

Prof. dr hab. inż. Piotr Duda
Katedra Inżynierii Ciepłej i Procesowej
Politechnika Krakowska

Kraków, 14.12.2025

Recenzja rozprawy doktorskiej
Mgr inż. Tomasza Puszczało
"Trwałość eksploatacyjna złączy spawanych ze stali
Super 304H"

Promotor rozprawy: Prof. dr hab. inż. Adam Zieliński,

Podstawą formalną opracowania jest prośba o wykonanie recenzji w postępowaniu o nadanie stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych mgr inż. Tomasza Puszczało w piśmie z dnia 31.10.2025 r.

A. OCENA TEMATYKI PODJĘTYCH BADAŃ

Polityka energetyczna Polski do roku 2040 zakłada znaczne zwiększenie mocy zainstalowanej w odnawialnych źródłach energii (OZE). Energia elektryczna pochodząca z tych źródeł charakteryzuje się dużą nieprzewidywalnością. W celu skompensowania dynamiki zmian w wytwarzaniu energii z OZE niezbędne jest wytwarzanie stabilnej oraz regulowalnej energii w elektrowniach konwencjonalnych lub jądrowych. Krajowe zasoby węgla pozostaną więc istotnym elementem bezpieczeństwa energetycznego Polski. Konieczna jednak będzie dalsza modernizacja istniejących jednostek w celu podniesienia ich trwałości, sprawności oraz umożliwienia współpracy z OZE. Do tego celu może być wykorzystana stal austenityczna Super 304H.

W literaturze jest wiele prac poświęconych badaniu tej stali. W stanie wyjściowym charakteryzuje się ona jednorodną strukturą austenityczną z drobnymi węglkami pierwotnymi NbC lub pierwotnymi wydzieleniami fazy Z. Ten rodzaj struktury stabilny w stanie dostawy, w warunkach eksploatacji w wysokich temperaturach ulega stopniowej degradacji, co powoduje pogorszenie własności mechanicznych oraz odporności na korozję. Negatywne zmiany w mikrostrukturze w kontekście własności użytkowych zachodzą poprzez wydzielenie faz wtórnych, zmianę ich morfologii, procesy sferoidyzacji i koagulacji tych wydzieleni, ubożenie osnowy w pierwiastki ją umacniające. Stal ta powinna zagwarantować oczekiwaną trwałość eksploatacyjną rozumianą jako stabilne właściwości mechaniczne, wysoka czasowa wytrzymałość na pełzanie, stabilna mikrostruktura w czasie eksploatacji, żaroodporność związana z utlenieniem w atmosferze spalin oraz odporność na korozję po stronie pary wodnej. Najbardziej wiarygodne wyniki przy prognozowaniu trwałości elementów z niej wykonanych uzyskuje się dysponując wynikami prób pełzania materiału po eksploatacji oraz w stanie wyjściowym. Wiele cennych badań dla różnych stali wykonano już w Instytucie Metalurgii Żelaza w Gliwicach.

Oceniana praca wpisuje się więc w cykl badań nad poznaniem mikrostruktury, właściwości mechanicznych oraz trwałości złączy spawanych ze stali Super 304H. Wykonane badania są istotne ze względu na konieczną modernizację istniejących jednostek energetyki zawodowej. Podjęty temat badań należy więc uznać za ambitny i uzasadniony.

B. CHARAKTERYSTYKA PRACY

Recenzowana praca doktorska jest napisana w języku polskim, liczy 136 stron i została podzielona na 5 rozdziałów. Rozpoczyna się od podziękowań a kończy spisem wykorzystanej literatury, listą tabel, rysunków oraz streszczeniem w języku polskim i angielskim.

W rozdziale pierwszym zamieszczono krótki wstęp, w którym wspomniano o modernizacji energetyki krajowej, której celem jest dążenie do neutralności klimatycznej do 2050 roku, podkreślono konieczność prowadzenia badań w kierunku utrzymywania wysokiego poziomu bezpieczeństwa oraz ciągłości wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej w istniejących elektrowniach konwencjonalnych.

Rozdział drugi zawiera przegląd literatury w zakresie aktualnego stanu polskiej energetyki, stosowanych stali, jej degradacji mikrostruktury i właściwości użytkowych. Przedstawiono metodyki oceny trwałości eksploatacyjnej materiałów stosowanych w elementach ciśnieniowych, ze szczególnym uwzględnieniem procedur diagnostycznych umożliwiających określenie stopnia degradacji strukturalnej komponentów pracujących w warunkach przekroczenia temperatury granicznej.

Przeprowadzona analiza literatury dotyczącej trwałości eksploatacyjnej oraz degradacji właściwości użytkowych rurowych złączy spawanych wykonanych ze stali Super 304H pozwoliła na sformułowanie celu pracy, który przedstawiony jest na początku rozdziału trzeciego. Zdefiniowano go jako wyznaczenie trwałości eksploatacyjnej złączy spawanych, wykonanych z austenitycznej stali Super 304H w perspektywie możliwości maksymalnego przedłużania niezawodnej i dyspozycyjnej pracy bloków energetycznych. Dodatkowo postanowiono wzbogacić istniejące charakterystyki materiałowe złączy spawanych węzłowiec przegrzewaczy pary tak aby pozwoliły one na oszacowanie utraty trwałości eksploatacyjnej w rzeczywistych warunkach pracy, bez konieczności znajomości historii ich eksploatacji.

W rozdziale trzecim opisano wykonane badania mikrostrukturalne, twardości, właściwości mechanicznych oraz zrealizowane próby pełzania. Przeprowadzono je dla złączy spawanych w stanie wyjściowym oraz po długotrwałym wyżarzaniu w temperaturze 700 oraz 750°C przez 1 000, 5 000 oraz 10 000 godzin. Na podstawie cech morfologicznych materiału w stanie wyjściowym oraz analizy EDS zidentyfikowano wydzielenia.

W rozdziale czwartym przedstawiono wyniki oceny trwałości stali austenitycznych pracujących w warunkach pełzania. Podkreślono, że ocena trwałości powinna opierać się na możliwie najszerszym zakresie metod badawczych, obejmujących zarówno analizy mikrostrukturalne, testy mechaniczne, jak i badania pełzania. Porównując mikrostrukturę złączy przed i po starzeniu, zauważono wyraźne zmiany, szczególnie w strefie wpływu ciepła, co istotnie może wpływać na trwałość

złącza. Próby pełzania bez pomiaru wydłużenia oraz zastosowana ekstrapolacja danych umożliwiła ocenę wpływu czasu i temperatury na trwałość eksploatacyjną złączy. Zaprezentowano charakterystyki materiałowe zawierające stan mikrostruktury, właściwości mechaniczne i odporność na pełzanie dla każdego z badanych stanów materiału oraz przedstawiono utratę trwałości badanych złączy w zależności od czasu i temperatury wyżarzania.

Wnioski końcowe zawiera rozdział piąty. Główny cel doktoratu, którym było określenie trwałości eksploatacyjnej złączy spawanych, wykonanych z austenitycznej stali Super 304H w perspektywie możliwości maksymalnego przedłużania niezawodnej i dyspozycyjnej pracy bloków energetycznych został zrealizowany. Na podstawie uzyskanych wyników opracowano charakterystyki materiałowe dla złączy spawanych uwzględniające różne warunki starzenia i stan wyjściowy.

C. UWAGI DYSKUSYJNE

Pytania do pracy:

- 1) Czy w układach regulacyjnych związanych z integracją z odnawialnymi źródłami energii nie należy analizować też zjawiska zmęczenia cieplnego?
- 2) Ile próbek zostało wykonanych dla poszczególnych badań. Czy pochodzą one z jednego czy z kilku złączy spawanych?
- 3) W tabeli 24 przedstawiono średnie wartości twardości HV1. Czy opracowano je w oparciu o punkty pomiarowe, które przedstawiono na rys. 71?
- 4) Na stronie 103 powołano się na tabelę 26 zamiast 25.
- 5) Ze wszystkich wykorzystanych urządzeń podano tylko dokładność indukcyjnego czujnika stosowanego w próbach pełzania. Jakie były dokładności innych czujników?
- 6) Na stronie 51 w oznaczeniu naprężenia jest błąd edytorski.
- 7) Zasada wyznaczania prędkości pełzania w próbie pełzania z pomiarem wydłużenia na rys. 25 nie jest precyzyjna. Czy chodzi tu o chwilową prędkość pełzania czy o uśrednioną po czasie dla pełzania ustalonego?
- 8) Czy próbowano oszacować niepewności pomiarowe dla mierzonych wielkości?
- 9) Na stronie 112 powołano się na tabelę 31 a chyba chodziło o tabelę 29?
- 10) Czy do wyznaczenia utraty trwałości eksploatacyjnej, która przedstawiona jest w tabeli 29 na stronie 112, wykorzystano tylko skrócone próby pełzania? Jak obliczono przedstawione w tabeli wartości utraty trwałości eksploatacyjnej?

D. OCENA KOŃCOWA

W recenzowanej rozprawie Doktorant podejmuje ambitny temat wyznaczenia trwałości eksploatacyjnej złączy spawanych z żarowytrzymałej stali Super 304H, bez konieczności znajomości historii ich eksploatacji. W tym celu wykonał próbki do badań z jednoimiennych złączy spawanych rur, które są wykorzystywane na ostatnie stopnie przegrzewaczy pary w kotłach energetycznych na parametry nadkrytyczne. Dla tych próbek przeprowadził szereg badań eksperymentalnych w celu oceny zmian

strukturalnych w obrębie strefy wpływu ciepła w złączu spawanym po jego długotrwałym wyżarzaniu.

Pomimo zamieszczonych uwag Doktorantowi udało się uzyskać szereg nowych oryginalnych wyników oraz wyciągnąć z nich wnioski pozwalające na wyznaczenie trwałości eksploatacyjnej analizowanych złączy spawanych ze stali 304H. Mgr inż. Tomasz Puszczało w ocenianej rozprawie wykazał się szeroką wiedzą, umiejętnością wnioskowania i profesjonalizmem w zakresie badań eksperymentalnych oraz znajomością nowoczesnych przyrządów pomiarowych.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że przedstawiona praca Pana Mgr inż. Tomasza Puszczała pt. " Trwałość eksploatacyjna złączy spawanych ze stali Super 304H " spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie "Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" z 20 lipca 2018 roku.

W związku z tym wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Pana Mgr inż. Tomasza Puszczała do dalszych etapów postępowania w celu nadania stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Prof. Piotr Duda

/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)|