

dr hab. inż. Piotr Migas

Kraków, dn. 30.10.2018

Akademia Górniczo-Hutnicza

Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej

Al. Mickiewicza 30,

30-059 Kraków

## **RECENZJA**

### **rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartosza Węckiego**

pt.: "Analiza wpływu wielkości powierzchni kontaktu ciekła faza metaliczna – faza gazowa na efektywność procesu rafinacji metali w tyglowych piecach indukcyjnych"

opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Politechniki Śląskiej

### **1. Ocena podjętego obszaru tematycznego**

Recenzowana praca doktorska obejmuje zakres tematyczny związany z technologiami przetopu metali w piecach indukcyjnych wybranych dwóch typów.

Szczegółowo zajmuje się analizą zjawisk: przewodzenia elektromagnetycznego w metalach, parowania pierwiastków z ciekłych roztworów metalicznych w metalurgii próżniowej oraz oceną wpływu wybranych parametrów na efektywność tego zjawiska.

Podjęty temat wydaje się jak najbardziej aktualny ze względu na uwarunkowania środowiskowe w UE (agregaty metalurgiczne oparte o energię elektryczną – piece indukcyjne) oraz np. możliwości uzyskiwania bardzo czystych roztworów metali z wykorzystaniem technologii rafinacyjnych.

### **2. Analiza przedstawionej rozprawy doktorskiej**

Przedstawiona rozprawa liczy 116 stron, składających się na 8 rozdziałów w tym bibliografię zawierającą 98 pozycji literaturowych, wykaz oznaczeń stosowanych w pracy,

natomiast nie zawiera spisów rysunków i tabel. Praca pod względem edytorskim została wykonana starannie, jest przejrzysta oraz czytelnie rozplanowana.

W części literaturowej (rozdziały 1-3) zostały omówione zagadnienia związane z generowaniem ciepła w roztworach metalicznych przez indukowane pole magnetyczne, jego oddziaływanie fizyczne na uzyskiwaną ciecz, czyli zjawiska mieszania. Opisano również wybrane typy pieców indukcyjnych pod kątem ich konstrukcji i stosowanych technologii przetapiania indukcyjnego, skoncentrowano się na piecach tyglowych oraz piecach z zimnym tygłem (pół-lewitacyjnych). W części analizy teoretycznej Autor skupił się również na zjawiskach parowania składników z roztworu, na wpływie np. ciśnienia w układzie na ten proces, jak również rodzaju stosowanych atmosfer nad roztworem.

Kolejnymi rozdziałami są: cel i zakres pracy, badania własne, opracowanie wyników badań, omówienie wyników badań oraz ostatnim rozdziałem są wnioski, w których Autor zawarł część badawczą pracy.

W rozdziale „Badania własne” zaprezentowano schematy stosowanych pieców indukcyjnych opisano szczegółowo metodykę badawczą. W dwunastu tabelach (od tab. 5.5 do tab. 5.16) zamieszczono parametry procesów oraz wyniki np.: ubytku masy analizowanych pierwiastków (Zn i Pb).

Rozdział „Opracowanie wyników badań” zawiera m.in. zdjęcia menisków cieczy w piecu, dokładniej Cu w PIT –piecu indukcyjnym tyglowym oraz Al w PZT – piecu z zimnym tygłem, jak również metodykę wyliczenia pola powierzchni tych menisków z wykorzystaniem dwóch programów komputerowych Wolfram Mathematica i MicroStation. Kolejną częścią tego rozdziału jest zaprezentowana metodyka wyliczania strumieni masy pierwiastków odparowujących z roztworu oraz przedstawienie uzyskanych wyników kalkulacji na wykresach 6.5 – 6.32 oraz w tabelach 6.1-6.3.

Ostatnim rozdziałem części badawczej jest rozdział 7 – „Omówienie wyników badań”.

W rozdziale tym zostały porównane (w postaci tabeli 7.1, - 7.2 oraz wykresów 7.1-7.36) uzyskane wyniki - ubytku masy oraz gęstości strumieni dla dwóch typów technologii wytopów w piecach z tygłem ceramicznym oraz z zimnym tygłem (m.in. dla różnych: ciśnień, stężeń pierwiastków w stopach oraz różnych elektrycznych mocy czynnych pieców).

### 3. Uwagi szczegółowe

Uwagi zostały przedstawione w kolejności występowania w pracy.

Uwagi ogólne – wydaje się, aby Autor zdecydował, czy używa w pracy sformułowania „kąpiel metaliczna”, czy „kąpiel metalowa” (w „Spisie treści” i w kolejnych rozdziałach) i stosował konsekwentnie tę formułę. Sformułowanie „odpędzanie” (str. 76 i 77), pochodzące raczej ze slangu hutniczego i wykorzystywane w pracy naukowej jest niefortunne.

1. W „Wykazie ważniejszych oznaczeń” na str. 3 - zamieszczono dwukrotnie te same oznaczenia dla tej samej zmiennej  $\Delta m$  – ubytek masy,  $g$  – wydaje się, że niepotrzebnie. Zaprezentowano dwukrotnie oznaczenie (sigma)  $\sigma$  - jako konduktywność oraz napięcie powierzchniowe – uzasadnione byłoby rozróżnienie tych wielkości fizycznych (choćby stosując np. indeks).
2. Na stronie 4 użyto sformułowania „obserwujemy dodatkowo dużą różnicę w wielkości powierzchni topionego metalu lub stopu” – wydaje się jednak, że metal lub stop topi się w całej objętości, a wykorzystanie takiego sformułowania jest skrótem myślowym.
3. Na str. 9 w równaniu (2.14) użyto oznaczeń  $f_1$  i  $f_2$  – nie zdefiniowanych ani w legendzie równania, ani w wykazie oznaczeń. Opis parametrów tego równania (2.14) „a, b, c – stałe”, bez np. podania ich wartości lub opisu skąd można je uzyskać/wyliczyć – wydaje się niewystarczający.
4. Kolejno, na str. 10 oraz 11 zaprezentowano zestaw równań od 2.16 do 2.23 opisujących/charakteryzujących m.in. wektory indukcji magnetycznej powstające w kąpielach metalicznych oraz np. siły Lorentza wpływających na powstawanie i kształt menisku oraz ruch cieczy w tyglu. Dla tej części rozdziału (2.1.2), wydawałoby się uzasadnione zaprezentowanie schematu/schematów, na których widoczne byłyby opisywane zjawiska, wektory, siły. Brak takich obniża wartość przytaczanych równań. Natomiast stosowane stwierdzenia o zwrotach wektorów sił, pól i ich kierunkach oraz „analizowanych obszarach” bez obrazu graficznego stwarza niedosyt czytającego. Zaprezentowany schemat pieca indukcyjnego na rys. 2.4, jest zbyt ogólny i nie wystarczający, do prowadzonych rozważań o działaniu wektorów sił na ciecz powstających w wyniku indukcji.
5. Na stronie 17 równanie 2.20 legenda równania jest niekompletna, nie ujmuje wszystkich zmiennych występujących w równaniu. Kolejno na tej stronie 17, został przytoczony „*stosunek amplitud  $E_m, H_m, J_m \dots$* ” Warto wyjaśnić amplitud jakich

- zmiennych, czy to: natężenia pola elektrycznego, natężenia pola magnetycznego, gęstości prądu ?
6. Czy postać równania 2.22 - jest odpowiednia zapisana ? Jeżeli wartość równania jest stała, co ono określa/wylicza ?
  7. Na rysunku 2.6 (str. 19) nie została opisana oś rzędnych, na rysunkach od 2.7 do 2.11 również brakuje opisu osi rzędnych.
  8. Wydaje się, że warto podać odnośniki literaturowe dla rysunków od 3.9 do 3.15, jak również dla tabel 3.1. oraz 3.2.
  9. Na rysunku 3.15. ze wzrostem częstotliwości, maleje średnia prędkość ruchu ciekłego metalu – jak to jest możliwe?
  10. Wydaje się, że użycie na stronie 47 w rozdziale „Cel i zakres pracy” - sformułowania „rdzeń drugiej fazy” - w odniesieniu do fazy gazowej nie jest do końca odpowiednie.
  11. Cele pracy zostały jasno sformułowane, natomiast nie została postawiona teza, wydaje się, że na podstawie analizy literaturowej tematu można było pokusić się o jej sformułowanie.
  12. W rozdziale 6, „Opracowanie wyników badań”. W zawiązku z istniejącym pewnym kątem (nie był to kąt  $90^\circ$  – jaki uznajemy - za przekrój poprzeczny), pod którym były wykonywane zdjęcia menisków w trakcie wytopów, wydaje się uzasadnione zamieszczenie opisu metodyki wzorcowania wysokości menisku w stosunku do położenia aparatu fotograficznego/kamery.
  13. Zaprezentowany na stronie 69, wyznaczony (z wykorzystaniem softwaru Wolfram Mathematica) przykładowy kształt oraz rozmiar menisku na rysunku 6.5 – wydaje się niezbyt dokładnie i jasno opisany w tekście.
  14. W tabeli 6.2 do oznaczenia pola powierzchni raz są wykorzystywane litery F1, F2, natomiast do różnicy tych powierzchni wykorzystuje się literę S, wprowadza to pewnego rodzaju zamieszanie. Również przytaczanie przepisów funkcyjnych opisujących kształt menisku z wykorzystaniem raz funkcji liniowej, raz wielomianu 6-tego stopnia oraz brak warunków (statystycznych dla równań regresji – poziom ufności, ilość stopni swobody, liczebność zbioru danych ), dla których te funkcje zostały przyjęte wprowadza pewnego rodzaju niepewność co do ich wiarygodności.
  15. Na stronie 77 w tekście pomyłono oznaczenia stopów zamiast zamieszczonego stopu AlZn<sub>6,3</sub> – powinien być stop AlZn<sub>4,2</sub>.

16. Analizując tabele 6.3, na stronie 78, uzyskane wyniki dla procesu przetapiania stopu Cu-Pb, w PZT oraz PIT, prezentują, że (dla pieca PZT) pomimo wzrostu mocy, wzrostu pola powierzchni menisku cieczy metalowej, dla takich samych wartości ciśnień, ale dla niższych temperatur - ubytek masy odparowywanego ołowiu jest mniejszy. Dlaczego tak się może dziać? Czy można w takim razie postawić wniosek, że w powyższych warunkach, temperatura kąpieli metalowej jest głównym czynnikiem determinującym odparowywanie ołowiu? Jak te wyniki (tabela 6.3) mają się do wniosków końcowych?
17. W trakcie analizy rysunków 6.27, 6.28, 6.29, 6.30, dla pieca PZT, można stwierdzić, że wraz ze wzrostem ciśnienia i obniżaniem mocy pieca, średnia gęstość strumienia usuwanego cynku maleje. Dla stopu AlZn<sub>6,3</sub>, zaprezentowane wyniki na rys. 6.29 parowania Zn ze stopu, pokazują, że wraz z obniżaniem mocy pieca średnia gęstość strumienia również maleje, natomiast na rysunku 6.30 dla stopu AlZn<sub>4,2</sub> jest odwrotnie – wraz obniżaniem mocy średnia gęstość strumienia masy Zn z układu rośnie. Dlaczego?
18. W przypadku analiz ubytków mas oraz gęstości strumieni masy z rys. 6.23 oraz 6.24 dla procesu w PIT oraz stopów CuPb<sub>8</sub> (w temp. 1323°C, 1373°C) i CuPb<sub>1,9</sub> ( w temp. 1423°C, 1473°C) oraz (vs.) rysunków 6.31 i 6.32 dla PZT, dla stopów CuPb<sub>8</sub> (w temp. 1238°C) i CuPb<sub>1,9</sub> (w temp. 1323°C) – nasuwa się konkluzja, iż warto było wykonywać eksperymenty, w tych samych (lub co najmniej porównywalnych) temperaturach eksperymentów, tak różne temperatury bardzo utrudniają analizę uzyskanych wyników oraz wyciąganie jasnych wniosków.
19. W przypadku zaprezentowanego rysunku 7.9 na str. 94, warto podać odnośnik literaturowy. Co ciekawe, w zakresie tych częstotliwości (0-10000 Hz) tendencja ich wpływu na szybkość mieszania metalu w tyglu jest zupełnie odwrotna niż ta na rysunku 3.15. (częstotliwość w zakresie 0,5 - 5,5 Hz).
20. Autor na stronach 94 oraz 103 posługuje się określeniem „sprawności elektrycznej procesu” – w przypadku prowadzonych przez Autora analiz, wydaje się jednak bardziej miarodajne używanie – sprawności cieplnej procesu, która jest zresztą diametralnie różna dla pieca PZT oraz PIT, na korzyść tego drugiego.
21. W przypadku wyników zaprezentowanych na rysunkach 7.10 oraz 7.12, zmiany ubytku masy w funkcji zmiany ciśnienia, nie może się ona odbywać dla stałych ciśnień - jak to zaprezentowano w legendzie wykresów ( $p = \text{const.}; 10, 100, 500, 1000 \text{ Pa}$ ). Wydaje się, że gdzieś wystąpiła nieścisłość.

22. W przypadku rys. 7.31 oraz 7.32 – zaprezentowane zostały dokładnie te same wyniki ubytku masy ołowiu-Pb w funkcji zmiany ciśnienia, jak na wykresach 6.23 i 6.24. Identycznie dla wykresów 7.33-6.6.26, 7.34-6.25, 7.35-6.31, 7.36-6.32 – co było powodem? Dlaczego wzrost temperatury (dla pieca PIT) powoduje obniżenie wartości średniej gęstości strumienia masy, czy ta tendencja wynika również ze wzrostu pola powierzchni menisku?

#### 4. Ocena końcowa

Stwierdzam, że rozprawa Pana mgr inż. Bartosza Węckiego spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim:

- postawiono jasno określone cele,
- zaplanowano i zrealizowano badania według przyjętej metodyki badawczej - dowodzi to umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez doktoranta,
- logicznie zinterpretowano uzyskane wyniki i sformułowano wnioski,
- uzyskane wyniki wnoszą ciekawy i oryginalny wkład naukowy z możliwością ich ew. zastosowania w praktyce technologicznej.

Podsumowując uważam, że praca wnosi wkład w rozwój nauk technicznych oraz zawiera interesujące przesłanki w kierunku wykorzystania przedstawionych wyników w praktyce metalurgicznej.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Bartosza Węckiego pt.: **„Analiza wpływu wielkości powierzchni kontaktu ciekła faza metaliczna – faza gazowa na efektywność procesu rafinacji metali w tyglowych piecach indukcyjnych”** spełnia wymogi określone w Ustawie o stopniach i tytule naukowym.

W związku z tym wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Bartosza Węckiego do publicznej dyskusji nad Jego rozprawą doktorską przed Radą Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Politechniki Śląskiej.

  
Piotr Migas