

prof. dr hab. inż. **Zbigniew Konopka**

Częstochowa, dn.21.08.2018 r.

Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

Katedra Odlewnictwa

Politechnika Częstochowska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Kostrzewskiego pt.: "Rola węgliku krzemu w procesie wytwarzania żeliwa sferoidalnego z wykorzystaniem pieca indukcyjnego"

opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Odlewnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej

1. Ocena przedmiotu rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa dotyczy badania wpływu węgliku krzemu wprowadzonego do stałego wsadu w procesie wytopu żeliwa sferoidalnego w piecu indukcyjnym na strukturę i właściwości mechaniczne odlewów. Węglik krzemu stanowi, z jednej strony, dodatek do wsadu uzupełniający deficyt węgla i krzemu w wytopach bazujących na całkowitym lub znaczącym udziale złomu stalowego we wsadzie, z drugiej zaś, pełni rolę premodyfikatora. Rozwiązywane w pracy zagadnienie ma cechy innowacji procesowej, w której zastępuje się drogą surówkę tańszym złomem stalowym, wprowadza się do kąpieli metalowej znacznie mniej zanieczyszczeń, co sprzyja warunkom wytwarzania żeliwa sferoidalnego oraz oczekuje się modyfikującego oddziaływania SiC na krystalizację, strukturę i właściwości odlewów, co jest głównym celem pracy.

Dane literaturowe wskazują, że węglik krzemu ma właściwości modyfikujące krystalizację grafitu w żeliwie ale oddziaływanie to nie zostało jednoznacznie potwierdzone we właściwościach odlewów. Znane jest w praktyce przemysłowej dodawanie metalurgicznego węgliku krzemu do żeliwa wytapianego w żeliwiaku, rzadziej wytapianego w piecach indukcyjnych. Opracowanie metalurgicznego procesu wytopu żeliwa

proponowanego w pracy otwiera szerokie możliwości sterowania strukturą i właściwościami odlewów i stosunkowo łatwe praktyczne jego zastosowanie. Ze względu na przedstawione powyżej elementy praca lokuje się w innowacyjnym obszarze badań naukowych.

2. Charakterystyka i ocena rozprawy

Tekst rozprawy liczy 128 stron, który uzupełniają: bibliografia zawierająca 66 pozycji literaturowych i streszczenia w języku polskim i angielskim. Rozprawa składa się z dwóch głównych części. W pierwszej części przedstawiono przegląd literatury dotyczący: charakterystyki właściwości węgla krzemu i metody jego otrzymywania, oddziaływania SiC na krystalizację i strukturę żeliwa oraz technologii wytopu żeliwa w piecu indukcyjnym. Ten fragment rozprawy został opracowany bardzo dobrze pod względem merytorycznym, językowym i edytorskim. Dowodzi to, bez wątpienia, wysokiej wiedzy Autora w zakresie metalurgii żeliwa oraz teorii krystalizacji i krzepnięcia odlewów. Tą część pracy oceniam bardzo wysoko, a poziom tego opracowania odpowiada wymogom pracy doktorskiej.

W drugiej części pracy Autor przedstawia badania własne formułując na wstępie cel i tezę pracy w brzmieniu: „**wprowadzenie węgla krzemu do stałego wsadu w procesie wytopu żeliwa sferoidalnego w piecu elektrycznym indukcyjnym powoduje poprawę struktury odlewu i jego właściwości mechaniczne**” Teza formułuje związek przyczynowo-skutkowy określający znany w teorii wpływ zabiegu modyfikacji na krystalizację, strukturę i właściwości żeliwa, a koncepcja opracowania i realizacji innowacyjnego procesu metalurgicznego na bazie złomu stalowego z dodatkiem SiC do wytworzenia żeliwa sferoidalnego jest niewątpliwie nie rozwiązany do tej pory zagadnieniem naukowym.

Dla udowodnienia tezy w pracy zrealizowano program badawczy o bardzo szerokim zakresie obejmującym: wykonanie serii wytopów o zmiennym udziale surówki, złomu i dodatków (nawęglacz, FeSi, SiC) dla gatunków żeliwa sferoidalnego EN-GJS-400-15 i EN-GJS-500-7 z pomiarem składu chemicznego żeliwa wyjściowego i po procesie sferoidyzacji i modyfikacji (piec indukcyjny o pojemności 2300 kg), jakościowe i ilościowe badania metalograficzne struktury żeliwa na mikroskopie świetlnym i elektronowym skaningowym, badania właściwości mechanicznych (R_m , $R_{p0,2}$, A, HB) i badania krystalizacji metodą analizy termicznej z wyznaczeniem (T_L , T_S , CE i S_C).

Wyniki pomiarów składu chemicznego żeliwa wyjściowego a także po sferoidyzacji i modyfikacji dowodzą jednoznacznie, że ustalone w programie badawczym pracy namiary materiałów wsadowych w wykonanych wytopach zostały bardzo dobrze obliczone, a wytopy przetestowane we wcześniejszych badaniach wstępnych bo w każdym z 31 wytopów

uzyskano wymagane do otrzymania żeliwa sferoidalnego zawartości pierwiastków. Potwierdza to prawidłowe założenia i realizację opracowanej w pracy technologii wytopu żeliwa. Wyniki analizy chemicznej żeliwa uzyskane metodą spektrometryczną zostały także potwierdzone w pomiarach metodą analizy termicznej.

Bogatą dokumentację zdjęciową żeliwa ze wszystkich wytopów Autor przedstawia w rozdziale 12.4.1 pokazując wydzielania grafitu kulkowego a także skład fazowy osnowy (rys.20-41). Te jakościowe badania metalograficzne dowodzą jednoznacznie wytworzenia wytypowanych gatunków żeliwa sferoidalnego. W krótkiej analizie wyników badań struktury żeliwa na mikroskopie skaningowym Autor wskazuje różnicę morfologii powierzchni wydzieleni grafitu w obu badanych gatunkach żeliwa. W żeliwie EN-GJS-400-15 stosunkowo duże płatki grafitu na powierzchni kulistego wydzielenia tworzą "gładką" powierzchnię. W żeliwie EN-GJS-500-7 płatki na powierzchni wydzielenia są mniejsze dając obraz bardziej "chropowatej" powierzchni. Autor nie uzasadnia bliżej tego wyniku badania. W mojej ocenie sekwencja badań jakościowych struktury żeliwa zasługuje na wysoką ocenę ze względu na bardzo dobrą jakość materiału zdjęciowy.

Wyniki badań właściwości mechanicznych żeliwa odpowiadają w każdym wytopie gatunkowi wykonanego żeliwa według normy. Analizę procesu krystalizacji żeliwa metodą analizy termicznej Autor ograniczył do pomiaru temperatury likwidus i solidus przedstawiając wartości tych temperatur dla wszystkich wytopów. Wszystkie uzyskane wyniki zostały krótko opisane w formie komentarza bez szerszej ich analizy.

W rozdziale 13 Autor przedstawia obszerne opracowanie wyników i własną ich interpretację. Analiza składu chemicznego wytworzonego żeliwa pokazuje dużą jednorodność zawartości pierwiastków dla obu badanych gatunków żeliwa sferoidalnego. Podkreślam wąski przedział zmian zawartości C i Si, a także Mn, S i P w obu gatunkach żeliwa mimo zmiennego udziału materiałów wsadowych w wytopach. Oceniając wpływ węgla krzemu na skład chemiczny żeliwa należy jednoznacznie stwierdzić, że jest to odpowiedni dodatek wsadu uzupełniający deficyt C i Si jednocześnie ograniczający potencjalny wzrost zawartości szkodliwych S, P i gazów w ciekłym metalu. Ten korzystny wpływ węgla krzemu odzwierciedla się w wysokim uzysku magnezu w zastosowanej w pracy metalurgii żeliwa sferoidalnego. Autor osiągnął ważny element celu pracy dotyczący opracowania technologii wytopu żeliwa w piecu indukcyjnym z wysokim udziałem złomu.

Pomiary temperatury likwidus żeliwa EN-GJS-400-15 pokazują tendencję zmniejszania wartości tej temperatury wraz ze wzrostem zawartości SiC we wsadzie. Nie stwierdza się wpływu SiC na temperaturę solidus, która ma stałą wartość dla wszystkich

wytopów na poziomie 1125⁰C. W przypadku wytopów żeliwa gatunku EN-GJS-500-7 Autor obserwuje tendencję odwrotną, dodatek SiC wywołuje podwyższenie wartości temperatury likwidus przy nie zmienionej wartości temperatury solidus.

W ilościowej analizie struktury żeliwa sferoidalnego obu gatunków Autor określił ilość wydzielań grafitu w 1 mm² powierzchni, średnią powierzchnię wydzielań, współczynnik kształtu oraz udziały grafitu, ferrytu i perlitu. Wyniki przedstawiono w formie tabelarycznej i wykresów słupkowych dla każdego wytopu. Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono rozkłady poszczególnych wielkości (ilość wydzielań grafitu/mm² i współczynnik kształtu) w określonych klasach wielkości. Autor przedstawił raczej opis uzyskanych wyników a nie ich analizę, a wpływ węgla krzemu na ilościowe wskaźniki struktury nie został wnikliwie oceniony. Powodem jest duży rozrzut uzyskanych wyników dla poszczególnych wytopów utrudniający a nawet uniemożliwiający taką analizę. Uwaga ta nie dotyczy wyników współczynnika kształtu wydzielań grafitu, który w 27 wytopach ma wartość 0.95. Z wykresów rozkładów poszczególnych wielkości wydzielań grafitu wynika, że są to rozkłady normalne potwierdzające dużą jednorodność wielkości i powierzchni wydzielań grafitu w badanych żeliwach.

W ocenie wyników zwracam uwagę, że zostały one zamieszczone w tabelach jako pojedyncze wartości dla każdego wytopu. Dotyczy to wszystkich wyników znajdujących się w pracy. W opisie metodyki badań Autor nie podał ile próbek badał w danym wytopie, tym samym nie wiadomo czy przedstawione wyniki są efektem pojedynczego pomiaru, czy są to wartości średnie. Brak wyniku obliczeń np. odchylenia standardowego będącego miarą rozrzutu wyników indywidualnych od wartości średniej utrudnia analizę uzyskanych wyników badań. Przykładem jest trudny do wyjaśnienia wynik pomiaru (tab.12 str.37) temperatury likwidus 1163⁰C (wytop 5-14) i 1131⁰C (wytop 5-16) gdy oba te wytopy zostały wykonane z takich samych namiarów materiałów wsadowych i dodatków (tab.8 str.33) i mają identyczny skład chemiczny (tab.10 str.35). Prawdopodobnie jest to także przyczyną rozbieżnego wpływu SiC na temperaturę likwidus w obu gatunkach żeliwa. Analiza statystyczna wyników i przyporządkowanie ich do określonej kategorii wytopu (z dodatkiem SiC i bez) ułatwiłaby szczegółową oceną wpływu dodatku węgla krzemu na krystalizację i strukturę żeliwa.

W rozdziale 14 Autor przedstawił interesującą i ważną z punktu widzenia praktyki przemysłowej analizę ekonomiczną wykonanych wytopów żeliwa. Na podstawie analizy kosztów materiałów wsadowych udowodniono jednoznacznie, że wykonanie 1 kg żeliwa sferoidalnego w wytopie w piecu indukcyjnym bez udziału surówki z dodatkiem węgla

krzemu jest tańsze o 9% w porównaniu z takim wytopem na bazie samej surówki dla gatunku EN-GJS-400-15 i o 4% dla gatunku EN-GJS-500-7.

Sekwencję badań własnych kończy krótkie podsumowanie i wnioski. Autor nie przedstawia szerszej analizy wyników, co wynika z opisu i komentarzy uzyskanych wyników cząstkowych w tekście pracy. Wnioski wynikające z analizy wyników są zgodne ze znaną do tej pory teorią. Opracowanie to dowodzi dojrzałości naukowej Doktoranta i jego zdolności do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W moim przekonaniu Autorowi udało się osiągnąć cel pracy, a jednocześnie zebrany bogaty materiał badawczy pozwolił na udowodnienie postawionej w pracy tezy.

3. Uwagi szczegółowe

W pracy brakuje kilku istotnych do oceny uzyskanych wyników informacji, które chciałbym uzyskać od Doktoranta jako odpowiedź na następujące pytania:

1. Czy zamieszczone wyniki badań są pojedynczymi pomiarami, czy są to wartości średnie z większej liczby pomiarów dla danego wytopu?,
2. Na wielu wykresach słupkowych w pracy narysowano chyba linie trendu (linia kropkowa). W jaki sposób wyznaczono te linie?,
3. W wynikach ilościowych grafitu (tab.19 str. 92) jakiego udziału grafitu dotyczą zamieszczone wartości? Proszę o szerszy komentarz na ten temat,
4. Jakiego efektu w wartości temperatury likwidus należy się spodziewać w przypadku modyfikującego działania modyfikatora w żeliwie?.

4. Ocena końcowa

Stwierdzam, że rozprawa Pana mgr inż. Łukasza Kostrzewskiego spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim ponieważ:

- Jasno określono problem naukowy i sformułowano tezę,
- zaplanowano i zrealizowano badania stosując nowoczesne narzędzia naukowe według przyjętej metodyki badań,
- zinterpretowano uzyskane wyniki i sformułowano wnioski na podstawie ogólnie uznanej wiedzy, co wskazuje na szeroką ogólną wiedzę teoretyczną kandydata,
- doktorant udowodnił postawioną tezę, a uzyskane wyniki wnoszą oryginalny wkład naukowy i praktyczny w teorię i praktykę odlewnictwa żeliwa sferoidalnego.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Łukasza Kostrzewskiego pt.: **"Rola węgla krzemu w procesie wytwarzania żeliwa sferoidalnego z wykorzystaniem pieca indukcyjnego"** spełnia wymogi określone w Ustawie o stopniach i tytule naukowym. W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Łukasza Kostrzewskiego do publicznej dyskusji nad Jego rozprawą doktorską przed Radą Wydziału Odlewnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

