

**Dr hab. Beata Pośpiech, prof. PCz**

Częstochowa, 01.06.2026

Katedra Inżynierii Materiałowej  
Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii  
Politechnika Częstochowska  
Al. Armii Krajowej 19  
42-201 Częstochowa

## **RECENZJA**

*pracy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Kortyki pt.*

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

opracowana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej z dnia 17.03.2026

**Promotorem** rozprawy jest prof. dr hab. inż. Jerzy Łabaj

**Opiekunem pomocniczym** ze strony Przedsiębiorstwa dr inż. Piotr Madej

### *Ogólna charakterystyka rozprawy*

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy innowacyjnej technologii recyklingu żużli metalurgicznych z wykorzystaniem złomu płytek obwodów drukowanych (j. ang. *Printed Circuit Board*, PCB) w roli reduktora, w celu odzysku metali użytkowych. Dodatkowo, w ramach pracy realizowano zadania o charakterze wdrożeniowym, obejmujące opracowanie sposobu aglomeracji złomu PCB z żużlem stałym oraz wytworzenie brykietów do testów redukcji żużla metalurgicznego w piecu elektrycznym. Opracowywanie efektywnych metod odzysku metali z surowców wtórnych przyczynia się do realizacji kluczowych założeń *Gospodarki o Obiegu Zamkniętym*. Ubocznym efektem intensywnego rozwoju technologicznego jest wzrastająca ilość elektroodpadów w postaci zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego, które należy zagospodarować stosując nowoczesne metody

recyklingu. Uważam, że podjęcie takiej tematyki badań należy uznać za uzasadnione ze względów technologicznych, ekonomicznych i ekologicznych. Temat rozprawy doktorskiej jest ważny i wpisuje się w aktualne trendy rozwoju technologii bezodpadowych. Jednocześnie stanowi przykład opracowania innowacyjnej metody wykorzystania odpadów w procesie metalurgicznym, którego efektem jest odzysk cennych metali użytkowych. Tematyka badań podjętych przez doktoranta jest istotna zarówno punktu widzenia badań podstawowych, jak i aplikacyjnych.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Łukasza Kortyki obejmuje 190 stron. Składa się z części teoretycznej, zawierającej przegląd literaturowy dotyczący redukcji tlenku miedzi(I) za pomocą węgla i żelaza metalicznego oraz możliwości wykorzystania tworzyw sztucznych jako alternatywnego reduktora. W tej części pracy doktorant opisał procesy redukcji żużla o podwyższonej zawartości miedzi w praktyce przemysłowej. Dokonał także charakterystyki materiałów używanych do produkcji płytek obwodów drukowanych (PCB). Na podstawie danych literaturowych podał ich skład chemiczny oraz średnią zawartość metali, takich jak: miedź (Cu), glin (Al), żelazo (Fe), cyna (Sn), nikiel (Ni), cynk (Zn), ołów (Pb), mangan (Mn), antymon (Sb) oraz srebro (Ag) (tabela 2). Bibliografia obejmuje 124 pozycje literaturowe, co świadczy o dobrym przygotowaniu teoretycznym doktoranta do prowadzenia badań naukowych. Wnikliwa analiza literaturowa umożliwiła sformułowanie tez badawczych i cel pracy. Doktorant przedstawił szczegółowy plan badań. Część badawczą podzielił na zadania o charakterze badawczo-naukowym oraz zadania o charakterze wdrożeniowym, do których należało opracowanie sposobu aglomeracji złomu PCB z żużlem stałym oraz wytworzenia brykietów do testów redukcji żużla metalurgicznego. W rozprawie znajduje się rozdział dotyczący oceny jakości otrzymanych produktów końcowych w aspekcie środowiskowym oraz opracowanie wytycznych do wdrożenia technologii redukcji żużla metalurgicznego za pomocą złomu PCB w warunkach zakładowych. Praca zakończona jest podsumowaniem i wnioskami.



Układ pracy doktorskiej jest przemyślany, a jej tytuł oraz tytuły poszczególnych rozdziałów sformułowano bardzo precyzyjnie, co ułatwia analizę danych literaturowych oraz wyników badań przedstawionych w rozprawie. Praca została napisana poprawnie pod względem stylistycznym. Dokładny przegląd literaturowy potwierdza, że **doktorant posiada wiedzę** w zakresie teoretycznych podstaw procesów redukcji tlenków metali, ze szczególnym uwzględnieniem tlenku miedzi(I) przy użyciu różnych reduktorów, jak również potrafi scharakteryzować pirometalurgiczne metody recyklingu złomu PCB. **Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria materiałowa.**

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

Głównym celem naukowym pracy było określenie możliwości zastosowania złomu PCB jako alternatywnego reduktora tlenków metali zawartych w żużlu metalurgicznym. Doktorant podjął się także oceny skuteczności podziału pierwiastków chemicznych między powstającymi produktami procesu na podstawie wartości współczynników podziału miedzi (Cu), ołowiu (Pb), cyny (Sn), złota (Au) oraz srebra (Ag) pomiędzy powstającą fazą żużlową a metaliczną. Cel użyteczny został sformułowany jako: „Opracowanie założeń do implementacji w warunkach zakładowych technologii recyklingu żużli metalurgicznych z wykorzystaniem złomu płytek obwodów drukowanych jako alternatywnego reduktora tlenków metali.” Doktorant szczegółowo sformułował zakres pracy wymieniając i opisując główne etapy badawcze obejmujące określenie właściwości fizykochemicznych materiałów stosowanych do badań tj. żużla metalurgicznego, złomu PCB oraz koksu hutniczego. Badania te przeprowadzono dokonując pomiarów gęstości nasypowej złomów PCB, analizy składu chemicznego żużla oraz złomów PCB, pomiarów kalorymetrycznych w celu wyznaczenia wartości ciepła spalania złomów PCB i koksu hutniczego oraz wykonując badania reaktywności złomów PCB oraz koksu względem tlenku węgla(IV). W pracy znajduje się szczegółowy opis metodyki badań z uwzględnieniem zastosowanych technik badawczych i aparatury. Badawcza część pracy obejmowała

laboratoryjne badania redukcji żużła metalurgicznego z wykorzystaniem złomu PCB oraz koksu, na podstawie których przeprowadzono bilans masowy procesu redukcji żużła. W toku przeprowadzonych badań doktorant dokonał oceny efektywności procesu redukcji na podstawie stopnia odmiedziowania żużła oraz w oparciu o analizę składu chemicznego produktów procesu, ze szczególnym uwzględnieniem wartości współczynników podziału poszczególnych metali między fazą żużlową a metaliczną. Są to kluczowe parametry wykorzystywane do oceny efektywności procesu redukcji. Doktorant zastosował nowoczesne techniki i aparaturę badawczą. Bardzo wysoko oceniam dyskusję uzyskanych wyników badań. Mgr inż. Łukasz Kortyka przedstawił ich własną interpretację, jak również odniósł się do danych literaturowych. Na szczególną uwagę zasługuje realizacja badań w ramach części wdrożeniowej. Zostały one dokładnie zaplanowane i wykonane. Brykiety żużła metalurgicznego otrzymane w badaniach laboratoryjnych poddano ocenie wytrzymałości i na tej podstawie doktorant opracował składy mieszanek do brykietowania. Wykorzystanie złomu PCB, który ze względu na zawartość metali ciężkich należy do odpadów niebezpiecznych stanowi pozytywny aspekt w kwestii zagospodarowania odpadów. Wnioski wynikające z realizacji zadań o charakterze badawczo-naukowym i wdrożeniowym pozwalają **stwierdzić, że rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska potwierdza, że doktorant wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.**

Pracę oceniam pozytywnie, niemniej jednak pozwolę sobie na przedstawienie uwag i spostrzeżeń do dyskusji.

#### Uwagi

- W tabeli 2 (str. 33) podano średnie zawartości metali w płytkach obwodów drukowanych zawartych w odpadach zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (ZSEE). W wykazie tym nie ma informacji na temat zawartości złota (Au), pomimo tego, iż doktorant wielokrotnie wspominał,



że metal ten jest obecny w tego typu odpadach. Proszę o uzupełnienie informacji na temat zawartości Au w PCB.

- W części literaturowej opisano skład złomu płytek obwodów drukowanych stwierdzając, że cechuje się on wysoką zawartością tworzyw sztucznych. Doktorant zwraca uwagę, że termicznemu rozkładowi tego typu odpadów towarzyszy wydzielanie się składników gazowych, takich jak: CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>. W skład PCB wchodzi frakcja organiczna zawierająca m.in. poli(chlorek winylu) (PVC), który, po ogrzaniu do temperatury powyżej 130°C wydzielą toksyczny chlorowodór. Czy podczas badań obserwowano wydzielanie się tego gazu? Jakie inne gazy wydzielają się podczas procesów redukcji za pomocą PCB? Czy badano ich stężenie? Na str. 124 znalazła się tylko wzmianka, że „zastosowanie złomu PCB jako reduktora prowadziło, w wyniku rozkładu termicznego frakcji organicznej, do generowania znacznych ilości gazów procesowych (...).”
- W pracy znajduje się stwierdzenie (str. 48), że w procesie redukcji żużła metalurgicznego powstaje stop metaliczny, który pełni rolę kolektora dla cennych metali użytecznych, tj. miedzi (Cu), ołowiu (Pb), cyny (Sn), złota (Au) i srebra (Ag) znajdujących się w złomie PCB. Co dzieje się z otrzymanym stopem? Czy jest poddawany dalszym procesom technologicznym? W jaki sposób może być wykorzystany?
- Do pierwiastków ziem rzadkich (ang. *rare-earth elements, REE*) należy 15 lantanowców od lantanu (La) do lutetu (Lu) oraz dwa skandowce – skand (Sc) i itr (Y). Tymczasem na str. 33 podając skład chemiczny płytek PCB, doktorant użył sformułowania *metale ziem rzadkich* (SEs) i jako przykłady podał: tellur (Te), gal (Ga), selen (Se). Nie spotkałam się z taką klasyfikacją. Według mnie określenie metale ziem rzadkich jest jednoznaczne i nie jest poprawne w stosunku do podanych metali. Proszę o wyjaśnienie skrótu SEs.

- Na str. 83 podano skład chemiczny złomu PCB typu LOW GRADE. Dwa razy podano zawartość srebra (Ag): 290 ppm oraz 10 ppm. Proszę o wyjaśnienie.
- Na str.126 w „Omówieniu wyników laboratoryjnych badań redukcji żużla” znajduje się stwierdzenie, że *Analizując uzyskane wyniki rozkładu pierwiastków pomiędzy fazę metaliczną a fazę żużlową (tabele 55 – 56) wyrażone za pomocą współczynników podziału można stwierdzić, że metale takie jak: Cu, Pb, Sn oraz Ag wykazywały silną preferencję do kumulowania się w powstającej fazie metalicznej ( $L > 10$ ). Natomiast całość złota wprowadzanego do procesu wraz ze złomem PCB gromadziła się w powstającej fazie metalicznej.*

Czy w przytoczonym fragmencie nie zaszła pomyłka ? Dwa razy, w różnym kontekście, doktorant użył określenia *faza metaliczna*. Proszę o wyjaśnienie.

*Pozostałe uwagi*

- Tlenek miedzi(I)  $\text{Cu}_2\text{O}$  występuje w postaci cząsteczek. Określenie *cząstki* jest w tym przypadku niepoprawne (str. 16).
- W streszczeniu pracy doktorant nie wyjaśnił znaczenia skrótu PCB. Na str. 4 skrót ten pojawił się po raz pierwszy i w tym miejscu powinno się znaleźć jego objaśnienie.
- W pracy pojawia się wielokrotnie skrót WEEE. Uważam, że doktorant powinien umieścić nazwę w języku angielskim od której pochodzi ten skrót (*ang. Waste electrical and electronic equipment*).
- Str. 81 Zamiast  $\text{KO}_2$  powinno być  $\text{K}_2\text{O}$ .

Przedstawione przeze mnie uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na merytoryczną ocenę pracy. Podsumowując stwierdzam, że mgr inż. Łukasz Kortyka wykazał się bardzo dobrą znajomością zagadnień związanych z procesami redukcji



tlenków metali z żużla metalurgicznego. Na podstawie badań laboratoryjnych zaproponował innowacyjny materiał w postaci zużytych płytek obwodów drukowanych w roli reduktora w procesie pirometalurgicznym. Prace badawcze o charakterze wdrożeniowym należy uznać za szczególnie wartościowe ze względu na duży potencjał aplikacyjny. Zaproponowane rozwiązanie może stanowić alternatywną, innowacyjną technologię recyklingu żużli metalurgicznych z wykorzystaniem odpadów w postaci PCB jako reduktora. Ponadto, proces ten jest korzystny ze względu na możliwość odzysku metali, takich jak miedź, cyna, ołów oraz złoto i srebro. Reasumując, wdrożenie tego rozwiązania pozwoli zmniejszyć zużycie surowców pierwotnych i jednocześnie zredukować ilość odpadów niebezpiecznych.

Na podstawie dokonanej oceny uważam, że przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymagania określone przez Ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r.(j.t. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571) Art. 187 i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Pana mgr. inż. Łukasza Kortyki do publicznej obrony pracy.

Jednocześnie uwzględniając szeroki zakres badań podjętych przez doktoranta oraz możliwość implementacji zaproponowanej technologii, zaliczam rozprawę do kategorii wybitnie dobrej i zasługującej na wyróżnienie. Tym samym wnioskuję o uznanie rozprawy doktorskiej pana mgr. inż. Łukasza Kortyki za wyróżniającą się.

Częstochowa, 01.06.2026



Dr hab. Beata Pośpiech, prof. PCz