

## RECENZJA

pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Andrzeja Pytla doktoranta Wydziału Odlewnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie pt.:

**„Wybrane właściwości perlitycznego żeliwa z grafitem wermikularnym zawierającego: Cu, Mo, V, Sb i Sn”** wykonanej pod opieką promotora Pana prof. dr hab. inż. Edwarda Guzika opracowana na zlecenie Rady Wydziału Odlewnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej (pismo Dziekana Wydziału z dnia 30.04.2019 roku)

Żeliwo szare jest nadal atrakcyjnym stopem żelaza na odlewy stosowane w wielu maszynach i urządzeniach ale też jeszcze w dalszym ciągu budownictwie, drogownictwie i innych dziedzinach gospodarki. Tradycyjny podział żeliwa ze względu na kształt wydzieliń grafitu przez wiele lat nie uwzględniał żeliwa z grafitem wermikularnym. Żeliwo z grafitem wermikularnym ze względu na specyficzne właściwości i swoje zalety znajduje w ostatnich latach coraz częstsze zastosowanie mimo, że wymaga precyzyjnego prowadzenia procesu metalurgicznego, stąd przez wiele lat było tworzywem unikany w produkcji przez odlewnie. Technologia wytwarzania tego żeliwa udoskonalana od lat 50. poprzedniego wieku znajduje również coraz częstsze zainteresowanie w polskich odlewniach. Jego zastosowanie ciągle wzrasta i też nieprzerwanie doskonalili się metody jego produkcji. Odlewnie krajowe poszukując nowych rynków zbytu dla swoich odlewów stoją coraz częściej przed wyzwaniem wprowadzania żeliwa wermikularnego do produkcji odpowiedzialnych elementów maszyn.

Tej właśnie tematyki dotyczy recenzowana rozprawa doktorska, w której mgr inż. Andrzej Pytel przy założonym zakresie zmienności stężenia dodatków stopowych takich jak: Cu, Mo, V, Sn, Sb podjął próbę określenia ich wpływu na mikrostrukturę i wybrane właściwości w żeliwie z grafitem wermikularnym.

Tytuł pracy odpowiada jej treści a praca stanowi właściwe podejście do zagadnienia poszukiwania optymalnych parametrów wytwarzania żeliwa wermikularnego z przeznaczeniem głównie do pracy w warunkach zmęczenia cieplnego. W związku z powyższym uznaję, że podjęta przez mgr. inż. Andrzeja Pytla tematyka badawcza jest aktualna i mieści się w zakresie dyscypliny Metalurgia i Inżynieria materiałowa.

Praca napisana jest w tradycyjnym układzie dla rozpraw doktorskich, czyli składa się z przeglądu literatury i części obejmującej badania własne. Jej treść przedstawiono na 134 stronicach oraz załącznika. W pracy przytoczono 87 pozycji literaturowych, w tym 2 z udziałem

Doktoranta. Praca składa się z merytorycznie istotnych 9 rozdziałów. Brak jest zwyczajowego streszczenia pracy ale w znacznym stopniu rozdział pt. *Wprowadzenie* je zastępuje.

W części literaturowej Doktorant wprowadzając czytelnika w tematykę rozprawy przedstawia podstawową wiedzę o układzie Fe-C, mikrostrukturze poszczególnych faz. Następnie opisuje metody otrzymywania żeliwa z grafitem wermikularnym oraz metody kontroli procesu wytwarzania tego żeliwa. Wiele uwagi Autor poświęcił metodom kontroli procesu wytwarzania żeliwa wermikularnego takich jak Multi-Lab Celox Foundry firmy Elektro-Nite, systemowi ATAS a także systemowi NovaCast produkcji w kadzi i produkcji w formie (PQ-CGI, PQ-CGI InMold) oraz metodzie przewodu elastycznego opracowanej przez firmę SinterCast pod nazwą System 3000 Plus (Szwecja).

Wartościowym fragmentem pracy jest przedstawienie istniejących w literaturze światowej i polskiej (ośrodek krakowski, łódzki) teorii tworzenia się grafitu wermikularnego, podobnie jak zestawienie/porównanie żeliwa wermikularnego z żeliwem szarym w kontekście ich odporności na zmęczenie cieplne. W nawiązaniu do tematyki pracy, w rozprawie przedstawiony został, poznany dotychczas wpływ takich niektórych pierwiastków z grupy: Cu, Mo, V, Sn i Sb dodawanych do stopu w celu zwiększenia udziału perlitu.

W związku z tym, że żeliwo z grafitem wermikularnym w znacznej części zastosowań przeznaczonych jest na elementy pracujące w warunkach zmęczenia cieplnego Doktorant opisał sposób prowadzenia badań w tym zakresie, rodzaje występujących wad i przytoczył również kryteria oceny tej właściwości. Przegląd literatury kończy zestawienie przykładowych odlewów wykonanych z żeliwa wermikularnego oraz wnioski będące podstawą podjęcia się przez Doktoranta tej tematyki. Jest to dobre wprowadzenie w analizowane zagadnienia oraz zakres pracy i postawioną tezę.

Tezę pracy w brzmieniu jak w rozprawie uważam za uzasadnioną i właściwie charakteryzującą problem oraz wskazującą jasno co jest do udowodnienia w rozprawie. Adekwatnie do postawionej tezy określony jest cel pracy polegający na przeprowadzeniu wielu prób/wytopów wykonywania odlewów z żeliwa wermikularnego przy zmiennych stężeniach Cu, Mo, V, Sb i Sn.

Cel i zakres pracy warunkuje udowodnienie tezy oraz przede wszystkim poszukiwania nad określeniem warunków wytwarzania odlewów próbnych z żeliwa z grafitem wermikularnym. Jest to charakterystyczne podejście do procesu wykonywania odlewów z „trudnego” stopu i wymagające precyzji w prowadzeniu wytopu.

Doktorant zrealizował badania wg czynnego planu Hartleya wykonując 27 wytopów przy zmianie stężenia na 3 poziomach wymienionych w tytule pracy pierwiastków (Cu, Mo, V, Sb, Sn). Odlewami próbnymi były wlewki typu „Ygrek II”. Zrealizowane badania to:

**Badania właściwości wytrzymałościowych** (wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$ , umownej granicy plastyczności  $R_{p0,2}$ , umownej granicy sprężystości  $R_{0,05}$ , twardości HB, wydłużenia  $A_5$ ) i udarności KV, które przeprowadzone zostały w temperaturze otoczenia dla wszystkich 27 odlanych wlewków oraz udarność także w temp.  $-20^{\circ}\text{C}$  a badania w temperaturze wysokiej 600 i  $800^{\circ}\text{C}$  tylko dla dziesięciu wybranych odlewów ( $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ ,  $R_{0,05}$ ,  $A_5$ ).

Ponadto Doktorant wykonał **badania mikrostruktury żeliwa** z poszczególnych wytopów na mikroskopie świetlnym i wybranych na mikroskopie skaningowym, określając zmiany wywołane dodatkami stopowymi.

Zostały również przeprowadzone kompleksowe **badania odporności żeliwa na zmęczenie cieplne** dwiema metodami. Pierwsza metoda zastosowana w Instytucie Odlewnictwa na 27 próbkach płaskich w temp. 600 i 800°C przy odpowiednio liczbie cykli 500 i 300. Wynikiem tych badań była wartość sumy pęknięć na krawędziach próbek, nagrzewanych i chłodzonych wodą. Druga metoda, mająca potwierdzić wyniki pierwszej wykonana wg opracowania J. Zycha obejmująca 18 próbek (3 wytopy) o przekroju kołowym z otworem wzdłuż osi próbki wykonana na W.O. AGH. W badaniach przeprowadzonych w W.O. AGH miarą odporności na zmęczenie cieplne była liczba cykli cieplnych potrzebnych do całkowitego pęknięcia próbki. Zatem porównanie tych wyników badań z dwóch odmiennych metod ma jednak tylko charakter jakościowy i moim zdaniem wyniki z AGH wymagają komentarza ze względu na duży rozrzut trwałości zmęczeniowej mierzoną liczbą cykli (10-cio krotna różnica) patrz tab. 23 wytop nr 14 na stronie 118.

W dalszej części pracy Doktorant podjął próbę szczegółowego określenia wpływu dodatków stopowych na odporność na zmęczenie. Wyniki badań poddał obliczeniom statystycznym w celu wyznaczenia zależności pomiędzy wartościami sumy pęknięć na krawędziach próbek badanego żeliwa wermikularnego a zmienną zawartością dodatków stopowych oraz określenia optymalnego składu żeliwa wykorzystując do tego celu komercyjne programy.

W pracy brakuje określenia wpływu analizowanych dodatków wynikających z przyjętego zakresu badań na właściwości mechaniczne. Stwierdzenie ze s. 103, że cytat „obliczenia statystyczne wykazały współczynniki korelacji (zależności 5 pierwiastków na właściwości mechaniczne) poniżej 0,9 i nie były przedmiotem dalszych badań statystycznych” jest nieprecyzyjne, ponieważ nie wiadomo o jakie wartości chodzi. Powinno to być wyjaśnione podczas obrony pracy.

Rozdziały 11 i 12 zawierają przedstawienie i omówienie wyników. Na ogół jest to wystarczająca prezentacja, ale do niektórych sformułowań mam zastrzeżenia lub wątpliwości.

Np. na s. 124 Autor pisze, że cytat : *Żeliwo z grafitem wermikularnym zawierające te zestawy pierwiastków (dotyczy stężeń pierwiastków traktowanych jako optymalne:*

*(a) Cu = 0,6% mas.; V = 0,184% mas.; Sn : 0,05% mas. oraz Sb = 0,06% mas.*

*(b) V = 0,126% mas.; Sn = 0,015% mas.; Sb = 0,038% mas.) powinno wykazywać dobrą odporność na zmęczenie cieplne. Po takim stwierdzeniu rodzi się pytanie dlaczego nie przeprowadzono takiego wytopu w celu weryfikacji uzyskanych zależności?*

*Ponadto wyznaczone stężenia dodatków stopowych (jako istotne osiągnięcie Doktoranta) powinny być opatrzone warunkiem dodatkowym dotyczącym zawartości pierwiastków podstawowych tworzących żeliwo (C, Mn, Si itd.).*

*Dlaczego nie powtórzono wytopu nr 9 skoro nie jest to żeliwo z grafitem wermikularnych?*

*Do uwag krytycznych czy wątpliwości można jeszcze dodać, że odchyłki stężeń niektórych dodatków stopowych różnią się znacznie od założonych w planie eksperymentu i tak np. w tab.*

13 w próbie nr 11 stężenie Sb wynosi 0,023% a powinno być 0,06%, podobnie jest w przypadku V w próbie nr 8 jest 0,17% a powinno być 0,3%. Oczywiście zdają sobie sprawę z trudności w spełnieniu warunków eksperyment ale Autor takiej wątpliwości w pracy nie przedstawił w kontekście czynnego planowania i nie ma takiej analizy w obliczeniach statystycznych. Przedstawione w tab. 15 wyniki badań mikrostruktury na ogół dobrze ilustrują postać grafitu i ośnowę ale w kilku przypadkach można mieć wątpliwości czy mamy do czynienia z żeliwem z grafitem wermikularnym np. próba 8 czy 17.

Postawione wnioski z przeprowadzonych badań i analiz uważam w większości za właściwe, poza wnioskiem nr 3, który od wielu lat nie jest nowością w badaniach eksperymentalnych oraz wnioskiem nr 4, bowiem jest nieuprawniony ze względu na brak ~~jest~~ w pracy wyników badań w tym zakresie.

Praca napisana jest poprawnym językiem i zawiera niewiele błędów formalnych oraz edytorskich. Oto niektóre z nich:

s. 66 brak w spisie literatury poz. [88],

s. 116 wykres na rys. 64 jest nieczytelny,

s. 119 5 wiersz od góry jest: - temperatura nagrzewania 600, 750 i 800°C a na s.120 w podpisie pod rys. 69 jest 700, 750 i 800°C?

s. 125 ostatni akapit – brak odnośnika do literatury,

s. 127 we wniosku nr 7 jest „zestawy pierwiastków w przedstawionych granicach” a być „zestawy pierwiastków w przedstawionych wartościach”.

W sumie, pomimo powyższych uwag, mających często charakter dyskusyjny, recenzowaną rozprawę oceniam jako wartościową pod względem poznawczym oraz uważam, że jest to praca rozszerzająca wiedzę dotyczącą charakterystyki żeliwa z grafitem wermikularnym. Największym osiągnięciem Autora jest wyznaczenie wpływu wybranych dodatków stopowych na odporność na zmęczenie cieplne badanego żeliwa.

**Biorąc powyższe uwagę stwierdzam, że praca doktorska mgr. inż. Andrzeja Pytla pt. „Wybrane właściwości perlitycznego żeliwa z grafitem wermikularnym zawierającego: Cu, Mo, V, Sb i Sn” spełnia wymagania stawiane przez Ustawę o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych wobec czego wnioskuję do Rady Wydziału Odlewnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie o dopuszczenie Kandydata do publicznej obrony.**