

Prof. dr hab. inż. Sebastian Mróz

Częstochowa, 25.11.2024 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Sławomira Kozłowskiego

pt.: „*Opracowanie i wdrożenie innowacyjnych rozwiązań w procesach karbotermicznej redukcji krzemionki podczas produkcji żelazostopów w piecach rezystancyjno-łukowych w oparciu o optymalizację zużycia surowców i energii*” – wykonana na zlecenie

Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Adama Grajcara z dnia 22 października 2024 r.

Żelazostopy są wykorzystywane głównie jako stopy przejściowe w hutnictwie żelaza. Ich stosowanie umożliwia w sposób najbardziej ekonomiczny dodanie wybranego pierwiastka stopowego do kąpieli stalowej. Żelazostopy stosowane w procesach stalowniczych jako dodatek wpływają na poprawę niektórych właściwości stali, np. większa wytrzymałość na rozciąganie czy odporność na ścieranie i korozję. Efekt ten osiągany poprzez wprowadzenie żelazostopów z pierwiastkiem stopowym zależy od zmiany w składzie chemicznym stali, usuwania lub wiązania szkodliwych zanieczyszczeń, takich jak tlen, azot, siarka, wodór, czy zmianie w charakterze krzepnięcia. W Unii Europejskiej ok. 90% całkowitej produkcji żelazostopów stanowią żelazochrom, żelazokrzem, żelazomanganokrzem oraz żelazonikiel. W recenzowanej pracy skupiono się na produkcji żelazokrzemu. Żelazokrzem stosuje się jako dodatek w różnych procesach przemysłowych. Krzem z żelazokrzemu jako dodatek do wytwarzania stopów zwiększa wytrzymałość stali i dlatego żelazokrzem jest stosowany w trakcie wytapiania stali. Niestety branża wytwórców żelazokrzemu zaliczana jest do gałęzi przemysłu bardzo materiało i energochłonnych. Stąd też, tematy-



kę pracy należy uznać za uzasadnioną i bardzo aktualną, szczególnie pod kątem redukcji materiało- i energochłonności oraz implementacji wyników badań do warunków przemysłowych, co było głównym zamiarem Autora. Należy również podkreślić, że wyniki badań zostały wdrożone do warunków przemysłowych jedyne polskiego producenta żelazostopów firmy Re Alloys.

Recenzowana praca składa się z wykazu oznaczeń, spisu rysunków i tabel, wstępu, celu i zakresu pracy, 8 rozdziałów, wniosków, literatury oraz streszczenia w j. polskim i angielskim zamieszczonych na aż 222 stronach maszynopisu. Jak wspomniano powyżej praca została zrealizowana w ramach projektu wdrożeniowego w firmie Re Alloys. Przyjęta struktura pracy nie jest typowa dla rozpraw doktorskich. Po wstępie w kolejnym rozdziale Autor zdefiniował cel i zakres pracy. W rozprawie nie zdefiniowano tezy pracy. Prawdopodobnie wynika to z aplikacyjnego charakteru pracy. Nietypowo jest również opisany przegląd literatury, który co prawda w szcążkowej formie można odnaleźć w rozdziale pierwszym, ale również w rozdziałach dotyczących już wyników badań własnych Autora (szczególnie rozdziały 3-8). W pracy nie wyodrębniono schematu badań oraz podsumowania przeglądu literatury, co mogłoby się przyczynić do większego wyeksponowania problemu badawczego i sposobu jego rozwiązania. Cytowana literatura (158 pozycji) jest poprawna i jak najbardziej dobrana do tematyki rozprawy. Bibliografia w głównej mierze składa się z najnowszych pozycji światowej literatury, które zostały opublikowane w okresie ostatnich 10 lat, ale również z fundamentalnych pozycji niezbędnych do zapoznania czytelnika z rysem historycznym procesu wytwarzania żelazostopów. W 10 pozycjach Doktorant występuje jako współautor. Duża część pozycji literaturowych jest opisana cyrylicą, co może utrudniać ich zrozumienie, szczególnie dla młodej kadry naukowej, która nie miała styczności z językiem rosyjskim. Powinno stosować się transliterację nazewnictwa. Tym niemniej analiza stanu



zagadnienia bardzo dobrze wprowadza czytelnika w problematykę związaną z produkcją żelazostopów. Autor bardzo szczegółowo omówił podstawy teoretyczne i technologiczne badanego zagadnienia. Również w przeglądzie literatury szczegółowo omówiono historię i technologie stosowane w Re Alloys (dawnej Huta Łaziska), co jest szczególnie istotne w kontekście wdrożenia wyników badań. Wnioski płynące z przeglądu literatury jednoznacznie potwierdzają konieczność poszukiwania rozwiązań w doborze materiałów i korelacji z zapotrzebowaniem na energię w procesie produkcji żelazostopów.

Celem pracy było zwiększenie efektywności procesu wytwarzania wysokoprocenowych stopów krzemu z żelazem i innymi pierwiastkami poprzez opracowanie metod operatywnej kontroli stanu procesu, a także opracowanie wytycznych do nowelizacji procesu technologicznego w zależności od stosowanych surowców i oczekiwanych własności produktu użytecznego. Zwiększenie efektywności procesu technologicznego będzie odbywać się w wyniku obniżenia wskaźnika zużycia jednostkowego energii elektrycznej oraz wzrostu wskaźnika wydajności produkcji przy jednoczesnym dotrzymywaniu wymagań jakościowych wyrobu końcowego. Kolejnym celem zdefiniowanym przez Autora rozprawy jest budowa wielomodułowego i wielopoziomowego sprzężonego systemu informatycznego (program Podstawowy System Obliczeń Technologicznych - PSOTnik) umożliwiającego racjonalne i optymalne sterowanie procesami produkcyjnymi wytwarzania stopów krzemu w piecach rezystancyjno-lukowych wraz z jego dostosowaniem do istniejącej infrastruktury zakładowej Re Alloys. Cel pracy jest w znacznej mierze użytkowy, ukierunkowany na wdrożenie do warunków przemysłowych, ale również ma elementy poznawcze.

Najbardziej wartościowymi pod względem merytorycznym są rozdziały od 2 do 8. W rozdziałach tych, w pierwszej kolejności, Autor opracował system informatyczny sterowania procesem wytwarzania stopów krzemu (podstawa



programu PSOTnik), a następnie dokonał optymalizacji poszczególnych procesów związanych z wytwarzaniem żelazostopów. Optymalizacja polegała na doborze surowców krzemonośnych i żelazonośnych, reduktorów węglowych, surowców zwiększających gazoprzepuszczalność i rezystancję łoża wsadu, dobór zabiegów rafinacyjnych oraz dobór technologii rozlewania ciekłych produktów wytopu. W każdym z wymienionych powyżej rozdziałów Autor po wykonaniu przeglądu literatury (jak wspomniano powyżej jest to nietypowy układ dla prac doktorskich) prowadzi badania w skali laboratoryjnej, a następnie w docelowej linii w Re Alloys.

Do największych osiągnięć Doktoranta należy uznać współdziałanie w opracowaniu programu PSOTnik, bez którego nie byłoby możliwości poprawy efektywności produkcji żelazostopów. Program ten obecnie odpowiada za zarządzanie i sterowanie wybranymi obszarami działalności Re Alloys, m.in. produkcją w zakresie zużycia surowców, zużyciem energii elektrycznej, czasem postojów i masy wytworzonego stopu; kontrolą jakości, w zakresie składu stopu na różnych etapach i składu surowców wsadowych; technologią w zakresie kart technologicznych i wymogów technicznych dla surowców; zabezpieczeniem produkcji w zakresie kontroli stanu magazynowego płaszczy i masy elektrodowej; logistyki w zakresie kontroli stanu magazynowego surowców. Są to podstawowe obszary procesu technologicznego wpływające na jakość wyrobów a równocześnie na zmniejszenie zapotrzebowania na materiały wsadowe oraz energię niezbędną do produkcji. W rozdziałach optymalizujących poszczególne parametry wpływające na jakość wyrobów Autor może nie w sposób bezpośredni definiuje co było kryterium optymalizującym, jednakże w sposób pośredni te kryteria są zdefiniowane. Przykładowo „Podstawowym parametrem technologicznym charakteryzującym jakość kwarcytów i pozwalającym na ich wstępną akceptację i wprowadzenie do procesu wytopu stopów krzemu w pie-

cach rezystancyjno-łukowych jest **skład chemiczny** oraz **kawałkowość (skład granulometryczny)**.” oraz „..., głównym wyznacznikiem wstępnej przydatności jest **zawartość masowa pierwiastka wiodącego – Si** oraz **zawartość masowa zanieczyszczeń**, które w głównej mierze przechodzą do gotowego stopu, i których zawartości nie można obniżyć drogą korekty namiaru wsadowego.” Podobne kryteria wyznaczono dla pozostałych parametrów.

Na zasługę należy również podkreślić wielowariantowość przeprowadzonych badań dla poszczególnych kryteriów w warunkach przemysłowych. Wykorzystując wyniki badań laboratoryjnych, które Autor w wielu przypadkach traktuje jako wstępne, dające tylko kierunek dalszych badań, w badaniach przemysłowych rozbudowuje je o różne warianty, jednoznacznie ukierunkowane na poprawę jakości wyrobów przy jednoczesnym zmniejszeniu zapotrzebowania na energię niezbędną do realizacji procesu. Wyniki tych badań są w sposób czytelny skorelowane na stosowanych wykresach, co umożliwia czytelnikowi własną ocenę wyników badań. Cennymi wynikami pracy są prowadzone analizy wpływu materiałów wsadowych do produkcji żelazostopów pochodzących z konkretnych źródeł (dostawców) pod kątem zwiększenia jakości wyrobów, ale także na uzysk w procesie. Tak kompleksowe wyniki badań jednoznacznie wskazują na istotny wpływ na rozwój dyscypliny inżynieria materiałowa.

Całość pracy zakończona jest rozbudowanymi wnioskami oraz krótkim podsumowaniem dotyczącymi sposobów poprawy efektywności procesu wytwarzania wysokoprocetowych stopów krzemu w piecach rezystancyjno-łukowych. Wnioski powinny odnosić się do celów pracy i jednoznacznie je potwierdzać. Autor nie zawarł takiego wniosku wprost mówiącego o zrealizowaniu założonych celów pracy. Niektóre z wniosków są oczywiste i nie wymagały realizacji żadnych badań, np. „konieczna jest intensyfikacja zarówno samego procesu technologicznego wytwarzania stopów krzemu, jak i procesów efektywne-

go sterowania pracą zakładu w celu utrzymania pozycji na rynku żelazostopów i miejsc pracy w okolicy." czy „intensyfikacja jest możliwa poprzez przeprowadzanie we właściwym czasie remontów agregatów piecowych i pomocniczych, pozwalających na znaczne skrócenie czasu postojów awaryjnych; uproszczenie procesu podejmowania decyzji i struktury organizacyjnej przedsiębiorstwa; automatyzację, robotyzację i informatyzację poszczególnych obszarów produkcyjnych w celu zmniejszenia nakładu pracy ręcznej, minimalizacji wpływu czynnika ludzkiego i wdrożenia sztucznej inteligencji;...” Te zagadnienia nie wpisują się w dyscyplinę naukową inżynieria materiałowa i nie były badane w pracy. Stąd też uważam, że wnioski 1 i 2 są zbędne, a wniosek 3 nie dotyczy części badawczej pracy, chociaż wynika z realizacji rozdziału 2. Najbardziej wartościowymi wnioskami istotnie wpływającymi na rozwój dyscypliny naukowej inżynieria materiałowa są wnioski 4-9 (wynikają bezpośrednio z realizacji badań w rozdziałach 3-8), w których to Autor wykazał wpływ stosowania konkretnych materiałów wsadowych na uzyski, jakość wyrobów i energochłonność procesu, co jest bezpośrednio związane ze zdefiniowanymi celami pracy. Tym samym w tych wnioskach cele te zostały w pełni udowodnione. Po wnioskach Autor zamieścił krótkie podsumowanie, w którym to w syntetyczny sposób wykazał przydatność stosowania opracowanego programu PSOTnik. Jest to możliwe m.in. dzięki jego użyteczności, ergonomii, otwartej architekturze i możliwości uzupełniania o nowe moduły. Dzięki czemu technolodzy w szybki sposób mogą analizować wpływ wielu parametrów surowcowych i technologicznych na pożądany efekt końcowy w postaci jakości stopu i kosztów jego wytworzenia. Podsumowanie i wskazane wnioski 4-9 cechują się wysokim poziomem merytorycznym, są bardzo cenne zarówno ze względu poznawczego, ale przede wszystkim aplikacyjnego. Tym samym stwierdzam, że przedstawione wyniki



badań w istotny sposób poszerzają zakres wiedzy w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Uwagi do pracy:

Praca została przygotowana bardzo starannie. Praktycznie nie występują błędy stylistyczne i literowe. Autor, przy tak ogromnym zakresie badań, nie uniknął pewnych nieścisłości, a niektóre zagadnienia nie zostały wyjaśnione w sposób wyczerpujący, (uwagi przytoczono w kolejności ich występowania w pracy):

- 1) Jakie metody optymalizacji stosowane są w algorytmach programu PSOT-nik?
- 2) Na rys. 41 zamieszczono wyniki dla kwarcytu ze źródła Tokaczewski. Nie jest jasne jak zamieszczone wyniki odnoszą się do zasobów ze źródła Bukowa Góra (tablica 33).
- 3) Proszę o bardziej szczegółowe wyjaśnienie stwierdzenia: „Lepsze wskaźniki zużycia energii produkcyjnej przy podobnych wskaźnikach wydajności dobowej zdecydowały o stosowaniu węgla z KWK „Marcel” jako węgla podstawowego.” Dlaczego tak się dzieje?
- 4) Stwierdzenie „W związku z ponad trzykrotną różnicą w cenie pomiędzy dwoma ostatnimi węglami, postanowiono przeprowadzić próby technologiczne w wariacie 3 z wykorzystaniem węgla „Inskoj”.” Praca jest z dyscypliny naukowej inżynieria materiałowa a nie inżynieria produkcji. Także argument ceny, oczywiście, który jest bardzo istotny, jest mało zasadny.
- 5) Tablica 67, po jakich procesach przeróbki plastycznej była badana zgorzelina? Który gatunek zgorzeliny jest najlepszy jako dodatek do produkcji żelazostopów?
- 6) Tablica 68, skąd pochodzą poszczególne złomy?

7) Dlaczego stosowanie złomu stalowego przyczynia się do poprawy wydajności pieców? Czy tak samo jak w przypadku zużycia reduktorów węglowych spowodowane jest to metalicznym charakterem złomu?

8) Tablica 77. Czy algorytm programu PSOTnik uwzględnia sezonowe różne właściwości zrębków drewna i jak one wpływają na pozostałe parametry?

Wnioski końcowe:

Biorąc pod uwagę aktualność doboru tematu, który ma bardzo istotne znaczenie aplikacyjne, ale również środowiskowe – szczególnie pod kątem zmniejszenia energochłonności procesu, ambitny i wartościowy cel rozprawy, który został w pełni udowodniony, a także umiejętności Doktoranta, który wykazał dobre opanowanie warsztatu naukowego oraz wiedzę teoretyczną i praktyczną w dyscyplinie inżynieria materiałowa, m.in. poprzez zastosowanie szerokiego zakresu metod badawczych, co umożliwiło poszerzenie wiedzy w obszarze doboru parametrów i materiałów wsadowych zapewniających ograniczenie materiało- i energochłonności podczas produkcji żelazostopów stwierdzam, że opiniowana praca w istotny sposób poszerzyła zakres wiedzy w dyscyplinie naukowej inżynieria materiałowa. Ponadto Autor w podsumowaniu i wnioskach przedstawił wartościowe sformułowania wynikające z analizy badań doświadczalnych realizowanych zarówno w warunkach laboratoryjnych oraz na rzeczywistym obiekcie przemysłowym. Tym samym stwierdzam, że rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie zdefiniowanego problemu naukowego.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określonej w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.