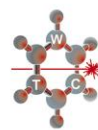




**Wojskowa
Akademia
Techniczna**

**Wydział
Nowych Technologii i Chemii**



Warszawa, dn. 05.02.2026r.

Prof. dr hab. inż. Tomasz CZUJKO,
Instytut Inżynierii Materiałowej
Wydział Nowych Technologii i Chemii
Wojskowa Akademia Techniczna
ul. Kaliskiego 2
00-908 Warszawa
e-mail: tomasz.czuiko@wat.edu.pl; tel. 261 839 445

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Agaty Tolarczyk

pt. „Procesy wydzieleniowe zachodzące w długotrwale starzonym stopie na bazie niklu”

Bezpieczeństwo energetyczne kraju, związane z gwarancją ciągłych, nieprzerwanych dostaw energii w niskiej cenie, obejmuje także dostępność infrastruktury oraz niezawodność operacyjną źródeł wytwórczych. W polskich realiach, gdzie budowa elektrowni jądrowych stanowi dość odległą perspektywę, zapewniają je konwencjonalne bloki węglowe, które w przeciwieństwo do tzw. odnawialnych źródeł energii (OZE) gwarantują stabilny, przewidywalny i ciągły dostęp do wytwarzanej energii.

Rosnące w absurdalnym tempie i zakresie wymogi ograniczenia emisji CO₂ do atmosfery w przemyśle elektroenergetycznym powodują konieczność budowy bloków pracujących w warunkach nadkrytycznych, bazujących przede wszystkim na nowoczesnych gatunkach żarowytrzymałych stali i stopów. Wprowadzenie nowoczesnych materiałów do energetyki poprzedzone jest zwykle wieloletnimi badaniami, mającymi na celu weryfikację ich właściwości użytkowych pod kątem potencjalnego zastosowania jako żarowytrzymałego materiału konstrukcyjnego. Jednym z nowoczesnych żarowytrzymałych materiałów przeznaczonych na elementy krytyczne jest stop na bazie niklu 23Cr-45Ni-6W-Nb-Ti-B (HR6W). Głównym zjawiskiem odpowiadającym za degradację mikrostruktury i obniżenie właściwości użytkowych stopów o osnowie austenicznej w czasie ich eksploatacji są procesy wydzieleniowe oraz zmiany w morfologii wydzieleni faz wtórnych.

Stąd też podjęcie się przez Doktorantkę analizy procesów wydzieleniowych zachodzących w stopie HR6W, po długotrwałym starzeniu w temperaturze 700 i 800°C i w czasie do 20 000 godzin oraz określenie ich wpływu na zmiany właściwości mechanicznych uważam za w pełni zasadne.

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Agaty Tolarczyk, pod wyżej wymienionym tytułem, o łącznej objętości 129 stron, składa się ze Spisu treści, Streszczenia, Przeglądu literatury (**rozdziały 1 - 3**), Badań własnych stanowiącego rdzeń merytoryczny pracy, zakończonych Podsumowaniem wyników badań oraz Stwierdzeniami i wnioskami. Praca ta kończy się Literaturą oraz spisem tabel i rysunków.

W ramach **Przeglądu literatury**, obejmującego 3 rozdziały, Doktorantka przedstawia opis wymagań Unii Europejskiej odnośnie udziału energetyki konwencjonalnej przy produkcji energii elektrycznej w Polsce, a także wskazuje na rodzaje materiałów stosowanych w nadkrytycznych parametrach pracy (**rozdział 1**). **Drugi rozdział** zawiera wnikliwą charakterystykę stopu bazie niklu HR6W, będącego przedmiotem badań Doktorantki. Część literaturową zamyka rozdział **trzeci** obejmujący opis mechanizmów degradacji mikrostruktury materiałów stosowanych w energetyce, ze szczególnym uwzględnieniem stopów o osnowie austenitycznej wraz z opisem potencjalnie występujących w mikrostrukturze tych materiałów wydzieleń faz pierwotnych i wtórnych.

Część badawczą pracy Doktorantka rozpoczyna postawieniem tezy wraz z poszczególnymi celami (głównym, poznawczym i utylitarnym). **Głównym** celem pracy doktorskiej była analiza procesów wydzieleniowych zachodzących w stopie na bazie niklu 23Cr-45Ni-6W-Nb-Ti-B (HR6W) po długotrwałym starzeniu w czasie do 20 000 godzin, w temperaturze 700 i 800°C. Ponadto w ramach przeprowadzonych badań określono wpływ długotrwałego starzenia na właściwości mechaniczne analizowanego stopu i wielkość ziarna austenitu stopowego oraz licznosc bliźniaków. Celem **poznawczym** rozprawy doktorskiej była analiza i opis procesu degradacji mikrostruktury i właściwości mechanicznych stopu HR6W podczas długotrwałego starzenia w podwyższonej temperaturze. Natomiast, jako cel **uitylitarny** pracy wskazano określenie i zbudowanie sekwencji wydzieleń faz wtórnych oraz powiązanie ich ze zmianami we właściwościach mechanicznych analizowanego stopu.

W kolejnych rozdziałach Doktorantka przedstawia zakres badań własnych, charakterystykę materiału do badań oraz zastosowaną metodykę badań obejmującą badania mikrostrukturalne z identyfikacją wydzieleń, badania stereologiczne i badania właściwości mechanicznych.

Następnie Doktorantka zaprezentowała wyniki badań własnych obejmujących charakterystykę metaloznawczą stopu HR6W w stanie dostawy oraz po długotrwałym starzeniu. W celu określenia wpływu długotrwałego oddziaływania temperatury na degradację mikrostruktury badanego stopu Doktorantka przeprowadziła badania mikrostrukturalne przy użyciu mikroskopii świetlnej, skaningowej oraz transmisyjnej mikroskopii elektronowej. Wyniki obserwacji strukturalnych wsparto ilościową analizą stereologiczną zmian wielkości ziaren oraz ilości bliźniaków

Całość części badawczej pracy uzupełniono badaniami właściwości mechanicznych, obejmującymi przeprowadzenie: statycznej próby rozciągania, próby udarowości oraz pomiaru twardości, celem określenia wpływu degradacji mikrostruktury na zmiany właściwości mechanicznych badanego stopu.

Uzyskane wyniki badań własnych pozwoliły Doktorantce na zbudowanie modelu degradacji mikrostruktury poprzez określenie sekwencji wydzieleni oraz opracowanie graficznego schematu zmian w mikrostrukturze badanego stopu. Uzyskane wyniki badań własnych pozwoliły na potwierdzenie tezy pracy, o dominującym wpływie procesów wydzieleniowych na stabilność mikrostruktury i właściwości mechaniczne.

Struktura pracy jest typowa dla prac doktorskich, a sama praca napisana jest prawidłowym językiem technicznym, z wykorzystaniem bogatej literatury o zasięgu międzynarodowym i posiada starannie opracowaną szatę graficzną oraz stojącą na bardzo wysokim poziomie dokumentację z badań własnych.

Recenzowana praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu, z wykorzystaniem zaawansowanych metod badawczych, poparte analizą uzyskanych wyników. Na podkreślenie zasługuje mnogość i zaawansowanie zastosowanych metodyk badawczych, świadczących o dojrzałym podejściu Autorki rozprawy do prowadzonych badań oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Praca nie zawiera istotnych błędów merytorycznych, a zawarte poniżej uwagi mają charakter dyskusyjny i służą lepszemu zrozumieniu omawianych zagadnień.

1. Rys. 6 brak jednostek na osiach Ilości CO₂ jak i Sprawności.
2. Rys. 12 brak symbolu „%” na osi Y.
3. Rys.81 na osi X wielkość ziarna jest w mm, a powinno być μm . Brakuje jednostki na osi Częstości. Poza tym lepszym rozwiązaniem byłoby przedstawienie histogramów rozkładu wielkości ziarna (o nieco mniejszych klasach) dla różnych stanów materiału

umieszczonych pod sobą. Przyjęcie klas o wielkości 40 μm może powodować, iż w pierwszym przedziale (klasie) pojawią się obiekty zakwalifikowane wadliwie przez program jako ziarna bardzo małe. Czy Doktorantka weryfikowała wyniki pomiarów programu pod względem wiarygodności i jeżeli tak to jak?

4. Na stronie 89 Doktorantka stwierdza „*Selektywny wzrost dużych ziaren oraz zwiększenie udziału objętościowego ziaren drobnych wskazuje na proces rekrytalizacji wtórnej osnowy austenitycznej stopu HR6W zachodzący w czasie długotrwałego wygrzewania.*” Jak Doktorantka definiuje proces **rekrytalizacji wtórnej** i jakie mechanizmy w ramach tego procesu powodują tworzenie ziaren drobnych?
5. 4.2. Badania stereologiczne i Rys. 88. Jak liczono ilość bliźniaków? Na jakiej powierzchni? Aby wynik był miarodajny powinno się to wykonywać na tej samej powierzchni dla każdej próbki. Z czego liczona była średnia i odchylenie standardowe? Z kilku obszarów o tej samej powierzchni?
6. Rys. 83 i 88. Oś czasu należało przedstawić w formie zmiennej liniowej lub log gdyż zastosowany sposób prezentacji nieco deformuje rzeczywisty obraz kinetyki zjawiska rozdrobnienia, o ile możemy o tym mówić zważywszy odchylenie standardowe wielkości ziaren, oraz spadku udziału ziaren bliźniaczych. Szczególnie widoczne będzie to dla rys. 88. Proszę o poprawienie rysunku 88 i przedstawienie mi jego interpretacji.
7. Na ilu próbkach przeprowadzono statyczną próbę rozciągania. Umieszczenia słupków błędów na rysunku 89 dałoby zdecydowanie pełniejszy obraz zmian właściwości mechanicznych.
8. Na ilu próbkach wyznaczano energii łamania? Umieszczenia słupków błędów na rysunku 91 dałoby zdecydowanie pełniejszy obraz zmian właściwości uderzeniowych.

Natomiast, do oryginalnych osiągnięć Doktorantki o charakterze naukowym i poznawczym zaliczam:

1. Charakterystykę procesów wydzieleniowych w stopie HR6W w trakcie długotrwałego starzenia wraz ze wskazaniem roli granic szerokokątowych i bliźniaczych.

2. Zbudowanie modelu degradacji mikrostruktury poprzez określenie sekwencji wydzieleni oraz opracowanie graficznego schematu zmian w mikrostrukturze badanego stopu.
3. Określenie wpływu tworzących się faz wtórnych (węglików $M_{23}C_6$, fazy Lavesa) na wzrost właściwości wytrzymałościowych oraz twardości analizowanego stopu, przy jednoczesnym obniżeniu jego właściwości plastycznych i znaczącym ograniczeniu ciągliwości.
4. Stwierdzenie w stopie starzonym w temperaturze 800°C, widocznego efektu przestarzenia, wynikającego z procesu koagulacji wydzielonych w osnowie cząstek faz wtórnych oraz pojawieniem się stref wolnych od wydzieleni.
5. Ujawnienie w mikrostrukturze starzonego stopu wydzieleni fazy α' bogatej w chrom, mogącej odgrywać istotną rolę w degradacji struktury i właściwości stopu HR6W.

Celem pracy była analiza procesów wydzieleniowych zachodzących w stopie na bazie niklu 23Cr-45Ni-6W-Nb-Ti-B (HR6W) po długotrwałym starzeniu w czasie do 20 000 godzin, w temperaturze 700 i 800°C wraz z określaniem wpływ długotrwałego starzenia na właściwości mechaniczne analizowanego stopu i wielkość ziarna austenitu stopowego oraz licznosc bliźniaków i **cel ten został w pełni osiągnięty.**

Uważam, że przedłożona do recenzji praca świadczy o znaczącej wiedzy ogólnej Doktorantki oraz umiejętności prowadzenia samodzielnego badań naukowych, a także w pełni odpowiada wymaganiom ustawowym stawianym rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Ponadto, zważywszy na mnogość i zaawansowanie zastosowanych metodyk badawczych oraz nowatorski charakter uzyskanych wyników zaprezentowanych w pracy, wnioskuję o jej wyróżnienie.

