

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

**Kraków, 17.11.2024**

**Recenzja rozprawy doktorskiej**  
**Mgr inż. Karola Sówki**  
**"Analiza trwałości eksploatacyjnej złączy spawanych z**  
**żarowytrzymałej stali P92"**  
**Promotor rozprawy: dr hab. inż. Marek Sroka,**  
**Profesor Politechniki Śląskiej**

Podstawą formalną opracowania recenzji jest prośba o wykonanie recenzji w postępowaniu o nadanie stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych mgr inż. Karola Sówki w piśmie z dnia 22.10.2024 r.

**A. OCENA TEMATYKI PODJĘTYCH BADAŃ**

W roku 2019 Rada Europejska zatwierdziła ograniczenie emisji netto gazów cieplarnianych do roku 2030 o co najmniej 55% w odniesieniu do roku 1990. Dwa lata później w Polsce został opracowany plan transformacji energetycznej pod nazwą Polityka Energetyczna Polski 2040. W zatwierdzonych do realizacji planach wskazano między innymi na założony wzrost mocy zainstalowanej w fotowoltaice do ok. 5-7 GW w 2030 roku, w energetyce wiatrowej na morzu do ok. 5,9 GW w 2030 roku oraz uruchomienie w 2033 r. pierwszego bloku jądrowego o mocy ok. 1-1,6 GW. Dzięki tym inwestycjom zaplanowano spadek udziału węgla w wytwarzaniu energii elektrycznej do 56%. Krajowe zasoby węgla pozostaną więc istotnym elementem bezpieczeństwa energetycznego Polski. Konieczna jednak będzie dalsza modernizacja istniejących jednostek energetyki zawodowej w celu poniesienia ich trwałości, sprawności oraz umożliwienia współpracy z budowanymi nowymi jednostkami, które będą wykorzystywać odnawialne źródła energii. Do tego celu będą potrzebne materiały charakteryzujące się wysoką odpornością na pełzanie, na korozję wysokotemperaturową od strony spalin oraz utlenianie od strony pary wodnej. Istotna jest wysoka granica plastyczności, wysoka odporność na kruche pękanie oraz korozję naprężeniową. Ważna jest dobra spawalność oraz odkształcalność podczas przeróbki plastycznej. Do tego celu mogą być wykorzystane stale o osnowie ferrytycznej a w szczególności stale martenzytyczne, których ciągły rozwój pozwala na stosowanie ich w większości jednostek krajowego systemu energetycznego. W literaturze jest wiele prac poświęconych uzyskaniu prawidłowej struktury martenzytu odpuszczonego. W trakcie eksploatacji w wysokiej temperaturze następuje wydzielanie się fazy Lavesa oraz fazy Z, które zwykle wpływają negatywnie na właściwości użytkowe materiału. Dużo prac jest również poświęconych analizie wykonywania oraz eksploatacji połączeń spawanych. Proces wyżarzania odprężającego powinien zapewnić strukturę odpuszczonego martenzytu, z niewielką

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 21.11.2024  
RDJMa/1771/511/2024  
nr ..... zał. ....

ilością ferrytu  $\delta$ . Wyższy jego udział niż 2% może powodować wzrost kruchości oraz spadek właściwości wytrzymałościowych materiału. Dla złączy spawanych zbyt duża ilość ferrytu  $\delta$  będzie oznaczała spadek udarności w poszczególnych strefach złącza. W ostatnich latach badano również łączenie materiałów o osnowie austenitycznej oraz ferrytycznej. Wykazano, że konwencjonalna metoda spawania materiałów P92 oraz Inconel 617 bez użycia warstwy napawanej wykazuje niższe właściwości mechaniczne takie jak twardość oraz udarność. Badania zjawiska pełzania w elementach ze stali P92 po długotrwałym ich wyżarzaniu opisane były w wielu publikacjach na przestrzeni ostatnich lat. Wiele prac jest też poświęconych wyznaczaniu trwałości eksploatacyjnej elementów bloków energetycznych.

Oceniana praca wpisuje się więc w cykl badań nad poznaniem mikrostruktury, właściwości mechanicznych oraz trwałości złączy spawanych ze stali P92. Podjęte 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 124 strony i została podzielona na 9 rozdziałów. Rozpoczyna się od podziękowań a kończy spisem wykorzystanej literatury, listą rysunków, tabel oraz streszczeniem w języku polskim i angielskim.

W rozdziale pierwszym zamieszczono krótki wstęp, w którym wspomniano o modernizacji energetyki krajowej, wymieniono kilka zrealizowanych w ostatnich latach inwestycji, podkreślono konieczność badań oraz analiz w celu oceny wytrzymałości i trwałości elementów bloków energetycznych.

Rozdział drugi zawiera opis krajowej energetyki oraz głównych kierunków jej modernizacji. Omówiono stosowane w niej stale, w tym stale martenzytyczne, a w szczególności badaną stal P92. Przedstawiono technologiczne aspekty wykonania oraz testowania rurowych złączy spawanych. Opisano metody oceny trwałości eksploatacyjnej materiału części ciśnieniowych ze szczególnym uwzględnieniem diagnostyki stopnia degradacji elementów pracujących powyżej temperatury granicznej. Przeprowadzona analiza literatury dotyczącej trwałości eksploatacyjnej oraz degradacji właściwości użytkowych rurowych złączy spawanych wykonanych ze stali P92 pozwoliła na sformułowanie celu pracy, którym jest ocena trwałości eksploatacyjnej złączy spawanych ze stali P92. Dodatkowo postanowiono zbadać mechanizm zmian strukturalnych w obrębie strefy wpływu ciepła w złączu spawanym po jego długotrwałym wyżarzaniu.

Sformułowany cel pracy i wszystkie wykonane badania eksperymentalne opisano w rozdziale trzecim, który stanowi najważniejszą część pracy. Wykonano sześć złączy spawanych z tego samego materiału bazowego aby zminimalizować różnice w składzie chemicznym, właściwościach mechanicznych oraz składzie fazowym materiału. Podczas procesu spawania monitorowano szybkość nagrzewania, szybkość chłodzenia, temperaturę spawania, temperaturę międzyściogową, temperaturę wyżarzania oraz czas wytrzymania. Dla wykonanych złączy spawanych

wykonano badania nieniszczące: wizualne, magnetyczno-proszkowe/penetracyjne, ultradźwiękowe oraz twardości. Wyniki pomiarów nie wykazały wad w postaci mikropęknięć i porów, co potwierdziło prawidłowo wykonany proces spawania. Przebadane złącza spawane pocięto wzdłużnie co umożliwiło przygotowanie 72 próbek. Część z nich skierowano bezpośrednio do badań (próbki w stanie wyjściowym), a część poddano długotrwałemu wyżarzaniu w 4 konfiguracjach: 3.000 godzin w temperaturze 600°C; 10.000 godzin w temperaturze 600°C; 3.000 godzin w temperaturze 650°C oraz 10.000 godzin w temperaturze 650°C. W rozdziale 4.3 wymieniono planowane do wykonania badania eksperymentalne, podano rodzaj urządzeń oraz zacytowano normy, według których miały być wykonane pomiary. Obserwacje mikrostruktury przy powiększeniach od 500x do 40 000x wykonano za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego a identyfikację wydzielen skaningowo- transmisyjnym mikroskopem elektronowym. Analiza ilościowa obrazów mikrostruktury strefy wpływu ciepła była podstawą do przeprowadzenia podstawowej analizy statystycznej. Zaobserwowano wzrost wielkości wydzielen oraz zanik listwowej mikrostruktury odpuszczonego martenzytu dla próbek wyżarzanych przez 10 000 godzin w temperaturze 650°C w porównaniu do stanu wyjściowego. Pomiar twardości wykonano sposobem Vickersa HV10 i wykazano tendencję stali P92 do obniżania twardości wraz ze wzrostem czasu wyżarzania. Zjawisko to wynika z procesów koagulacji węglików  $M_{23}C_6$  i fazy Lavesa, co obniża efekt umocnienia wydzieleniowego. Próby udarnościowe przeprowadzone metodą Charpy'ego wykazały duży spadek pracy łamania we wszystkich strefach złącza spawanego, co też można tłumaczyć wystąpieniem procesów wydzieleniowych. Na podkreślenie zasługuje opis badanego zjawiska pełzania w rozdziale 3.5.5. Do tego celu wykorzystano maszyny do prób pełzania produkcji Sieci Badawczej Łukasiewicz - Górnośląskiego Instytutu Technologicznego w Gliwicach. Badania przeprowadzono przy pomiarze wydłużenia próbki w czasie i bez tego pomiaru. Wyniki wskazują, że dla próbek wyżarzanych w temperaturze 600°C, wzrost szybkości pełzania jest wolniejszy niż w przypadku próbek wyżarzanych w temperaturze 650°C. Potwierdza to wcześniejsze obserwacje badaczy, którzy podają dla stali P92 temperaturę 610°C jako maksymalną w długotrwałej ich eksploatacji. W tym rozdziale wyznaczono również utratę trwałości poprzez porównanie średniej wytrzymałości na pełzanie próbek wyżarzanych ze średnią wytrzymałością na pełzanie próbek w stanie wyjściowym. Wytrzymałość na pełzanie po 10 000 h i 100 000 h uzyskano przez ekstrapolację wyników uzyskanych ze skróconych prób pełzania (bez ciągłej rejestracji wydłużenia próbki) w temperaturze 650°C i przy naprężeniach 80, 100, 120 i 140 MPa. Rozdział 3.5.6 zawiera wyniki z analiz mikrostrukturalnych dla próbek, które były poddane próbom pełzania. Opis wielkości, które wpływają na trwałość eksploatacyjną złącza spawanego zamieszczono w rozdziale 3.6.

Wnioski końcowe zawiera rozdział czwarty. Główny cel doktoratu, którym było wyznaczenie trwałości eksploatacyjnej oraz ocenę degradacji właściwości użytkowych rurowych złączy spawanych został osiągnięty. Dodatkowo zbadano mechanizm zmian strukturalnych w obrębie strefy wpływu ciepła w złączu spawanym. Zaobserwowano, że dynamika procesów wydzieleniowych jest zauważalnie wyższa w przypadku złącza długotrwałe wyżarzane w 650°C. Półka wyżarzana w temperaturze 600°C przez 3 000 godzin wykazała utratę trwałości na poziomie 13% a wyżarzanie przez 10 000

godzin doprowadziło do 17% utraty trwałości w stosunku do próbki w stanie wyjściowym.

### C. UWAGI DYSKUSYJNE

Pytania do pracy:

- 1) Wykres spawania rurowego złącza (Rys. 25) nie jest czytelny. Brakuje również dokładniejszego opisu procesu spawania z podaniem wartości monitorowanych wielkości fizycznych.
- 2) Ani w rozdziale 3.4 ani w następnych nie podano dokładności wykorzystywanych urządzeń. Dokładności pomiaru temperatury i wydłużenia próbki podano jedynie dla maszyny do prób pełzania Sieci Badawczej Łukasiewicz - Górnośląskiego Instytutu Technologicznego w Gliwicach.
- 3) Na stronie 88 napisano „odczytano parametry linii trendu, opisane równaniami  $y=f(x)$ , a następnie obliczono wartości wytrzymałości na pełzanie  $R_z$  złącza spawanego po wyżarzaniu przez 10 000 godzin oraz 100 000 godzin dla wszystkich stanów badanego materiału”. Materiał był wyżarzany tylko 3 000 h i 10 000h, natomiast dokonujemy ekstrapolacji wyników z przeprowadzonych prób pełzania. Proszę o informację jak to było wyznaczone.
- 4) Dlaczego nie przeprowadzono skróconej próby pełzania dla takich samych parametrów temperaturowo-naprężeniowych jak w próbie pełzaniowej z rejestracją wydłużenia?
- 5) Dlaczego w obliczeniu trwałości eksploatacyjnej uwzględniono tylko wytrzymałość na pełzanie a nie uwzględniono wszystkich innych wyników badań? Jak wyglądałaby ubytek trwałości w oparciu o analizę czasu do zniszczenia?
- 6) Które wydanie normy PN-EN ISO 148-1 wykorzystano przy badaniach udarności? Na stronie 47 podano normę z 2010 roku a cytowana jest pozycja [111] czyli norma z roku 2017.

### D. OCENA KOŃCOWA

W recenzowanej rozprawie Doktorant podejmuje ambitny temat badań nad analizą trwałości eksploatacyjnej złączy spawanych z żarowytrzymałej stali P92. W tym celu wykonał sześć złączy spawanych z tego samego materiału bazowego aby zminimalizować różnice w składzie chemicznym i właściwościach mechanicznych materiału. Poprzez badania nieniszczące wykazał brak ukrytych wad w złączach spawanych w postaci mikropęknięć i porów. Następnie przygotował 72 próbki przez cięcie wzdłużne złączy spawanych, z których większość była poddana potem wyżarzaniu. 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 merytorycznych Doktorantowi udało się uzyskać szereg nowych oryginalnych wyników oraz wyciągnąć z nich wnioski pozwalające na ocenę trwałości eksploatacyjnej złączy spawanych ze stali P92. Mgr

inż. Karol Sówka 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. Karola Sówki pt. " Analiza trwałości eksploatacyjnej złączy spawanych z żarowytrzymałej stali P92" 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. Karola Sówki do dalszych etapów postępowania w celu nadania stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.



