

Kraków, 02.01.2025 rok

Prof. dr hab. inż. Dariusz Kopyciński  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica  
Wydział Odlewnictwa, ul. Reymonta 23  
30-059 Kraków

## Recenzja pracy doktorskiej

mgr inż. Małgorzata LENERT

w dyscyplinie naukowej: **Inżynieria Materiałowa**

pod tytułem: **Wpływ materiałów wsadowych na jakość metalurgiczną żeliwa sferoidalnego w odlewach wielkogabarytowych**

przygotowanej pod kierunkiem:

promotora: **dra hab. inż. Marcina Stawarza, prof. PŚ**

opiekuna przemysłowego: **dra inż. Rafała Dojki**

### 1. Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej w Katowicach. Pismo nr RDYMa.512.11.2024. Podstawa prawna art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (z późn. zm.).

Opinia dotycząca przedmiotowej rozprawy doktorskiej zawiera trzy elementy:

- Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydatki ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w dyscyplinie inżynieria materiałowa;
- Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Kandydatkę ubiegającą się o nadanie stopnia doktora;
- Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

### 2. Charakterystyka i opis rozprawy

Stan fizykochemiczny ciekłego metalu wpływa na liczbę ziaren austenitu pierwotnego oraz ziaren eutektyki grafitowej w odlewie z żeliwa, co bezpośrednio przekłada się na jego właściwości mechaniczne oraz na brak wad odlewniczych typu: pęknięcia na gorąco, porowatość czy jamy skurczowe. Posiadamy w dyspozycji kilka działań, które możemy podjąć w celu sterowania stanem fizykochemicznym ciekłego metalu, a są nimi: uszlachetnianie ciekłego metalu oraz temperatury zabiegów przegrzewania ciekłego metalu i jego odlewania.

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 03.01.2025  
RDYMa.17151/2025  
nr ..... zał. ....

Bardzo ważnym etapem w procesie wytwarzania odlewu jest opracowanie składu chemicznego żeliwa oraz przygotowanie składu wsadu metalowego. Powyższe rozwiązania decydują w końcu o zarodkowaniu i wzroście kryształów podczas samej krystalizacji. Początek rozwoju teorii zarodkowania datuje się na lata trzydzieste XX wieku, kiedy to została opublikowana przez Volmera i Webera i później rozwinięta przez Turnbulla. Według tych autorów zarodkowanie jest niczym innym, jak procesem kształtowania się klasterów czyli zgrupowań atomów w ciekłym metalu, co jest niezbędne do ich naturalnego wzrostu w danych warunkach termodynamicznych. Zarodkowanie w ciekłym metalu jest etapem początkowym krystalizacji metali i ich stopów po którym następuje nieprzerwany wzrost kryształów. Niewątpliwie najważniejszym wskaźnikiem wytwarzania odlewów z żeliwa jest zwiększenie liczby ziaren eutektycznych. Ponadto ocenie podlegają zmiany charakterystyki wydzieleni grafitu. Zmniejsza się wartość stopnia przechłodzenia  $\Delta T$  podczas krystalizacji eutektyki grafitowej oraz zmniejsza się również skłonność żeliwa do zabieleni. Można założyć, że suma tych zmian powinna prowadzić do zwiększenia właściwości mechanicznych odlewu z żeliwa. Jednak zagadnienie to komplikuje się kiedy wykonywane jednostkowo odlewy z żeliwa są wielkogabarytowe oraz stosowane żeliwo ma charakter stopowy. Zazwyczaj wtedy prowadzone badania sprowadzają się do opracowania technologii *know how* wytwarzania danego odlewu.

Dobrym przykładem nowej technologii są badania zaprezentowane w recenzowanej pracy doktorskiej. Przedstawiona do oceny praca ma klasyczny układ dla tego typu opracowań. W części pierwszej Kandydatka ubiegająca się o nadanie stopnia doktora na podstawie zestawionej literatury zaprezentowała następujące zagadnienia: Żeliwo sferoidalne – porównanie właściwości podstawowych gatunków z żeliwami ferrytycznymi umocnionymi roztworowo; Rola krzemu w żeliwach sferoidalnych – wpływ na kształtowanie struktury i mechanizm umocnienia roztworowego; Wpływ składu chemicznego żeliwa na jego strukturę i właściwości mechaniczne; Wytwarzanie żeliwa sferoidalnego - materiały wsadowe (złom stalowy, żeliwny oraz surówka) i obróbka pozapiecowa tj. zabiegi modyfikowania oraz sferoidyzowania żeliwa; Krystalizacja żeliwnych odlewów grubościennych, Ocena ferrytycznego żeliwa sferoidalnego umocnionego roztworowo podwyższoną zawartością krzemu jako wyzwania w produkcji przemysłowej. W części tej zostało również przedstawione zastosowanie i możliwości aplikacyjne ferrytycznego żeliwa sferoidalnego umocnionego roztworowo podwyższoną zawartością krzemu przeznaczonego na odlewy grubościenne. Wadą, inaczej - niedopowiedzeniem w tej części pracy jest nie poinformowanie czytelnika we wstępie, że przedmiotem rozprawy doktorskiej jest szczególny przypadek żeliwa sferoidalnego - nazwany w tekście gatunkiem nowej generacji tj.: ferrytyczne żeliwo sferoidalne umocnione roztworowo o podwyższonej zawartości krzemu. Szczególnie w przypadku, że temat pracy nie zawiera tej informacji. Wtedy stało się jasne, że w literaturze nie obserwuje się badań wpływu podwyższonej zawartości krzemu w żeliwie sferoidalnym na pojawienie się niekorzystnych wydzieleni grafitu typu „chunky” w odlewach wielkogabarytowych. Forma „chunky” grafitu należy do najczęstszych degeneracji grafitu występujących w odlewach wielkogabarytowych. Dlatego podjęcie wysiłku opracowania nowej technologii wytwarzania odlewów wielkogabarytowych z ferrytycznego żeliwa sferoidalnego umocnionego roztworowo o podwyższonej zawartości krzemu należy ocenić jako ze wszech miar wskazane.

Zatem można stwierdzić, że w pierwszej części pracy Kandydatka przedstawiła na dobrym poziomie merytorycznym stan wiedzy z analizowanego obszaru inżynierii materiałowej dotyczącego tematyki rozprawy doktorskiej. Na podstawie pierwszej części pracy na początku części drugiej kandydatka formułuje główne cele prowadzonych badań oraz tezę pracy (41 stron). Należy wyrazić przekonanie, że zadanie to zostało wykonane. Jednak postawiona teza pracy, jej sformułowanie na pewno nie jest odważne, natomiast jest z jednej strony oczywiste i z drugiej, zbyt ogólne. Tymczasem wnioski zawarte na końcu pracy są bardzo interesujące oraz w sposób szczegółowy odpowiadają celom przyjętym w pracy. Szkoda, że zaprezentowana teza pracy nie ewoluowała podczas prowadzenia badań i nie wyraża procesu dochodzenia do odkryć badawczych. Nie jest to ze szkodą dla całości pracy, jednak nie zostały w tym miejscu pracy ujawnione najciekawsze dla Kandydatki aspekty związane z oddziaływaniem wsadu metalowego na strukturę i właściwości badanego żeliwa przeznaczonego do wytwarzania odlewów wielkogabarytowych.

Przechodząc do bardziej szczegółowych uwag dotyczących wstępu przedstawiającego stan wiedzy, to interesujące jest wprowadzenie pojęcia gatunków nowej generacji (str. 5) w zderzeniu z gatunkami I generacji (str. 112) dla żeliwa sferoidalnego – proszę o wyjaśnienie. Również nie jest jasno wyjaśnione zjawisko zmniejszenia się właściwości wytrzymałościowych oraz plastycznych przedmiotowego żeliwa po przekroczeniu krytycznej zawartości krzemu – jaka jest przyczyna tak nagłej zmiany? Ponadto ostatnie zdanie na str. 17 de facto dotyczące zwiększonej zawartości krzemu w żeliwie i jego wpływu na udarność wymaga preredagowania. Na rys. 14 zaznaczono dwa obszary I oraz II, jakie one mają znaczenie w opisie merytorycznym dla danego podrozdziału? W opisie oddziaływania krzemu na kształtowanie struktury i mechanizm umocnienia roztworowego (str. 18 do str. 24) występuje szereg nazwisk badaczy, ale nie ma do nich przypisanej pozycji literaturowej, czy to jest niedopatrzenie wynikające z redakcji tekstu? Na stronie 28 pojawia się opis negujący wpływ Cu na strukturę w wielkogabarytowych odlewach z żeliwa sferoidalnego, natomiast już w testowym składzie W1 żeliwa sferoidalnego w tabeli 7 na str. 53 pierwiastek ten się pojawia, proszę wytłumaczyć dlaczego zastosowano w tym wypadku dodatek miedzi?

Z kolei w części drugiej (89 stron) rozprawy doktorskiej Kandydatka zamieściła opis prowadzonych przez siebie badań, a w tym udokumentowała wykorzystywane materiały, metody oraz uzyskane wyniki. W części przedstawiającej badania własne Kandydatka opracowała metodykę badań i podzieliła je na etapy. Pierwszy z nich obejmował uzyskanie żądanych właściwości mechanicznych odlewów dla każdego z gatunków żeliwa tj. EN-GJS 450-18, EN-GJS 500-14, EN-GJS 600-10. W swoich badaniach przeprowadziła 14 wytopów w których ograniczono udziału surówki odlewniczej na korzyść złomu żeliwnego i stalowego. Wynikiem badań było szczegółowe zestawienie wpływu udziału surówki odlewniczej na właściwości mechaniczne badanego żeliwa oraz wpływu manganu na udział perlitu w osnowie metalowej i właściwości mechaniczne żeliwa oraz udziału krzemu na właściwości mechaniczne tego samego żeliwa.

Drugi etap miał na celu określenie wpływu zróżnicowanej grubości ścianek odlewu na właściwości mechaniczne. Wykorzystano do tego znormalizowane próbki „Ygrek” o zmiennej grubości, łącząc je w jeden odlew w celu zachowania jednakowych warunków metalurgicznych, tzw. próba 4Y. W oparciu o dyspozycje wsadowe z I etapu badań zastosowano optymalne zawartości surówki we wsadzie

metalowym, a mianowicie: 60% dla żeliwa gatunku EN-GJS 450-18, 60% dla żeliwa dla gatunku EN-GJS 500-14, oraz 40% dla żeliwa gatunku EN-GJS 600-10. Dla tego etapu wyznaczono zależność grubości ścianki odlewu na właściwości mechaniczne badanego żeliwa. Dla etapu I oraz etapu II badań zestawiono dla każdej otrzymanej próbki mikrostruktury przygotowane na mikroskopie optycznym i zdjęcia przełomów tych próbek wykonane na mikroskopie skaningowym oraz przeprowadzono dla każdego wytopu analizę termiczno-derywacyjną ATD.

Pracę kończy dyskusja wyników badań i wskazanie najważniejszych wniosków oraz wdrożenie opracowanej technologii do warunków przemysłowych odlewni Rafamet Sp. z o.o. oraz wytworzenie dwóch odlewów produkcyjnych tj. pierścienia z żeliwa gatunku EN-GJS 450-18 oraz korpusu z żeliwa gatunku EN-GJS 500-14.

Najważniejszym osiągnięciem rozprawy doktorskiej według recenzenta jest wytypowanie najbardziej korzystnych składów chemicznych oraz dyspozycji wsadowych pieca, które umożliwiają uzyskanie zgodności gatunkowej badanego żeliwa sferoidalnego oraz dokonanie oceny wpływu grubości ścianki odlewu na właściwości mechaniczne żeliwa. W pracy udowodniono, iż wraz ze wzrostem szybkości krystalizacji możliwe jest uzyskanie największych właściwości wytrzymałościowych żeliwa. Większa grubość ścianki odlewu jednak zapewnia większe wydłużenie odlewu oraz większy udział ferrytu przy mniejszym dodatku krzemu. Sprzyja to redukcji ilości tego pierwiastka w odlewach wielkogabarytowych i prowadzi do uniknięcia degeneracji grafitu w formę „chunky”, co wiąże się z uzyskaniem wyższych właściwości użytkowych odlewów. W powyższym ujęciu część badawcza ma spójny charakter i pozwala stwierdzić, że Kandydatka osiągnęła zaplanowane cele oraz udowodniła tezę pracy. Niewątpliwie stanowi to jej ważny wkład do obszaru badań materiałowych.

Do bardziej szczegółowych uwag dotyczących tej części pracy można zaliczyć, brak oceny wartości stopnia przechłodzenia  $\Delta T$  w korelacji z udziałem surówki we wsadzie metalowym pieca. Dlaczego nie przeprowadzono obliczeń tego najważniejszego parametru krystalizacji? W jaki sposób (technicznie) został przeprowadzony zabieg sferoidyzowania podczas etapu I oraz etapu II w części badawczej rozprawy? Nie jest podana wartość temperatury odlewania ciekłego metalu? W pracy jest podawany zakres temperatury podgrzania ciekłego metalu po zabiegu sferoidyzowania, stąd metodyka zalewania próbek ciekłym metalem jest niejasna. Z którego miejsca odlewu pobierano próbki do badań metalograficznych? Na stronie 72 pojawia się trend - niby koagulacji cząstek - proszę to wyjaśnić. Na str. 73 w ostatnim zdaniu oceniono warunki krystalizacji jako pożądane – jak czytelnik ma to rozumieć. Co to jest premodyfikator i na czym polega modyfikacja wtórna? I uwaga bardziej ogólna: w pracy doktorskiej w podrozdziałach oznaczonych jako wyniki badań nie powinno się zamieszczać tabel, rysunków oraz zdjęć mikrostruktury bez jakiegokolwiek informacji tekstowej, niestety jest to największy mankament części badawczej rozprawy.

Recenzowana praca jest obszernym opracowaniem zawierającym szereg rysunków, zdjęć mikrostruktury i wykresów (w sumie 133 strony, 158 rysunków i 23 tabele) oraz dodatkowo posiada streszczenie pracy w j. polskim oraz j. angielskim. Liczba pozycji literaturowych wynosi 104. Część badawcza zdecydowanie góruje nad częścią dotyczącą przeglądu stanu wiedzy (89 stron do 41stron). Należy przyznać, że recenzowane opracowanie zostało przygotowane starannie oraz w zasadzie nie zawiera większych błędów edycyjnych (trzy błędy).

### 3. Wniosek końcowy

W podsumowaniu stwierdzam, że przedstawiona praca doktorska dobrze dokumentuje ogólną wiedzę teoretyczną oraz umiejętność samodzielnego planowania i prowadzenia badań Kandydatki ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w obszarze przygotowania jakości metalurgicznej żeliwa sferoidalnego przeznaczonego na odlewy wielkogabarytowe. Jednocześnie pragnę podkreślić, że rozprawa ta stanowi nowe, oryginalne rozwiązanie problemu uzyskania wysokich właściwości wytrzymałościowych w odlewach wielkogabarytowych z ferrytycznego żeliwa sferoidalnego umocnionego roztworowo podwyższoną zawartością krzemu. Większa grubość ścianki odlewu zapewnia większe wydłużenie  $A_5$  oraz większy udział ferrytu przy mniejszym dodatku krzemu. Sprzyja to redukcji ilości tego pierwiastka w odlewach wielkogabarytowych i prowadzi do uniknięcia degeneracji grafitu w formę „chunky”, co wiąże się z uzyskaniem wyższych właściwości użytkowych odlewów. Biorąc to pod uwagę stwierdzam, że recenzowana rozprawa w pełni spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określonej w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

*Dariusz Kyziołek*