

Prof. dr hab. inż. Jerzy Stanisław Zych
Katedra Tworzyw Formierskich, Technologii Form
I Odlewnictwa Metali Nieżelaznych
Wydział Odlewnictwa
Akademia Górniczo Hutnicza w Krakowie

RECENZJA

pracy doktorskiej

Pana mgr inż. Karola Piaseckiego
pod tytułem

**„Ocena wpływu wybranych modyfikatorów na proces krystalizacji
i jakość żeliwa sferoidalnego w odlewach grubościennych”**

wykonanej pod opieką promotora Pana dra hab. inż. Marcina Stawiarza, prof. PŚ
i promotora pomocniczego Pana dr inż. Rafała Dojki,
opracowana na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa
Politechniki Śląskiej Pana Prof. dr hab. inż. Adama Grajcara
(pismo RDIM: 512.15.2024, prof. dr hab. inż. Adama Grajcara - Kopia z dnia
22.10.2024r.)

1. Ocena doboru problematyki rozprawy

Żeliwo było i jest aktualnie podstawowym materiałem wykorzystywanych do produkcji zarówno odlewów drobnych jako elementów zespołów i podzespołów różnego rodzaju pojazdów samochodów i innych zmechanizowanych pojazdów jak i jako materiał na odlewy masywne stosowane w wielu gałęziach przemysłu. W grupie wielkogabarytowych odlewów dominują odlewy dla przemysłu maszynowego, górniczego czy też hutniczego. Obserwuje się rozwój żeliwa jako materiału konstrukcyjnego w kierunku osiągania wyższych wskaźników wytrzymałościowych, głównie na drodze zmiany postaci grafitu z płatkowego na kulkowy. Krajowy przemysł odlewniczy podąża w tym zakresie za światowym trendem wytwarzając coraz więcej odlewów z żeliwa sferoidalnego. Wyzwaniem w tym obszarze jest osiągnięcie struktury z grafitem kulkowym w grubościennych odlewach, krzepnących niekiedy przez okres kilkudziesięciu godzin. W takich warunkach żeliwa traci zdolność do zachowania struktury z kulkową postacią grafitu a dodatkowo jest podatne na flotację grafitu. Kluczowym elementem technologii wytwarzania odlewów z żeliwa sferoidalnego jest nadanie mu wysokiej zdolności do grafityzacji w całym okresie krzepnięcia. Wprowadzenie dużej ilości zarodków krystalizacji, które nie zanikają w krótkim okresie czasu daje szansę uzyskiwania dużej ilości wydzieleni grafitu a to zapobiega tak zanikowi efektu modyfikacji jak i ogranicza zjawisko flotacji grafitu.

W świetle powyższego problematyka pracy doktorskiej pt. *Ocena wpływu wybranych modyfikatorów na proces krystalizacji i jakości żeliwa sferoidalnego w*

odlewach grubościennych” w całej rozciągłości wpisują się zarówno w aktualne kierunki rozwoju Inżynierii Materiałowej jako dyscypliny jak i rozwoju nowoczesnego, oszczędnego materiałowo odlewnictwa komponentów masywnych.

Należy również dodać, iż tematyka pracy powiązana jest z problemem technologicznym, który w ramach doktoratu wdrożeniowego jest rozwiązywany w wybranym do realizacji pracy zakładzie, tj. Odlewni Rafamet sp. z o.o

2. Ocena strony formalnej pracy

Praca doktorska Pana mgra inż. Karola Piaseckiego realizowana w trybie doktoratu wdrożeniowego została zredagowana na 130 stronach z zachowaniem klasycznej struktury i układu dla prac w dziedzinie nauk technicznych. Pierwsza część, obejmująca studium literaturowe zajmuje 42 strony i obejmuje 7 rozdziałów, a część druga - „Badania własne” wraz z bibliografią - została zredagowana na 58 stronach. Bibliografia obejmuje 71 pozycje, w tym monografie, artykuły, normy, strony internetowe, itp. Numeracja rysunków, tabel utrzymana jest w całej pracy w układzie ciągłym, bez wydzielania jej dwóch części/rozdziałów. Praca zawiera 118 rysunki i 69 tabele z podpisem każdego rysunku i tabeli.

Układ pracy nie budzi zastrzeżeń. Treść zarówno w części teoretycznej jak praktycznej (badania własne) utrzymane są w ciągu logicznym. W części analizy literatury opisano kluczowe elementy technologii wytwarzania żeliwa sferoidalnego, krystalizacji i kształtowania struktury żeliwa sferoidalnego. Przeanalizowano teorię zarodkowania grafitu, wpływ szybkości stygnięcia na strukturę. Analizie poddano również proces modyfikacji żeliwa sferoidalnego. Uzupełnieniem analizy jest opis charakterystycznych dla grubościennych odlewów wad odlewniczych. Ostatni rozdział części teoretycznej dotyczy kształtowania i kontroli jakości żeliwa sferoidalnego. Obejmuje on takie zagadnienia jak: analiza termiczna i derywacyjna, metalografia, skład chemiczne i badania właściwości mechanicznych.

W stosunku do przyjętych standardów redagowania rozpraw w części, którą można nazwać analizą stanu literaturowego brakuje rozdziału „Podsumowanie”, który uzasadnia i nadaje kierunek badań opisywanych w drugich częściach rozpraw, tzw. badaniach własnych. Wnioski, wynikające z analizy literatury, zostały niejako przesunięte do badań własnych.

W części drugiej „Badania własne” przedstawiono wyniki prac własnych, realizowanych w całości w warunkach przemysłowych. Realizując wiodący cel pracy, czyli dokonanie wyboru najbardziej efektywnego modyfikatora z grupy wybranej do testów przeprowadzono i opisano 8 kontrolowanych wytopów w przemysłowym piecu elektrycznym o pojemności 6.000 kg wsadu. Badania własne obejmowały określenie wpływu rodzaju modyfikatora/modyfikatorów użytych w procesie na jakość

metalurgiczną żeliwa, którą oceniano w drodze analizy składów chemicznych, analizy termicznej ATD, badań wytrzymałościowych, analizy mikrostruktury. Oceniono również wpływ szybkości stygnięcia na próbkach sześciennych kostek o różnych wymiarach boku. Dla tych testowych odlewów wykonano również badania z użyciem tomografii komputerowej. Opisane szczegółowo badania wykonano w Odlewni Rafamet. Praca kończy się opisem wykonania dwóch odlewów testowych: stołu obrabiarki karuzelowej o masie 32 ton z żeliwa EN GJS 600-3 oraz obudowy korbowodu o masie 30 ton z żeliwa EN GJS 350 – 22. W obu wypadkach zastosowano technologię modyfikacji opracowaną w ramach badań własnych.

Reasumując, wymagania formalne stawiane pracom doktorskim doktoratu wdrożeniowego zostały spełnione. Tematyka pracy wpisuje się w pełni dyscyplinę naukową Inżynieria Materiałowa

3. Ocena merytoryczna pracy

3.1. Studium literatury

Przegląd i analiza literatury w pracy doktorskiej Pana mgr inż. Karola Paseckiego zostały opracowane na bazie 71 pozycji. Bibliografia jest poprawnie zestawiona, wg kolejności pojawiania się w tekście, obejmuje okres po roku 80, pozycje książkowe z lat wcześniejszych pozostałe praktycznie po roku 2000. Problematyką wiodącą w analizie jest teoria krystalizacji żeliwa sferoidalnego, metalurgia żeliwa, technologie obróbki pozapiecowej, analiza termiczna. Tematyka literatury jest zbieżna z obszarem badań własnych.

Szczegółowa analiza treści rozdziału obejmującego studium literaturowe potwierdza spójność jej tekstu z obszarem badawczym rozprawy, chociaż rozłożenie akcentów tej analizy nasuwa kilka uwag ogólnych:

- Rozdział 3.3 – opis większości metod sferoidyzacji żeliwa nie jest konieczny w powiązaniu z tematem pracy, który dotyczy modyfikacji żeliwa. Nie jest to merytoryczny błąd, ale treść tworzy zbędny balast pracy.
- Rozdział 4.1 – „Kształtowanie struktury końcowej żeliwa sferoidalnego”. Podtytuł – kształtowanie struktury żeliwa podeutektycznego wg. układu metastabilnego”. Nasuwa się pytanie po co prowadzić analizę krystalizacji w układzie metastabilnym (z eutektyką cementytową) w sytuacji, gdy interesuje nas żeliwa szare z grafitem kulkowym? Opis treści odpowiada głównemu tytułowi, natomiast podtytuł wprowadza „czytelnika” w błąd.
- Rozdział 4.2. – „Wpływ szybkości stygnięcia na strukturę końcową żeliwa sferoidalnego” ważne zagadnienie niestety opisane bardzo „zwięźle”. Stygnięcie – to zmiana temperatury w czasie i obejmuje stygnięcie w stanie ciekłym i stałym i podczas krystalizacji. O strukturze żeliwa sferoidalnego decyduje krystalizacja eutektyki, która przebiega w małym

kilkustopniowym zakresie temperatury. Zatem szybkość stygnięcia (dT/dt) podczas krystalizacji jest bardzo mała i jest słabym wskaźnikiem dla prognozowania struktury. Korzystniej byłoby analizować czas przejścia ze stanu ciekłego w stan stały eutektyki grafitowej (t_{eut}) lub bezwymiarowo $1/t_{eut}$. Zacytowana na rys. 26 próba schodkowa opisuje wpływ grubości ścianki na strukturę żeliwa, ale odnosi się do typowych grubości ścianek odlewów żeliwnych, a w tytule pracy „odlewy grubościennne”. Rodzi się pytanie, jak będzie zmieniać się struktura żeliwa przy większych grubościach ścianek. Tego brakuje w tej analizie.

- Rozdział 5 - „Modyfikacja żeliwa sferoidalnego” – kluczowy dla tematu rozdział. Podobnie jak rozdział 4.2 potraktowany w pracy bardzo skrótowo. Brakuje analizy chociażby dostępnych i stosowanych modyfikatorów pod względem ich składu chemicznego, przeznaczenia, itp. Punkt 5.1. „Metody modyfikacji” zawiera dwa zdania, co w powiązaniu z tematem pracy jak i wagą tego zagadnienia z punktu widzenia osiągnięcia celu pracy – odlewów grubościennych z żeliwa sferoidalnego o „właściwej” strukturze wydaje się niewystarczającą analizą. Przywołana w bibliografii pozycja „6” jak kilka innych daje materiał do szerszej analizy tego ważnego zagadnienia.
- Rozdział 6 – „Wady charakterystyczne dla odlewów wielkogabarytowych z żeliwa sferoidalnego” obejmuje głównie wady powodowane jakością żeliwa. W przypadku odlewów grubościennych ważną rolę w kształtowaniu jakości odgrywa technologia formy, która daje możliwości wykonywania odlewów bez nadlewów lub jedynie z tzw. nadlewami bezpieczeństwa, kompensującymi skurcz w stanie ciekłym. Specyfiką technologii form dla odlewów z żeliwa sferoidalnego jest sterowne krzepnięciem (strukturą) przy użyciu ochładzalników. Takiej analizy, chociażby przyczynkowej brakuje w tym rozdziale.
- Rozdział 7 – „Określenia jakości żeliwa sferoidalnego” obejmuje opis czynników determinujących „dobrą” jakość żeliwa jak i sposoby weryfikacji tej jakości. Opisano zastosowanie Analizy Termicznej i ATD, morfologię wydzieleni grafitu, dobór składów chemicznych. Opis jest wystarczający. Rozdział kończy opis próby wytrzymałości jako metody weryfikacji właściwości mechanicznych żeliwa sferoidalnego.
- Rozdział ...? - „Podsumowanie” – doktorant zrezygnował z redakcji tego typowego i w opinii recenzenta bardzo wskazanego rozdziału prac doktorskich jakim jest „podsumowanie” analizy literatury. Konkluzje zawarte w „podsumowaniu” powinny wprost prowadzić do postawienia tezy pracy i zadań do realizacji w ramach badań własnych.

Podsumowując opracowanie części literaturowej należy zaznaczyć, iż obszar tematyczny został dobrze wybrany i poddany opisowi, chociaż w niektórych obszarach

zbyt skrótowemu. Niestety w opisie znalazło się sporo „niedoskonałości” terminologicznych i błędnych sformułowań. Poniżej kilka przykładów:

- Str. 8, wiersz 15 – ich zawartość w ciekłym metalu „przekłada się” bezpośrednio – „przekłada się” - to potoczne sformułowanie, nie naukowe
- Rys. 8. – jakkolwiek zacytowany z literatury, to temperatura wpływa na uzysk Mg, a nie odwrotnie: zmienną niezależną jest temperatura
- Str. 15 wiersz 6-7 od dołu – Uzysk magnezuzawsze maleje wraz ze spadkiem temperatury sferoidyzacji.... Czy aby na pewno?
- Str.23, wiersz 5 od góry: „Prędkość zarodkowania heterogenicznego” ..., prędkość to wielkość fizyczna wektorowa a zarodkowanie to proces fizykochemiczny objętościowy, czy raczej nie chodzi tu o szybkość zarodkowania...??
- Str. 29 wiersz 9 od dołu: ..polega na „podawaniu dodatku” ... dodatek się wprowadza lub „dodaje” ale nie „podaje”
- Typowymi błędami są błędy o charakterze interpunkcji, np. przecinki przed spójnikami typu „oraz”, lub zaimkami „które” i inne. Prawdopodobnie wynika to z pośpiechu redakcyjnego.

Podsumowując, analiza literatury jest przeprowadzona poprawnie, ujmuje najważniejsze zagadnienia wynikające z tytułu pracy i przyjętych w dalszej części pracy tez. Niewielkie uchybienia terminologiczne czy interpunkcyjne, jak i niedoskonałe rozłożenie akcentów w poszczególnych jej częściach nie obniżają jej ogólnej wartości merytorycznej.

BADANIA WŁASNE:

8. Cel, teza pracy i zakres badań

Cele pracy zostały ujęte w postaci trzech zadań sformułowanych jako:

- Poprawę procesu technologicznego poprzez optymalizację procesu „**modyfikacji odlewów**” grubościennych z żeliwa sferoidalnego. (uwaga – modyfikujemy żeliwo nie odlew, chyba że ingerujemy w jego konstrukcję.
- Zmniejszenie zużycia pierwiastków krytycznych
- Obniżenie „kosztów produkowanych odlewów” (raczej obniżamy „koszty wytwarzania wybranych odlewów”, niż koszty produkowanych odlewów)

Przyjęte cele wpisują się w koncepcję realizacji doktoratu wdrożeniowego i są spójne.

Teza pracy:

„Możliwa jest optymalizacja procesu produkcyjnego mająca na celu poprawę skuteczności zabiegu modyfikacji odlewów grubościennych z żeliwa sferoidalnego”. Teza stanie się prawdziwa, w powiązaniu z tytułem i treścią pracy, pod warunkiem, że modyfikacja dotyczy żeliwa i jest to zabieg na ciekłym metalu, a nie obejmuje „modyfikacji odlewu” – bo jest to ingerencja w jego konstrukcję. W opinii recenzenta teza powinna brzmieć:

„Możliwa jest optymalizacja procesu produkcyjnego mająca na celu poprawę skuteczności zabiegu modyfikacji żeliwa sferoidalnego przeznaczonego na odlewy grubościenne”.

Druga część tezy mówiąca o szerokim zastosowaniu żeliwa modyfikowanego wg nowej „technologii” potwierdza potrzebę doprecyzowania tezy pracy.

Zakres pracy jest starannie opisany w postaci 15 punktów, które stanowią pewnego rodzaju harmonogram dobrze zaplanowanych badań własnych.

9. Metodyka badań

W ramach badań własnych wykonano 8 wytopów testowych w piecu indukcyjnym o pojemności 6.000kg, w których wytwarzano żeliwo wyjściowe dla dwóch gatunków sferoidalnego: ENGJS 400-15 i EN GJS 500-7. Wytopy prowadzono zgodnie z instrukcjami obowiązującymi w zakładzie Odlewnia Fafamet sp. z o.o. Składy wsadów metalowych do pieca posiadały typową strukturę dla produkcji żeliwa sferoidalnego i zawierały: surówkę Pig - Nod, złom stalowy, stal niskomanganową, złom żeliwny kupny i własny, nawęglacz i żelazostopy.

Kluczowy program badawczy obejmował próby z stosowaniem czterech rodzajów modyfikatorów: barowy, strontowy, aluminiowo – bizmutowy i aluminiowo lantanowy, które wykorzystywano jako pojedyncze dodatki lub w kombinacji dwóch różnych. Starano się utrzymać główne parametry ciekłego metalu na stałym poziomie $T_{spustu} = 1550^{\circ}\text{C}$ i $T_{zali} = 1320-1340^{\circ}\text{C}$. Testy prowadzono odlewając wlewki w postaci kostek sześciennych o boku 6,0; 9,0 i 12,0cm. Odlewano wlewki z żeliwa bez modyfikacji z po modyfikacji. Analizowano strukturę żeliw we wlewkach, składy chemiczne, badania z użyciem tomografii komputerowej oraz analizę termiczną.

9.1. Analiza składów chemicznych

Wyniki analizy składów przedstawiono w postaci tabelarycznej z wszystkich ośmiu wytopów. Uzyskano składy chemiczne typowe dla gatunku EN GJS 400-15 odpowiadające żeliwu eutektycznemu z obniżoną zawartości pierwiastków w perlitotwórczych (Mn, Cu) oraz dla drugiego gatunku EN GJS 500-7 o składzie podeutektycznym i podwyższonej zawartości pierwiastków sprzyjających perlityzacji (Mn, Cu).

9.2. Wyniki badań wytrzymałościowych

Próbki do badań wykonano z wlewków próbných typu Y, porównywano wytrzymałość żeliwa bez końcowej modyfikacji i z modyfikacją dla wszystkich wytopów. Wykazano, że we wszystkich przypadkach modyfikacji żeliwa wykonywanej dwuetapowo: podczas przelewania metalu z pieca do kadzi zabiegowej i podczas wlewania metalu do form testowych, uzyskuje się pozytywny efekt zwiększenia wytrzymałości i w niektórych przypadkach także wydłużenie. Skala tych zmian jest nieco inna dla każdego rodzaju pojedynczego modyfikatora lub kombinacji dwóch modyfikatorów. Na tym etapie pracy nie podjęto próby wyjaśnienia czym powodowane są obserwowane zmiany właściwości mechanicznych.

Tytuły tabel od 31 do 39 są błędne, tabele nie zawierają danych porównawczych, jak miało to miejsce w wypadku tabel 23 do 30.

9.3. Wyniki analizy termicznej

W trakcie każdej próby/wytopu przeprowadzono analiz termiczną z aplikacją systemu Itaca – 8. Wszystkie zrzuty widoków z monitora komputerowego zamieszczono w pracy.

Zbiorcze zestawienie zmian wartości podstawowych parametrów analizy termicznej zestawiono w tabeli 41 i na rysunku 75. Jeśli analiza termiczna miałaby być „narzędziem” kontroli skuteczności modyfikacji żeliwa sferoidalnego, to w opisie wyników powinien być szerszy komentarz. W klasycznej analizie termicznej wiodącym wskaźnikiem „dobrej” modyfikacji żeliwa szarego jest wartość zmiany rekalescencji żeliwa przed i po zabiegu modyfikacji. Powinna się ona zmienić/zmniejszyć od 1,5 do 2,5 krotnie. A jak jest w przypadku żeliwa sferoidalnego? Z analizy danych zamieszczonych na rysunkach 44 do 74 wynika, że stosunek rekalescencji żeliwa w stanie przed końcową modyfikacją i po jej przeprowadzeniu waha się w przedziale od 0,63 do 1,53. W czterech przypadkach - że żeliwo przed modyfikacją końcową ma mniejszą wartość rekalescencji niż po modyfikacji. Jak to należy zinterpretować?

9.4 Geometria modeli próbných i wyniki symulacji zalewania

Analiza konstrukcji typowych odlewów wykonywanych w Odlewni Rafamet miała na celu opracowanie geometrii modeli odlewów testowych do badań wstępnych nad skutecznością procesu modyfikacji. Na rysunkach 76 i 77 pokazano odlewy płyty z zaznaczeniem głównych/największych węzłów cieplnych. Mają one kształt prostopadłościanów o zbliżonych wymiarach boków (bliskie sześciansom). W wyniku analizy podobieństwa kształtów do badań własnych przyjęto modele/odlewy sześciansom o bokach: 6,0; 9,0 i 12,0cm.

W opisywanej analizie brakuje opisu geometrii elementów odlewów z wykorzystaniem podstawowego parametru opisującego kinetykę krystalizacji odlewów jakim jest moduł krzepnięcia bryły, węzła cieplnego. Postępowanie się modułami krzepnięcia stanowi „klasykę” w analizie czasów krzepnięcia segmentów odlewów i wyznaczania miejsc ich zasilania. Moduł sześciansu to wymiar boku dzielony przez 6,0

($M = a/6$). Zatem wybrane sześciany mają moduły: $M = 1,0; 1,5; i 2,0\text{cm}$, co odpowiada ścianką odlewu o grubości: 2,0, 3,0 i 4,0cm. Na ile te wymiary odlewów testowych odpowiadają rzeczywistym odlewom? Analiza budowy odlewów z punktu widzenia wymiarów węzłów cieplnych uzyskiwanych z programów do symulacji krzepnięcia dałaby odpowiedź.

Opracowane proste modele wykorzystano w pracy do realizacji badań nad wpływem wybranych modyfikatorów na zmianę skłonność żeliwa do tworzenia jam skurczowych. W pracy opisano wyniki badań z użyciem modeli dla dwóch gatunków żeliwa sferoidalnego i kilku kombinacji mieszanych modyfikatorów. Formy wykonywano z masy furanowej o typowym składzie dla mas z wykorzystaniem osnowy po regeneracji. Analizowano skuteczność tzw. wtórnej modyfikacji realizowanej techniką „na strugę” metalu kierowanego do zbiornika wlewowego formy. Wtórna modyfikacja obejmowała wprowadzania 0,10% klasycznego modyfikatora.

9.5. Wyniki analizy mikrostruktury – mikroskopia świetlna i skaningowa

W pracy przedstawiono zdjęcia złądów nietrawionych przy powiększeniu x200 na rys. 88 do 95. Próbkę pobierano z wlewków wytrzymałościowych Y2. Zdjęcia posłużyły do wyznaczania gęstości wydzieleni grafitu kulkowego w próbkach bez i po modyfikacji. Analiza wyników zamieszczono w dalszej części pracy.

Podobne nadania mikrostruktury przeprowadzono dla prób zasadniczych obejmujących odlewanie sześciennych kostek o różnym wymiarze boku. Ta część badań dotyczyła wytypowanych (optymalnych?) kombinacji modyfikatorów dodawanych raz przy przelewaniu z pieca do kadzi i dwa – na strugę metalu. Na rysunkach 96 – 99 przedstawiono mikrostrukturę nietrawionych złądów. Każdy rysunek zawiera zdjęcie złądu żeliwa bez (wtórnej?) modyfikacji i żeliwa po modyfikacji wykonany dla trzech kostek o opisanych wymiarach. Daje to możliwość łatwego porównania skuteczności działania modyfikatorów oraz roli szybkości stygnięcia.

W ramach mikroskopii skaningowej wykonano kilka zdjęć przetomów próbek z wytopu 7, w którym wykonano dwustopniową modyfikację: I – przez wprowadzenie podczas przelewania metalu 0,12% FeSiBa, i drugą II – przez dodanie na strug 0,10% FeSiAlBi. Przetomy próbek potwierdzają kulkową postać wydzieleni grafitu

9.6. Wyniki analizy za pomocą tomografii komputerowej

Testowano strukturę wewnętrzną próbek o module $M=1,0\text{cm}$ (sześciąt 6cm) poszukując wewnętrznych nieciągłości. Badani dotyczyły wytopu nr 8, w którym modyfikację dwustopniową przeprowadzono wg procedury opisanej powyżej, przy przelewaniu wprowadzano 0,10% FeSiBa, a w modyfikacji na strugę dodawano 0,15% FeSiAlBi. Wykazano, iż bez modyfikacji w próbkach powstają wewnętrzne pustki – jamy skurczowe, a po modyfikacji odlewy są wolne od tych wad.

9.7. Podsumowanie wyników przeprowadzonych badań

Jest ważny i starannie opracowany rozdział, w którym doktorant stara się wyciągnąć wnioski z każdego segmentu opisanych badań. Odnosi się kolejno do wyników:

- Analizy składów chemicznych badanych gatunków żeliwa
- Badań wytrzymałościowych
- Badań analizy termicznej i derywacyjnej
- Wpływu modyfikacji na gęstość wydzieleni grafitu
- Analizy kształtu wydzieleni grafitu
- Tomografii komputerowej

Prowadząc analizę zestawiono w postaci tabel i wykresów porównanie badanych parametrów i właściwości żeliwa przed i po modyfikacji. W ocenie skuteczności modyfikacji żeliwa sferoidalnego użyte „narzędzia” badawcze wymienione powyżej mają różną wagę. Wydaje się, w opinii recenzenta, że kluczowym wskaźnikiem skuteczności modyfikacji jest zwiększenie liczby wydzieleni grafitu w jednostkowej objętości zwana w pracy „gęstością wydzieleni grafitu”. Celem modyfikacji jest zwiększenie liczby zarodków heterogenicznych w żeliwie, a skutkiem zwiększenie liczby komórek eutektycznych budujących się na wydzieleniach grafitu. Pozostałe wskaźniki takich jak zmiana rekalescencji żeliwa przed i po modyfikacji, czy też właściwości mechanicznych, które badano jedynie na odlewach wlewków próbnych Y nie dają tak jednoznacznych wyników.

9.8 Przykład wdrożenie opracowanej technologii modyfikacji w procesie produkcyjnym

W ramach walidacji opracowanej technologii modyfikacji żeliwa w warunkach Odlewni Rafamet zostały wykonane dwa odlewy o masie około 30 ton każdy. Są to odlewy: stołu dla obrabiarki karuzelowej z perlitycznego żeliwa EN GJS 600 – 3 oraz odlew obudowy korbowodu z ferrytycznego żeliwa EN GJS 350 – 22. W ramach badań wykonano analizę składu chemicznego, próbę analizy termicznej i określono wytrzymałość na próbkach wykonanych z wlewka próbnego Y2. W ramach prezentacji wyników pokazano obraz mikrostruktury w próbkach przyłanych do odlewu. Niestety nie podano wymiarów próbek przyłanych, których wymiary opisują obowiązujące w tym zakresie normy.

Przy odlewaniu **stołu obrabiarki** wykonano modyfikację dwustopniową, przez wprowadzenie przy przelewaniu 0,81% modyfikatora barowego FeSiBa i dodatkowo na strugę metalu wprowadzono 0,10% modyfikatora FeSiAlBi.

Przy odlewaniu **obudowy korbowodu** wykonano podobnie modyfikację dwustopniową, przez wprowadzenie przy przelewaniu 0,50% modyfikatora barowego FeSiBa i dodatkowo na strugę metalu wprowadzono 0,083% modyfikatora FeSiAlBi.

Z analizy składów chemicznych można zauważyć, iż żeliwo wlane do form zawierało stosunkowo niską zawartość Mg (0,039%) jak na tak grubościenny odlew. Struktura we wlewkę przyłanym (rys. 115) odpowiada raczej ferrytyczno – perlitycznym gatunkom żeliwa sferoidalnego a nie gatunkowi o wytrzymałości $R_m = 670$ MPa i twardości 235HB. W pracy nie podano jakich właściwości „oczekuje” się w próbce przyłanej, bo te zawarte w tabeli 68 odnoszą się do wlewka Y2. Podobne uwagi odnoszą się do drogiego odlewu próbnego – obudowy korbowodu.

10. Wnioski końcowe

W ramach wniosków końcowych doktorant dokonał reasumpcji wyników badań przeprowadzonych w ramach pracy i uzyskanych wyników. Wskazuje w nich, że cel pracy został osiągnięty, ograniczono zużycie materiałów krytycznych osiągając równolegle poprawę jakości odlewów wielkogabarytowych. Ograniczono również liczbę odlewów zabrakowanych.

Wskazuje się na modyfikację jako sposób „odbudowy” zdolności do grafityzacji żeliwa, które ze względów techniczno – organizacyjnych musi być przetrzymywane w wysokiej temperaturze przez długi czas. Chodzi tu o zbieranie metalu w kadziach z kilku wytopów dla uzyskania możliwości wykonania odlewów o masie ponad 30ton przy jednostkach topiących 6 ton. W takiej sytuacji, jak wykazano to w badaniach przemysłowych zaleca się modyfikatory zawierające Al. i Ca. Korzystnie, że większość modyfikatorów zawiera zarówno Al. jak i Ca, chodzi o to, aby ta zawartość była podwyższona w stosunku do „przeciętnej”.

4. Uwagi merytoryczne do dyskusji

Praca doktorska obejmuje wiele wątków i zagadnień naukowych, badawczych, technologicznych. Poza uwagami o charakterze edytorskim, terminologicznych jest kilka aspektów, które wymagają wyjaśnić w ramach dyskusji. I tak:

- Analiza termiczna w początkowym okrasie jej rozwoju w obszarze oceny żeliwa była stosowana do wyznaczania wskaźników składu chemicznego (CE i Sc) żeliwa podeutektycznego i do oceny skuteczności zabiegu modyfikowania żeliwa szarego. W pierwszym zastosowaniu wykorzystuje się różnicę temperatur $T_{sol} - T_{lik}$, a w drugim – ocenę skuteczności prowadzono w oparciu o wartość rekalescencji żeliwa przed i po modyfikacji. Proszę, na bazie swoich wyników, ustosunkować się do wykorzystania analizy AT i ATD do oceny skuteczności modyfikacji żeliwa sferoidalnego.
- Proszę wyjaśnić, co kryje się pod pojęciem „odlewów grubościennych”, czy masa odlewu, którą posługuje się Autor jest wskaźnikiem grubościenności? W pracy nie są podawane wymiary grubości ścianek. Proszę o przedstawienie analizy modułów krzepnięcia: próbki Y2, próbek sześciennych testowanych w

pracy i modułów głównych węzłów cieplnych w odlewach przyjętych do walidacji prac własnych

- Opis technologii wykonania odlewów próbnych i oceny ich jakości jest niepełny. Chodzi o takie elementy technologii jak proces sferoidyzacji, prawdopodobnie jest on prowadzony po „zebraniu” całej objętości? Na podstawie jakich testów stwierdza się, że odlew jest „dobry”?
- Proszę odnieść się do składu chemicznego zaprawy magnezowej PE w kontekście odpowiedzi na pytanie, czy spełnia ona dodatkową funkcję modyfikatora. Jeśli tak, to ilustrowana modyfikacja żeliwa sferoidalnego jest stosowana w technologii Odlewni Rafamet?
- Proszę ustosunkować się do informacji zawartej w pracy o zastosowaniu pierwotnej modyfikacji z użyciem 0,81% i 050% modyfikatora w stosunku do badań własnych z użyciem 0,10% tych samych modyfikatorów.
- W odlewach żeliwa sferoidalnego po modyfikacji obserwuje się mniejszą skłonność do tworzenia jam skurczowych. Na czym polega mechanizm tych zmian?
- W jakich obszarach kontroli produkcji odlewów z żeliwa sferoidalnego można wykorzystać technikę ultradźwiękową, jeśli jest stosowana w Odlewni Rafamet - to proszę opisać.

5. Wniosek końcowy

Podsumowując całość pracy, uzyskane w opiniowanej rozprawie doktorskiej wyniki badań są interesujące, tak z uwagi na ich poznawczy charakter, jak i przede wszystkim ze względu na znaczenie użytkowe. Modyfikacja żeliwa jest kluczem utrzymania wysokiej jakości metalu, w tym żeliwa sferoidalnego. Ten drugi cel w sposób szczególny jest oczekiwany w pracach doktorskich o charakterze wdrożeniowym.

W zawiązku z powyższym stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr inż. Karola Piaseckiego pt. "Ocena wpływu wybranych modyfikatorów na proces krystalizacji i jakość żeliwa sferoidalnego w odlewach grubościennych" spełnia wymogi Ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym z dnia 20.07.2018 (i późniejszymi zmianami) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Prof. Jerzy Stanisław Zych

/podpis odręczny/

Kraków 04.01.2025

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)