

Imię i nazwisko recenzenta:
Prof. Adam W. Bydałek

Zielona Góra 07.06.2026
(data i miejsce)

Dane adresowe:
Uniwersytet Zielonogórski
Wydział Nauk Inżynieryjno - Technicznych
Instytut Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej
Katedra Metalurgii i Inżynierii Materiałowej
ul. Prof. Z. Szafrana 4
65 – 516 Zielona Góra
a.bydalek@iimb.uz.zgora.pl
tel. [REDACTED] *

Recenzja pracy doktorskiej
Mgr inż. Łukasz Kortyka
(imię i nazwisko doktoranta)

pod tytułem:

Badania odzysku metali z wybranych żużli metalurgicznych z wykorzystaniem płytek obwodów drukowanych jako reduktora

przygotowanej pod kierunkiem:

prof. dr hab. inż. Jerzy Łabaj
(imię i nazwisko promotora)

oraz opiekuna pomocniczego ze strony przedsiębiorstwa:

dr inż. Piotr Madej
(imię i nazwisko opiekuna)

1. Podstawa opracowania

Recenzja została wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej uchwałą z dnia 17 marca 2026 roku.

Podstawa prawna art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (z późn. zm.)

Opinia dotycząca przedmiotowej rozprawy doktorskiej zawiera trzy elementy:

- 1) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria materiałowa;
- 2) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta ubiegającego się o nadanie stopnia doktora;
- 3) Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

2. Charakterystyka i opis rozprawy

- 2.1. **Ocena wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria materiałowa.**

Oceniana praca doktorska omawia zagadnienie związane z technologią recyklingu żużli metalurgicznych, koncentrując się na wykorzystaniu materiałów odpadowych w postaci płytek obwodów drukowanych, w procesach odmiedziowania żużli jako alternatywnych reduktorów w stosunku do węgla. Przedstawiono w niej analizę możliwości wykorzystania złomu płytek obwodów drukowanych jako reduktora, wskazując jednocześnie na efekty utylizacji tego typu odpadów. Koncepcja autora dotyczy bowiem nie tylko efektywnego przetwarzania odpadów elektronicznych ale umożliwia, poprzez zastosowanie tego typu materiałów antropogenicznych, ograniczenie zużycia surowców naturalnych w procesach redukcyjnych w żużlach. Analizy Doktoranta dotyczą również założeń związanych z gospodarką w obiegu zamkniętym, w tym przypadku poprzez zrównoważone zarządzanie odpadami elektronicznymi.

Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie inżynieria materiałowa, szczególnie w zakresie metalurgii miedzi - głównie procesów redukcji w żużlach. Wiedza doktoranta została udokumentowana w części teoretycznej, oraz uwidacznia się w całej pracy, w poszczególnych etapach pracy własnej, w tym: w postaci sformułowania planu badawczego, zaplanowania aparatury pomiarowej i opisu oraz interpretacji uzyskanych wyników z badań.

2.2. Ocena wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta ubiegającego się o nadanie stopnia doktora.

Doktorant, po szczegółowej i prawidłowo zestawionej analizie teoretycznej postawił jasne tezy i cele wskazując na możliwości zastosowania złomu płytek obwodów drukowanych jako alternatywnego reduktora tlenków metali zawartych w żużlu metalurgicznym. W pracy przedstawiono starannie zaplanowany cykl pracy badawczej co w konsekwencji pozwoliło na osiągnięcie założonego celu naukowego a następnie wdrożenia opracowanego sposobu wykorzystania wybranego z badań laboratoryjnych typu odpadów PCB do redukcji żużli z podwyższoną zawartością Cu i Pb.

Część o charakterze badawczo – naukowych podsumował Doktorant szczegółowymi wnioskami wskazując min. na: rolę żelaza w wyborze grupy odpadów PCB, zawartość celulozy, oraz na zawartość żywic epoksydowych. Wskazał również, że powstały w trakcie procesu redukcji stop metaliczny pełni rolę kolektora cennych metali użytkowych zawartych w złomie PCB. Część wdrożeniową zakończył wytycznymi do wdrożenia, oraz instrukcją postępowania w realizacji opracowanej technologii z wykorzystaniem odpadów PCB. Zredagował również wymagania odnoszące się do typów materiałów złomowych do procesu brykietowania oraz wytyczył procedury postępowania technologicznego. Całość części wdrożeniowej zakończył obszernymi wnioskami własnymi.

Podsumowując przedstawione w dysertacji wyniki, sposób ich opracowania i zaproponowane wnioski końcowe stwierdzam, że Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

2.3. Ocena wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Przedstawiona do zaopiniowania rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego przez Doktoranta problemu naukowego. Znane są co prawda opracowania odnoszące się do zastępowania węgla w procesach redukcji przez wprowadzanie tworzyw sztucznych, jednak to nie było głównym założeniem w pracy. Głównym celem naukowym pracy

było określenie możliwości zastosowania zużytych płytek obwodów drukowanych, zawierających oprócz podkładów z tworzyw sztucznych cenne metale szlachetne, jako alternatywnych reduktorów tlenków metali zawartych w żużlu metalurgicznym. Analizując uzyskane wyniki rozkładu pierwiastków pomiędzy fazę metaliczną a fazę żużlową, wyrażone za pomocą współczynników podziału, Doktorant wykazał, że metale takie jak: Cu, Pb, Sn oraz Ag charakteryzują się silną preferencją do kumulowania w fazie metalicznej. Stanowi to cenny wniosek wskazujący, że powstający stop metaliczny CuPbFe pełnił rolę kolektora dla cennych metali towarzyszących, wprowadzanych do procesu wraz ze złomem PCB. W ten sposób uzyskał nie tylko efekty redukcji ale również recyklingu cennych pierwiastków zawartych w złomie elektronicznym, głównie w układach płytek drukowanych.

Przeprowadzone badania wdrożeniowe pozwoliły min. na: - opracowanie sposobu aglomeracji złomu płytek obwodów drukowanych z żużlem, - ocenę jakości otrzymanych produktów końcowych pod kątem środowiskowym, oraz opracowanie wytycznych do wdrożenia technologii redukcji żużla metalurgicznego za pomocą złomu PCB w warunkach zakładowych. Doktorant opracował również bardzo szczegółową instrukcję postępowania odnoszącą się do zaproponowanej technologii z wykorzystaniem złomu PCB jako reduktora.

Podczas analizy recenzowanej pracy nasunęło mi się kilka ogólnych spostrzeżeń i uwag, do których prosiłbym o ustosunkowanie się przez Doktoranta. Zebrałem je poniżej – wybrane uwagi szczegółowe

Uwagi szczegółowe:

1. Proszę o przedstawienie analizy zjawisk na granicy atmosfera – żużel – ciekły metal w myśl koncepcji jonowej, w tym podwójnej warstwy elektrycznej.

Zrozumienie kinetyki przechodzenia metali, takich jak min. srebro (Ag), złoto (Au), cyna (Sn), żelazo (Fe) i nikiel (Ni), z wtapianego złomu elektronicznego przez warstwę żużla do metalu znajdującego się pod żużlem, jest głównym motywem analizowanej pracy. Dlatego trochę mi brakuje analizy zjawisk tworzących się na granicy żużel-metal nie według nie najbardziej adekwatnej do poruszanych zagadnień teorii molekularnej (w żużlu nie ma tlenków w postaci molekuł, są jony), na którą autor się powołuje w części teoretycznej a w myśl podwójnej warstwy elektrycznej. Rozumiem, że praca miała głównie charakter wdrożeniowy, jednak takie podejście bardzo by autorowi w tej pracy i w przyszłych analizach pomogło w wyjaśnieniu skomplikowanych zjawisk zachodzących na granicy rozdziału. Podwójna warstwa elektryczna powstająca na granicy rozdziału dwóch faz, gdzie obserwuje się obszar z nadmiarowym ładunkiem elektrycznym, jest bowiem podstawą zjawisk na granicy atmosfera-żużel-ciekły metal.

2. Bardzo proszę o odniesienie się do wyszczególnionych poniżej pozycji literaturowych i wskazanie jak dostępne tam dane mogłyby się przydać podczas realizacji dysertacji.

Badania nad kinetyką przechodzenia metali przez warstwę żużla są faktycznie, jak wykazał Doktorant ograniczone, zwłaszcza w kontekście wtapienia złomu elektronicznego. Jednakże, dostępne w literaturze badania nad odzyskiem metali szlachetnych w procesach wytopu miedzi dostarczają pewnych informacji, które można było wykorzystać w myśl interpretacji podwójnej warstwy elektrycznej oraz analiz termodynamicznych związanych ze zmianą parametrów termodynamicznych układu atmosfera-żużel-metal, ograniczając w ten sposób badanie własne. Do takich źródeł należą:

1. "Investigation of Waste PCB Leach Residue as a Reducing Agent in Smelting Processes", Desmond Attah-Kyei i współpracownicy (research.aalto.fi)

2. "Thermodynamic-Based Exergy Analysis of Precious Metal Recovery Out of Waste Printed Circuit Board Through Black Copper Smelting Process", Maryam Ghodrat i współpracownicy (researchers.westernsydney.edu.au)
3. "Sustainable Management of the Plastic-Rich Fraction of WEEE by Utilization as a Reducing Agent in Metallurgical Processes" Lotfian, Samira; Lennartsson, Andreas; Jokilaakso, Ari (aaltodoc.aalto.fi)
4. "Research on the Mathematical Model of Local Equilibrium in the Top-Blown Smelting Process of Electronic Waste", Xiaochun Wen, Jinliang Wang, Houqing Wang (mdpi.com)
5. "Recovery of Metals from Electronic Waste-Printed Circuit Boards by Ionic Liquids, DESs and Organophosphorous-Based Acid Extraction", Aneta Łukomska, Anna Wisniewska, Zbigniew Dabrowski, Jakub Lach, Kamil Wróbel, Dorota Kolasa and Urszula Domanska (pmc.ncbi.nlm.nih.gov)
6. "Handling trace elements in WEEE recycling through copper smelting-an experimental and thermodynamic study", Min Chen i współpracownicy (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687521004180?utm_source=opnai)

3. Proszę o uzasadnienie, przez porównanie z innymi technologiami, aspektu finansowego – jak można wytłumaczyć pod kątem zysku wprowadzanie drogich pierwiastków do miedzi. Wyjaśnienie zagadnień ekonomicznych pośrednio jest w pracy zaznaczone w opisach zjawisk fizykochemicznych oraz w analizie wyników badań. Autor dysertacji szczegółowo jednak tego nie zaakcentował a byłoby to bardzo istotnie i zarazem cenne dla niego jako element ukierunkowujący na wdrożenie w przemyśle.

3. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania określone 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.

Podpisał: prof. dr hab. inż. Adam W. Bydałek

(podpis recenzenta)

* 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 (Dz.U. z 2022 r., poz. 902)