

dr hab. inż. Karol Kyziol, prof. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki
Katedra Fizykochemii i Modelowania Procesów
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel. (012) 617 24 65, e-mail: kyziol@agh.edu.pl

Kraków, dn. 20.03.2026 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Gockiego

pt.: „Struktura i własności nowo opracowanych materiałów kompozytowych na formy wtryskowe wytwarzane technologią przyrostową”

opracowana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej, prof. dr hab. inż. Adama Grajcara, zgodnie z uchwałą RD IM Politechniki Śląskiej z dn. 20.01.2026 r., na podstawie otrzymanego egzemplarza rozprawy doktorskiej.

1. Ogólna charakterystyka dysertacji

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy aktualnej tematyki badawczej z zakresu inżynierii materiałowej, mianowicie przedstawia charakterystykę nowo opracowanych materiałów kompozytowych (stal-miedź) do wytwarzania form wtryskowych metodą druku 3D. Mając na względzie potrzeby przemysłowe, wynikające z zapotrzebowania na tego typu elementy, często o skomplikowanym kształcie i specyficznych wymaganiach w zakresie efektywności procesu odprowadzania ciepła, koncepcję przedstawionego rozwiązania technologiczno-materiałowego należy uznać za w pełni wpisującą się w rozwój użytecznych, ale też tańszych technologii, w tym przypadku techniki MFDM (*Multi-Material Fused Deposition Modeling*), której atrakcyjność jest związana z możliwością wykorzystania w jednym cyklu wielu filamentów materiałów termoplastycznych. Autor w dysertacji zawarł 6 rozdziałów, które obejmują: wstęp i przegląd literatury (rozdziały 1 i 2), badania własne i opis wyników badań (rozdziały 3 i 4), podsumowanie i wnioski (rozdziały 5 i 6) oraz bibliografię. Streszczenie w języku polskim i angielskim zawarto na końcu rozprawy. Praca doktorska ma zatem klasyczny układ, zawiera także bogaty zbiór rysunków i tabel (łącznie są

Biuro Dziekana

weryfikacja dnia 24.03.2026
RD IMa/186/15/2026
zał.

to odpowiednio 109 i 23 pozycje), które w części badawczej przedstawiono zbiorczo po każdym podrozdziale z sekcji czwartej (wyniki badań). Na wstępie zamieszczono również przydatny wykaz oznaczeń i skrótów stosowanych w części opisowej pracy.

Jak już wspomniano Autor podjął się badań w zakresie aktualnej i rozwojowej tematyki, z wyraźnym aplikacyjnym charakterem formułowanych wniosków. W mojej ocenie Doktorant stosuje właściwą terminologię, wyniki prezentowane są w sposób czytelny, a ich analiza i odniesienie do literatury przedmiotu znajduje się na odpowiednim dla tego rodzaju opracowań poziomie naukowym. Prezentowane informacje oraz dyskusję wyników Autor odniósł do prawie 170 pozycji literaturowych, prace te cytował zasadnie, są one aktualne i osadzone w literaturze przedmiotu. Niemniej jednak w kilku aspektach praca mogłaby być bardziej dopracowana, o czym wspominam w części z uwagami merytorycznymi i szczegółowymi.

2. Ocena rozprawy wraz z uzasadnieniem

We wstępie Autor w sposób logiczny i spójny uzasadnia zasadność realizowanego tematu pracy doktorskiej, skupiając się zarówno na aspekcie materiałowym, gospodarczo-ekonomicznym, jak i przedstawiając argumenty, iż wpisuje się on w trend zrównoważonego rozwoju i redukcji CO₂. W opisie przytacza dane określone w Europejskim Systemie Handlu Emisjami (dyrektywa ETS Unii Europejskiej) oraz mechanizm dostosowania emisji CO₂ (CBAM, *Carbon Border Adjustment Mechanism*), co potwierdza znajomość uwarunkowań przemysłowych w zakresie wspomnianych technologii.

W rozdziale drugim Autor dokonał przeglądu w zakresie tematycznym obejmującym ważniejsze materiały i technologie opisywane w pracy. W kolejnych podrozdziałach scharakteryzował m. in.:

(i) materiały przeznaczone na formy wtryskowe, gdzie w opisie zasadnie zwrócił uwagę na wykorzystanie stali X40CrMoV5-1 (ozn. 1.2344), która stanowi atrakcyjny materiał do formowania tworzyw sztucznych, wraz z określeniem wpływu poszczególnych pierwiastków stopowych. Jednocześnie Autor zwraca także uwagę na konieczność dalszych prac technologiczno-materiałowych dla poprawy funkcjonalności elementów form, budowy kanałów chłodzących i stosowania materiałów o wysokim przewodnictwie cieplnym. W tym aspekcie Autor mógł wzbogacić opis o stwierdzenie, że problemem są również częste trudności natury wytrzymałościowej, wynikające z możliwości osłabienia konstrukcji formy na drodze wiercenia klasycznych kanałów w złożonych formach, co w takim przypadku

uzasadnia potrzebę stosowania materiałów o zwiększonej efektywności cieplnej (jak np. proponowany kompozyt stal-miedź).

(ii) wybrane technologie przyrostowe. Opis ten stanowi o komplementarnej wiedzy Autora w tej tematyce, poruszone zostały aspekty związane zarówno z reologią jak i fizykochemią druku 3D. Autor przedstawił również zarys historyczny w tym względzie, opisując dalej ważniejsze informacje związane z technologią SLA (wykorzystującej promieniowanie UV do utwardzania żywicy polimerowej), SLM (wykorzystującej proszki metali, które stapia się przy użyciu wiązki lasera), FDM (wykorzystującej polimer w formie filamentu polimerowego czy kompozytowego) i MFDM (pozwalającej na formowanie elementów na bazie metalu), co też w sposób czytelny ilustruje. Warto zaznaczyć chociażby wnikliwe informacje dotyczące pomiaru lepkości materiałów, gdzie Doktorant powołuje się na regułę Coxa-Merza, i podkreśla, że nie obowiązuje ona dla polimerów z dużą ilością cząstek wypełniacza, przez co wspomniane pomiary lepkości dla materiałów wysoko napełnionych nie powinny być wykonywane w trybie oscylacyjnym, a rotacyjnym. Ta część przeglądu literaturowego jest bardzo interesująca naukowo, kilka drobnych uwag zamieszczam w sekcji ich dotyczących.

(iii) zastosowanie spiekania w technologiach przyrostowych. Autor również w spójny i logiczny sposób przedstawia informacje związane z mechanizmami transportu masy w procesie spiekania, w tym wskazuje te powodujące tak pożądane zagęszczenie materiału. Aspekt szybkości procesów dyfuzyjnych Doktorant odnosi nie tylko do parametrów czasu i temperatury ale również wspomina o roli wielkości cząstek proszku w stosowanych filamentach, co świadczy o znajomości kluczowych aspektów dla tego typu technologii. Wiedzę teoretyczną z tego zakresu, z uwagi na bezpośrednią aplikację w technologii MFDM, można by jednak wzbogacić – uwaga w sekcji poniżej.

(iv) wytwarzanie materiałów kompozytowych metodą infiltracji spieków, w którym Autor wskazuje na możliwość infiltracji form uzyskanych na drodze technologii SLM czy MFDM ciekłymi metalami, podaje przykłady takich kompozytów, tym samym bezpośrednio nawiązuje do tematu swojej dysertacji. Szkoda, że Autor nie wspomniał o zwilżalności powierzchni, która w dużej mierze decyduje o powodzeniu infiltracji.

W mojej ocenie rozdział (2) jest merytorycznym i cennym opracowaniem, nieco syntetyczny, z tego względu w kilku wątkach, wspomnianych powyżej, mógłby być bardziej rozbudowany, co w jeszcze większym stopniu zobrazowałoby celowość podjętych działań naukowo-badawczych przez Doktoranta. Zasadnym byłoby też podsumowanie tej części pracy, tym bardziej, iż dysertacja od rozdziału kolejnego obejmuje już opis prac własnych Autora.

W rozdziale trzecim Autor sformułował tezę pracy, mianowicie „Zastosowanie druku 3D do produkcji lito-porowatych kształtek ze stali narzędziowej X40CrMoV5-1 oraz ich infiltracji miedzią pozwoli na wytworzenie kompozytów o ściśle zaprojektowanej strukturze i własnościach predestynujących je do zastosowań na wkładki matrycowe form wtryskowych.” i poszczególne cele (rozd. 3.1). W mojej opinii postawiona teza jest logiczna i zasadna (weryfikowalna) z użytecznego punktu widzenia, Doktorant podaje zarówno rodzaj materiału infiltrowanego (stal X40CrMoV5-1) jak i infiltrującego (Cu). Co ważne, w tym rozdziale, uzasadnia także potrzebę swoich badań w kontekście atrakcyjności technologii MFDP w zakresie zarówno kosztów wytwarzania jak i problemu związanego z recyklingiem. W kolejnym podrozdziale (3.2) Autor krótko scharakteryzował materiały wykorzystane w badaniach (odnosząc się do odpowiednich norm) jak i poszczególne etapy przygotowania próbek, co też schematycznie zilustrował (Rys. 3.1). Zaproponowaną metodykę należy uznać za interesującą z naukowego punktu widzenia i kompleksową w odniesieniu do uzyskanych danych do późniejszej analizy (w tym na zasadzie porównawczej). Doktorant zaproponował w tym kontekście trzy ścieżki badawcze: (i) wytworzenia filamentu eksperymentalnego o trzech różnych udziałach obj. proszku (55%, 60% i 65%), (ii) badań z wykorzystaniem filamentu komercyjnego (Zetamix H13) i (iii) przygotowanie wyprasek i ich spiekanie dla uzyskania możliwie największej gęstości. Opis poszczególnych etapów działań naukowo-badawczych jest spójny, a wybór poliuretanu termoplastycznego (TPU) jako lepiszcza należy uznać za trafny i uzasadniony z uwagi na jego elastyczność. Bardzo dobrze należy ocenić również przyjętą metodykę badań (rozd. 3.3), w którym Autor przedstawił szereg stosowanych technik niezbędnych do potwierdzenia sformułowanej tezy badawczej, które obejmują zarówno charakterystykę fizykochemiczną materiałów jak i ich wybrane właściwości użytkowe. Opis w tym zakresie jest szczegółowy, co niewątpliwie przyczynia się do pełnej weryfikacji uzyskanych wyników w kontekście ich interpretacji.

W rozdziale czwartym Autor opisał wyniki uzyskanych badań, które podzielił na sześć sekcji, mianowicie: (i) dotyczące własności proszków, składników lepiszczy oraz gotowych filamentów polimerowo - proszkowych eksperymentalnych i komercyjnych, (ii) dotyczące badań wstępnych i analizy doboru parametrów drukowania, degradacji cieplnej, spiekania i infiltracji, (iii) dotyczące badań struktury i własności stali po spiekanii, (iv) dotyczące badań struktury i własności kompozytów stal – miedź, (v) dotyczące badań struktury i własności stali po obróbce cieplnej oraz (vi) dotyczące analizy właściwości tribologicznych stali. W pierwszej sekcji (4.1) Doktorant obrazuje między innymi wielkości cząstek proszków stali X40CrMoV5-1 we wspomnianych materiałach, ich morfologię, porównuje widma IR

z zakresu środkowej podczerwieni, wyniki badań termogravimetrycznych, które prawidłowo interpretuje. Co bardzo istotne Autor dla przeprowadzenia analizy kinetycznej procesu degradacji wyznaczył wartości temperatur odpowiadające konkretnym stopniom przemiany α (od 0,1 do 0,9), co pozwoliło na monitorowanie postępu rozkładu lepiszcza i określenie, w jakim zakresie temperatur następuje usunięcie danej frakcji polimeru.

W rozdziale 4.2 Autor dokumentuje wyniki związane z wyznaczeniem optymalnych parametrów dla opracowywanej technologii, w tym temperatury druku (210 °C, sekcja 3.2.3 rozprawy), degradacji cieplnej (40 – 48 h) oraz procesu spiekania w kontekście uzyskania najwyższej gęstości stali. Przeprowadzone eksperymenty pozwoliły także na sformułowanie wniosku dotyczącego wykorzystania warunków wysokiej próżni (o wartości $1 \cdot 10^{-5}$ Pa) lub autoklawu dla pożądanego, całkowitego wypełnienia porowatego szkieletu stalowego miedzią.

W rozdziale 4.3. przedstawiono wyniki badań strukturalnych i wybranych właściwości użytkowych próbek stalowych po procesie spiekania, stwierdzono m. in. zasadność technologiczną stosowania atmosfery redukującej ($N_2-10\%H_2$) dla uzyskania największej gęstości ($7,5 \text{ g/cm}^3$) dla spieków ze stali z filamentu eksperymentalnego. Warto zaznaczyć, że uzyskane wyniki (nie tylko w odniesieniu do wartości gęstości ale też i zawartości węgla w stalach spiekanych czy też wnikliwej analizie faz podczas procesu spiekania w określonych atmosferach) Autor odnosi do danych literaturowych, co niewątpliwie stanowi o rzetelnym podejściu naukowym Doktoranta do formułowanych wniosków ale i atrakcyjności proponowanej technologii w tym zakresie.

Z kolei rozdział 4.4 stanowi jednoznacznie, iż proces infiltracji miedzią „szkieletu stalowego” w bardzo dobrym stopniu wyeliminował porowatość powstałą na wcześniejszym etapie technologicznym (uzyskano gęstość ok. 99%). Warto też wspomnieć, o badaniach (transmisyjnej mikroskopii elektronowej STEM-HAADF oraz STEM-BF), które pozwoliły na analizę wydzielen (będących efektem dyfuzji wzajemnej pierwiastków) o strukturze nanometrycznej. Uzyskane rezultaty potwierdzają również wzrost twardości osnowy stalowej (związanej z wydzielinami azotków, w tym VN) po spiekaniu w atmosferze $N_2-10\%H_2$. Pewną nieścisłość pozostawiają prezentowane wartości dyfuzyjności w układzie stal-miedź, o czym wspominam w sekcji uwag.

W sekcji 4.5 Autor przedstawił wyniki badań strukturalnych (w tym analizy fazowej) dla wytworzonych próbek w technologii MFDm po obróbce cieplnej (procesie hartowania i odpuszczania), potwierdzając jednoznacznie, że jest to użyteczna metoda dla otrzymywania

tego typu kompozytów o bardzo dobrych parametrach, zarówno mechanicznych (twardości) i związaną z tym trwałością wydzielen jak i przewodnością cieplną.

Z kolei wyniki zawarte w rozdziale 4.6 stanowią niejako potwierdzenie proponowanej technologii dla uzyskania odpowiedniej odporności na zużycie ściernie wytwarzanych materiałów, mając na uwadze ich aplikację. Uzyskane w tym względzie rezultaty w pełni potwierdzają słuszność kolejno stosowanych etapów technologii przez Autora, w tym zasadność procesu spiekania w atmosferze $N_2-10\%H_2$ (względem innych stosowanych atmosfer), uzyskując wartość współczynnika tarcia na poziomie 0,63 oraz wysoką odporność na zużycie ściernie.

Praca obejmuje także podsumowanie (rozd. 5) i wnioski (rozd. 6), w których Autor odpowiednio zebrał ważniejsze informacje prezentowane w poszczególnych rozdziałach jak i ważniejsze konkluzje potwierdzające realizację tezy pracy i użyteczne wytyczne dla technologii wspomnianych materiałów kompozytowych.

3. Uwagi merytoryczne i szczegółowe

Recenzowana praca w pełni realizuje sformułowany cel naukowy, niemniej jednak Autor nie ustrzegł się niefortunnych sformułowań, niedociągnięć w zakresie prezentowanych danych, ale też błędów edytorsko-gramatycznych, o których wspomina poniżej:

- i. Rozdz. 1, str. 7. Autor napisał: „*Własności fizyczne takie jak wysoka przewodność cieplna lub elektryczna jest cechą metali o wysokiej czystości*”. Generalnie właściwości te są cechą metali, niekoniecznie o wysokiej czystości.
- ii. Rozdz. 2.3, str. 35-37. Autor napisał: „*W technologii MFDm proces spiekania materiału zachodzi głównie pod wpływem wzrostu temperatury układu, co zwiększa energię kinetyczną atomów, która prowadzi do zjawisk dyfuzyjnych*”. Wątek ten jest dalej rozwinięty, jednak w mojej opinii Autor, poza podaniem graficznej interpretacji miejsca występowania określonych ścieżek transportu masy czy też informacji odnośnie dominowania danego rodzaju dyfuzji w wyższych czy niższych temperaturach, mógł dodatkowo przedstawić zależność strumienia dyfundujących atomów (J) od temperatury (T) w układzie Arrheniusa, co w bardziej naukowy sposób określa te uwarunkowania energetyczne, związane z poziomem niezbędnej energii aktywacji dla dominacji danego mechanizmu dyfuzji.
- iii. Rozdz. 3.2.3, str. 44-46. Odnośnie stosowanej metodyki badań, czy modele CAD były skalowane dla uwzględnienia skurczu materiału po procesie z wykorzystaniem technologii MFDm? Zasadnym byłoby także umieścić skalę na rys. 3.2.

- iv. Rozdz. 3.2.3, str. 46. Na jakiej podstawie dobrano (zaproponowano) skład atmosfery zastosowanej podczas procesu spiekania (N_2 -10% H_2 , Ar-10% H_2)?
- v. Rozdz. 4.1, str. 55-56. Autor napisał: „*W celu oceny ilości i wielkości porów w filamencie wykorzystano tomografię komputerową. ... Wynik badań wykazały, że filament komercyjny charakteryzuje się występowaniem porów w zakresie objętości od $1,44 \cdot 10^{-6}$ do $0,0687 \text{ mm}^3$, natomiast w filamencie eksperymentalnym występują nieco większe pory o objętości od $1,81 \cdot 10^{-6}$ do $0,0923 \text{ mm}^3$.*” Proszę podać informacje dla jakiego rodzaju porowatości obliczono te wartości oraz określić jak dany rodzaj porowatości wpływa na druk 3D.
- vi. Rozdz. 4.2, str. 84. Brak legendy na rys. 4.20. Czy Autor może przedstawić słupki błędów pomiarowych dla prezentowanych wartości gęstości?
- vii. Rozdz. 4.3, str. 96. Autor napisał: „*Wartości modułu Younga dla badanych próbek wyniosła od 165 MPa do 300 MPa. ... Średnia wartość modułu Younga dla badanych próbek wyniosła 286,54 MPa.*”. Podobna uwaga dla danych w rozdz. 4.5. Czy istotnie tego rzędu wielkości osiągnięto dla badanych próbek, czy rzeczywiście była mierzona wartość modułu Younga?
- viii. Rozdz. 4.4, str. 123: W kontekście badań dyfuzyjności Autor napisał: „*Analiza wyników wykazała, że najwyższą wartość przewodności cieplnej uzyskano dla stali z filamentu eksperymentalnego spiekanej w atmosferze N_2 -10% H_2 ($2,07 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$). Z kolei najniższy wynik zaobserwowano dla tej samej stali po spiekaniu w próżni ($1,45 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).*” Zgodnie z literaturą (np. *Theodore L. Bergman et al., Fundamentals of heat and mass transfer, 8 edition, Wiley*) dyfuzyjność stal-miedź, (dla stali ok. $5,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, a dla Cu ok. $117,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), powinna mieć wyższą wartość niż te podawane w pracy dla badanych próbek (co raczej nie stanowiłoby o przewodnictwie), proszę o komentarz. Tym bardziej, że wyniki badań (dyfuzyjności cieplnej) podane w sekcji 4.5 (Tabela 4.20) wskazują na inny rząd wielkości, a tyczą się próbek po obróbce cieplnej.

Uwagi redakcyjno-edytorskie:

- i. W pracy zdarzają się zbyt długie zdania, czy też zbyt potoczne słownictwo, przykładowo: „...wytwarza się mnóstwo elementów takich jak implanty ...” (Wstęp, str. 9).
- ii. Rozdz. 2, str. 17. Powtórzenie akapitu ze str. 16-17: „Zbyt duża odległość ... równoosiowe [38].”

- iii. Rozdz. 2, str. 20. Autor opracowania technologii FDM, Scott Crump, a nie Scott Trump jak podano w tekście.
- iv. Rozdz. 4.3, str. 102. Brak opisu osi OY na rys. 4.29.
- v. Rodz. 4.4, str. 121, i dalej w tekście: Błędne zapisy symboli grupy przestrzennej i jednostek: jest np. „ $Fm\bar{3}m$ ”, „ $a=4.128\text{Å}$ ”.
- vi. Inne: str. 43: jest „190C°” zamiast „190°C”; str. 45: jest „... warstwy (rysunku 3.2).” zamiast „... warstwy (rysunek 3.2).”; str. 165: tabela 4.21 i rys. 4.84 – brak przywołania w tekście.

W pracy zdarzają się błędy interpunkcyjne, braki spacji, powtórzenia słów, które można by częściowo wyeliminować (np. technologia, własności) czy też nie do końca precyzyjne sformułowania (np. dotyczące % zawartości pierwiastków, w przypadku składu chemicznego stali były to % wag.). Niemniej jednak wykazane błędy i niedociągnięcia nie wpływają w istotnym stopniu na merytoryczną jakość dysertacji, którą z uwagi na aktualność tematyki, zakres przeprowadzonych badań i analiz, oceniam wysoko.

4. Wnioski końcowe

Rozprawa doktorska Pana **mgr inż. Michała Gockiego** „Struktura i własności nowoopracowanych materiałów kompozytowych na formy wtryskowe wytwarzane technologią przyrostową” stanowi aktualne i spójne opracowanie z zakresu technik przyrostowych otrzymywania materiałów, tym samym jest podstawą do ubiegania się o nadanie stopnia doktora nauk technicznych. Opisane przez Autora działania naukowo-badawcze są perspektywiczne dla aplikacji i zawierają aspekt nowości, zarówno w ujęciu materiałowym jak i techniki wytwarzania, co bezpośrednio stanowi o synergizmie w postaci materiałów na wspomniane formy. Mając na względzie obszerność uzyskanych danych eksperymentalnych, umiejętność analizy wyników badań i ich opisu wraz z użytecznymi dla technologii konkluzjami stwierdzam, że Autor prezentuje ogólną jak i specjalistyczną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa oraz predyspozycje do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Mając na uwadze określoną tezę pracy oraz zrealizowane cele naukowe rozprawy, uzyskane wyniki i sformułowane wnioski w pracy doktorskiej stwierdzam, że recenzowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i spełnia wymagania ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (j.t. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571) Art. 187. Z tych względów **wnioskuję o dopuszczenie** mgr inż. Michała Gockiego

do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.

