

Dr hab. inż. Andrzej Zyska, prof. PCz  
Instytut Metalurgii i Technologii Metali  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów  
Politechnika Częstochowska  
ul. Armii Krajowej 19  
42-200 Częstochowa

Częstochowa 20.12.2024 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Małgorzaty Lenert pt.:

**„Wpływ materiałów wsadowych na jakość metalurgiczną żeliwa  
sferoidalnego w odlewach wielkogabarytowych”**

zrealizowanej pod opieką promotora Dr hab. inż. Marcina Stawarza, prof. PŚ

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Niniejsza recenzja została opracowana w odpowiedzi na pismo Pana Prof. dr hab. inż. Adama Grajcara, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej nr RDIMa.512.11.2024 z dnia 22.10.2024 roku, w którym poinformowano mnie, że uchwałą Rady Dyscypliny zostałem powołany na recenzenta w tym przewodzie oraz załączono komplet dokumentów wymaganych do dokonania oceny.

### 2. Ocena problematyki badawczej rozprawy

Żeliwo sferoidalne jest jednym z najbardziej wszechstronnych materiałów inżynierskich, oferującym szeroki zakres właściwości funkcjonalnych. Korzystne właściwości odlewnicze oraz relatywnie niskie koszty wytwarzania sprawiają, że zastosowania żeliwa z grafitem kulkowym mogą być różnorodne, od elementów maszyn i urządzeń, poprzez komponenty motoryzacyjne, aż do konstrukcji budowlanych i elementów dekoracyjnych. Obecnie (2022 r) w Europie (kraje zrzeszone w CAEF) udział produkowanych odlewów z żeliwa sferoidalnego wśród odlewów z metali żelaznych stanowi 44,3% rynku. W Polsce, w ostatnich 10 latach średnia wartość produkcji odlewów z żeliwa sferoidalnego kształtowała się na poziomie 150 tys. ton/rok. Popularność żeliwa sferoidalnego, a także możliwość sterowania jego strukturą i właściwościami sprawiają, że tworzywo to jest wciąż aktualnym przedmiotem badań prowadzonych w ośrodkach krajowych i zagranicznych. W grupie żeliw wysokojakościowych stosunkowo nowym gatunkiem jest żeliwo sferoidalne ferrytyczne umacniane roztworowo. Dwie główne cechy tego żeliwa - bardzo dobre właściwości plastyczne przy jednoczesnym

Biurowo Dziekana

weryfikacja dnia 02.01.2025  
RDIMa.512.11.2024  
Zaś...



zachowaniu wysokiej wytrzymałości na rozciąganie oraz wymagana homogeniczna osnowa metalowa predestynują ten materiał na odlewy wielkogabarytowe o zróżnicowanej grubości ścianki. Wyroby kształtowe z żeliwa SSFDI ze względu na swoją jednorodną strukturę nie wykazują tendencji do koncentracji naprężeń własnych i cechują się wysoką stabilnością wymiarową. Niewątpliwą zaletą żeliwa SSFDI jest także łatwość skrawania i obniżenie kosztów obróbki wykańczającej.

Inicjatorem wielu tematów badań nad żeliwem sferoidalnym jest przemysł odlewniczy oraz rosnące wymagania kontrahentów odlewni w zakresie jakości odlewów. Wprowadzenie nowych gatunków żeliwa do produkcji odlewniczej połączone często z modernizacją linii technologicznej implikuje wiele problemów, których rozwiązanie wymaga przeprowadzenia szeregu prac i badań o charakterze poznawczym i rozwojowym.

W problematykę wytwarzania wysokojakościowych odlewów wielkogabarytowych z żeliwa sferoidalnego wpisuje się praca Pani mgr inż. Małgorzaty Lenert. Jest ona wartościowym studium poznawczo-aplikacyjnym w zakresie doboru wsadu metalowego do wytopu żeliwa SSFDI, optymalizacji jego składu chemicznego w korelacji z geometrią odlewów oraz jednoczesną próbą oceny efektywności umocnienia roztworowego w przekrojach grubościennych. Uważam, że podjęta tematyka pracy jest aktualna i ważna i poszerza stan wiedzy w zakresie żeliwa sferoidalnego, a w szczególności żeliwa z umocnioną osnową ferrytyczną. Dużą wartością recenzowanej dysertacji jest realizacja części prac badawczych w warunkach przemysłowych i ich aplikacja do procesu produkcyjnego Odlewni Rafamet.

### **3. Ocena językowej i redakcyjnej formy Rozprawy**

Recenzowana praca doktorska posiada typową budowę dla tego typu opracowań i składa się z dwóch zasadniczych części. Część pierwsza zawiera studium literaturowe natomiast część druga obejmuje wyniki badań własnych oraz ich analizę, podsumowanie i wnioski. Całość rozprawy liczy 132 strony druku komputerowego i zamieszczono w niej 158 rysunków oraz 23 tabele. Przegląd literatury oraz zakres badań są spójnie połączone i odpowiadają wymogom pracy naukowej. Prawidłowo ustalono kolejność rozdziałów i logicznie usystematyzowano problematykę badawczą rozprawy. W pracy zamieszczono bardzo dużą ilość rysunków i należy podkreślić, że w zdecydowanej większości przygotowano je w sposób staranny. Całość rozprawy jest rzetelnie opracowana i napisana zrozumiałym językiem z użyciem właściwej terminologii. W tak dużym opracowaniu, zauważyłem tylko kilka błędów o charakterze redakcyjnym.

### **4. Ocena merytorycznej zawartości Pracy**

Pani mgr inż. Małgorzata Lenert, w części pierwszej rozprawy przedstawia obszerny przegląd stanu zagadnienia. Studium literaturowe rozpoczyna od zwięzłych informacji na temat wolumenu produkcji odlewów z żeliwa sferoidalnego oraz perspektyw jego rozwoju.



W oparciu o wskaźnik nastroju w europejskim przemyśle odlewniczym (FISI) oraz wskaźniki BCI i OIG przedstawia zmianę potencjału sektora odlewniczego w ostatnich sześciu latach, a także zwraca uwagę na utrzymujący się aktualny trend spadkowy ww. wskaźników związany z eskalacją wojny na Ukrainie, niestabilną ceną surowców, dominacją Chin na rynku światowym oraz transformacją energetyczną. W rozdziale drugim Doktorantka opisała znormalizowane gatunki żeliwa sferoidalnego, ze szczególnym uwzględnieniem gatunków o umocnionej roztworowo osnowie ferrytycznej. Trafnie odniosła się do problematycznych gatunków EN-GJS 500-7 i EN-GJS 600-3, w których uzyskanie właściwej proporcji ferrytu do perlitu możliwe jest tylko w odlewach o grubości ścianki do ok. 30 mm. Niejednorodność właściwości w odlewach o grubszych ściankach przyczyniła się do rozwoju gatunków nowej generacji o praktycznie jednorodnej strukturze ferrytycznej. Oprócz wielu zalet jakie wykazują gatunki SSFDI Doktorantka prawidłowo poruszyła zagadnienie ich obniżonej udurowienia i odporności na pękanie, głównie w temperaturach niskich. Za szczególnie wartościowe uważam rozdziały 1.3 i 1.4, w których Pani mgr inż. Małgorzata Lenert przedstawiła mechanizm umocnienia żeliwa ferrytycznego z uwzględnieniem oddziaływania dyslokacji i ich mobilności na granicę plastyczności ferrytu i naprężenia uplastyczniające oraz opisała wpływ głównych dodatków stopowych i zanieczyszczeń na grafityzację, strukturę i właściwości żeliwa sferoidalnego w tym gatunków o podwyższonej zawartości Si. Kolejny rozdział pracy jest syntetycznym opracowaniem z zakresu technologii wytwarzania żeliwa sferoidalnego. Doktorantka omówiła istotną rolę wsadu metalowego, materiałów pomocniczych oraz parametrów procesowych w aspekcie jakości metalurgicznej żeliwa, dziedziczności struktury i właściwości odlewów. Przybliżyła także najbardziej popularną metodę PE stosowaną do sferoidyzacji żeliwa oraz praktykę dwuetapowej modyfikacji. W rozdziale 1.6 Doktorantka odnosi się do specyfiki krystalizacji odlewów grubościennych. Wskazuje na niebezpieczeństwo występowania niejednorodnej struktury oraz niejednorodnych właściwości w poszczególnych częściach odlewów spowodowane różną intensywnością chłodzenia i obecnością węzłów cieplnych. Przytacza również związki pomiędzy szybkością chłodzenia, przechłodzeniem a morfologią i wielkością składników strukturalnych. Przedstawiona analiza jest poprawna, ale brakuje w niej sentencji odnośnie numerycznych rozwiązań zagadnień cieplnych oraz możliwości prognozowania struktury, w tym potencjalnych miejsc występowania wad odlewniczych, na podstawie symulacji parametrów kinetycznych krzepnięcia. W ostatnich dwóch rozdziałach Doktorantka omawia problematykę produkcyjną oraz możliwości aplikacyjne żeliwa SSFDI. Wymienia główne czynniki i ich wpływ na tworzenie się zdegenerowanych form grafitu oraz segregację dodatków stopowych podczas krzepnięcia odlewów grubościennych. Ze zrozumieniem opisuje przebieg i znaczenie tych zjawisk w kontekście jakości i eksploatacji odlewów. W rozdziale 1.7 uwagę zwraca ciekawy dobór zdjęć i rysunków ilustrujących morfologię grafitu chunky, mechanizm jego wzrostu oraz sposób rozmieszczenia na powierzchni odlewu po obróbce mechanicznej.

Opracowany na podstawie 104 pozycji literaturowych przegląd stanu zagadnienia jest wartościowym źródłem informacji nt. kształtowania struktury i właściwości odlewów



wielkogabarytowych wytwarzanych z żeliwa sferoidalnego ferrytycznego umacnianego roztworowo. Dobór i układ treści studium literaturowego są starannie przemyślane, natomiast ich opracowanie należy uznać za bardzo dobre. Na wysoką ocenę zasługują komentarze i krytyczne osądy Pani mgr inż. Małgorzaty Lenert w poszczególnych rozdziałach przeglądu literaturowego. Wobec powyższego stwierdzam, że przedłożona do recenzji **rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktorantki w dyscyplinie inżynieria materiałowa.**

Przeprowadzona wnikliwa analiza literaturowa pozwoliła Doktorantce sformułować w drugiej części rozprawy tezę i pięć celów pracy. Teza pracy jest dość ogólna, ale w połączeniu z celami szczegółowymi, które można uznać za jej doprecyzowanie, stanowi logiczne ujęcie podjętego zagadnienia badawczego oraz zaplanowanych prac eksperymentalnych.

W dalszej części opracowania Doktorantka z właściwą starannością prezentuje materiał badawczy, przebieg wytopów, zastosowaną aparaturę badawczą i metodykę pomiarów wraz ze stosownymi normami. Zakres badań przedstawiono w podpunktach, które syntetycznie i poglądowo określają przebieg kolejnych badań oraz dobrane narzędzia badawcze. Prace eksperymentalne zrealizowano w dwóch etapach wyróżniając badania wstępne i badania zasadnicze. Taki podział uważam za jak najbardziej zasadny, ponieważ pozwolił zminimalizować liczbę wytopów, zoptymalizować ilość badań, a jednocześnie wytypować kompozycje wsadu metalowego, które zapewniają najkorzystniejszy poziom właściwości wytrzymałościowych. Za trafny wybór uważam również zastosowanie w eksperymentach próby 4Y i odlanie w jednej formie wlewków z żeliwa o tych samych parametrach technologiczno-materiałowych, ale zróżnicowanej grubości ścian.

Kolejne rozdziały rozprawy przedstawiają kluczowe wyniki badań i opisy, które są realizacją ustalonych celów pracy i **stanowią oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.** Do najważniejszych osiągnięć, które wnoszą wkład własny Pani mgr inż. Małgorzaty Lenert w rozwój wysokojakościowego żeliwa sferoidalnego ferrytycznego, zaliczam:

- wyznaczenie zależności funkcyjnych opisujących siłę i charakter oddziaływań głównych pierwiastków występujących w żeliwie na jego strukturę i właściwości mechaniczne, a w tym określenie „współczynnika umocnienia” żeliwa SSFDI na poziomie 135 MPa/1%Si w badanym zakresie zmian krzemu 2,95-4,37 %;
- ustalenie kosztowo i technologicznie efektywnych proporcji materiałów wsadowych do wytopu gatunków EN-GJS 450-18, EN-GJS 500-14 i EN-GJS 600-10;
- opracowanie galerii mikrostruktur żeliwa SSFDI wraz z kompleksową analizą metalograficzną osnowy metalowej i wydzieleni grafitu;
- wyznaczenie granicznej zawartości manganu w korelacji z ilością krzemu w żeliwie, która zapewnia uzyskanie jednorodnej struktury ferrytycznej w odlewach;
- ocenę wrażliwości na szybkość chłodzenia żeliwa sferoidalnego ferrytycznego wraz z charakterystyką zmian właściwości mechanicznych w odlewach o grubości ścianki do 75 mm;



- weryfikację procedury wytwarzania żeliwa SSFDI oraz wyników badań laboratoryjnych na przykładzie dwóch produkcyjnych odlewów wielkogabarytowych.

Wyżej wymienione osiągnięcia o charakterze naukowym i aplikacyjnym są efektem dobrze zaplanowanej konstrukcji pracy oraz dość obszernych pomiarów i analiz. Pani mgr inż. Małgorzaty Lenert w swojej pracy wykorzystwała spektroskopię emisyjną, mikroskopię skaningową i świetlną, komputerową analizę obrazu, przeprowadziła: pomiary właściwości wytrzymałościowych ( $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ ) i wydłużenia, próby twardości oraz badania krzepnięcia metodą ATD. Realizacja tych wszystkich prac jest dowodem bogatego warsztatu badawczego jaki zdobyła i posiada Pani Doktorantka. Wysoko oceniam syntetyczne i obiektywne komentarze, zarówno do poszczególnych wyników badań jak i ich wzajemnych związków, które zostały zawarte w analizie prac badawczych, i które **jednoznacznie wskazują na umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.**

#### Uwagi krytyczne i pytania do Rozprawy:

W ramach pracy wykonano szereg pomiarów właściwości mechanicznych, ale nie podano bliższych informacji na temat ilości przebadanych próbek oraz poziomu rozproszenia zmierzonych wartości. Wskazaniem byłoby wykonanie podstawowych obliczeń statystycznych i wyznaczenie odchyłeń standardowych dla  $R_{m,}$ ,  $R_{p0,2}$  i HB, a także przedziałów ufności, szczególnie w odniesieniu do rysunków 87-91.

W rozdziałach 2.4.5, 2.5.5 i 3.3 Doktorantka zamieściła kilkanaście rysunków z wynikami badań krzepnięcia otrzymanych metodą analizy termiczno-derywacyjnej (ATD). Wyniki tych badań zostały jednak bardzo skromnie opisane i skomentowane. Ponadto, niektóre z oznaczeń takie jak np. kąt VPS czy też Rec (Rekalescencja) – nie posiadają stosownego objaśnienia w tekście.

- w ramach wytopów laboratoryjnych do modyfikacji pierwotnej zastosowano modyfikator barowy FeSiBa MB-10, a do modyfikacji wtórnej Inoculin 40. Czym kierowano się dobierając te modyfikatory i czy w odniesieniu do żeliwa sferoidalnego o osnowie ferrytycznej przeznaczonego na odlewy grubościennne rodzaj modyfikatora ma istotne znaczenie ?
- w celu określenia wpływu podwyższonej zawartości manganu na właściwości i strukturę żeliwa SSFDI do wytopów W4-W9 stosowano „klasyczny” złom stalowy. W żadnym z tych wariantów nie udało się wytworzyć gatunku spełniającego wymagania normy. Czy przyczyną jest jedynie perlitotwórcze działanie Mn, czy też inne cechy tego złomu ?
- w jaki sposób można wyjaśnić różnice w wydłużeniu (4% versus 10.6%) i umownej granicy plastyczności (395 MPa vs 531 MPa) pomiędzy wytopami W6 i W3, w których zawartość krzemu była na tym samym poziomie ok. 4,3% ?

- na rysunku 139 Doktorantka przedstawiła wpływ grubości ścianki na współczynnik kształtu grafitu w żeliwie gatunku EN-GJS 500-14. Czy jest znana przyczyna obniżonej wartości tego współczynnika we wlewkach typu II ?
- porównując wyniki badań ATD uzyskane na rejestratorze MultiCon (firma Simex) z wynikami z systemu ITACA (firma ProService) widoczne są istotne różnice w charakterystycznych temperaturach przemian fazowych badanych gatunków żeliwa. Przykładowo, dla gatunku EN-GJS 450-18 temperatura przemiany eutektycznej (uwzględniając wartość minimalną i maksymalną) zarejestrowana na pierwszym stanowisku wynosi ok. 1166°C, natomiast na stanowisku ITACA temperatura tej przemiany to 1152°C. Czym można uzasadnić tak wysoką wartość temperatury przemiany eutektycznej -1166°C i tak dużą różnicę ?

Przedstawione uwagi nie wpływają na wysoką jakość pracy doktorskiej i odnoszą się tylko do niektórych wyników badań i ich interpretacji oraz warunków prowadzenia eksperymentów. Uwagi te mają charakter dyskusyjny i mogą być pomocne podczas dalszej pracy naukowo-badawczej Doktorantki.

## 5. Wniosek końcowy

Uwzględniając oceny poszczególnych elementów rozprawy wyrażam opinię, że dysertacja Pani mgr inż. Małgorzaty Lenert stanowi samodzielne i wartościowe rozwiązanie ważnego zagadnienia naukowego i wykazuje Jej dobrą wiedzę teoretyczno-metodyczną oraz badawczą w obszarze technologii żeliwa sferoidalnego i inżynierii materiałowej.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pani mgr inż. Małgorzaty Lenert spełnia wymagania określone w ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. z późniejszymi zmianami) z późniejszymi zmianami. Wnoszę o dopuszczenie Jej do publicznej obrony na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej.

Prof. A. Zyska

/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)