

Prof. dr hab. inż. Jarosław Mizera
Wydział Inżynierii Materiałowej
Politechnika Warszawska

Warszawa, 9 stycznia 2026 r.

Recenzja pracy doktorskiej

mgr inż. Tomasz PUSZCZAŁO

pod tytułem:

**Trwałość eksploatacyjna złączy spawanych
ze stali Super 304H**

.....
.....
.....

przygotowanej pod kierunkiem:

prof. dr hab. inż. Adam Zieliński

1. Podstawa opracowania

.....
.....
.....

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej.

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

Opinia dotycząca przedmiotowej rozprawy doktorskiej zawiera trzy elementy:

.....
.....
.....

- 1) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria materiałowa;
- 2) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta ubiegającego się o nadanie stopnia doktora;
- 3) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 09. 01. 2026
RD JM a. 512. 41. 2026
nr zał.

2. Charakterystyka i opis rozprawy

Uwagi ogólne

Opiniowana praca powstała pod opieką prof. dr hab. inż. Adama Zielińskiego z Sieci Badawczej Łukasiewicz - Górnośląski Instytut Technologiczny, gdzie pod kierunkiem Pana Profesora od lat prowadzone są m. in. badania aplikacyjne nad rozwiązaniami materiałowymi i technologiami na potrzeby przemysłu energetycznego. Recenzowana rozprawa wpisuje się doskonale w nurt prac badawczych Jego zespołu - opracowaniem nowych rozwiązań w obszarze innowacyjnych materiałów dla energetyki.

Kluczowym zagadnieniem w obszarze urządzeń dla energetyki cieplnej jest określenie charakteru oraz dynamiki procesów degradacyjnych zachodzących w materiałach konstrukcyjnych w warunkach długotrwałej ekspozycji (wysokie naprężenia oraz podwyższona i wysoka temperatura). Szczegółowe znaczenie ma analiza kinetyki zmian właściwości mechanicznych i mikrostrukturalnych umożliwiającą nie tylko ocenę aktualnego stanu technicznego poszczególnych komponentów, lecz także formułowanie wiarygodnych prognoz dotyczących trwałości eksploatacyjnej konstrukcji. Wiedza ta stanowi kluczowe kryterium oceny niezawodnej eksploatacji oraz bezpiecznego funkcjonowania urządzeń ciśnieniowych, których praca opiera się na zachowaniu długoterminowej stabilności właściwości materiałowych.

Czas niezawodnej pracy (trwałość eksploatacyjna) to wskaźnik, który łączy w sobie strukturę, właściwości materiału oraz warunki obciążenia i eksploatacyjne elementu, ale nie jest równoznaczny z trwałością elementu konstrukcyjnego. Z pojęciem trwałości eksploatacyjnej związane jest określenie granicznego czasu do zniszczenia, granicznej liczby cykli do zniszczenia oraz liczby operacji technologicznych, po których nastąpi zniszczenie materiału przy założonym kryterium oceny jego trwałości.

Żarowytrzymałe stale stosowane do wytwarzania elementów ciśnieniowych kotłów parowych muszą gwarantować oczekiwaną trwałość eksploatacyjną rozumianą jako: stabilne właściwości mechaniczne, wysoka czasowa wytrzymałość na pełzanie, stabilna mikrostruktura w czasie eksploatacji, żaroodporność związaną z utlenieniem w atmosferze spalin oraz odporność na korozję po stronie pary wodnej.

Należy jednocześnie zaznaczyć, że elementy wykonane z tych stali nie pracują samodzielnie, lecz stanowią składniki rozbudowanych instalacji, w których kluczową rolę konstrukcyjną odgrywają złącza spawane. To właśnie one decydują o integralności całego układu, ponieważ stanowią potencjalne miejsca koncentracji naprężeń, procesów pełzania

oraz inicjacji i rozwoju pęknięć. Dlatego też ocena trwałości eksploatacyjnej żarowytrzymałych stali musi być nierozdzielnie związana z analizą zachowania złączy spawanych. W praktyce oznacza to, że rzeczywista trwałość węzownic i innych elementów, wykonanych na przykład ze stali Super 304H, zależy nie tylko od właściwości samego materiału, ale przede wszystkim od jakości i charakterystyki wykonanych połączeń spawanych. Z tego względu analiza złączy spawanych staje się nieodłącznym uzupełnieniem badań materiału podstawowego i warunkiem kompletnej oceny przydatności tej stali do długookresowej eksploatacji w nowoczesnych jednostkach energetycznych.

Badania przeprowadzone przez mgr inż. Tomasza Puszczało w ramach doktoratu obejmują analizę trwałości eksploatacyjnej złączy spawanych wykonanych z nowej generacji stali austenitycznej X10CrNiCuNb18-9-3 (Super 304H) w kontekście określania możliwości maksymalnego przedłużania jej niezawodnej pracy w krytycznych elementach ciśnieniowych kotłów energetycznych na parametry nadkrytyczne.

Doktorant postawił sobie za cel opracowanie uaktualnionych charakterystyk materiałowych z użyciem nowoczesnych metod badawczych zapewniających wyższą precyzję pomiaru. Analiza złączy spawanych wykonanych ze stali Super 304H pozwoliła Autorowi rozprawy wyniki, które mogą wskazać możliwe kierunki udoskonalania technologii ich wytwarzania oraz określić przydatność tych złączy do długookresowej pracy w nowoczesnych blokach energetycznych.

Recenzowana praca dotyczy, moim zdaniem, zagadnień o istotnej wartości poznawczej i przede wszystkim aplikacyjnej. Podjęto w niej bardzo istotny z punktu widzenia technologii materiałów wątek badawczy – określenie trwałości eksploatacyjnej złączy spawanych stali austenitycznej przeznaczonej do pracy w newralgicznych elementach ciśnieniowych kotłów energetycznych na parametry nadkrytyczne.

Uwagi redakcyjne

Recenzowana dysertacja jest kompletna i napisana w sposób komunikatywny. Ma ona klasyczny układ i została podzielona na kilka rozdziałów. W rozdziale *Przegląd literatury* Doktorant przedstawił aktualny stan polskiej energetyki oraz uwarunkowania prawno-formalne w tym sektorze gospodarki. Opisał stale stosowane w energetyce cieplnej oraz degradację mikrostruktury i właściwości użytkowych stali austenitycznych. Na końcu tego rozdziału Doktorant opisał trwałość eksploatacyjną urządzeń ciśnieniowych stosowanych w energetyce cieplnej.

W rozdziale *Badania Własne* Autor rozprawy przedstawił cel, zakres i metodykę badań oraz wyniki badań mikrostrukturalnych i mechanicznych. Osobny rozdział Doktorant poświęcił *Podsumowaniu wyników badań trwałości eksploatacyjnej*. Konkluzje przedstawił w rozdziale *Wnioski*.

Pracę czyta się z dużym zainteresowaniem tym bardziej, że jest ona napisana poprawnie pod względem językowym i praktycznie nie zawiera błędów redakcyjnych. Na uwagę zasługują trafnie dobrane i aktualne powołania literaturowe (117 pozycji).

Cel i zakres pracy

Realizacja inwestycji w sektorze energetycznym, obejmujących budowę oraz uruchamianie bloków wytwórczych pracujących przy nadkrytycznych parametrach pary generuje konieczność przeprowadzenia kompleksowych analiz wytrzymałościowych oraz badań materiałowych elementów ciśnieniowych stanowiących integralne części tych jednostek.

Z przeprowadzonej przez Doktoranta krytycznej analizy aktualnego stanu wiedzy związanego z tematem pracy wynika, że materiałem stosowanym w konstrukcjach kotłów ultranadkrytycznych i superultranadkrytycznych, m.in. w elementach ciśnieniowych, węzownikach i przegrzewaczach pary, jest stal Super 304H. Jednak obecny stan wiedzy w zakresie trwałości eksploatacyjnej złączy spawanych ze stali Super 304H jest nadal niedostateczny dla bezpiecznej eksploatacji urządzeń ciśnieniowych stosowanych w energetyce cieplnej. Problem staje się szczególnie istotny w sytuacjach, gdy warunki pracy komponentów konstrukcji odbiegają od założeń projektowych, na przykład w układach regulacyjnych związanych z integracją technologii odnawialnych źródeł energii.

Fakt ten był bezpośrednią inspiracją Autora rozprawy do sformułowania następujących celów pracy:

Cel metodyczny

„Opracowanie metodyki szacowania trwałości eksploatacyjnej złączy spawanych, wykonanych z austenitycznej stali Super 304H w perspektywie możliwości maksymalnego przedłużania niezawodnej i dyspozycyjnej pracy bloków energetycznych”.

Cel wdrożeniowy

„Wzbogacenie charakterystyk materiałowych złączy spawanych węzownic przegrzewaczy pary pracujących w stacjonarnych i zmiennych warunkach pracy, które pozwolą na oszacowane utraty trwałości eksploatacyjnej w rzeczywistych warunkach pracy, bez konieczności znajomości historii eksploatacji”.

Koncepcja realizacji celów pracy przyjęta przez Doktoranta zakładała przeprowadzenie badań obejmujących kilka etapów:

1. Pozyskanie materiału do badań – wycinki złączy spawanych węzownic (stan dostawy i po starzeniu w różnych temperaturach i czasach).
2. Przeprowadzenie badań strukturalnych (mikroskopia skaningowa, identyfikacja faz – na podstawie cech morfologicznych wydzieleni i analizy EDS).
3. Analiza właściwości mechanicznych (twardość, statyczna próba rozciągania w temperaturze otoczenia, próby pełzania (skrótowe oraz z pomiarem wydłużenia z wyznaczeniem szybkości pełzania)).
4. Określenie zmian mikrostruktury i właściwości mechanicznych w funkcji czasu i temperatury starzenia.
5. Ocena trwałości eksploatacyjnej złącza spawanego.

Doktorant założył, że na podstawie uzyskanych wyników opracowane zostaną procedury jakościowo-technologiczne, których wprowadzenie do praktyki przemysłowej pozwoli na standaryzację działań w sytuacjach awaryjnych oraz przy występowaniu innych zakłóceń procesu wytwarzania energii w elektrowni.

Uważam, że przeprowadzone przez Doktoranta badania dostarczyły spójnych wyników, które pozwoliły na realizację celów pracy. Chciałbym podkreślić duże znaczenie zarówno poznawcze jak i przede wszystkim praktyczne uzyskanych rezultatów badań.

W podsumowaniu stwierdzam, że cel i zakres opiniowanej pracy w pełni spełniają wymagania stawiane badaniom będącym podstawą rozpraw doktorskich.

Ocena rozprawy doktorskiej

Autor dysertacji bardzo dobrze zidentyfikował problem badawczy, poprawnie sformułował cele badawcze oraz dobrał techniki badawcze adekwatnie do zaplanowanych zadań. Z lektury doktoratu można wywnioskować, że Doktorant wykonał eksperymenty samodzielnie, a uzyskane wyniki badań poddał szczegółowej analizie konfrontując je z aktualnym stanem wiedzy. Dowodzi to, że mgr inż. Tomasz Puszczało posiadał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Z kolei realizując zadania badawcze Doktorant wykazał, że posiada niezbędną wiedzę w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa, która skutecznie pozwoliła Mu na realizację planu badawczego.

Doktorant podjął się realizacji ambitnego zadania aplikacyjnego - analizy trwałości eksploatacyjnej złączy spawanych z nowej generacji austenitycznej stali Super 304H (X10CrNiCuNb18-9-3) stosowanej w konstrukcjach kotłów ultranadkrytycznych i superultranadkrytycznych, m.in. w elementach ciśnieniowych, węzownikach i przegrzewaczach pary eksploatowanych w temperaturze do 640°C. Do określenia trwałości eksploatacyjnej zastosował metody badawcze obejmujące m.in.: próby pełzania w warunkach laboratoryjnych, analizy mikrostrukturalne przy użyciu mikroskopii skaningowej, badania właściwości mechanicznych, ocenę składu chemicznego i twardości, a także obliczenia prognostyczne wykorzystujące zależności czas-temperatura do przewidywania zmian właściwości materiałowych.

Uważam, że bardzo cenne z punktu widzenia opracowania wytycznych technologicznych do określenia trwałości eksploatacyjnej złączy spawanych ze stali Super 30H jest wykazanie przez Doktoranta, że:

- Pomimo spadku właściwości mechanicznych w złączu spawanym ciągle spełniają one wymagania stawiane przez normę na materiał rodzimy, tj. rury bezszwowej do zastosowań ciśnieniowych w temperaturze podwyższonej.
- W próbach pełzania wraz z wydłużeniem czasu i wzrostem temperatury starzenia, szybkość pełzania rośnie i powoduje utratę trwałości eksploatacyjnej. Bardzo szybki wzrost prędkości pełzania stwierdzono w temperaturze 750°C, co potwierdza, że maksymalny zakres temperatury użytkowania stali Super 304H powinien zawierać się w zakresie od 630 do 660°C.

- Próby pełzania bez pomiaru wydłużenia pozwalają na ekstrapolację metodą wykreślną wytrzymałości na pełzanie dla 10 000 i 100 000 godzin badanych złączy spawanych w stanie wyjściowym. Badane złącze spawane charakteryzuje się zbliżoną wytrzymałością na pełzanie w porównaniu do materiału rodzimego.
- Wykonane próby pełzania bez pomiaru wydłużenia pozwalają na określenie liczbowego spadku trwałości złączy w stanie wyjściowym. Ekstrapolacja danych umożliwiła ocenę wpływu czasu i temperatury na trwałość eksploatacyjną. Próbki najczęściej ulegały zniszczeniu w materiale rodzimym, co potwierdza poprawność wykonanych połączeń spawanych.

Niewątpliwym osiągnięciem Doktoranta jest opracowanie charakterystyk materiałowych złączy spawanych ze stali Super 304H stosowanych m. in. na węzownice przegrzewaczy pary, co pozwala na oszacowane utraty trwałości eksploatacyjnej w rzeczywistych warunkach pracy, bez konieczności znajomości historii eksploatacji i informacji na temat rzeczywistych parametrów pracy na obiekcie. Opracowane przez mgr inż. Tomasza Puszczało zestawienia charakterystyk materiałowych badanej stali mogą posłużyć z kolei jako baza do opracowania procedur i instrukcji dla działów diagnostycznych, których implementacja w praktyce przemysłowej pozwoli na standaryzację działań w sytuacjach awaryjnych oraz przy występowaniu innych zakłóceń procesu wytwarzania energii w elektrowni.

W podsumowaniu należy stwierdzić, że zaplanowany przez Doktoranta program badawczy został w pełni zrealizowany. Z powodzeniem zostały osiągnięte cele pracy (metodyczny i wdrożeniowy).

Moim zdaniem rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Puszczało stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego o charakterze aplikacyjnym, bardzo dobrze osadzonego w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.

Uzyskane przez Doktoranta wyniki badań wnoszą nową wiedzę w obszarze bezpiecznej eksploatacji nowoczesnych stali austenitycznych przeznaczonych do pracy w ekstremalnych warunkach.

Uwagi

Badana przez autora rozprawy stal Super 304H powstała w wyniku modyfikacji składu chemicznego stali 304, która „polegała na wprowadzeniu do jej składu dodatku miedzi w ilości 2,5 – 3,5% oraz mikrododatku azotu i niobu. Wprowadzenie do składu powyższych pierwiastków, poprzez umocnienie roztworowe (atomami azotu) i umocnienie wydzieleniowe (drobnodispersyjne wydzielenia ϵ -Cu i MX) przyczyniło się do wzrostu wytrzymałości na pełzanie o ok. 20% w porównaniu do stali TP347H”.

Czy, zdaniem Doktoranta, istnieje pole do dalszej modyfikacji składu chemicznego (fazowego) badanej (lub innej) stali austenitycznej mającej na celu ukształtowanie struktury o jeszcze wyższej wytrzymałości na pełzanie?

Czy, i ewentualnie jak, zdaniem Doktoranta, zastosowanie różnej metody spawania (np. spawanie łukowe, laserowe, hybrydowe) może wpłynąć na przebieg degradacji badanego złącza i w efekcie na jego trwałość eksploatacyjną?

W Podsumowaniu wyników badań trwałości eksploatacyjnej (rozdział 4) Doktorant wskazuje, że „bez długofalowych badań nie jest możliwe pełne zrozumienie procesów degradacyjnych, dlatego opracowane charakterystyki mogą stanowić podstawę dla dalszych projektów badawczych”.

Co miałyby być przedmiotem dalszych badań?

3. Wniosek końcowy

Bardzo dobrze oceniam pracę doktorską mgr inż. Tomasza Puszczało. Autor pracy wybrał bardzo interesujący problem badawczy, umiejętnie sformułował cele i zakres pracy oraz wnikliwie przeprowadził analizę otrzymanych wyników badań pod kątem określenia trwałości eksploatacyjnej złączy spawanych ze stali Super 304H.

Uzyskane przez Autora dysertacji wyniki badań pozwoliły na pomyślną realizację celów pracy. Na podstawie wyników wytrzymałości na pełzanie wyznaczył utratę trwałości eksploatacyjnej badanych złączy w zależności od czasu i temperatury starzenia. Przeprowadzone przez Doktoranta badania mogą posłużyć do opracowania procedur i instrukcji dla działów diagnostycznych w elektrowniach ciepłych odnośnie do określenia trwałości eksploatacyjnej elementów kotła zawierającego złącza spawane ze stali Super 304H.

Szczegółowa analiza rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Puszczało pozwala stwierdzić, że:

- Zrealizowane przez Doktoranta badania, które pozwoliły na określenie granicznych warunków niezawodnej pracy złączy spawanych ze stali Super 604H w krytycznych elementach ciśnieniowych kotłów energetycznych na parametry nadkrytyczne, dowodzą, że posiadał On umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.
- Umiejętność krytycznej analizy otrzymanych przez Doktoranta wyników badań pod kątem ich wykorzystania w praktyce składa się na dużą wartość badawczą i aplikacyjną recenzowanej rozprawy. Dowodzi to, że Autor rozprawy posiada wysoki poziom wiedzy teoretycznej i praktycznej w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.
- Doktorant podjął się rozwiązania oryginalnego problemu badawczego, a uzyskane wyniki przyczyniły się do poszerzenia wiedzy w zakresie określenia długookresowej eksploatacji kluczowych elementów konstrukcji kotłów w nowoczesnych jednostkach energetycznych wykonanych ze stali Super 304H.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora mgr inż. Tomaszowi Puszczało w dziedzinie nauk Inżynieryjno-Technicznych w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.

Jarosław
Mizera

Elektronicznie
podpisany przez
Jarosław Mizera
Data: 2026.01.09
08:31:24 +01'00'