

Częstochowa, dn.5.01.2024 r.

prof. dr hab. inż. Zbigniew Konopka, emeryt  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów  
Katedra Metalurgii i Technologii Metali  
Politechnika Częstochowska

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Rafała Dwulata**

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

opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa  
Politechniki Śląskiej w Gliwicach

### 1. Ocena przedmiotu rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Rafała Dwulata reprezentuje dyscyplinę Inżynieria Materiałowa i dotyczy opracowania technologii przygotowania ciekłego żeliwa przeznaczonego na odlewy motoryzacyjne. Praca o charakterze aplikacyjnym przedstawia wyniki badań wpływu struktury wsadu i modyfikacji wtórnej na jakość metalurgiczną żeliwa wyjściowego do procesu sferoidyzacji i w konsekwencji na strukturę, właściwości mechaniczne oraz jakość odlewów z uwzględnieniem ich grubości ścianki. Celem wdrożeniowym pracy było zmniejszenie ilości surówki odlewniczej we wsadzie i rozszerzenie struktury asortymentowej produkcji o bardziej złożone technologicznie odlewy bez pogorszenia ich jakości.

Badania przedstawione w pracy bazują na znanej teorii i praktyce procesów metalurgicznych, wytopu i odlewania żeliwa sferoidalnego uwzględniających wpływ składu chemicznego metalu oraz parametrów zabiegów sferoidyzacji i modyfikacji na jakość ciekłego metalu i odlewu. Zagadnienie oddziaływania powyższych czynników

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 15.01.2024  
RD311a | RMT | 131 | SI | 2024  
nr ..... zat. ....

technologicznych i materiałowych na krzepnięcie oraz kształtowanie struktury i właściwości odlewów jest dobrze zbadane i opisane w literaturze.

Rozwinięte w ostatnich latach metody numerycznej symulacji procesów wypełniania formy odlewniczej i krzepnięcia w niej odlewu istotnie udoskonaliły proces odlewania pozwalając na identyfikację potencjalnych miejsc w odlewie zagrożonych wadami. Nie opisują one jednak ilościowych związków stosowanych parametrów odlewania z określonymi typami wad w odlewie, a także uniemożliwiają sterowanie procesem w czasie rzeczywistym. Zastosowana w pracy metoda pomiaru temperatury stygnącego i krzepnącego w doświadczalnej formie odlewu próbnego (analiza termiczna) umożliwia powtarzalną kontrolę procesu wytwarzania żeliwa sferoidalnego czasie rzeczywistym. Metoda analizy termicznej stosowana jest w odlewniach żeliwa szarego, rzadziej w technologii żeliwa sferoidalnego. Powyższe przesłanki jednoznacznie wskazują na konieczność prowadzenia badań eksperymentalnych i w pełni uzasadniają podjęcie badań w tym zakresie.

Wytworzenie, zgodnego z normami, gatunku żeliwa sferoidalnego według zaproponowanej w pracy procedury materiałowo-technologicznej jest innowacyjnym rozwiązaniem ponieważ zdolność do krystalizacji grafitu sferoidalnego zostaje uzyskana zwiększonym udziałem nawęglacza, odpowiednią temperaturą ciekłego metalu i modyfikacją wtórną przy zmniejszonym udziale kosztownej surówki odlewniczej we wsadzie. Sterowanie parametrami tej nowej technologii uzyskuje się przez zastosowanie własnych algorytmów w interpretacji krzywych stygnięcia. Pozwala to opisać ich wpływ na jakość odlewów, co ma niewątpliwie także ważne znaczenie ekonomiczne polegające na potencjalnym zmniejszeniu kosztów produkcji odlewów.

Uwzględniając powyższe stwierdzam, że Autor zaproponował innowacyjne rozwiązanie, a wyniki przedstawione w pracy mogą służyć jako algorytm poprawy jakości odlewów w stworzonej bazie danych. Z uwagi na specyfikę metalurgii i odlewania żeliwa sferoidalnego wynikającą z dużej różnorodności asortymentowej wykonywanych odlewów, szerokiego zakresu zmian parametrów odlewania i dużej liczby kryteriów jakościowych odbioru, wyniki pracy mogą być wykorzystane do badania i sterowania jakością konkretnego odlewu. Jest to zagadnienie naukowo-badawcze o dużej wartości poznawczej i innowacyjnej z dużym potencjałem wdrożenia wyników do praktyki przemysłowej.

Wybór tematyki badań uznaję za trafny i celowy, a praca lokuje się w innowacyjnym obszarze badań naukowych. Proponowane w pracy rozwiązanie wynika z rosnącej konkurencji i potrzeby rynkowej, które stawiają coraz większe wymagania jakościowe odlewom z żeliwa sferoidalnego.

## 2. Ocena rozprawy

Tekst rozprawy liczy 122 strony, który uzupełniają: bibliografia zawierająca 89 pozycji literaturowych i streszczenia w języku polskim i angielskim. Rozprawa składa się z dwóch głównych części. W pierwszej części przedstawiono obszerny przegląd literatury dotyczący: ogólnej charakterystyki żeliwa sferoidalnego, opisu etapów produkcji ciekłego metalu z uwzględnieniem czynników materiałowych (materiały wsadowe, skład chemiczny), zabiegów sferoidyzacji i modyfikacji, teoretycznych podstaw krystalizacji grafitu sferoidalnego i krzepnięcia żeliwa, interpretacji krzywych stygnięcia żeliwa uzyskanych podczas pomiarów analizy termicznej.

Ten fragment rozprawy został opracowany bardzo dobrze ponieważ Autor dokonał trafnego, pod względem zakresu, doboru materiału źródłowego informacji naukowej, przedstawiony opis jest skoncentrowany na tematyce pracy, bez zbędnych, nieistotnych dla badanej tematyki informacji, opis jest wnikliwy i jasny a ważne treści odpowiednio wzbogacono odpowiednimi wykresami i równaniami. Przełożyło się na wysoką jakość opracowania tej części pracy pod względem merytorycznym, językowym i edytorskim. Przegląd literatury kończy rozdział 9 przedstawiający podsumowanie przeglądu literatury i uzasadnienie podjęcia badań własnych Autora. W podsumowaniu oceny tej części pracy stwierdzam, że przedstawiony przegląd literatury odpowiada wymogom pracy doktorskiej na poziomie wyróżniającym.

W drugiej części pracy zatytułowanej „Badania własne” Autor przedstawia wyniki badań własnych formułując na wstępie cele pracy, tezę i zakres badań. Celem naukowym było określenie wpływu rodzaju materiałów i struktury wsadu oraz modyfikacji wtórnej na jakość metalurgiczną ciekłego żeliwa z uwzględnieniem grubości ścianki odlewu (szybkości krzepnięcia). Celem wdrożeniowym było zmniejszenie udziału surówki odlewniczej we wsadzie bez pogorszenia współczynnika braków produkowanych odlewów.

Na podstawie jasno określonych celów pracy przedstawiono tezę i zakres badań. W tezie sformułowano oczekiwaną poprawę właściwości mechanicznych i zmniejszenie liczby wad skurczowych w produkowanych odlewach w wyniku odpowiedniego doboru struktury wsadu i rodzaju modyfikatora wtórnego zwiększające zdolność ciekłego żeliwa do krystalizacji grafitu kulkowego.

Teza w pełni odpowiada na postawione cele pracy mające określić zależności między doбором materiałów wsadowych, parametrami topienia i zabiegiem modyfikacji

grafityzującej a strukturą, właściwościami mechanicznymi i jakością odlewów, i stanowi nowe podejście do rozwiązania postawionego zagadnienia w skali przedsiębiorstwa.

Dla osiągnięcia celu pracy zrealizowano program badawczy obejmujący badania w skali laboratoryjnej i w warunkach produkcyjnych odlewni. Zakres badań laboratoryjnych obejmuje:

- wykonanie 6 różnych rodzajów żeliwa szarego, wyjściowego do sferoidyzacji, ze wsadu o zmiennym udziale surówki odlewniczej (0-50%), złomu stalowego, nawęglacza i żelazokrzemu FeSi75 w piecu indukcyjnym tyglowym o pojemności 20 kg,
- badanie składu chemicznego wykonanych rodzajów żeliwa,
- badania stygnięcia i krzepnięcia wytworzonego żeliwa bez modyfikacji i z modyfikacją metodą różniczkowej analizy termicznej,
- wyznaczenie modeli matematycznych zależności parametrów analizy termicznej ( $T_{emin}$ -minimalna temperatura krzepnięcia eutektyki,  $Rec$ -rekalescencja, VPS-wskaźnik szybkości przejścia żeliwa ze stanu półstałego w stały) od udziału masowego surówki we wsadzie bez zabiegu modyfikacji,
- wyznaczenie zależności wpływu udziału surówki we wsadzie na efekt zabiegu modyfikacji mierzony parametrem  $\Delta T_{emin}$ ,
- pomiary wytrzymałości na rozciąganie i twardości żeliwa wyjściowego (szarego GJL200 i GJL250) w zależności od udziału surówki we wsadzie,

W obszarze badań przemysłowych wykonano:

- badania skłonności żeliwa do zabielen żeliwa (próba klinowa) wytworzonego w żeliwiaku kampanijnym i w procesie duplex z różnymi kombinacjami czasu przetrzymywania żeliwa w piecu przetrzymującym i modyfikacją (5 rodzajów żeliwa),
- badania stygnięcia i krzepnięcia wytworzonego żeliwa metodą różniczkowej analizy termicznej z wyznaczeniem modeli matematycznych wpływu  $T_{emin}$ , równoważnika węgla CE i źródła pochodzenia żeliwa (metody wytopu) na zabielenie,
- wykonanie 8 różnych rodzajów żeliwa ze wsadu o zmiennym udziale surówki odlewniczej (22-55%) w żeliwiaku kampanijnym z dmuchem wzbogaconym w tlen, z zastosowaniem metody przewodu elastycznego do zabiegu sferoidyzacji,
- pomiary składu chemicznego i parametrów krzepnięcia wytworzonych żeliw dla różnych grubości ścianek odlewów w zakresie 6,3-50,8 mm (odlew schodkowy),
- wyznaczenie modeli matematycznych zależności parametrów analizy termicznej ( $T_{emin}$ , VPS) od udziału masowego surówki we wsadzie,

- pomiary wytrzymałości na rozciąganie, granicy plastyczności i wydłużenia w zależności od udziału surówki we wsadzie i grubości ścianki odlewu z żeliwa sferoidalnego,
- ilościowe badania metalograficzne mikrostruktury wytworzonych żeliw dla różnych grubości ścianek odlewów,
- badania wpływu różnych modyfikatorów wtórnych na strukturę i właściwości wytypowanego żeliwa

W szczegółowo opisanej metodyce badań przedstawiono: stosowane materiały, procedury wykonania pomiarów z zastosowanymi parametrami, rysunki i zdjęcia wykonanych odlewów oraz dokumentację zdjęciową procesu odlewania. Zastosowane metody pomiarowe, zaplanowany zakres badań, metody obliczeniowe i weryfikacji są adekwatne do osiągnięcia oczekiwanego celu pracy.

W rozdziale 11.2 przedstawiono następujące wyniki badań żeliwa szarego do sferoidyzacji uzyskane w skali laboratoryjnej:

1. wytopiono 6 żeliw o jednakowym składzie chemicznym ze wsadów o zmiennym udziale surówki dzięki właściwemu doborowi udziału grafitu syntetycznego jako nawęglacza, złomu i żelazokrzemu FeSi75 oraz odpowiednio wysokiej temperaturze i stopnia wymieszania ciekłego metalu,
2. potwierdzono, znany wzrost zdolności żeliwa do zarodkowania grafitu ze wzrostem udziału surówki we wsadzie. Dla każdego żeliwa uzyskano wymagane wartości parametrów grafityzacji (jakość metalurgiczna) zmierzone w analizie termicznej,
3. potwierdzono większą wytrzymałość na rozciąganie i twardość żeliwa syntetycznego (bez dodatku surówki) od pozostałych rodzajów żeliwa,

W rozdziale 12 przedstawiono następujące wyniki badań zrealizowanych w warunkach przemysłowych:

1. potwierdzono negatywny wpływ przetrzymywania żeliwa w piecu na zwiększenie skłonności żeliwa do zabielen. Nie stwierdzono zmiany skłonności żeliwa do zabielen dla żeliwa otrzymanego w żeliwiaku i w procesie duplex (żeliwiak+piec elektryczny),
2. wykazano i przedstawiono liczbowo spadek długości zabielenia w próbie klinowej ze wzrostem wartości parametru  $T_{min}$ . Przedstawiono liczbowe wartości parametrów  $T_{min}$ ,  $Rec$ ,  $VSP$  gwarantujące uzyskanie wymaganego, co do gatunku, żeliwa sferoidalnego,

3. przedstawiono modele matematyczne wpływu udziału surówki, złomu stalowego, antracytu na jakość metalurgiczną ciekłego żeliwa określoną parametrami Temin, i VPS) dla technologii żeliwa sferoidalnego w skali przemysłowej,
4. wyznaczono równania opisujące wpływ grubości ścianki odlewu na wytrzymałość na rozciąganie ( $R_m$ ), granicę plastyczności ( $R_{0,2}$ ) i wydłużenie względne ( $A$ ) wytworzonego żeliwa sferoidalnego w różnych technologiach,
5. udokumentowano zdjęciami mikrostrukturę odlewów i przedstawiono ilościowe wyniki badań metalograficznych wydzieleni grafitu i osnowy,
6. wytypowano modyfikatory wtórne zawierające Ce i Bi jako najlepiej zwiększające zdolność żeliwa do grafityzacji i zmniejszające skłonność do tworzenia jam skurczowych.

Uzyskane wyniki, wynikające z teorii i praktyki metalurgii i odlewania żeliwa sferoidalnego, dowodzą jednoznacznie tezę pracy i potwierdzają osiągnięcie założonych celów pracy. Autor poprawnie zinterpretował uzyskane wyniki. Ważnym naukowo wynikiem badań są wyznaczone empiryczne zależności jakości metalurgicznej, zdolności do grafityzacji i tworzenia jam skurczowych żeliwa oraz właściwości mechanicznych odlewów w funkcji struktury wsadu, metod wytopu i zabiegów modyfikujących. Wyniki badań pracy są innowacyjne w skali krajowej i mają duże znaczenia praktyczne, a także wnoszą nową wiedzę w teorię i praktykę metalurgii i odlewania żeliwa sferoidalnego. Podsumowując wyniki badań własnych Autora stwierdzam, że:

- potwierdzono doświadczalnie możliwość sterowania jakością metalurgiczną żeliwa przez dobór udziału surówki we wsadzie gwarantującą otrzymanie wymaganego gatunku żeliwa sferoidalnego,
- autorska interpretacja krzywych stygnięcia i krzepnięcia żeliwa pozwala na ocenę skłonności żeliwa do przechłodzenia i wyeliminowanie problemu zabielen w odlewach cienkościennych oraz jest dodatkowym narzędziem uzupełniającym badania spektrometryczne identyfikacji składu żeliwa na wykresie Fe-C,
- udowodniono możliwość zmniejszenia udziału surówki we wsadzie przy zachowaniu wymaganych właściwości mechanicznych, co przekłada się na korzystny, wymierny efekt ekonomiczny produkcji odlewów,
- opracowano recepturę wsadu dla wytopów żeliwa EN-GJS 500-7 zmniejszając udział surówki we wsadzie z 30 do 10%,
- opracowano sposoby sterowania strukturą odlewów z żeliwa sferoidalnego (charakterystyka wydzieleni grafitu) w zależności od grubości ścianki odlewu,

Sekwencję badań własnych kończy podsumowanie i wnioski. Autor przedstawia wnioski poznawcze zgodne ze znaną do tej pory teorią oraz utylitarne. Opracowanie to dowodzi dojrzałości naukowej i dużej wiedzy praktycznej Doktoranta, a także jego zdolności do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W moim przekonaniu Autorowi udało się osiągnąć cel pracy, co potwierdza prawidłowość przyjętych założeń, odpowiednie zastosowanie naukowej metodyki badań i realizację praktyczną wykonanych eksperymentów.

### 3. Ocena końcowa

W pracy nie dostrzegłem błędów i uchybień w zakresie edycji i prezentacji wyników, jedynie na str. 30 jest taki sam podpis pod różnymi rysunkami (rys.17 i rys.18). Stwierdzam, że rozprawa Pana mgr inż. Rafała Dwulata spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim ponieważ:

- sformułowano problem badawczy i określono jego cel,
- zaplanowano i zrealizowano badania stosując nowoczesne narzędzia naukowe według przyjętej metodyki badań, co dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta,
- zinterpretowano uzyskane wyniki i sformułowano wnioski na gruncie znanej teorii, co wskazuje na szeroką ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata,
- Doktorant osiągnął cel pracy, a uzyskane wyniki wnoszą oryginalny wkład naukowy i praktyczny w teorię i praktykę metalurgii i odlewania żeliwa sferoidalnego.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Rafała Dwulata pt.: ” **Wpływ struktury wsadu i modyfikacji wtórnej na jakość metalurgiczną żeliwa przeznaczonego na odlewy motoryzacyjne**” spełnia wymogi określone w Ustawie o stopniach i tytule naukowym. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Rafała Dwulata do publicznej dyskusji nad Jego rozprawą doktorską przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

### Wniosek

Na podstawie oceny zastosowanej metodyki badań, uzyskanych w pracy wyników oraz ich opracowania i prezentacji wnioskuję o wyróżnienie pracy doktorskiej Pana mgr inż. Rafała Dwulata ponieważ:

- rozwiązano oryginalny problem badawczy o dużej wartości naukowej i innowacyjny w obszarze praktycznego zastosowania w skali kraju,

- opracowano nową recepturę materiałową żeliwa na żeliwo wyjściowe do sferoidyzacji, a także technologię wytopu dla warunków przemysłowych w odlewni,
- Autorowi udało się z sukcesem przenieść wyniki uzyskane w skali laboratoryjnej na skalę przemysłową.

*Krzysztof Ułgiewicz*