

## RECENZJA

pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Marka Rondudy  
doktoranta na Wydziale Odlewnictwa AGH pt.:

**„Ocena stabilności jakości metalurgicznej żeliwa sferoidalnego metodą analizy termicznej”**  
wykonanej pod opieką promotora Pana prof. dr hab. inż. Dariusza Kopycińskiego opracowana  
na zlecenie Rady Wydziału Odlewnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej  
w Krakowie (pismo Dziekana Wydziału z dnia 16.04.2019r.)

Żeliwo sferoidalne jako odlewniczy stop żelaza już dawno przestał być nowością w odlewniach. Produkcja żeliwa w sferoidalnego w różnych krajach świata kształtuje się na różnym ilościowym poziomie ale Polska póki co nie należy do przodujących producentów odlewów z tego stopu. Jego zastosowanie z roku na rok ciągle wzrasta i też ciągle doskonalą się metody jego produkcji i to nie tylko standardowych gatunków ale też gatunków specjalnych. W związku z tym, że odlewnie krajowe stają coraz częściej przed wyzwaniem jakościowymi i potrzebą obniżania kosztów produkcji w takim też kierunku prowadzone są badania aby producenci odlewów mogli skutecznie konkurować jakościowo i cenowo z odlewniami zagranicznymi.

Tej właśnie tematyki dotyczy recenzowana praca doktorska, w której Autor proponuje zastosowanie w produkcji żeliwa sferoidalnego rozwiązań prowadzących do stabilności procesowej ciekłego stopu przez okres około 2 godzinnego rozlewania w automatycznych liniach formierskich.

Tytuł pracy odpowiada jej treści a praca stanowi istotne podejście do zagadnienia doskonalenia stabilności procesu wytwarzania wybranych gatunków żeliwa sferoidalnego oraz jakości odlewów. Zatem należy uznać, że podjęta przez mgr. inż. Marka Rondudę tematyka badawcza jest aktualna i mieści się w zakresie dyscypliny Metalurgia.

Praca napisana jest w tradycyjnym układzie dla rozpraw doktorskich, czyli składa się z przeglądu literatury i części obejmującej badania własne. Jej treść przedstawiono na 144 stronicach. W pracy przytoczono 87 pozycji literaturowych, w tym 9 współautorskich. Praca składa się z merytorycznie spójnych 11 rozdziałów.

Autor po wprowadzeniu w tematykę rozprawy przedstawia podstawową wiedzę na temat żeliwa i dokonuje jego charakterystyki w zakresie podziału wynikającego z układu równowagi fazowej Fe-C. Następnie analizuje zmiany w składzie chemicznym głównie pod kątem zawartości węgla i jego synergicznego wpływu z innymi pierwiastkami stopowymi na krystalizację podstawowych faz i strukturę. Dalsza część teoretyczna to szczegółowa charakterystyka krystalizacji żeliwa szarego pod względem morfologii grafitu i struktury oraz właściwości mechanicznych a także zjawisk skurczowych. Krystalizacja rozważana jest również pod kątem wpływu wybranych modyfikatorów i procesu modyfikacji na porowatość skurczową odlewów.

Oprócz zagadnień teoretycznych dotyczących klasycznego żeliwa szarego Doktorant przeprowadza wyczerpujące studium literaturowe na temat krystalizacji żeliwa sferoidalnego. Obejmuje ono krystalizację faz przedutektycznych i eutektyki oraz krystalizację podeutektyczną, eutektyczną i nadeutektyczną. W każdym przypadku szacuje rzeczywistą ilość węgla uczestniczącego w grafityzacji w kontekście jego wpływu na skurcz żeliwa. Scharakteryzowany został również stan fizykochemiczny żeliwa sferoidalnego pod względem zawartości tlenu i siarki na jego właściwości. Powyższa charakterystyka stanu zagadnienia stanowi dobre wprowadzenie w tematykę rozprawy.

W rozdz. 4 Autor przedstawia szczegółowo parametry i możliwości systemu analizy termicznej ATAS, zwracając uwagę na wstępie rozdziału, że istnieje jeszcze konkurencyjny system ITACA oraz MetLab i inne o mniejszym zasięgu stosowania. Nie dziwi obszerność treści tego rozdziału ponieważ ten system posłużył Doktorantowi do analizy stanu fizykochemicznego żeliwa w ocenie jego stabilności metalurgicznej. Doktorant opisuje przeznaczenie poszczególnych modułów systemu ATAS wykorzystywanych do oceny jakości krystalizacji żeliwa w zakresie trzech głównych przemian fazowych. Zdefiniowane zostały podstawowe parametry analizy termicznej systemu oraz ich zalecane wartości konieczne do uzyskania właściwej jakości żeliwa jeszcze w piecu/kadzi i jego wpływ na wady typu skurczowego.

Natomiast bardzo dziwi brak w tej części przeglądu literatury odniesienia do publikacji krajowych, których w tym zakresie jest bardzo dużo i do chwili obecnej w niektórych naukowych ośrodkach prowadzi się badania z wykorzystaniem podstawowej metody ATD do analizy procesu krystalizacji stopów. Należy też podkreślić, że polskie osiągnięcia w tym zakresie dotyczą przede wszystkim Pol. Śl., Pol. Łódzkiej ale też Wydziału Odlewnictwa AGH, Instytutu Odlewnictwa oraz Pol. Poznańskiej, Pol. Warszawskiej. Najbliżej z wizualizacją metody ATD, zbliżoną do systemu ATAS i ITACA, był prof. S. Pietrowski z Politechniki Łódzkiej. W sumie w dostępnych bazach bibliotecznych znajduje się wiele publikacji polskich autorów, np. tylko w bazie AFE jest ponad 120.

Podsumowaniem części literaturowej rozprawy jest rozdział dotyczący uzasadnienia podjęcia się tej tematyki przez mgr Marka Rondudę wynikający z bieżącej działalności Odlewni Polskich S.A. a dotyczącej problemów z jakością metalurgiczną żeliwa sferoidalnego w czasie zalewania form na liniach formierskich. Rzeczowa analiza jakości wykonywanych odlewów i ocena skutków finansowych tej jakości jest wiarygodnym wprowadzeniem w zakres pracy i postawioną tezę.

Trochę niespotykany w rozprawach doktorskich jest podział na „proponowane tezy pracy” wymienione w punktach 1÷5 na str. 73, które są właściwie wnioskami wynikającymi z przeglądu literatury i „tezę główną”. Studiując treść przeglądu literatury i możliwości systemu ATAS, tezy, a w zasadzie **wnioski (1÷5)** nasuwają się same a postawiona teza pracy (tzw. główna) w brzmieniu „Przez sterowanie (monitorowanie, kontrolę) metodą analizy termicznej dynamicznie zmieniającej się jakości metalurgicznej ciekłego stopu, można stabilizować proces wytwarzania żeliwa sferoidalnego i zapobiegać wadom skurczowym” wystarczająco wskazuje co jest do udowodnienia w rozprawie.

Z postawionej tezy wynika cel pracy i też jej technologiczny charakter. Jego realizacja miała udowodnić postawioną tezę, co jest oczywiste, ale też dowieść, że **wykorzystując wyniki analizy termicznej systemu ATAS można zmieniać jakość metalurgiczną żeliwa w trakcie zalewania form na linii formierskiej, czego do tej pory nie stosowano w praktyce.** Jest to oryginalne i innowacyjne podejście do procesu wykonywania odlewów w produkcji seryjnej.

Duży przedział czasowy (do 1 godz.) związany przetrzymywaniem w piecu przy linii formierskiej i z rozlewaniem żeliwa do form (8-12 min) z jednej kadzi (800-1000kg) lub z zalewarki powoduje znaczącą zmianę jakości metalurgicznej ciekłego stopu zarówno w piecu jak i kadzi. Wartości tych zmian są na tyle duże, że powodują różnorodność procesu krystalizacji od nadeutektycznej do eutektycznej lub podeutektycznej. W czasie zalewania żeliwa do form odlewniczych zmieniają się także jego parametry fizykochemiczne, obniża się temp. o 30-50°C, obniża się też zawartość Mg oraz wzrasta aktywność tlenu.

Doktorant prowadził również badania pod kątem określenia charakterystyki ilościowego oddziaływania różnych modyfikatorów stosowanych w odlewni na jakość metalurgiczną ciekłego żeliwa w zakresie premodyfikacji w piecu topialnym oraz w zakresie oceny wpływu rodzaju i ilości modyfikatorów na morfologię grafitu a także oceny wpływu modyfikacji Fe-Si na ziarna austenitu pierwotnego. Przeprowadził też serię wytopów żeliwa w warunkach Odlewni Polskich S.A. w celu określenia wpływu wybranych parametrów jakościowych żeliwa (wg systemu ATAS) na krystalizację i zasilanie wybranego odlewu. Wykonał również badania stabilności metalurgicznej ciekłego żeliwa po zabiegach sferoidyzacji i modyfikacji pierwotnej oraz w procesie modyfikacji wtórnej przy rozlewaniu żeliwa do form odlewniczych. Skutki zabiegów metalurgicznych oceniane były przez wyniki badań mikrostruktury, właściwości mechanicznych oraz wad skurczowych w węzłach cieplnych odlewów. W niektórych przypadkach określano poziom aktywnego tlenu w ciekłym metalu, wykonano symulacje procesu krzepnięcia w celu predykcji jam skurczowych oraz oznaczono ziarna austenitu. Część badań wykonano w warunkach laboratoryjnych wytapiając żeliwo w piecu indukcyjnym o pojemności 140kg i przeprowadzając sferoidyzację metodą Tundish. Badania przemysłowe wykonywane były na liniach formierskich Loramendi i HWS (Heinrich Wagner Sinto). Żeliwo wytapiano w piecu o pojemności 7 ton a sferoidyzację wykonywano metodą przewodu elastycznego. Szczegółową metodykę badań doktorant przedstawił w rozdz. 8 a obszerne wyniki zostały przedstawione w rozdz. 9.

Wyniki badań to:

- określenie wpływu premodyfikacji na jakość metalurgiczną ciekłego żeliwa,
- ocena wpływu różnego rodzaju modyfikatorów i ich ilości na jakość metalurgiczną ciekłego żeliwa. *W tym miejscu odnosząc się do komentarza Doktoranta ze str. 94 związanego z premodyfikacją SiC proszę o wyjaśnienie mechanizmu jego oddziaływania jako modyfikatora ponieważ nie tylko temperatura topnienia decyduje o przydatności do modyfikacji.*
- uzasadnienie wpływ Fe-Si jako modyfikatora na pierwotne ziarno, strukturę i morfologię grafitu oraz właściwości mechaniczne,
- dobór parametrów procesowych wytapiania i obróbki pozapiecowej żeliwa sferoidalnego na odlewy na przykładzie korpusu zaworu wysokociśnieniowego oraz wyznaczenie korelacji pomiędzy ACEL a modulem odlewu/węzła, a także zależności pomiędzy parametrami systemu ATAS tj. TL, TELow, TS, GRF1, GRF2,
- wykorzystanie wyników pracy do ocena jakości metalurgicznej żeliwa podczas zalewania form na przykładzie odlewu kotwy (rozd. 9.5), ale też weryfikacji opracowanej procedury sterowania jakością żeliwa w czasie wytopu i zalewania form.

Podsumowując stwierdzam, że metodyka badań i uzyskane wyniki a przede wszystkim ich interpretacja dowodzą dużych umiejętności Doktoranta w prowadzeniu badań eksperymentalnych.

Generalnie praca napisana na ogół poprawnie językowo ale tak obszerne opracowanie nie może nie zawiera błędów edytorskich. Oto przykłady:

s. 26 błędny podpis pod rysunkiem 1.25

- s. 46 określenie żargonowe „*odcisk palca*” wytopu
- s. 49 2 wiersz od dołu strony zawiera zbędny wyraz – „jest”
- s. 50 6 wiersz od dołu strony „niska grafityzacja”
- s. 61 11 wiersz od góry strony jest „PET” a powinno być „TEP”
- s. 62 jest „nadeutektyczny” a powinno być „nadeutektycznego”
- s. 63 niewłaściwie cytowana literatura poz. [70]
- s. 65 w tab. 1.2 umieszczono duplikat wyników
- s. 68 jest „modyfikatorami” a powinno być „modyfikatory”
- s. 71 nieczytelny rys. 1.66
- s. 117 2 wiersz od góry strony - występuje w zdaniu 2 razy „ciekły stop”
- s. 124 na rys. 2.48 jest „czas przegrzania zamiast „czas przetrzymania” ciekłego żeliwa w piecu?
- s. 126 podpis pod rys. 2.51 jest błędny
- s. 127 tytuł na tej stronie jest niepoprawny stylistycznie
- s. 133 tytuł ta. 2.15 jest niepoprawny.

W sumie, pomimo powyższych uwag, recenzowaną rozprawę oceniam jako bardzo wartościową pod względem poznawczym i użytkowym i uważam, że jest to praca znacznie rozszerzająca wiedzę dotyczącą sterowania procesem wytwarzania żeliwa sferoidalnego i wykonywania wysokojakościowych odlewów. Największym osiągnięciem Autora jest:

- udowodnienie, że właściwe wykorzystanie wyników analizy ATD (systemu ATAS) do sterowania jakością metalurgiczną żeliwa sferoidalnego na każdym etapie procesu jego wytwarzania przyczynia się do wzrostu jakości odlewów,
- wyznaczenie wpływu sposobu premodyfikacji na jakość metalurgiczną stopu w piecu przetrzymującym żeliwo,
- określenie skuteczności modyfikacji wtórnej zachodzącej przy wlewaniu żeliwa do zalewarki różnymi modyfikatorami i wskazanie najbardziej skutecznego (Ultraseed) w warunkach prowadzonych badań,
- opracowanie modelu sterowania krystalizacją układu odlew (węzeł cieplny)-nadlew przez dobór parametrów procesowych ciekłego żeliwa uwzględniających korelację pomiędzy modułem węzła cieplnego a aktywnym równoważnikiem węglowym ACEL w celu eliminacji wad skurczowych,
- opracowanie metody modyfikacji wtórnej dynamicznej na strugę metalu wlewanego do formy wraz z podaniem założeń projektowych podajnika automatycznego systemu modyfikacji dynamiczno-elastycznej.

**Biorąc powyższe uwagę stwierdzam, że praca doktorska p. mgr. inż. Marka Rondudy pt. „*Ocena stabilności jakości metalurgicznej żeliwa sferoidalnego metodą analizy termicznej*” spełnia wymagania stawiane przez Ustawę o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych wobec czego wnioskuję do Rady Wydziału Odlewnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej o dopuszczenie Kandydata do publicznej obrony.**

