

Prof. dr hab. inż. Maria RICHERT  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
Wydział Metali Nieżelaznych  
al. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków

**Recenzja rozprawy doktorskiej  
Pana mgr inż. Piotra Nowaka  
pt. „Analiza mechanizmu starzenia fizycznego kotłów energetycznych”**

**1. Podstawa formalna**

Recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Nowaka pt. „Analiza mechanizmu starzenia fizycznego kotłów energetycznych”. Podstawą formalną wykonania recenzji było pismo prof. dr hab. Sławomira Bukowskiego, Prorektora ds. Rozwoju i Współpracy z Zagranicą, Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, z dnia 23 czerwca 2016 r.

**2. Charakterystyka rozprawy**

Przedmiotem badań, w przedłożonej do recenzji rozprawie, były badania nad procesami fizycznego starzenia kotła energetycznego wodno-rusztowego. Rozważania dotyczyły skutków działania gazów spalinowych w wysokiej temperaturze kotła. Do procesów odpowiedzialnych za degradację podczas eksploatacji urządzenia zaliczane jest przyklejanie się obcych substancji na zewnętrznych warstwach elementów pieców energetycznych, korozja wysokotemperaturowa, występowanie zużycia ciernego. Badane zagadnienie jest niezwykle istotne ze względu na wagę problemu i wywoływane skutki w postaci niszczenia elementów kotłów grzewczych oraz przestoje wynikające z konieczności przeprowadzania remontów i napraw. Jednakże, zmienność warunków panujących w piecu, wywołująca zróżnicowany skład i stężenie spalin, zróżnicowanie temperatury oraz inne zmienne czynniki jak na przykład zróżnicowanie spalanego wsadu powodują, że trudno jednoznacznie przewidzieć następstwa oddziaływania wytworzonych w wyniku spalania substancji na materiał, z którego zbudowany jest kocioł. Warunki panujące w każdym kotle mogą być inne, stąd działania naprawcze muszą być bardzo elastyczne. Celem pracy jest ocena mechanizmu starzenia fizycznego elementów kotła energetycznego w zależności od zastosowanego paliwa, produktów spalania i miejsca eksploatacji.

Tematyka rozprawy odnosi się do fundamentalnych zagadnień inżynierii powierzchni i dotyczy badań eksploatacyjnych materiałów kotłowych. Ulepszenie eksploatacji kotłów energetycznych zwiększy efektywność produkcji energii cieplnej i elektrycznej, zmniejszy degradację elementów urządzenia oraz pozytywnie wpłynie na środowisko. Jest to tematyka



niezwykle ważna zarówno ze względu na aspekty poznawcze jak i wykorzystanie aplikacyjne. Dobór tematyki przedłożonej rozprawy jest bardzo trafny z punktu widzenia energetyki kraju i wynika z naukowych zainteresowań promotora pracy, którego osiągnięcia w tej dziedzinie, niewątpliwie ukierunkowały prace Doktoranta.

Rozprawa składa się z dziewięciu części: wstępu, analizy stanu wiedzy, celu pracy, rozdziału dotyczącego zakresu i metody badań, obejmującego metodologię przeprowadzonych eksperymentów i wyniki badań, dyskusji wyników, wniosków, propozycji dalszych badań i obejmuje spis literatury. W tym miejscu wyodrębnienie osobnego rozdziału dotyczącego tylko wyników badań byłoby korzystniejsze dla przejrzystości pracy.

W części dotyczącej przeglądu literaturowego Autor rozprawy dużo uwagi poświęcił zagadnieniu korozji oraz wpływie różnych czynników na żywotność kotłów energetycznych. W dalszych częściach rozprawy szczegółowo przedstawił badania struktury powierzchni próbek umieszczonych w różnych miejscach pieca energetycznego. Następnie przeprowadził analizę wyników, w szczególności odnosząc się do poszczególnych rodzajów stopów stosowanych w różnych miejscach pieca.

Przeprowadzone badania pozwoliły na ocenę użyteczności eksploatacyjnej badanych stali i wytypowanie najkorzystniejszego gatunku, umożliwiającego wydłużenie czasu eksploatacji pieca energetycznego.

Doktorant realizując pracę wykazał się umiejętnością dojrzałego zaprojektowania eksperymentów i ich praktycznego wykorzystania do osiągnięcia założonych celów badawczych.

W pracy przedstawiono wartościowe wyniki, których analiza skłania ku stwierdzeniu, że stanowią istotną część bazy danych wzbogacających wiedzę na temat nowoczesnych materiałów do zastosowania w przemyśle energetycznym.

### **3. Ocena merytoryczna rozprawy**

Rozprawa stanowi wyróżniające się, logiczne i metodycznie przedstawione opracowanie naukowe, dotyczące najbardziej aktualnych zagadnień inżynierii powierzchni.

Umiejętnie zaprojektowana metodologia badawcza doprowadziła do uzyskania serii danych pozwalających na ocenę zjawisk zachodzących w poszczególnych strefach pieca energetycznego, a w szczególności obejmuje analizę powierzchni próbek z osadzonymi osadami i skutkami korozji.

Rozprawa jest podzielona na spójne tematycznie sekcje, opisujące poszczególne badania i zagadnienia, które ułatwiają zrozumienie i cele badawcze Autora rozprawy dążącego do oceny struktury takich stali jak: X53CrMnNiN21-9, X18CrN28, X10CrAl24, 13CrMo 4-5, X6CrNiTi 10-18, X10CrMoVNb 9-1, X7CrNiTi 18-10, X6CrNiTi, stopów na bazie Fe3Al, stopów na bazie Ni3Al oraz na bazie Fazy NiAl w różnych temperaturach eksploatacji. Badania objęły także stal kotłową P265GH.

**W części I rozprawy – Wstęp**, Pan mgr inż. Piotr Nowak przedstawił ogólne dane dotyczące degradacji elementów kotła energetycznego i wskazał ogólnie na czynniki powodujące to zjawisko. Skrótowo zrelacjonował co stanowiło przedmiot badań rozprawy, wprowadzając czytelnika w zagadnienia badawcze i metodologię badań.

**W rozdziale 2 – Żywotność urządzeń - podstawowe pojęcia i definicje** Autor rozprawy przybliży czytelnikowi takie pojęcia jak: żywotność, mechanizmy starzenia fizycznego kotła energetycznego, omawia procesy niszczenia kotłów energetycznych



wymieniając jako najważniejsze przyczyny – starzenie termiczne, pełzanie, korozję, erozję i zmęczenie. Przedstawia także metody badawcze, które najlepiej określają stopień degradacji materiałów kotła, zaliczając do nich testy udarowości i wyznaczanie temperatury określającej stan kruchości. Jednocześnie mgr inż. Piotr Nowak zaprezentował w tym rozdziale algorytm obrazujący mechanizmy starzenia fizycznego kotła energetycznego, który celnie ilustruje mechanizmy uszkodzeń kotła i obrazowo zapoznaje czytelnika rozprawy z ciągiem możliwych zjawisk zachodzących podczas eksploatacji.

**W rozdziale 3 - Analiza stanu wiedzy** Autor rozprawy przedstawił w kilku podpunktach zatytułowanych kolejno:

- aktualne problemy w energetyce,
- czynniki destrukcyjne działające na materiał kotłów energetycznych,
- obserwacja reakcji w atmosferze kotła energetycznego,
- powstawanie w kotle energetycznym mieszanin stopionych soli,
- substancje mineralne i gazowe w spalinach, a degradacja elementów kotła opalanego węglem,
- zapobieganie procesom destrukcyjnym wywołanych przez gazy spalinowe,

istotne informacje dotyczące najważniejszych zagadnień prowadzących do niszczenia materiałów kotła energetycznego i określił zagrożenia powodujące degradację.

Cytując dane literaturowe Pan mgr inż. Piotr Nowak stwierdził, że ważnym zjawiskiem prowadzącym do degradacji materiałów kotła jest korozja płomieniowa. Drugim czynnikiem wpływającym niekorzystnie na materiał kotła jest jakość spalanych paliw.

Następstwem pracy kotłów energetycznych jest zanieczyszczenie środowiska i powstawanie toksycznych spalin i związków prowadzących do występowania awarii wskutek korozji, przegrzewania kotła i starzenia fizycznego. Autor rozprawy szczegółowo opisał powstawanie w kotle energetycznym mieszanin stopionych soli agresywnie oddziałujących na materiał kotłów. Agresywne środowisko głównie składa się z trójsiarczanów metali alkalicznych oraz pirosiarczanów. Kolejnymi niebezpiecznymi związkami pochodzącymi od spalin są chlorki powodujące katastrofalną korozję stali. Ponadto do degradujących czynników można zaliczyć liczne substancje osadzające się na elementach kotłów. Zasadniczym składnikiem tych substancji są:  $K_2SO_4$ , Ca, Si i Mg.

Oceniając następstwa oddziaływania spalin z materiałem elementów kotła należy podkreślić zmienność składu produktów spalania wynikających z różnych rodzajów stosowanego paliwa oraz parametrów jego spalania.

W związku z powyższym zapobieganie destrukcyjnym oddziaływaniom gazów spalinowych i innym zjawiskom niszczącym materiały kotła energetycznego jest trudne i stanowi prawdziwe wyzwanie. Do stosowanych zabezpieczeń ograniczających zużycie kotłów należą takie rozwiązania jak: stosowanie powietrza osłonowego, zmniejszenie granulacji miazgi węglowej, stosowanie lepszych gatunków paliwa, stosowanie stali o wyższej odporności na korozję i temperaturę, zmiany geometrii elementów, stosowanie warstw ochronnych, korzystnym rozwiązaniem może być także stosowanie rur dwuwarstwowych.

**W rozdziale 4 - Degradacja elementów energetycznych opisana w literaturze,** Pan mgr inż. Piotr Nowak omawia procesy powodujące starzenie fizyczne kotłów. Odnosi się do parametru - trwałości eksploatacyjnej i charakterystyki eksploatacyjnej. Omawia najnowsze rozwiązania elektrociepłowni oparte na najnowszych metodach technicznych i najlepszych



materiałach. Dyskutuje także ekonomikę, koszty modernizacji i zasadność ewentualnych zmian, które mogą polepszyć pracę kotłów. W kilku podrozdziałach punktu nr 4 analizuje najważniejsze przyczyny powodujące destrukcję elementów pieca energetycznego, omawiając wpływ produktów spalania na mechanizmy fizycznego starzenia występujące głównie w przypadku wysokich parametrów eksploatacyjnych. Szczegółowo analizuje skutki korozji chlorkowej, która jest jednym z najczęściej spotykanych czynników destrukcyjnych. Kolejnym zagadnieniem, szczegółowo omówionym w tym rozdziale są procesy utleniania stali kotłowych. Autor rozprawy przedstawia także układy równowagi stopów stosowanych w konstrukcji kotłów energetycznych i omawia zmiany występujące w strukturze stali pod wpływem temperatury. Następnie przybliży zagadnienie żywotności urządzeń kotła energetycznego, wskazując na zjawiska pełzania i zmęczenia cieplnego jako kolejne mechanizmy sprzyjające niszczeniu materiału kotła i skracające jego żywotność.

Pan mgr inż. Piotr Nowak, w celu przybliżenia budowy urządzeń stosowanych w elektrociepłowniach przedstawił także schematy różnego rodzaju kotłów, porównując ich wady i zalety.

**W rozdziale 5 - Cel pracy** Pan mgr inż. Piotr Nowak stwierdza, że celem przedłożonej dysertacji jest ocena mechanizmu starzenia fizycznego elementów kotła energetycznego w zależności od zastosowanego paliwa, produktów spalania i miejsca eksploatacji.

**W rozdziale 6 - Zakres i metoda badań** zostały przedstawione dane dotyczące kotła wodno-rusztowego typu WR25 z wymuszonym obiegiem wodnym, na którym przeprowadzono badania. Została przedstawiona budowa tego typu kotła, podane jego parametry techniczne, układ technologiczny, a także przedstawiono dodatkowe oprzyrządowanie kotła.

Materiałami do badań były stale żaroodporne: X18CrN28, X10CrAl24, X53CrMnNiN21-9, stal węglowa kotłowa - P265GH, stal konstrukcyjna stopowa 13CrMo4-5, Intermetale - stopy na bazie Fe<sub>3</sub>Al, FeAl, Ni<sub>3</sub>Al i NiAl, ponadto stal martenzytyczna X10CrMoVNb9-1, stal wysokostopowa X7CrNiTi18-10 i X6CrNiTi.

Próbki ze stali zamontowano w trzech strefach pieca, które odpowiadały temperaturze 700°C, 900°C i 1100°C.

Przeprowadzono badania wyjściowej struktury stali, która stanowią bazę do zmian obserwowanych po teście eksploatacyjnym.

Próbki ze stali żaroodpornych i stopy na bazie intermetali po teście eksploatacyjnym poddano badaniom w celu określenia stopnia korozji. Badania składu chemicznego po eksploatacji umożliwiły Autorowi rozprawy ocenę stopnia zawansowania korozji i wytypowanie rodzaju faz tworzących się na powierzchni próbek.

Autor rozprawy przeprowadził także badania właściwości pasywacyjnej materiałów, porównując stan powierzchni po ekspozycji w kotle energetycznym.

Interesującym podsumowaniem przeprowadzonych badań jest przedstawiona tabela dotycząca oceny wagowego zużycia próbek po eksploatacji. Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że największemu zużyciu uległa stal kotłowa P265GH. Najkorzystniejszą pod względem odporności na zużycie okazała się stal X6CrNiTi.

**W rozdziale 7 - Dyskusja wyników badań** Pan mgr inż. Piotr Nowak omówił wyniki badań stali poddanych testom eksploatacyjnym w kotle energetycznym wodno-rusztowym typu WR25 i poddał analizie użyteczność poszczególnych gatunków stali. Autor dysertacji stwierdził że najlepsze własności użytkowe posiada stal wysokostopowa X6CrNiTi, która



wydłuża czas eksploatacji kotła energetycznego nawet o 30 000 godzin, w porównaniu do stali stosowanych w przemyśle energetycznym. Jednocześnie jednak wskazał także na stale zaworowe, wysokostopowe oraz martenzytyczne jako posiadające doskonałe właściwości, przedłużające żywotność kotłów energetycznych. W związku z tym stwierdzeniem, korzystne byłoby uszeregowanie badanych stali pod względem przydatności eksploatacyjnej, z uwzględnieniem aspektu ekonomicznego istotnie wpływającego na możliwość ich zastosowania, przy zachowaniu dopuszczalnego ekonomicznie poziomu kosztów inwestycji.

**W rozdziale 8 - Wnioski** Pan mgr inż. Piotr Nowak wyciągnął na podstawie przeprowadzonych badań 10 wniosków podsumowujących przeprowadzoną analizę. Pewną uwagę można wnieść do wniosku nr 6, w którym stwierdzono iż rozrost ziarna nie był duży, pomimo, że nie przedstawił ilościowo wielkości ziarna i nie porównał go do poziomu odniesienia.

#### **4. Forma rozprawy**

Recenzowana rozprawa doktorska zawiera 135 stron. Wykaz literatury obejmuje 64 pozycje. Rozprawa została napisana pod kierunkiem dr hab. inż. Wojciecha Żurowskiego, prof. ndzw. UTH w Radomiu.

Recenzowaną rozprawę charakteryzuje logiczna struktura i przejrzysty opis. Treść rozprawy jest w pełni spójna z tytułem rozprawy. Przedstawiony spis rozdziałów oraz ich struktura jest prawidłowa i logiczna. Zamieszczone rysunki, tabele i wykresy dobrze ilustrują treść i opis prezentowanych wyników badań.

Kolejnym godnym uznania walorem pracy doktorskiej mgr inż. Piotra Nowaka jest znakomicie zaprojektowana metodyka badawcza, która wykorzystując techniki badań struktury i kładu chemicznego metodą EDS w prosty sposób umożliwiła osiągnięcie celu pracy i wysunięcie trafnych wniosków końcowych.

#### **5. Wnioski końcowe**

W mojej ocenie praca doktorska mgr inż. Piotra Nowaka „Analiza mechanizmu starzenia fizycznego kotłów energetycznych”, przygotowana pod kierunkiem dr hab. inż. Wojciecha Żurowskiego, prof. ndzw. UTH w Radomiu stanowi oryginalne osiągnięcie naukowe. Autor pracy trafnie wybrał tematykę badań z istotnego zakresu zagadnień energetycznych i umiejętnie sformułował cele badawcze. Postawiony do rozwiązania problem naukowy jest osadzony zarówno w obszarze ważnych kierunków badań podstawowych jak i rozwiązań aplikacyjnych, związanych z przemysłem energetycznym. Cele pracy zostały osiągnięte i w przekonujący sposób udowodnione zaprojektowanymi badaniami.

Przedstawioną rozprawę oceniam wysoko mając na względzie wkład pracy, samodzielne wykonanie i opracowanie oraz uzyskanie wartościowych wyników, które istotnie wzbogacają wiedzę z zakresu inżynierii materiałowej.

Uważam, że oryginalność badań, umiejętne zastosowanie przez Doktoranta odpowiednich technik badawczych, umiejętność krytycznej analizy wyników, ogrom wysiłku i pracy włożony w wykonanie rozprawy oraz wyczerpująca interpretacja uzyskanych danych, upoważniają mnie do postawienia wniosku o wyróżnienie pracy doktorskiej Pana mgr inż. Piotra Nowaka.

W mojej opinii rozprawa doktorska Pana mgr inż. Piotra Nowaka w pełni spełnia wymagania zawarte w ustawie o stopniach i tytule naukowym (art. 18 ust. 11 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule

w zakresie sztuki - Dz. U. nr 65, poz. 595 z późn. zm., 18 marca 2011r. Dz.U. nr 84 poz. 455, Dz.U. z dnia 14 października 2014 r. poz. 1383) i na tej podstawie wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Piotra Nowaka do obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej przed Radą Wydziału Mechanicznego Uniwersytetu Technologiczno – Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'P. Nowak', is located in the upper right quadrant of the page.