

prof. dr hab. inż. Mariola Saternus  
Katedra Metalurgii i Recyklingu  
Wydział Inżynierii Materiałowej  
Politechnika Śląska  
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice

Katowice, dnia 27.04.2022

### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**Tytuł rozprawy:** Modelowanie zjawisk fizyko-chemicznych w procesie rafinacji barbotażowej ciekłego aluminium

**Autor rozprawy:** mgr Kamil Piotr Kuglin

**Przewód doktorski:** w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa

**Promotor rozprawy:** dr hab. inż. Dorota Kalisz, prof. AGH

**Promotor pomocniczy:** dr inż. Aleksander Siwek

Recenzję rozprawy doktorskiej sporządzono na prośbę Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie dr hab. inż. Agnieszki Kopia, prof. AGH

### **Informacje o pracy i ocena strony formalnej**

Przedstawiona do recenzji praca doktorska liczy 108 stron. Składa się z sześciu rozdziałów, po każdym z nich (oprócz ostatniego rozdziału zatytułowanego Wnioski) zamieszczono literaturę, co w pracach doktorskich nie jest typowym układem. Trudno zatem stwierdzić, ile pozycji literaturowych Autor wykazał. W rozdziale I Wprowadzenie, który wprowadza czytelnika do tematyki Autor zamieścił 88 pozycji literaturowych. W kolejnych rozdziałach tych pozycji literaturowych jest znacznie mniej, ale wiele z pozycji zamieszczonych w rozdziale I się powtarza. Analizując jednakże zamieszczoną literaturę można stwierdzić, że zakres tematyczny literatury można uznać za właściwy dla realizacji pracy, a przeprowadzona analiza źródeł jest wystarczająco obszerna.

Rozprawa doktorska została napisana poprawnym językiem technicznym. Choć do mankamentów należy zaliczyć brak zdecydowania Autora do jednolitego nazewnictwa, przykładem może być tutaj żużel (str. 62), którego w procesie rafinacji praktycznie brak. Pojawia się kożuch (lub zgar) na powierzchni aluminium, którego ilość zależy od użytego



gazu rafinującego. Na str. 69 pojawia się także żużel rafinujący lub pokrywający. Ponieważ jest to istotna terminologia w całej pracy sugeruje się by stosować na przyszłość jednolitą terminologię, np. żużel rafinujący. Głównym mankamentem pracy jest także brak spisu oznaczeń, który w znaczący sposób ułatwiłby czytanie, zwłaszcza przy tak dużej ilości pojawiających się w pracy równań i wzorów. Tym bardziej, że wiele z oznaczeń niestety nie zostało podanych w podpisie pod wzorami. Również układ pracy, zwłaszcza rozdział 2, budzi pewne wątpliwości. Zatytułowano go Obiekt badań, cel i zakres pracy. Na 7 stronach analizowane są parametry procesu, by na ostatniej stronie tego rozdziału podać cel i zakres pracy, choć tutaj także budzi wątpliwość ilość podanych celów. Cel pracy powinien być jeden, a to co Autor opisuje jako najważniejsze cele to raczej zakres pracy.

W pracy występują także błędy edycyjne, których przykłady przedstawiono poniżej:

- brak spisu oznaczeń, brak oznaczeń symboli w równaniach, np. str. 13 Tabela 1, brak opisu  $R$ ,  $h$ ,  $P_a$ ,  $T$ ,  $T_g$ ,  $V_m$ ,  $\rho_g$ ; str. 30 równania (10-13) brak opisu symboli  $d_B$ ,  $D$ ,  $u_B$ ; str. 43 równanie (21-22) brak opisu niektórych symboli; str. 56 rys. 37 – brak opisu symboli na rysunku; str. 57 brak oznaczeń  $D_c$ ,  $D_p$ ,  $u_p$ ,  $u_c$
- brak odniesienia w tekście do literatury lub błędne odnośniki literaturowe, np. str. 1 Tabela 1 [10-12], powinno być, [9-12]; str. 12 pozycje [71,72] brak odniesienia w tekście; str. 16 – L. Zhang i S. Taniguchi – brak odnośnika; str. 17 punkt g) L. Zhang i S. Taniguchi [29] – pod nr [29] w spisie literatury kryje się Szekely; str. 17 – M. Sevik i S. H. Park – brak odnośnika; strony 21-24 – brak odniesienia w tekście do literatury [19-27,33-34,41-47]; str. 30 – brak odniesienia do literatury w zdaniu: „Niektórzy autorzy zaobserwowali ....., inni twierdzą ....”; str. 40 rys. 6 – brak odnośnika literaturowego; str. 60 rys. 41 – brak odniesienia do literatury
- błędne oznaczenie rysunków lub brak ich odniesienia w tekście, np.: Tabela 2 – wers 3 i 4 kolumna 1 ten sam podpis proces IMN pod różnymi rysunkami; str. 28 rys. 5 i 6 ten sam opis, raczej rys. 5 i oznaczenia a oraz b; str. 38 rys. 1-5 – podpis niezbyt precyzyjny, „...usuwanie .... różnymi rafinatorami”, a na rysunku przedstawiono wyniki usuwania także gazami rafinującymi; str. 54 rys. 30-34 – brak odniesienia w tekście; str. 56 – po rys. 34 następuje rys. 37, brak rys. 35 i 36
- używanie błędnego lub nieprecyzyjnego opisu zjawisk: str. 2 „wskutek złe przeprowadzonego procesu stopowania ciekłego metalu”, str. 2 „w przypadku metalu pierwotnego tzn. aluminium elektronicznego”; str. 2 – „złej jakości zapraw”; str. 26 rys. 3 – „piasek”



- błędy edycyjne i literówki, np. str. 1 w w aluminium; str. 3 raz alkaiczne, raz alkaliczne, str. 27 – równanie (4) po T powinien pojawić się minus, jest plus i minus; str. 30 równanie Eng`a ma być Engh`a; str. 44 moc mieszania jednostka [w/t], powinno być [W/t]
- błędnie przedstawione rysunki, np. str. 57 rys. 38 – brak osi x – zarówno opisu, jak i wartości; str 66-74 - rys. 52-75 co jest na osi x, jaka jest jednostka, podobnie brak jednostki na osiach y w przypadku U
- niska rozdzielczość rysunków przedstawionych w rozdziale 5.2 (rys.10-65), bardzo lakoniczny ich opis.

Błędy te utrudniają czytanie, ale nie wpływają na wartość merytoryczną rozprawy.

### **Wartość naukowa i merytoryczna pracy**

Tematyka przedstawiona w pracy doktorskiej dotyczy modelowania zjawisk fizykochemicznych zachodzących w procesie rafinacji aluminium na drodze barbotażu, czyli wprowadzania do ciekłego metalu gazu rafinującego. Proces ten realizowany może być poprzez lance, kształtki porowate oraz wirującą dyszę. Ten ostatni proces jest często wykorzystywany ze względu na prostotę i skuteczność. Proces usuwania zwłaszcza zanieczyszczeń gazowych jest niezwykle ważnym zagadnieniem i jednocześnie koniecznym etapem technologicznym. Każdy gram aluminium zarówno pierwotnego, jak i wtórnego musi być poddany procesowi rafinacji, by nie pojawiła się porowatość, co obniżyłoby właściwości mechaniczne i wytrzymałościowe materiałów wykonanych z aluminium i jego stopów. Zatem wybór tematu jest trafny i uzasadniony.

W rozdziale I Wprowadzenie Autor przedstawił charakterystykę zanieczyszczeń spotykanych w aluminium tak pierwotnym, jak i wtórnym, po czym przedstawił wiele urządzeń stosowanych w przemyśle do procesu rafinacji aluminium i jego stopów. Brak większych zastrzeżeń do tak przedstawionego zagadnienia. Rozdział II Obiekt badań, cel i zakres pracy Autor rozpoczął od podania charakterystycznych parametrów analizowanego procesu, po czym podał cele pracy. Zdefiniowano główny cel pracy oraz najważniejsze cele pracy (podano ich pięć). Ponadto jeszcze Autor skupił się na trzech zagadnieniach. W rozdziale 2.2 Cel i zakres pracy panuje dosyć spory chaos. Ponadto czy Cel 4. Wykonanie w programie ... projektów ... oraz zbadanie ich możliwości ... to cel czy zakres? Ten element pracy wymagałby uściślenia. Choć należy tutaj nadmienić, że cele pracy zostały zrealizowane.

Rozdział 3 opisuje usuwanie wodoru z ciekłego aluminium, m.in. mechanizm wprowadzania wodoru i jego usuwania, rozpuszczalność wodoru w aluminium, jego dyfuzję i transport w



ciekłym metalu, wszystko to poparte obliczeniami i wieloma wzorami matematycznymi, brak jednakże wskazania wzorów, np. na współczynnik przenikania masy, najbardziej adekwatnych do dalszych obliczeń modelowych. Same obliczenia przeprowadzono w oparciu o model Kitamury i wyciągnięto wnioski, które niewiele wnoszą nowych informacji, gdyż wiele tych informacji zostało już wcześniej zbadanych i podanych przez innych Autorów (Botor, Sigworth i Engh, Zhang).

Rozdział 4 zatytułowany „Usuwanie zanieczyszczeń podczas rafinacji aluminium” koncertuje się głównie na wtrąceniach niemetalicznych lub metalicznych. Przeprowadzono w nim modelowanie zjawiska kolizji pęcherzyków gazowych i zanieczyszczeń stosując metodę Particle Size Group bazując na bilansie populacji dla wybranej grupy zanieczyszczeń. Tym samym Autor zrealizował jeden z kilku postawionych w pracy celów. Metoda ta wcześniej nie była stosowana do modelowania tego zjawiska w procesach rafinacji aluminium, czyli ma charakter oryginalności. Na podstawie wyników otrzymanych z modelu Autor stwierdził, że trudno jest na drodze kolizji turbulentnych usunąć wtrącenia o promieniu 1 i 5  $\mu\text{m}$ . W rozdziale tym Autor przeprowadził także modelowanie zjawiska usuwania wtrąceń na drodze flotacji z wykorzystaniem topników przy użyciu programu komputerowego, choć sam opis metodyki badawczej nasuwa kilka pytań i wymaga doprecyzowania. Ten element pracy także wykazuje charakter oryginalności i jednocześnie Autor osiągnął kolejny z założonych sobie celów.

Rozdział 5 to rozdział przedstawiający wyniki badań eksperymentalnych bazujących na modelowaniu fizycznym procesu rafinacji aluminium. Autor zaprojektował 6 typów wirników/głowic, wydrukował je z wykorzystaniem druku 3D oraz przetestował na stanowisku do modelowania fizycznego procesu rafinacji aluminium. Na tej podstawie wytypował wirnik, dający najlepsze wyniki pod kątem rozproszenia pęcherzyków gazowych w ciekłym metalu. Projekt głowicy (wirnika) niewątpliwie ma charakter oryginalny, brak jednakże informacji czym się sugerowano przy projektowaniu wirników. Wyniki badań otrzymane z modelowania fizycznego zostały uzupełnione wynikami symulacji numerycznych. Opis metodyki badawczej pozostawia jednakże wiele do życzenia, co szczegółowo omówiono w Uwagach krytycznych.

W wyniku analizy przedstawionej do oceny pracy należy stwierdzić, że Autor rozwiązał postawiony przed nim problem naukowy w sposób dostateczny i użył do tego właściwych metod, których jednakże opis wciąż wymaga doskonalenia.



## Uwagi krytyczne

- str. 3 – paragraf 2, „wtrącenia niemetaliczne ....dyspersjami tlenków”, cały ten paragraf powiela treść zawartą na stronie 2 i częściowo 3” – wymaga wyboru treści, które nie pojawiły się wcześniej
- str. 8 – wers 5 od dołu – „Opracowano w niej lub zaadaptowano modele najistotniejszych dla jakości etapów procesu, w tym celu wykorzystano modele, które są przydatne dla analogicznych procesów usuwania zanieczyszczeń gazowych i niemetalicznych np. w produkcji stali.” – całe to zdanie nie jest logiczne, ponadto trzeba doprecyzować, dla których zanieczyszczeń zaadaptowano modele, bo w literaturze zagadnienia rafinacji aluminium jest opracowanych wiele modeli matematycznych dokładnie opisujących proces usuwania np. wodoru
- str. 14 – Tabela 3 – dlaczego w danych do obliczeń przyjęto gęstość aluminium  $2375 \text{ kg/m}^3$ , czas procesu przyjęto 20 s – sam proces rafinacji trwa od 4 do 10 minut, by był skuteczny, ponadto temperatura rzędu 940 K czyli  $667^\circ\text{C}$  jest trochę niska, z reguły proces rafinacji prowadzi się w temperaturze  $690^\circ\text{C}$
- str. 14 – rys. 2 – jak obliczono czas mieszania w funkcji prędkości dla różnych wartości stężeń zanieczyszczeń – w modelu F. Chiti i A. Pagliani prezentowanym w Tabeli 2 brak odniesienia do stężenia zanieczyszczeń
- Tabela 6 – brak dyskusji otrzymanych wyników, tym bardziej, że niektóre wartości wyników średnic pęcherzyków znacznie różnią się od siebie
- str. 18-19 – przedstawione wyniki obliczeń liczby Webera na rys. 3-6 są praktycznie takie same, czy nie jest to błąd? Tym bardziej, że wartości przedstawione na rys. 7 i 8 wykazują duże różnice w stosunku do poprzednich wartości
- str. 25 – równanie (1) źle zapisane, składa się ono z dwóch reakcji, w pierwszej powstaje wodór cząsteczkowy, po czym wodór cząsteczkowy jest następnie rozpuszczany w fazie ciekłej w formie atomowej
- str. 29 i 30 – rys. 7 i rys. 8 – czym te dwa rysunki się różnią, przedstawiają ten sam mechanizm?
- str. 31 – przedstawione na rys. 9 a i b wartości współczynnika przenikania masy wykazują dużą rozbieżność, brak dyskusji wyników, brak wskazania równania do dalszego modelowania, co ciekawe żadne z czterech równań nie zostało następnie wykorzystane, a współczynnik przenikania masy na str. 32 obliczano z wzoru Higbiego, którego ponadto zapis jest błędny (równanie 19)



- str. 35 – wniosek nr 2: skąd pojawia się tutaj tworzenie warstewki  $\text{MgCl}_2$ ?
- str. 37 – Autor pisze, że „Rozpuszczalność i aktywność zanieczyszczeń w ciekłym aluminium były szczegółowo omówione w pracach [1-17]”, po czym dodaje tylko kilka zdań o wynikach prac zawartych w literaturze [5-11,13,14], Autor powinien odnieść się także do wyników uzyskanych w pracach [1-4] oraz [12,15,16,17], w innym przypadku po co je cytować?
- rys. 10-34 – w opisie pojawia się „czas zastępczy, zaniku pierwszej grupy wtrąceń niemetalicznych” – jeśli odnieść to do informacji zawartych w rozdziale 1 o podziale wtrąceń niemetalicznych, to pojawia się brak spójności, bo do grupy I zaliczono tylko  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  i  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ , a na rysunkach pojawiają się także wyniki dla  $\text{MgO}$  oraz  $\text{NaCl}$  i  $\text{SiO}_2$ ; potrzebne wyjaśnienia lub zmiana opisu rysunków
- str. 59 – brak informacji jakich topników użyto do analizy, czy te badania są poparte eksperymentalnie, czy tylko wybrano topniki i przeprowadzono analizę teoretyczną, czy te topniki w odlewniach są stosowane, wszystkie czy tylko wybrane?
- str. 61 Autor pisze: „Symulację zachowania cząstki na granicy faz aluminium – żużel wykonano przy pomocy programu komputerowego ...”. Czy ten program został przez Autora napisany czy zaadaptowany na potrzeby pracy? Co jest wynikiem tego programu – jakie dane powstają? Na rys. 44-50 pokazano przebieg linii izoterm lepkości, czy te wykresy wiążą się z wcześniej omawianym programem?
- str. 63 – nie podano topników, informacje o nich otrzymujemy tylko z podpisu pod rys. 44-50. Jakie topniki się stosuje, jaki jest ich skład chemiczny, w jakim celu się je stosuje, i czy kriolit jest często stosowany, oraz czy wtedy nie będą wydzielać się szkodliwe fluorki, jak ma to miejsce w przypadku elektrolizy  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ? Brak odpowiedzi w tekście na te pytania.
- str. 65 rys. 51 – ten rysunek jest całkowicie nieczytelny, w podpisie Autor pisze: „.... w jednym z badanych układów.” Co to za układ, co oznaczają linie, a co punkty? Ponadto opis do rysunku zamieszczony w tekście nie pokrywa się z tym co można na wykresie zaobserwować.
- str. 79 – jakiego typu są przedstawione na rys. 1-6 wirniki, typu propeller czy pompa, brak schematu doprowadzenia gazu do każdego wirnika i generowania pęcherzyków gazowych, na jakiej podstawie dobierano kształt głowic (wirników), brak Tabeli z wirnikami i zakresem parametrów procesowych



- str. 81 – w jakiej skali jest model fizyczny, na którym testowano wirniki, ta wartość jest niezwykle ważna, brak opisu metodyki badawczej
- w procesie wdmuchiwania pęcherzyków gazowych do ciekłego metalu zidentyfikowano pięć wzorców dyspersji, szeroko opisanych w literaturze zagadnienia; brak tutaj odniesienia do tych wzorców; wyniki badań prezentowane na rys. 10-65 powinny odnosić się do tych wzorców i zostać zebrane w tabeli, tak by wyniki badań były bardziej czytelne
- str. 98 dlaczego do badań numerycznych wytypowano tylko trzy prędkości obrotowe (200, 300 i 500 obr/min), podczas gdy w procesie modelowania fizycznego stosowano cztery wartości prędkości obrotowej (200, 300, 400 i 500 obr/min)
- str. 99 – zawsze szuka się optymalizacji siatki obliczeniowej, by nie wpływała na wyniki obliczeń, w pracy siatka składa się z prawie 8 milionów komórek, co jest dosyć dużym wynikiem i oznacza bardzo długi czas obliczeniowy, dlaczego nie przeprowadzono testu siatki i dlaczego zastosowano tak dużą siatkę?
- str. 99-100 – Autor opisuje modelowanie numeryczne, jednakże zaproponowany opis nie do końca jest jasny, czy zastosowany model cząstek to model DPM czyli opis Euler-Lagrange, a do modelowania przepływu płynu zastosowano model VOF? To jasno powinno zostać przedstawione w tekście
- str. 104 - Wniosek 1 – czy Autor wskazuje, że należałoby wybrać modelowanie numeryczne, czy fizyczne, nie do końca to jest jasne, warto by tutaj podać argumenty przemawiające za tego typu rozwiązaniem.

### **Ocena końcowa**

Na podstawie powyższych dywagacji stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska stanowi w stopniu dostatecznym oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Praca stanowi obszerny i miejscami ciekawy materiał badawczy, mimo wielu uwag krytycznych, na które Autor powinien w przyszłości zwrócić szczególną uwagę, zwłaszcza przy opisie metodyki badawczej, gdyż obecnie opis ten jest stosunkowo słaby. Autor wykazał się dostateczną umiejętnością w prowadzeniu badań eksperymentalnych jednocześnie prezentując dostateczną znajomość zagadnień związanych z rafinacją aluminium. Uwagi krytyczne przedstawione w recenzji wpłynęły istotnie na ocenę pracy i powinny stanowić podstawę doskonalenia warsztatu badawczego Doktoranta. Na uwagę zasługuje także aktualność tematu pracy oraz praktyczne jej znaczenie.



Reasumując, stwierdzam, że recenzowana rozprawa Pana mgr inż. Kamila Kuglin spełnia ustawowe kryteria (art. 13, ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, Dz. U. z 2003 r., nr 65, poz. 595 z późn. zm.) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie o dopuszczenie mgr inż. Kamila Kuglin do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Sale