



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



**WYDZIAŁ
MECHANICZNO-
TECHNOLOGICZNY**
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

Stalowa Wola, 17.01.2024 r.

dr hab. inż. Andrzej TRYTEK, prof. PRz
POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. Ignacego Łukasiewicza
Wydział Mechaniczno-Technologiczny
Zakład Wytwarzania Komponentów i Organizacji Produkcji
ul. Kwiatkowskiego 4, 37-450 Stalowa Wola

RECENZJA

rozprawy doktorskiej

mgra inż. Rafała Dwulata

pt.: *„Wpływ struktury wsadu i modyfikacji wtórnej na jakość metalurgiczną żeliwa przeznaczonego na odlewy motoryzacyjne”*,

której promotorem jest dr hab. inż. Krzysztof Janerka prof. PŚ

Recenzję wykonano na podstawie pisma RDIMa.RMT.512.20.2023. z dnia 23.11.2023 r. od Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Marii Sozańskiej.

1. Tematyka rozprawy

Rozwój produkcji przemysłowej oraz nowoczesnych technologii jest nierozłącznie związany z doskonaleniem wykorzystywanych materiałów. Jednym z wielu materiałów metalicznych współcześnie stosowanych do wytwarzania odlewanych części i komponentów dla motoryzacji jest żeliwo. Jest to stop znany od kilku tysięcy lat, a grupa odlewniczych stopów żeliwa z powodu wymagań przemysłowych rozrasta się o nowe gatunki z jeszcze lepszymi właściwościami.

Rosnące potrzeby i zmiany zachodzące w polityce gospodarczej oraz środowiskowej wymuszają na przedsiębiorstwach metalurgicznych intensyfikację działań związanych z ekologią i redukcją kosztów wytwarzania. Wiąże się to przede wszystkim z wdrażaniem nowych rozwiązań w technologii produkcji umożliwiających oszczędności. W przemyśle odlewniczym takie rozwiązania są szczególnie poszukiwane w celu zmniejszania zużycia energii i surowców w procesach wytopiania i obróbki ciekłego metalu. Odlewnia, która inwestuje w rozwój tych zagadnień jest firmą nowoczesną, innowacyjną oraz konkurencyjną na rynku.

Mając na uwadze obecne wymagania i wyzwania przemysłu uważam, że tematyka badań podjęta przez mgra inż. Rafała Dwulata w rozprawie pt.: *„Wpływ struktury wsadu i modyfikacji wtórnej na jakość metalurgiczną żeliwa przeznaczonego na odlewy motoryzacyjne”* jest aktualna i niezbędna dla odlewnictwa. Ponadto aspekt wdrożeniowy rozprawy dodaje tej pracy pozytywny wydźwięk użyteczny.

2. Charakterystyka i układ pracy

Praca doktorska mgra inż. Rafała Dwulata liczy 129 stron i podzielona jest na dwie części: studium literaturowe oraz badania własne. Studium literaturowe składa się z 9 rozdziałów głównych a badania własne z 4 rozdziałów głównych. Na końcu pracy zamieszczono streszczenia w

językach polskim i angielskim. W pracy zamieszczono 31 tabel, 103 rysunki oraz 9 wzorów i równań. Literatura zawiera 89 pozycji krajowych i zagranicznych, w tym 3 współautorstwa Doktoranta.

2.1. Część teoretyczna

W studium literaturowym rozprawy Autor dokonał analizy stanu zagadnień związanych z produkcją żeliwa sferoidalnego. W pierwszych rozdziałach scharakteryzował żeliwo sferoidalne materiały wsadowe do wytapiania żeliwa oraz czynniki istotne mające wpływ na jakość ciekłego stopu. Przeanalizował technologię wytopu żeliwa ze szczególnym uwzględnieniem zmian składu chemicznego oraz zmian po zabiegach sferoidyzacji i modyfikacji. W rozdziałach 4 i 5 Doktorant omówił teorię zarodkowania grafitu opisując pięć głównych teorii oraz krystalizację grafitu sferoidalnego. Rozdział 6 pracy Autor poświęcił krzepnięciu żeliwa sferoidalnego podeutektycznego, eutektycznego i nadeutektycznego. W rozdziale 7 omówił wady odlewnicze związane ze skurczem metalu występujące w odlewach żeliwnych. Rozdział 8 rozprawy przedstawia metodykę badań analizy termiczno-derywacyjnych ATD oraz interpretację uzyskiwanych krzywych stygnięcia i jej parametrów. Rozważania teoretyczne zakończono podsumowaniem przeglądu literatury w rozdziale 9.

2.2. Część praktyczna

Badania własne Doktorant rozpoczął rozdziałem 10, w którym przedstawił cele, tezę pracy oraz zakres badań. Autor przedstawił dwa główne cele:

- badawczy, dotyczący przeprowadzenia wytopów żeliwa ze zmiennym udziałem materiałów wsadowych,
- wdrożeniowy, dotyczący poprawy jakości oraz zmniejszenia ilości surowki we wsadzie.

Teza pracy przedstawiona przez Doktoranta:

„Odpowiedni dobór struktury wsadu i rodzaju modyfikatora wtórnego powoduje poprawę parametrów fizykochemicznych, właściwości mechanicznych, parametrów mikrostruktury oraz zmniejszenie wielkości wad skurczowych w produkowanych odlewach z żeliwa.”

Postawione cele i sformułowana teza pracy były podstawą do opracowania zakresu pracy, który obejmował: studia literaturowe (dotyczące zagadnień ściśle powiązanych z tematyką rozprawy), badania wstępne (dotyczące czynników wpływających na skład chemiczny i właściwości żeliwa) oraz badania zasadnicze (dotyczące analizy termiczno-derywacyjnej, wpływu wsadu oraz modyfikatorów wtórnych na właściwości żeliwa sferoidalnego).

W rozdziale 11 Autor przedstawia badania wstępne wpływu materiałów wsadowych na jakość metalurgiczną żeliwa szarego. Analizowano sześć wytopów żeliwa o zmiennej zawartości surowki, złomu stalowego, nawęglacza RANCO 9905 i FeSi. Zmiana dotyczyła głównie udziału surowki we wsadzie od 0 % do 50 %. Po każdym wytopie zalewano próbki do analizy ATD oraz badań składu chemicznego. Wyniki badań przedstawiono w formie tabelarycznej (skład chemiczny) oraz graficznej (krzywe ATD). Charakterystyczne parametry analizy ATD (T_{liquidus} , T_{emin} , T_{emax} , T_{solidus} , Rec, VPS) przedstawiono dla poszczególnych wytopów bez modyfikacji oraz po zabiegu modyfikacji. Wyniki omówiono oraz przedstawiono w formie graficznej wraz z równaniami regresji w zależności od zawartości surowki we wsadzie. Przedstawiono również wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie i twardości HB żeliwa w zależności od udziału surowki we wsadzie. Wyniki przeanalizowano i podsumowano wnioskami.

W rozdziale 12 Doktorant przedstawił badania zasadnicze realizowane w warunkach przemysłowych Odlewni Żeliwa Lisie Kąty. W pierwszym etapie badań oceniono skłonność żeliwa szarego do zabielen w zależności od sposobu wytapiania. Żeliwo uzyskano w warunkach produkcyjnych z pięciu różnych sposobów wytapiania:

- uzyskane poprzez wytopienie w żeliwiaku,
- uzyskane w procesie duplex,
- uzyskane z pieca przetrzymującego – magazynowane przez dwa dni,
- uzyskane z pieca przetrzymującego – magazynowane przez dwa dni i modyfikowane,
- uzyskane z pieca przetrzymującego uzupełniane na bieżąco z żeliwiaka i transportowane do pieca dozującego.

Wpływ rodzaju materiału wsadowego oraz grubości ścianek odlewu schodkowego na właściwości oceniono z jednego wytopu żeliwa uzyskanego z żeliwiaka kampanijnego z dmuchem tlenowym. Pobrano próbki, na których analizowano: skład chemiczny metalu wyjściowego oraz po sferoidyzacji z 8 różnych wytopów, obliczano równoważnik węgla, mierzono długość zabielenia klina oraz parametry ATD ($T_{liquidus}$, T_{emin} , Rec, VPS). Wpływ grubości ścianki odlewu na mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne określano z wykorzystaniem odlewu schodkowego. Wyniki przedstawiono tabelarycznie i graficznie z równaniami regresji w funkcji grubości ścianki odlewu. Dla potrzeb tych badań opracowano i zaprojektowano płytę modelową do formy odlewniczej z pionowym podziałem. Próbki do badań pobierano z odlewów eksperymentalnych z kolejnych przekrojów ścianek odlewu schodkowego. Oceniono właściwości mechaniczne żeliwa: wytrzymałość na rozciąganie R_m , granicę plastyczności $R_{0,2}$ oraz wydłużenie A_5 . Nie oceniono twardości. Uzyskane wyniki przedstawiono tabelarycznie i graficznie z równaniami regresji w funkcji grubości ścianki odlewu. Badania zglądów metalograficznych trawionych i nietrawionych na poszczególnych przekrojach ścianek odlewów pozwoliły na ujawnienie mikrostruktury osnowy metalowej oraz określenie ilości grafitu na mm^2 , udziału % grafitu w osnowie oraz współczynnika kształtu grafitu, a także udziału ferrytu w mikrostrukturze. Autor wyniki analizował w formie równań regresji parametrów strukturalnych (grafitu oraz ferrytu) w zależności od grubości ścianki odlewu oraz poszczególnych wytopów. Tę część uzyskanych wyników Doktorant zakończył wnioskami.

Kolejnym etapem badań zasadniczych było określenie wpływu modyfikatorów wtórnych na właściwości żeliwa. W badaniach wykorzystano 6 typów modyfikatorów (Zr, Ce, Fe-Si, Ba, RE, Bi). Wykonano odlewy eksperymentalne schodkowe oraz próbki klinowe (Y typ II) w formie z pionowym podziałem. Kontrolowano ich skład chemiczny, temperaturę ciekłego metalu, oraz właściwości fizykochemiczne metodą ATD. Na przekrojach poprzecznych odlewów schodkowych oceniano wielkość jam skurczowych w zależności od użytego modyfikatora i powiązano je z wynikami analizy ATD. Uzyskane w tej części wyniki badań wad skurczowych oraz parametrów ATD (HEH , $T_{liquidus}$, T_{emin} , $T_{solidus}$, Rec, VPS) analizowano w zależności od zastosowanego modyfikatora. Oceniono również właściwości mechaniczne żeliwa: wytrzymałość na rozciąganie R_m , granicę plastyczności $R_{0,2}$ oraz wydłużenie A_5 w zależności od zastosowanego modyfikatora. Nie oceniono twardości. Ostatnią część stanowiły badania metalograficzne z wykorzystaniem mikroskopu optycznego oraz skaningowego elektronowego, a także programu do analizy mikrostruktury. Badania mikrostruktury żeliw modyfikowanych przeprowadzono na zglądach metalograficznych nietra-

wionych i trawionych. Oceniono liczbę wydzieleni grafitu, kształt grafitu, udział grafitu, współczynnik kształtu grafitu oraz udział ferrytu. Wyniki badań zestawiono tabelarycznie i wykreślił oraz udokumentowano zdjęciami mikrostruktur. Te badania zakończono wnioskami.

Rozprawę Autor zakończył podsumowaniem i wnioskami końcowymi w rozdziale 13. W rozdziale tym odniósł się do uzyskanych wyników badań i postawionych celów.

3. Ocena rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Dwulata zawiera błędy edytorskie tekstu i grafiki. Nie są one przytaczane w recenzji, ale zostały przesłane Autorowi.

Jednakże Doktorant w kolejnych opracowaniach naukowych powinien zwrócić uwagę na kilka przedstawionych poniżej sugestii, które należałoby uwzględnić przy ich redagowaniu;

- Strona 24: „*Fosfor w żeliwie jest pierwiastkiem niepożądanym i szkodliwym,*” należałoby dodać że wyjątek stanowi żeliwo na odlewy tarcz hamulcowych gdzie jest pierwiastkiem pożądanym.
- Strona 38 rozdział 6: „*Mikrostruktura powstała w wyniku procesu krzepnięcia jest tą, która nada ostateczne właściwości mechaniczne materiałowi, gdy nie zostaną zastosowane dalsze manipulacje (na przykład obróbka cieplna).* Tu raczej należałoby stwierdzić: ... dalsze zabiegi technologiczne.
- Rozdział 6 rysunki 23, 24, 25, 26, 28, 29 powtarzają się, wystarczyłby jeden większy z różnymi oznaczeniami dla kolejnych rodzajów żeliwa.
- Strona 63, rozdział 11.1 powołanie na rysunek 44 jest powołaniem niewłaściwym lub brak odpowiedniego rysunku.
- Strona 64, rozdział 11.1 Autor pisze „*Kolejnym krokiem było zalanie próbniaka do analizy termiczno-derywacyjnej (próbniak QC4010 ...), pobranie próbki do analizy chemicznej (próbniak SAF DO400 ...) oraz zalanie próbek do badania właściwości mechanicznych.*” Brak informacji do jakich form lub wg jakiej normy wykonano próbki do badań właściwości mechanicznych.
- Rozdział 12 Badania zasadnicze. Do pełnej oceny właściwości uzyskanych żeliw brak pomiarów twardości.
- Strona 118 „*...odlewy stają się nieobrabialne mechanicznie i potrafią pękać.*” Odlewy nie potrafią pękać. Odlewy posiadają skłonność do pęknięcia.

Przedstawione powyżej uwagi nie umniejszają wartości naukowej i merytorycznej niniejszej pracy.

4. Osiągnięcia Doktoranta

Zaprezentowana w recenzowanej rozprawie doktorskiej metodyka badawcza jest oryginalna i opracowana na potrzeby realizacji postawionych celów naukowego i wdrożeniowego oraz udowodnienia postawionej tezy.

Doktorant opracował własną koncepcję i zaprojektował płytę modelową z odlewami eksperymentalnymi do badań. Dzięki temu możliwe było wykonanie odlewów eksperymentalnych w warunkach przemysłowych. Umożliwiło to realizację badań w warunkach produkcyjnych Odlewni Żeliwa Lisie Kąty.

Autor rozprawy opracował plan badawczy, który uwzględniał wiele zmiennych procesu wytapiania żeliwa i obróbki ciekłego metalu.

Doktorant dowiódł, że postawiona teza jest słuszna. Zmienił skład wsadu metalowego i modyfikacji wtórnej a poprzez to jakość metalurgiczną ciekłego żeliwa. Zmienił recepturę wsadu dla wytopów żeliwa gatunku GJS 500-7 zmniejszając ilość surówki z 30% do 10%, zastępując ją złotem stalowym i obiegowym. Dzięki temu uzyskał takie same właściwości mechaniczne przy ograniczeniu kosztów wsadu metalowego do wytapiania żeliwa. Wprowadził nowy modyfikator, który zapewnił właściwości plastyczne żeliwa oraz zminimalizował wady skurczowe. Wprowadził ocenę skłonności żeliwa do zbieleń z zastosowaniem metody ATD, co pozwala na uniknięcie kosztów związanych z obróbką cieplną odlewów.

Doświadczenie przemysłowe Doktoranta, Jego umiejętność prognozowania oraz realizacja odpowiednich prób i zadań wskazuje, że ma On zdolności badawcze i predyspozycje naukowe.

5. Uwagi i pytania do Doktoranta

Proszę mgra inż. Rafała Dwulata o wyjaśnienia i odpowiedź na poniższe kwestie:

- Na rysunku 63 (str. 80) przedstawiono eksperymentalną płytę modelową z oznaczonymi miejscami pobierania próbek. Dlaczego badania mikrostruktury wykonano na próbkach pobranych z obszaru w pobliżu powierzchni odlewu, a nie ze środka ścianki odlewu ?
- Na stronie 97 znajduje się opis dotyczący oceny skuteczności modyfikacji z wykorzystaniem systemu wizyjnego. Nie ma opisu metodyki tego pomiaru, a na rysunku 83 przedstawiono obraz z kamery, z którego nie można tego jednoznacznie określić. Brak również wyników tego badania.
- Na stronach 99-101 opisano badania wad skurczowych. Na podstawie rysunku 84 nie można określić metody pomiaru wielkości jamy skurczowej. Czy wykorzystano do tego celu program komputerowy, czy też mierzono ręcznie? W tabeli 29 oprócz wskazanych wcześniej parametrów przedstawiono dodatkowo porowatość. Nie ma opisu metodyki pomiaru dla tego parametru.
- W jednym z wniosków kończących rozdział 12.3.2. (str. 115-116) Doktorant napisał: „*Żeliwo modyfikowane Bi uzyskało poziom Rec zgodny z zaleconym zakresem. Wysokie wartości mogą być przyczyną deformacji formy w wyniku jej niskiej sztywności.*” Oznaczałoby to, że zaprojektowano nieprawidłowo formę lub użyto niewłaściwej masy formierskiej. Co Autor miał na myśli formułując taki wniosek ?

6. Wniosek końcowy

Rozprawa mgra inż. Rafała Dwulata pt: „*Wpływ struktury wsadu i modyfikacji wtórnej na jakość metalurgiczną żeliwa przeznaczonego na odlewy motoryzacyjne*”, **spełnia wymagania dotyczące prac doktorskich:**

- praca została zrealizowana według własnej założonej koncepcji i planu badawczego,
- postawiona w rozprawie teza została przez Doktoranta udowodniona poprzez wykonane badania i uzyskane wyniki,
- Autor opracował własną koncepcję i opracował odlewniczą płytę modelową do wykonywania odlewów eksperymentalnych w warunkach przemysłowych,
- wyniki badań zostały opracowane w formie tabel, wykresów, mikrostruktur i dokonano ich analizy,

- uzyskane rezultaty wnoszą do praktyki odlewniczej z zakresu wytapiania żeliwa nową wiedzę i stanowią oryginalny wkład naukowo-badawczy dla tej branży,
- wyniki badań zostały wdrożone w praktyce przemysłowej Odlewni Żeliwa Lisie Kąty.

Recenzowana rozprawa doktorska mgra inż. Rałafa Dwulata to oryginalne opracowanie, w którym dowiódł umiejętności samodzielnego planowania i rozwiązywania zadań badawczych. Doktorant dokonał analizy literatury, przygotował koncepcję i plan eksperymentów badawczych. Autor wykazuje predyspozycje do opracowania, interpretacji i analizy wyników badań naukowych.

Biorąc po uwagę powyższe stwierdzenia uważam, że rozprawa doktorska mgra inż. Rałafa Dwulata pt: *„Wpływ struktury wsadu i modyfikacji wtórnej na jakość metalurgiczną żeliwa przeznaczonego na odlewy motoryzacyjne”* spełnia wymagania ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. z późniejszymi zmianami. **Wnioskuje, do Rady Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej, o dopuszczenie do publicznej obrony mgra inż. Rałafa Dwulata.**

