzenie charakterystyk materiałowych dla tych materiałów, zarówno w stanie wyjściowym jak i po różnych czasach eksploatacji w warunkach długotrwałego oddziaływania temperatury i naprężenia. Charakterystyki te pozwalają na ocenę materiału elementów części ciśnieniowej bloku energetycznego jak również sporządzanie wiarygodnej

prognozy bezpiecznej eksploatacji dla materiałów w stanie wyjściowym oraz dalszej eksploatacji materiałów pracujących instalacji i ich elementów.

Wśród oczekiwań stawianych wszystkim stalom żarowytrzymałym jest zachowanie przez nie, w długim czasie eksploatacji w temperaturze powyżej granicznej tzn. w takiej, w której dominującym procesem niszczenia jest pełzanie, stabilności struktury decydującej o stabilnym poziomie właściwości mechanicznych przy równocześnie wystarczającej odporności na korozję zarówno w atmosferze pary wodnej jak i na korozję wysokotemperaturową w atmosferze spalin, jako **wymogów bezpiecznej i bezawaryjnej eksploatacji w obliczeniowych parametrach pracy kotła, głównych rurociągów parowych i turbiny.**

Wprowadzenie na rynek energii Odnawialnych Źródeł Energii (OZE) wymusiło zmianę rzeczywistych warunków pracy konwencjonalnych bloków energetycznych opalanych węglem wynikających z konieczności ich pracy w tzw. układzie regulacyjnym. Wiąże się to z pracą bloku z wykorzystywaniem często tylko części jego mocy nominalnej, nawet tylko 40%, a również częstym odstawianiem i uruchamianiem. Dla elementów krytycznych tzn. pracujących w najtrudniejszych warunkach temperaturowo-naprężeniowych pojawia się wówczas cykliczne pełzanie, dla którego charakterystyczną cechą jest pojawianie się pierwszego stadium pełzania przy każdym kolejnym uruchomieniu charakteryzującego się znacznym przyrostem trwałego odkształcenia w bardzo krótkim czasie. Wpływa to na osiągnięcie w znacznie krótszym czasie dopuszczalnej maksymalnej wielkości trwałego odkształcenia w wyniku pełzania. Dla krytycznych elementów grubościennych takich jak: komory, kolektory, regulatory temperatury czy główne rurociągi parowe, zarówno po stronie kotła jak i turbiny, przy zwiększonej szybkości ich nagrzewania podczas uruchamiania do osiągnięcia stabilnych warunków pracy występuje znaczny gradient temperatury na grubości ścianki skutkując generowaniem nadmiernych naprężeń wewnętrznych mających wpływ na obniżenie zdolności do przenoszenia występujących obciążeń. Wśród elementów grubościennych charakteryzujących się takimi warunkami pracy są wykonane z gatunków stali będących przedmiotem zainteresowania doktoranta. Ponadto tematyka pracy doktorskiej Pana mgr inż. Adama Brodeckiego pt. *„Monitorowanie stopnia rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych stali kotłowych wspomagane optycznymi systemami pomiarowymi”* wpisuje się w obszar wiedzy obejmującej tworzenie elementów charakterystyk materiałowych przydatnych w ocenie badanych materiałów oraz problematykę stabilności właściwości mechanicznych w odniesieniu do zmian w strukturze spowodowanych długotrwałym równoczesnym oddziaływaniem temperatury i naprężenia.

*Na tej podstawie stwierdzam, że recenzowana praca mieści się w nurcie działań naukowych dotyczących materiałów dla energetyki przeznaczonych do pracy w warunkach równoczesnego oddziaływania temperatury i ciśnienia w długim czasie eksploatacji szczególnie pracy w układzie regulacyjnym wymaganym przy współpracy z OZE. Równocześnie stwierdzam spełnienie warunku Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” pkt 1 art. 187 rozdziału 2 nadawanie stopnia doktora Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym i*

*naucze” dotyczącej ogólnej wiedzy teoretycznej i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez doktoranta.*

## **Charakterystyka pracy**

Tematyka opiniowanej pracy doktorskiej bez wątpienia mieści się w dyscyplinie naukowej „*Inżynieria Mechaniczna*”. Dotyczy ważnych i aktualnych zagadnień obejmujących problematykę wysoko i niskocyklowego zmęczenia materiałów w stanie wyjściowym i po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania w głównych rurociągach parowych bloków energetycznych na podkrytyczne parametry pracy. Materiałem do badań były dwa gatunki stali do pracy w podwyższonej temperaturze, a w tym wysokochromowa stal X10CrMoVNB9-1 (T/P91) o strukturze odpuszczonego martenzytu oraz niskostopowa stal 10CrMo9-10 (10H2M) o strukturze bainityczno-ferrytycznej w stanie wyjściowym jak i materiały z tych gatunków stali po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania.

Praca obejmowała przeprowadzenie na wyżej wymienionych materiałach badań podstawowych właściwości wytrzymałościowych w temperaturze pokojowej, ocenę stanu struktury na podstawie przeprowadzonych badań metalograficznych oraz próby nisko i wysokocyklowego zmęczenia w zakresie amplitudy naprężenia od 250 do 650 MPa w celu zdefiniowania mechanizmów uszkodzenia dla materiałów w stanie wyjściowym oraz po długotrwałej eksploatacji, dla stali X10CrMoVNB9-1 odpowiednio w temperaturze 540°C i przy ciśnieniu 8,4 MPa przez 80 tys. godzin, a dla stali 10CrMo9-10 w temperaturze 540°C i przy ciśnieniu 2,9 MPa przez 280 tys. godzin, sądząc po parametrach pracy prawdopodobnie w głównych rurociągach pary wtórnej. Istotnym elementem badań było monitorowanie rozwoju uszkodzenia w trakcie prowadzonych prób zmęczeniowych z zastosowaniem optycznych metod pomiarowych, a w szczególności cyfrowej korelacji obrazów (Digital Image Correlation - DIC) oraz elektronicznej interferometrii plamkowej (Electronic Speckle Pattern Interferometry - ESPI). W interpretacji uzyskanych wyników badań w charakteryzacji dynamiki rozwoju uszkodzeń i ocenie poziomu uszkodzeń badanych materiałów wykorzystano parametry uszkodzenia materiału tzn. odkształceniowy współczynnik uszkodzenia zmęczeniowego  $\phi$  oraz parametr uszkodzenia zmęczeniowego D.

W punkcie 1.2. **Teza pracy** rozprawy doktorskiej Autor zdefiniował tezy pracy w brzmieniu:

- 1. „poziom degradacji materiału, powodując zmiany w mikrostrukturze i obniżenie właściwości wytrzymałościowych materiału wskutek długotrwałej eksploatacji wysokotemperaturowej, determinuje charakter i dynamikę rozwoju jego uszkodzenia w warunkach eksploatacyjnych”,*
- 2. dobrze zdefiniowane mierzalne wskaźniki uszkodzenia zmęczeniowego mogą stanowić konkurencyjną alternatywę dla określenia wytrzymałości zmęczeniowej z wykresów Wohlera dając jednocześnie znacznie więcej danych o stopniu uszkodzenia materiałów poddawanych obciążeniom cyklicznym, zwłaszcza na wczesnym etapie jego rozwoju”,*

### 3. „*wybór optycznego systemu pomiarowego może mieć istotny wpływ na efektywne monitorowanie stopnia degradacji materiału i jego postępu wskutek cyklicznego obciążenia*”

Można mieć uwagi i zastrzeżenia do formy zredagowanych tez, że są zbyt ogólne i oczywiste. Zawierają jednak najistotniejsze elementy, które stanowią przedmiot zainteresowania Autora rozprawy i zostały potwierdzone w ramach opiniowanej pracy doktorskiej.

Zdaniem recenzenta ważniejsze od tez jest zdefiniowanie celu do osiągnięcia. Został on określony w punkcie 1.1. **Cel i zakres pracy** rozprawy doktorskiej chociaż niejednoznacznie wyodrębniony, a mianowicie:

*„...za cel badań przeprowadzonych w niniejszej pracy przyjęto 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 – odkształceniowego współczynnika uszkodzenia zmęczeniowego  $\phi$  oraz parametru uszkodzenia zmęczeniowego  $D$ ”*

Opiniowana praca doktorska Pana mgr inż. Adama Brodeckiego jest zwięzłym opracowaniem. Praca ma klasyczny układ. Podzielono ją na kilka głównych części. Wśród nich można wyróżnić: *wstęp, usytuowanie tematyki rozprawy w świetle aktualnego stanu wiedzy oraz część badawczą zakończoną wnioskami*. Na część badawczą składają się rozdziały: *wstępne badania uszkodzenia materiałów poddanych zmęczeniu klasycznymi metodami niszczącymi* oraz *proponycja kompleksowej analizy rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych na przykładzie stali 10H2M*.

We *wstępie* oprócz zdefiniowania celu, zakresu i tez rozprawy, przedstawiono zwięzłe podstawy teoretyczne zmęczenia materiałów oraz problematykę eksploatacji materiałów części ciśnieniowej bloków energetycznych.

Kolejny rozdział p.t. „*Usytuowanie tematyki rozprawy w świetle aktualnego stanu wiedzy*”, zawiera omówienie problematyki badania wpływu degradacji na eksploatację, zdefiniowanie parametrów uszkodzenia w badaniach zmęczeniowych oraz omówienie nieniszczących metod monitorowania rozwoju uszkodzenia obejmujące: metody ultradźwiękowe, magnetyczne oraz optyczne wraz z analizą ich wykorzystywania. Jest bogato ilustrowanym przeglądem literatury opracowanym na podstawie 155 pozycji literaturowych, z czego znaczna część obejmuje prace obcojęzyczne, w tym liczne opublikowane w ostatnim dziesięcioleciu. Tło literaturowe obejmuje również uzasadnienie wyboru tematu pracy z krótkim podsumowaniem będącym oceną możliwości wykorzystania metody cyfrowej korelacji obrazu oraz elektronicznej interferometrii plamkowej w badaniach zmęczeniowych.

Następny rozdział p.t. „*Materiał i metody*” obejmuje krótką charakterystykę materiału do badań w postaci wycinków głównych rurociągów parowych w stanie wyjściowym i po długotrwałej eksploatacji z wysokochromowej stali w gatunku X10CrMoVNb9-1 (P91 wg ASTM) i niskostopowej

bainityczno - ferrytycznej w gatunku 10CrMo9-10 (dawniej 10H2M), przyjęty do realizacji program badań w postaci schematu blokowego oraz omówienie sposobu realizacji techniki cyfrowej korelacji obrazu (DIC) oraz metody elektronicznej interferometrii plamkowej (ESPI) wraz z krótkim zdefiniowaniem zalet i wad tych metod.

Uzyskane wyniki badań przedstawiono w dwóch rozdziałach. W rozdziale p.t. „*Wstępne badania uszkodzenia materiałów poddanych zmęczeniu klasycznymi metodami niszczącymi*”, omówiono i przeanalizowano wyniki badań uszkodzenia uzyskane klasycznymi niszczącymi próbami zmęczeniowymi zrealizowane na materiałach głównego rurociągu parowego bloku energetycznego w stanie wyjściowym i po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania wykonanych ze stali X10CrMoVNb9-1 (P91). Omawiany rozdział zawiera wyniki podstawowych badań wytrzymałościowych w temperaturze pokojowej, analizę mikrostrukturalną rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych, zastosowany alternatywny sposób analizy rozwoju uszkodzenia podczas zmęczenia na podstawie analizy zmian przebiegu pętli histerezy, określenie granicznej wartości amplitudy naprężenia zmęczeniowego na podstawie rozwoju uszkodzeń oraz wyniki badań procesu zmęczenia z wykorzystaniem metod optycznych DIC i EPSI wraz z analizą możliwości ich wykorzystywania. Natomiast w rozdziale p.t. „*Propozycja kompleksowej analizy rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych na przykładzie stali 10CrMo9-10 (10H2M)*” przedstawiono uzyskane wyniki podstawowych właściwości wytrzymałościowych w temperaturze pokojowej tego materiału w stanie wyjściowym i po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania, analizę mikrostrukturalną rozwoju jego uszkodzeń zmęczeniowych, ilościową ocenę rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych będących skutkiem symetrycznych obciążeń oraz wyznaczone graniczne wartości amplitudy naprężenia przy zmęczeniu na podstawie rozwoju uszkodzeń. Ponadto zaprezentowano wykorzystanie metody systemu optycznego cyfrowej korelacji obrazu (DIC) przy obciążeniu odzerowo-tętniącym dodatnim z zastosowaniem próbek płaskich a monitorując w badanej stali 10CrMo9-10 (10H2M) rozwój uszkodzeń zmęczeniowych dokonano na tej podstawie ich oceny.

Rozdział zatytułowany „*Uwagi podsumowujące i wnioski końcowe*” zawiera podsumowanie i analizę wykonanych badań oraz zdefiniowanie propozycji dalszych badań w obszarze monitorowania rozwoju uszkodzeń w wybranych stalach energetycznych poddanych cyklicznym obciążeniom. Natomiast opracowane wnioski końcowe zostały podzielone na trzy obszary i obejmują:

- wpływ degradacji materiału na rozwój uszkodzeń w warunkach eksploatacyjnych,
- mierzalne wskaźniki uszkodzeń zmęczeniowych jako alternatywa dla wykresów Wöhlera,
- wpływ doboru optycznych systemów pomiarowych na monitorowanie stopnia uszkodzenia.

Zdaniem recenzenta szkoda, że w scharakteryzowaniu materiału do badań w zakresie jego oceny na podstawie obrazu ujawnionej mikrostruktury nie dokonano jej szczegółowego opisu w zakresie stanu podstawowych występujących faz oraz zaawansowania stopnia rozwoju procesów wydzieleniowych czy wewnętrznych uszkodzeń z oszacowaniem stopnia wyczerpania badanych

materiałów po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania, choćby tylko na podstawie obserwacji struktury w skaningowym mikroskopie elektronowy oraz sekwencji występujących wydzielen na podstawie wyników rentgenowskiej analizy fazowej osadu wydzielen.

Ponadto zabrakło choćby krótkiego fragmentu omawiającego rzeczywiste warunki pracy ze zdefiniowaniem mogących wystąpić procesów niszczenia i ewentualnego ich udziału w utracie najważniejszych właściwości użytkowych materiału czy wykonanego z niego elementu.

W badawczej części pracy przedstawiono w kolejności: tezę, cel i zakres pracy, materiał do badań, metodykę badań (w tym metody i aparaturę badawczą), wyniki badań, ich analizę oraz wnioski. Dodatkowo sformułowano rozdział obejmujący badania przewidywane do realizacji w przyszłości.

W ocenie badań własnych, zdaniem recenzenta, ważnym jest **cel praktyczny** przeprowadzonych badań.

Do najważniejszych jego elementów należy zaliczyć:

1. zaproponowanie metodyki pozwalającej ocenić efektywność zastosowania badań nieniszczących, opartych na optycznych systemach pomiarowych w monitorowaniu rozwoju uszkodzenia stali energetycznych o różnym stanie struktury poddanych cyklicznemu obciążeniu,

2. opracowanie propozycji sposobu dokonywania kompleksowej analizy rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych materiału w oparciu o oryginalną metodykę określania granicznej wartości amplitudy naprężenia przy zmęczeniu na podstawie rozwoju uszkodzenia badanego materiału będące alternatywnym sposobem oceny granicznej wartości amplitudy naprężenia przy zmęczeniu w stosunku do powszechnie znanej i stosowanej techniki wyznaczania jej z krzywej będącej zależnością cyklicznej amplitudy naprężenia  $S$  od liczby cykli do zniszczenia  $N$  dla dobranego współczynnika naprężenia  $R$ ,

3. zastosowanie mierzalnych parametrów uszkodzenia tzn. odkształceniowego współczynnika uszkodzenia zmęczeniowego  $\phi$  oraz parametru uszkodzenia zmęczeniowego  $D$  dla charakteryzacji dynamiki rozwoju uszkodzenia materiału w wyniku zmęczenia.

Uzyskane wyniki badań wraz z ich analizą odniesioną do oczekiwań w odniesieniu do danych literaturowych stanowią ważną i wartościową część opiniowanej pracy.

W ocenianej pracy:

1. wykonano badania porównawcze zmęczenia materiału w stanie wyjściowym oraz po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania tzn. dla dwóch stanów strukturalnych dla każdego z dwóch badanych materiałów,

2. wykazano efektywność badania uszkodzeń wskutek obciążeń zmęczeniowych uzyskanych w klasycznych próbach niszczących i zaimplementowanych metod optycznych, cyfrowej korelacji obrazów (DIC) oraz elektronicznej interferometrii plamkowej (ESPI),

3. opracowano zależności zachodzące pomiędzy parametrami czułymi na rozwój uszkodzenia zmęczeniowego uzyskane na podstawie wyników niszczących badań właściwości mechanicznych oraz

nieniszczących z zastosowanych dwóch systemów optycznych, cyfrowej korelacji obrazów (DIC) oraz elektronicznej interferometrii plamkowej (ESPI).

## Ocena pracy

W pełni pozytywnie oceniam stronę merytoryczną opiniowanej pracy doktorskiej **Pana mgr inż. Adama Brodeckiego** pod tytułem „*Monitorowanie stopnia rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych stali kotłowych wspomagane optycznymi systemami pomiarowymi*” wykonaną pod opieką promotora **Pana Prof. dr hab. inż. Zbigniewa Kowalewskiego** i promotora pomocniczego **Pana dr hab. inż. Mateusza Kocpia** w dyscyplinie naukowej „*Inżynieria Mechaniczna*”.

**Pozytywna ocena** w szczególności **wynika** z tego, że:

1. autor osiągnął postawiony cel i udowodnił postawione tezy, co wysoko ocenia recenzent,
2. tematyka pracy doktorskiej dotyczy aktualnej w inżynierii mechanicznej problematyki oceny możliwości wykorzystania optycznych systemów pomiarowych w badaniach wybranych stali kotłowych, w stanie wyjściowym i po długotrwałej eksploatacji w warunkach podwyższonej temperatury i ciśnienia wewnętrznego, na ich wytrzymałość w warunkach wysoko i niskocyklowego zmęczenia oraz wyznaczania stopnia rozwoju i dynamiki uszkodzenia zmęczeniowego z wykorzystaniem dobrze zdefiniowanych i mierzalnych parametrów uszkodzenia materiału w postaci odkształceniowego współczynnika uszkodzenia zmęczeniowego  $\phi$  oraz parametru uszkodzenia zmęczeniowego  $D$ .
3. doktorant zastosował w badaniach zmęczeniowych dwa różne systemy optyczne; cyfrowej korelacji obrazów (DIC) oraz elektronicznej interferometrii plamkowej (ESPI),
4. język rozprawy nie budzi zastrzeżeń, a zastosowana terminologia pomimo drobnych błędów jest zgodna ze stosowaną w nauce o materiałach oraz w inżynierii mechanicznej,
5. uzyskane wyniki badań są wartościowe poznawczo, oryginalne i mogą mieć znaczenie aplikacyjne. O oryginalności wyników badań rozprawy może świadczyć zastosowanie dwóch różnych technik optycznych w ocenie stanu uszkodzenia w wyniku zmęczenia i ocena ich efektywności, granicznej wartości amplitudy naprężenia przy zmęczeniu na podstawie rozwoju uszkodzenia badanych materiałów czy opracowanie alternatywnego sposobu oceny granicznej wartości amplitudy naprężenia przy zmęczeniu w stosunku do powszechnie znanej techniki określania jej z krzywych S-N. Poszerzają one wiedzę w tym zakresie.
6. opiniowana praca doktorska charakteryzuje się wysokim poziomem merytorycznym, przede wszystkim dzięki kompetentnemu wykorzystaniu zastosowanych metod badawczych (właściwy dobór metodyki badawczej, obejmujący zarówno próby zmęczenia

- jak i optyczne systemy pomiarowe w badaniach stanu i rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych)
7. wyniki badań pozostają w ogólnej zgodności z prezentowanymi w literaturze wynikami innych autorów,
  8. autor definiuje propozycje dalszych badań badanych stali dla energetyki poddanych cyklicznym obciążeniom,
  9. praca z bogatym materiałem ilustracyjnym jest wykonana bardzo starannie pod względem edycyjnym i zawiera tylko pojedyncze błędy edycyjne.

**Najważniejsze osiągnięcia** zrealizowanej pracy doktorskiej, zdaniem recenzenta, to:

1. zastosowanie przez Doktoranta nowoczesnych technik badawczych wykorzystujących optyczny pomiar rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych, takie jak Digital Image Correlation (DIC) oraz Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI), które są bardzo dokładnymi metodami nieniszczącymi monitorowania tych uszkodzeń,
2. wyniki badań porównawczych dla określania granicznej wartości amplitudy naprężenia przy zmęczeniu w stosunku do powszechnie stosowanej metody jej określania z wyznaczonych krzywych S-N dla badanych materiałów w stanie wyjściowym i po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania,
3. jakościowe zobrazowanie rozwoju uszkodzenia na powierzchni próbki w trakcie badań zmęczeniowych w postaci map rozkładu odkształcenia, ilościowych zmian odkształcenia wzdłuż wybranych profili części pomiarowej próbki i zmian odkształcenia dla całego przebiegu zmęczeniowego jako efekt analizy jej zmian w 3 punktach na powierzchni próbki skorelowane z zapisami ekstensometru oraz opracowanie jakościowych map odkształcenia,
4. stworzenie charakterystyk dynamiki rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych badanych materiałów z wykorzystaniem dobrze zdefiniowanych i mierzalnych parametrów uszkodzenia materiału w postaci odkształceniowego współczynnika uszkodzenia zmęczeniowego  $\phi$  oraz parametru uszkodzenia zmęczeniowego D,
5. możliwość wykorzystania wykonanych badań oraz analizy otrzymywanych wyników jako elementu oceny stanu i przydatności do dalszej pracy badanych materiałów po długotrwałej eksploatacji.

## Uwagi dyskusyjne i krytyczne

Uwagi krytyczne ograniczono tylko do wybranych zagadnień, które recenzent uważa za najistotniejsze w badaniach zmęczeniowych w odniesieniu do stanu struktury po długotrwałej

eksploatacji badanych materiałów zastosowanych w elementach części ciśnieniowej kotłów przeznaczonych do długotrwałej pracy przy równoczesnych oddziaływaniu temperatury i ciśnienia.

1. Na stronie 40 rozprawy autor pisze:

*„...Ogólna koncepcja kumulacji uszkodzenia na skutek działania zróżnicowanego obciążenia może być ujęta następującym związkiem [68]:*

$$\sum N_i/N_{Ri}=1$$

*gdzie  $N_i$  oznacza określoną liczbę cykli dla zadanej amplitudy naprężenia  $\sigma$ , a  $N_{Ri}$  liczbę cykli do zniszczenia odpowiadającą tejże amplitudzie naprężenia  $\sigma$ . Stosunek  $N_i/N_{Ri}$  stanowi tutaj miarę uszkodzenia, która jest liniowa z narastającą liczbą cykli...”*

Koncepcja uszkodzenia na skutek pełzania w nieco różnej temperaturze eksploatacyjnej będąca stosunkiem czasu eksploatacji  $t_i$  w  $i$ -ej temperaturze  $T_i$  do przewidywanego czasu do zniszczenia  $t_{ri}$  w tej temperaturze przy identycznej wielkości obciążenia(naprężenia) definiowane stopniem wyczerpania  $t/t_r$  jest ujęta następującym związkiem:

$$\sum t_i/t_{ri}=1$$

Czy zdaniem autora istnieje realna możliwość połączenia wpływu zróżnicowanego obciążenia w wyniku zmęczenia z obciążeniem w wyniku pełzania, czego należałoby oczekiwać w praktyce przemysłowej?

2. Na stronie 160 rozprawy autor pisze:

*„... testy zmęczeniowe w reżimie nisko- i wysokocyklowym, które uwzględniają faktyczną temperaturę pracy badanych stali. Badania te powinny być przeprowadzane z wykorzystaniem próbek klepsydrycznych w temperaturze 540°C zarówno pod obciążeniem symetrycznym, jak i odzerowotętniającym....”*

Przeprowadzenie takich badań jest niezbędnym elementem w ocenie wytrzymałości zmęczeniowej badanych materiałów ze względu na ich pracę w podwyższonej temperaturze. Jaką autor ma koncepcję przeprowadzenia takich badań?

3. *Obecnie bloki energetyczne zarówno na parametry pod i nadkrytyczne pracują w układzie regulacyjnym, który wymaga częstego odstawiania i uruchamiania, często przy zwiększonej szybkości dochodzenia do stabilnych warunków pracy co szczególnie oddziałuje negatywnie .*

Czy konieczność pracy bloków energetycznych w układzie regulacyjnym może powodować intensyfikację procesów niszczenia w wyniku zmęczenia i jakie badania właściwości mechanicznych zdaniem autora należałoby przeprowadzać aby wpływ tak zdefiniowanych niestabilnych warunków pracy uwzględnić?

4. *Istotnym parametrem w ocenie materiałów pracujących po przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy jest rzeczywista trwałość eksploatacyjna będąca indywidualną cechą każdej instalacji pracującej w dominujących warunkach pełzania w układzie regulacyjnym.*

Jaką rolę oraz jaki udział w skracaniu tzw. trwałości eksploatacyjnej mają najważniejsze procesy niszczenia i w jakiej relacji pozostają do obliczeniowego czasu pracy ?

W trakcie lektury omawianej pracy doktorskiej stwierdzono nieścisłości związane bezpośrednio z treścią rozprawy. Oto wybrane spośród nich:

**1. na stronie 24 rozprawy stwierdzono:**

cytat: „...*Wśród rozpatrywanych grup strukturalnych materiałów dla energetyki konwencjonalnej przeznaczonych na konstrukcje stalowe największe szanse wykorzystania w przyszłości będą miały [16]:*

- *stale niskostopowe o strukturze ferrytyczno-perlitycznej: 13CrMo4-5 (15HM) i 10CrMo9-10 (10H2M);*

- *stale stopowe o strukturze bainitycznej: 7CrWVMoNb9-6 (T/P23) i 7CrMoVTiB10-10 (T/P24);*

.....”

Pojęcie „konstrukcje stalowe” raczej należy kojarzyć np. z konstrukcją nośną kotła. Natomiast wyspecyfikowane gatunki stali są stalami do pracy w podwyższonej temperaturze często nazywane również stalami odpornymi na pełzanie czy stalami kotłowymi przeznaczonymi do stosowania na elementy części ciśnieniowej kotłów energetycznych do pracy w podwyższonej temperaturze pod działaniem ciśnienia (naprężenia) w długim czasie gdzie dominującym procesem niszczenia jest pełzanie.

Prawidłową strukturą stali 10CrMo9-10 w stanie wyjściowym jest mieszanina bainitu z niewielką ilością ferrytu a nie struktura ferrytyczno-perlityczna. Natomiast stale 7CrWVMoNb9-6 (T/P23) i 7CrMoVTiB10-10 (T/P24) należą również do stali niskostopowych, które znalazły głównie zastosowanie na elementy ścian szczelnych komory parownika kotła energetycznego. Ich stosowanie zostało jednak zaniechane ze względu na brak możliwości zastosowania na elementy spawane części ciśnieniowej kotłów energetycznych bez obróbki cieplnej odprężającej po spawaniu jako warunku wymaganego.

**2. na stronie 25 rozprawy stwierdzono:**

cytat:.....”*W polskiej energetyce materiałem najpowszechniej wykorzystywanym do produkcji przegrzewaczy pary, zbiorników pary, zbiorników ciśnieniowych i rurociągów parowych, przeznaczonych do pracy w zakresie temperatur do 650°C, jest stal 10H2M, która jest aktualnie zastępowana nowocześniejszą stalą P91, dlatego też oba te gatunki zostały wybrane, jako materiały przeznaczone do kompleksowych badań opisywanych w dalszej części pracy. ....”*

Zastosowanie na elementy przegrzewacza pary kotłów na parametry podkrytyczne najczęściej stosowane są również gatunki 15Mo3, 13CrMo4-5, których wybór zastosowania jest zależny od rodzaju elementu, stopnia przegrzewu i ciśnienia. Ponadto stal 10CrMo9-10 jest przeznaczona do długotrwałej pracy w warunkach pełzania do maks. 600°C, zarówno na elementy cienkościenne jak węzownice przegrzewacza pary oraz grubościennie jak komory zbiorcze oraz główne i przerzutowe rurociągi pary. Stal X10CrMoVNb9-1 (T/P91) znalazła zastosowanie w części ciśnieniowej kotłów na parametry podkrytyczne na niektóre komory zbiorcze wykonane ze stali 10CrMo9-10 oraz główne rurociągi parowe, szczególnie pary świeżej gdzie zamieniono je z wykonanych z niskostopowej stali 14MoV6-3 w ramach prowadzonych procesów modernizacji. Stal ta znalazła również zastosowanie w kotłach na parametry nadkrytyczne na zbiorcze komory wylotowe wyższych stopni przegrzewu oraz na główne rurociągi, zarówno pary świeżej jak i wtórnie przegrzanej, których temperatura długotrwałej pracy nie przekracza 620°C.

**3. na stronie 32 rozprawy stwierdzono:**

cytat:...*”W szczególności zwrócono uwagę na zwiększenie udziału wytrącania węglików  $M_{23}C_6$  bogatych w chrom na granicach ziaren martenzytu i austenitu, które zwiększały efekt dyspersji tego pierwiastka w stali przez jego dyfuzję do granic ziaren powodując drastyczny spadek wytrzymałości na rozciąganie i granicy plastyczności po pierwszych 100 h. ...”*

Wydzielenia węglików  $M_{23}C_6$  bogate w chrom oraz wydzielenia MX bogate w Nb i V w strukturze odpuszczonego martenzytu w stanie wyjściowym głównie lokują się na granicach byłych ziarn austenitu a na granicach listew oprócz  $M_{23}C_6$  wydzielenia MX. W wyniku długotrwałego równoczesnego oddziaływania temperatury i naprężenia następuje wzrost tych wydzieleni oraz pojawienie się faz międzymetalicznych typu Lavesa ( $Fe_2Mo$ ) oraz Z [Cr(V, Nb)N] Powstająca struktura charakteryzuje się obniżonymi podstawowymi właściwościami mechanicznymi oraz obniżoną odpornością na pełzanie. Trudno jest natomiast mówić o rozroście ziarna. Następuje zanik listew martenzytu, pojawienie się subziarn a w konsekwencji struktury ferrytu z wydzieleniami.

**5. na stronie 32 rozprawy stwierdzono:**

*„..., że spadek granicy plastyczności i granicy wytrzymałości przypisywany jest...”*

Wg obowiązujących norm definiuje się wskaźniki wytrzymałościowe granica plastyczności oraz wytrzymałość na rozciąganie, natomiast niepoprawnym jest granica wytrzymałości

**3. na stronie 73 rozprawy stwierdzono:**

cytat: *”... Badania mechaniczne przeprowadzono na próbkach wykonanych ze stali żaroodpornej P91. ...”*

Stal P91 nie jest zaliczana do grupy stali żaroodpornych charakteryzujących się wysoką odpornością na zgorzelinowanie/utlenianie przy zdolności do przenoszenia obciążeń niewiele większych niż wynikające z ciężaru własnego konstrukcji. Jest stalą definiowaną jako stal żarowytrzymała posiadająca zdolność do przenoszenia obciążeń wynikających z równoczesnego oddziaływania temperatury i naprężenia w długim czasie przy wystarczającej odporności na zgorzelinowanie często nazywana również stalą odporną na pełzanie.

cytat: „...*Jak można zauważyć na Rys. 3.1b, stal P91 po eksploatacji charakteryzuje się gruboziarnistą strukturą, która wpływa na obniżenie właściwości wytrzymałościowych materiału zarówno na skutek wydzielania się węglików wzdłuż granic, jak i rozrostu wielkości ziarna. ...*”

W wyniku eksploatacji nie następuje rozrost wielkości ziarna dlatego, że ujawniane granice ziarn to pierwotne ziarna austenitu. Zmiany w strukturze w wyniku długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania polegają na intensyfikacji procesu wydzieleniowego; występowaniu na granicach byłych ziarn austenitu wydzieleni węglików  $M_{23}C_6$  tworzących łańcuszki wydzieleni oraz na granicach listew/igieł martenzytu powodując wynikające z obniżonej zawartości chromu osłabienie osnowy oraz osłabienie granic ziarn. Skutkuje to spadkiem zarówno podstawowych właściwości mechanicznych jak również spadkiem odporności na pełzanie. Występowanie „... gruboziarnistej struktury...” wynika ze stanu wyjściowego a nie jest skutkiem długotrwałej eksploatacji. Należy nadmienić, że odporność na pełzanie materiału w stanie wyjściowym mierzona czasową wytrzymałością na pełzania może się różnić  $\pm 20\%$  od wartości średniej, niezależnie od rodzaju wyrobu hutniczego. Również podstawowe właściwości mechaniczne w stanie wyjściowym mogą się różnić znacznie ale muszą być wyższe od wymaganych wartości minimalnych przyjętych dla rodzaju wyrobu hutniczego i zakresu jego grubości. Dlatego uzyskane wartości dla materiałów po eksploatacji należy odnosić do tych wymagań.

cytat: „...*Długotrwała eksploatacja w wysokiej temperaturze doprowadziła do znacznej degradacji mikrostruktury stali 10H2M, co przedstawiono na Rys. 3.2. Mikrostruktura stali 10H2M w stanie dostawy składała się z typowej mikrostruktury ferrytyczno-bainitycznej [162] z rozproszonymi wydzieleniami węglików na granicach ziaren (Rys. 3.2a). Natomiast materiał eksploatowany charakteryzował się strukturą zdegradowanego bainitu, niewielką ilością ferrytu oraz wytrąconymi węglnikami skupionymi na granicach ziaren [163] (Rys. 3.2b). ...*” Na podstawie wyników badań strukturalnych ujawniona struktura obserwowana w mikroskopie świetlnym nie daje możliwości jednoznacznej oceny stanu zmian w postaci bainitu. Również stan rozwoju procesów wydzieleniowych jest trudny do oceny zarówno wewnątrz obszarów bainitycznych jak i na granicach ziarn ferrytu. Dlatego obserwacje struktury należy prowadzić w skaningowym mikroskopie elektronowym. Natomiast szczegółową identyfikację rodzaju, postaci

i miejsc występowania wydzielen należy prowadzić w transmisyjnym mikroskopie elektronowym na cienkich foliach.

Uwagi te nie mają jednak istotnego wpływu na obniżenie pozytywnej wysokiej oceny merytorycznej opiniowanej pracy doktorskiej.

## **Wniosek końcowy**

Podsumowując stwierdzam, że w opiniowanej pracy doktorskiej p.t. „*Monitorowanie stopnia rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych stali kotłowych wspomagane optycznymi systemami pomiarowymi*”, Pan mgr inż. Adam Brodecki wykazał, że:

- jest dobrze zorientowany w poruszanej w literaturze problematyce dotyczącej zmęczenia materiałów, problemach wynikających z eksploatacji związanych ze zmianami w strukturze i właściwościach użytkowych, obszarze definiowania parametrów uszkodzeń w badaniach zmęczeniowych, niszczących i nieniszczących metodach monitorowania uszkodzeń w odniesieniu do stanu struktury,
- pozyskał umiejętności stawiania problemów badawczych i odpowiedniego doboru komplementarnego zestawu metod badań oraz ich pełnego praktycznego opanowania,
- posiada umiejętności wykorzystywania nowoczesnych technik i metod badawczych oraz oprogramowania komputerowego do prowadzenia badań właściwości mechanicznych, szczególnie dotyczących problematyki zmęczenia materiałów,
- uzyskał wartościowe i oryginalne wyniki badań, o istotnym znaczeniu poznawczym i praktycznym,
- opanował umiejętności opracowywania oraz syntezy osiągniętych wyników badań o czym może świadczyć opracowanie interesujących zależności pomiędzy parametrami czułymi na uszkodzenia podczas zmęczenia z wykorzystaniem niszczących metod badawczych oraz nieniszczących technik badawczych z zastosowaniem dwóch różnych technik optycznych, a w szczególności metody cyfrowej korelacji obrazów (DIC) oraz elektronicznej interferometrii plamkowej (ESPI).

Dodatkowo należy zwrócić uwagę na znaczący dorobek publikacyjny Doktoranta jako współautora 28 publikacji w renomowanych czasopismach naukowych oraz 39 abstraktów konferencyjnych świadczących o aktywności związanej z udziałem w konferencjach naukowych.

Praca doktorska jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego w oparciu o oryginalne wyniki badań własnych związanych ze stosowaniem i eksploatacją wybranych stali kotłowych w części ciśnieniowej bloków energetycznych spełniając wymagania pkt 2 art. 187 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Równocześnie praca doktorska spełnia wymagania pkt 3 Art. 187 wyżej cytowanej ustawy będąc samodzielnym opracowaniem autora.

Wobec powyższego stwierdzam, że opiniowana *praca doktorska spełnia wszelkie wymagania określone w art. 187 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U.2018 poz. 1668 z dnia 20.07.2018) i wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu podstawowych Problemów Nauki PAN w Warszawie o dopuszczenie Pana mgr inż. Adama Brodeckiego do publicznej obrony.*

Janusz Dobrzański

