

dr hab. inż. Piotr Klimczyk  
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Krakowski Instytut Technologiczny

POLITECHNIKA POZNAŃSKA WYDZIAŁ INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ I FIZYKI TECHNICZNEJ.		
DNIA	10-04-2026	DNIA
WPŁYNEŁO		

DF-510/93/2026  
Kraków, 2026-03-08

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Jakuba Wiśniewskiego

pt.: „*Opracowanie technologii wytwarzania kompozytów z proszków WC/Ti techniką FAST/SPS*”,

opracowana na zlecenie

Rady Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Poznańskiej  
(pismo nr DF-63/7/2026 Przewodniczącego Rady, Dziekana Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej, prof. dr hab. Mirosława Szybowicza)

### 1. **Tematyka rozprawy oraz ocena istotności podjętego problemu naukowego**

Rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Wiśniewskiego dotyczy opracowania technologii wytwarzania kompozytów na bazie proszków WC/Ti z wykorzystaniem wysokoenergetycznego mielenia kulowego (HEBM) oraz spiekania iskrowo-plazmowego (FAST/SPS). Tematyka ta wpisuje się w aktualne, intensywnie rozwijane kierunki badań w obszarze inżynierii materiałowej, obejmujące poszukiwanie nowych, bardziej zrównoważonych i bezpiecznych dla zdrowia materiałów narzędziowych, stanowiących alternatywę dla klasycznych węglików spiekanych typu WC-Co.

W pracy podjęto problem o wysokiej istotności naukowej i aplikacyjnej. Węglik spiekane z osnową kobaltową, mimo swojej ugruntowanej pozycji w przemyśle narzędziowym, obarczone są szeregiem ograniczeń. Po pierwsze, kobalt został uznany za surowiec krytyczny, którego dostępność i cena podlegają znacznym wahaniom, co generuje ryzyko technologiczne i ekonomiczne dla producentów narzędzi. Po drugie, kobalt jest pierwiastkiem o udowodnionym działaniu toksycznym, a jego stosowanie wiąże się z koniecznością spełnienia coraz bardziej restrykcyjnych wymogów środowiskowych i BHP. W tym kontekście opracowanie materiałów narzędziowych pozbawionych kobaltu, przy

jednoczesnym zachowaniu lub poprawie właściwości mechanicznych, stanowi wyzwanie o dużym znaczeniu dla współczesnej metalurgii proszków.

Autor podjął się rozwiązania problemu poprzez zaprojektowanie i optymalizację technologii wytwarzania kompozytów WC-Ti, wykorzystując synergiczne połączenie dwóch procesów: wysokoenergetycznego mielenia w młynku planetarnym oraz spiekania FAST/SPS. Szczególnie istotnym elementem pracy jest opracowanie metodyki prowadzenia procesu spiekania z ekstremalnie wysoką szybkością nagrzewania, przekraczającą 2000 °C/min, co jak twierdzi autor, jest wartością dotąd niespotykaną w literaturze. Stanowi to istotny wkład w rozwój technologii SPS, otwierając nowe możliwości w zakresie kontroli kinetyki spiekania materiałów wysokotopliwych. Opracowana metodyka znalazła zastosowanie w Łukasiewicz – PIT do otrzymywania również innych trudnospiekalnych materiałów ceramicznych i kompozytowych.

W rozprawie przeprowadzono kompleksową analizę wpływu parametrów HEBM i FAST/SPS na skład fazowy, mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne otrzymanych kompozytów. Zoptymalizowany materiał charakteryzuje się jednorodną mikrostrukturą, twardością (ok. 2500 HV10) znacznie wyższą niż typowe węgliki spiekane o niskiej zawartości Co i drobnym ziarnie (zazwyczaj <2000 HV) oraz korzystną odpornością na kruche pękanie (ok. 8 MPa·m<sup>1/2</sup>), na poziomie porównywalnym z konwencjonalnymi węglkami WC-Co. Należy jednak zauważyć, że właściwości te osiągnięto stosując relatywnie niskie szybkości nagrzewania (200 °C/min). Dodatkowo, autor wykazał w testach eksploatacyjnych, że prototypowe płytki skrawające z WC-Ti osiągają wyższą trwałość podczas toczenia stali niż komercyjna płytka WC-Co, co potwierdza potencjał aplikacyjny opracowanego rozwiązania.

Podjęty problem badawczy ma zatem charakter zarówno naukowy, jak i praktyczny. Z jednej strony praca wnosi nową wiedzę dotyczącą procesów mechanicznej aktywacji proszków WC/Ti oraz kinetyki ich spiekania w warunkach ultraszybkiego nagrzewania. Z drugiej, odpowiada na realne potrzeby przemysłu narzędziowego, poszukującego materiałów o wysokiej trwałości, stabilności eksploatacyjnej oraz ograniczonym wpływie na środowisko. W kontekście globalnych trendów związanych z ograniczeniem stosowania surowców krytycznych oraz rozwojem technologii zrównoważonych, tematyka rozprawy jest w pełni aktualna i wysoce istotna.

Podsumowując, rozprawa podejmuje interesujący i ważny problem naukowy, a zaproponowane rozwiązania mają potencjał wdrożeniowy i mogą przyczynić się do rozwoju nowej generacji materiałów narzędziowych. Autor wykazał się umiejętnością prowadzenia badań o wysokim stopniu złożoności, łączących zaawansowane techniki syntezy, spiekania, charakteryzacji mikrostrukturalnej oraz testów eksploatacyjnych. Tematyka pracy jest spójna, nowatorska i odpowiada na kluczowe wyzwania współczesnej inżynierii materiałowej.

## 2. Zawartość rozprawy i jej charakterystyka

Rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Wiśniewskiego ma układ przejrzysty, logiczny i zgodny z typową strukturą prac z zakresu inżynierii materiałowej. Pracę otwiera **Streszczenie** w języku polskim, w którym autor syntetycznie przedstawia cel badań, zastosowane metody oraz najważniejsze wyniki, ze szczególnym podkreśleniem osiągniętych właściwości mechanicznych i eksploatacyjnych opracowanego materiału WC-Ti. Następnie zamieszczono **Abstract** w języku angielskim, dobrze oddający treść streszczenia polskiego. Kolejną część to **Dorobek naukowy**, obejmujący zestawienie publikacji, udziałów konferencyjnych, projektów badawczych oraz zgłoszeń patentowych, co stanowi istotny element dokumentujący aktywność naukową doktoranta w trakcie realizacji pracy.

Po tych elementach wstępnych rozprawa przechodzi do części merytorycznej, obejmującej pięć głównych rozdziałów: **(1)** Analiza literatury i obecnego stanu wiedzy, **(2)** Motywacja podjęcia pracy, **(3)** Metodyka prowadzonych prac, **(4)** Wyniki badań i dyskusja, **(5)** Wnioski, a całość zamyka **Podsumowanie** oraz **Bibliografia**. Struktura ta jest spójna i umożliwia czytelnikowi płynne przejście od kontekstu teoretycznego, przez opis metod, aż po analizę wyników i ich interpretację.

### 2.1. Rozdział 1 – Analiza literatury i obecnego stanu wiedzy

Pierwszy rozdział stanowi przegląd literatury dotyczącej materiałów narzędziowych, ze szczególnym uwzględnieniem węglików spiekanych. Autor w sposób uporządkowany omawia klasyfikację materiałów narzędziowych, ich właściwości oraz czynniki determinujące ich zastosowanie. Szczegółowo przedstawiono charakterystykę węgla wolframu, jego strukturę krystaliczną, właściwości fizyczne i mechaniczne oraz rolę w klasycznych węglkach WC-Co.

W dalszej części rozdziału autor analizuje węgliki metali przejściowych, w tym TiC, TaC i NbC, wskazując ich wpływ na właściwości kompozytów narzędziowych, a następnie omawia metale: Co, Ni, Fe, stosowane w produkcji węglików spiekanych oraz cermetali jako fazy wiążące, po czym szczegółowo charakteryzuje Ti jako potencjalny zamiennik Co w tego typu materiałach. Wprowadzenie to jest istotne, ponieważ stanowi podstawę do zrozumienia roli tytanu w opracowywanym materiale WC-Ti. Autor poświęca także jeden podrozdział specjalnym odmianom węglików spiekanych otrzymywanych bez użycia metalicznej fazy wiążącej.

Kolejne podrozdziały poświęcono szczegółowemu omówieniu różnych zagadnień związanych z kobaltem, w tym: Kobalt jako surowiec krytyczny, Zapotrzebowanie na kobalt, Produkcja kobaltu oraz Wpływ kobaltu na zdrowie.

Analiza stanu wiedzy zwieńczona jest szczegółowym omówieniem technik wysokoenergetycznego mielenia kulowego (HEBM) oraz spiekania iskrowo-plazmowego (FAST/SPS). Autor przedstawia mechanizmy tych procesów, ich zalety oraz ograniczenia, a także przegląd dotychczasowych zastosowań w syntezie materiałów trudnotopliwych.

Rozdział ten jest napisany rzetelnie i świadczy o bardzo dobrej orientacji doktoranta w aktualnym stanie wiedzy. Przegląd literatury jest szeroki, a jednocześnie ukierunkowany na zagadnienia kluczowe dla dalszej części pracy.

## **2.2. Rozdział 2 – Motywacja podjęcia pracy**

W rozdziale drugim autor przedstawia przesłanki stojące za podjęciem tematyki badawczej. Wskazuje na rosnące znaczenie problemu ograniczonej dostępności kobaltu, jego toksyczności oraz konieczność poszukiwania alternatywnych materiałów narzędziowych. Podkreśla również potencjał technologii FAST/SPS w wytwarzaniu materiałów o kontrolowanej mikrostrukturze oraz możliwość wykorzystania HEBM do aktywacji proszków WC i Ti.

Motywacja jest przedstawiona klarownie i przekonująco, a autor wyraźnie uzasadnia potrzebę opracowania materiału WC-Ti jako bezkobaltowej alternatywy dla klasycznych węglików spiekanych.

## **2.3. Rozdział 3 – Metodyka prowadzonych prac**

Rozdział trzeci opisuje szczegółowo materiały wyjściowe, parametry procesów oraz metody badawcze zastosowane w pracy. Autor przedstawia koncepcję badań, obejmującą: przygotowanie mieszanin proszków WC i Ti i ich aktywację poprzez wysokoenergetyczne mielenie kulowe, spiekanie metodą FAST/SPS z zastosowaniem zarówno standardowych, jak i ekstremalnie wysokich szybkości nagrzewania, charakterystykę mikrostrukturalną i fazową, badania właściwości fizycznych i mechanicznych (gęstość, moduł Younga, twardość, odporność na kruche pęknięcie), badania tribologiczne, testy eksploatacyjne prototypowych płytek skrawających.

Metodyka jest kompletna, na ogół dobrze udokumentowana i obejmuje szeroki zakres technik badawczych, właściwych dla prowadzonych prac.

## **2.4. Rozdział 4 – Wyniki badań i dyskusja**

Jest to najobszerniejsza i najważniejsza część rozprawy, w której autor prezentuje wyniki badań własnych. Rozdział podzielono na sześć podrozdziałów, obejmujących kolejno: **(4.1)** charakterystykę materiałów wyjściowych, **(4.2)** proces mielenia HEBM, **(4.3)** spiekanie FAST/SPS z maksymalną szybkością nagrzewania, **(4.4)** optymalizację procesu spiekania, **(4.5)** charakterystykę opracowanego materiału oraz **(4.6)** testy eksploatacyjne.

### **4.1. Charakteryzacja materiałów wyjściowych**

Analiza obejmuje dyfrakcję rentgenowską, morfologię proszków oraz ich rozkład wielkości cząstek. Autor przedstawia właściwości proszków węglkowych i tytanu, zwracając

uwagę na obecność faz ubocznych (np.  $W_2C$  w proszku WC), co ma istotne znaczenie dla późniejszej mikrostruktury kompozytów.

#### 4.2. Wysokoenergetyczne mielenie kulowe

Wyniki badań HEBM są omówione bardzo szczegółowo. Autor analizuje wpływ czasu mielenia, prędkości obrotowej a także medium zwilżającego (lub jego braku) na rozdrobnienie proszków, reakcje i przemiany fazowe w układach WC-Ti a także na ujednorodnienie mieszaniny tych faz. W wyniku przeprowadzonych badań opracowane optymalne parametry ujednorodniania i aktywacji mieszanki WC-5Ti to: czas mielenia 3 h, prędkość obrotowa 500 obr/min, współczynnik masy kul do masy mieszanki 10:1, mielenie na sucho w atmosferze argonu.

#### 4.3. Spiekanie FAST/SPS z maksymalną szybkością nagrzewania

Ten podrozdział stanowi jeden z najbardziej innowacyjnych elementów pracy. Autor opracował metodykę spiekania z szybkością nagrzewania przekraczającą 2000 °C/min – co, jak twierdzi – nie było dotąd opisywane w literaturze. Przedstawiono modyfikację zespołu matrycy grafitowej i stempli a także programu spiekania FAST/SPS dla osiągnięcia nietypowo wysokich szybkości nagrzewania. Następnie zbadano wpływ tak ekstremalnych szybkości na zagęszczenie, mikrostrukturę, skład fazowy i właściwości mechaniczne kompozytów. Wyniki wskazują, że ultraszybkie nagrzewanie pomimo potencjału do ograniczania reakcji chemicznych i przemian fazowych a także do ograniczenia rozrostu ziaren nie sprawdziło się w przypadku aktywowanych mechanicznie mieszanin WC-Ti ze względu na: brak obecności fazy metalicznej na bazie tytanu (aktywne proszki reagowały błyskawicznie tworząc węgliki a jedyną fazą metaliczną w przypadku układu WC-15Ti był W, co ze względu na kruchość tego pierwiastka jest niekorzystne), niejednorodność składu chemicznego w skali mikroskopowej, występowanie dużych gradientów temperatury oraz szybkie zużycie narzędzi grafitowych na skutek lokalnego przegrzewania i deformacji stempli.

#### 4.4. Optymalizacja procesu spiekania FAST/SPS

Autor modyfikuje program spiekania i przeprowadza analizę wpływu temperatury, oraz czasu wygrzewania właściwości końcowe kompozytów. Podejmuje także próbę modyfikacji składu kompozytów przez wprowadzenie dodatkowych węglików (TiC, VC,  $Cr_3C_2$ ) do układu WC-Ti. Modyfikacja jednak nie przynosi zakładanego rezultatu a kompozyty zawierające dodatkowe węgliki mają gorsze właściwości mechaniczne niż te o składzie podstawowym. Ostatecznie opracowano optymalne parametry, które umożliwiły uzyskanie materiału WC-5Ti o wysokiej twardości i dobrej odporności na kruche pękanie.

#### 4.5. Charakterystyka opracowanego materiału węglkowego

W tej części autor przedstawia szczegółową analizę mikrostruktury, składu fazowego oraz właściwości mechanicznych kompozytów WC-Ti. Zoptymalizowany materiał zawiera w swoim składzie WC oraz węglík złożony (Ti, W)C, charakteryzuje się jednorodną mikrostrukturą, twardością (ok. 2500 HV10) znacznie wyższą niż typowe węglíki spiekane o niskiej zawartości Co i drobnym ziarnie (zazwyczaj <2000 HV) oraz korzystną odpornością na kruche pękanie (ok.  $8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ), co stanowi istotny sukces badawczy. W rozdziale opisano również wyniki badań tribologicznych (współczynnik tarcia oraz wskaźnik zużycia) kompozytu WC-Ti w temperaturze otoczenia oraz w temperaturze 700 °C. W badaniach jednak nie uwzględniono materiału odniesienia, dlatego wyniki te, a w szczególności wartości wskaźnika zużycia są trudne do jednoznacznej interpretacji.

#### 4.6. Testy eksploatacyjne

Opracowane materiały zostały wykorzystane do wykonania prototypowych płytek skrawających, które poddano testom toczenia. Wyniki wykazały, że płytki WC-Ti charakteryzują się wyższą trwałością ostrza (ok. 11 min) niż komercyjna płytka WC-Co o drobnym ziarnie i niskiej zawartości Co (ok. 7 min). Jest to dowód na praktyczną przydatność opracowanego materiału i jego potencjał wdrożeniowy.

### 2.5. Rozdział 5 i 6 – Wnioski i podsumowanie

Autor syntetyzuje najważniejsze rezultaty badań, podkreślając pełną realizację celu pracy, jakim było opracowanie technologii wytwarzania kompozytów WC-Ti metodą łączącą wysokoenergetyczne mielenie kulowe oraz spiekanie FAST/SPS, a także podkreśla znaczenie opracowanej technologii w kontekście rosnącej potrzeby substytucji kobaltu.

### 2.6. Bibliografia

Bibliografia zamieszczona w rozprawie obejmuje 131 pozycji, co świadczy o dość szerokim przeglądzie literatury i dobrym osadzeniu pracy w aktualnym stanie wiedzy. Zdecydowaną większość stanowią artykuły naukowe z uznanych czasopism międzynarodowych, w tym z obszaru inżynierii materiałowej, metalurgii proszków, technologii spiekania oraz badań nad węglíkami metali przejściowych. W zestawieniu znajdują się również monografie, normy techniczne, oraz klasyczne pozycje literaturowe, które stanowią fundament wiedzy o węglíkach spiekanych i procesach ich wytwarzania.

Pod względem aktualności bibliografia prezentuje się bardzo dobrze. Około 40–50% pozycji pochodzi z ostatnich 10 lat, co jest typowe i pożądane w pracach dotyczących nowoczesnych technologii materiałowych. Jednocześnie autor korzysta także z literatury starszej, w tym publikacji sprzed 20–30 lat, które dotyczą podstawowych zagadnień z zakresu

termodynamiki, kinetyki spiekania czy klasycznych właściwości węglików, co jest w pełni uzasadnione, ponieważ są to prace o charakterze fundamentalnym, nadal aktualne i często cytowane.

Dobór literatury jest trafny i adekwatny do tematyki rozprawy. Autor korzysta zarówno z publikacji dotyczących klasycznych węglików WC-Co, jak i z najnowszych badań nad kompozytami bezkobaltowymi, technikami HEBM oraz spiekaniem SPS. Bibliografia obejmuje również prace dotyczące problematyki surowcowej i etycznej związanej z kobaltem, co dobrze koresponduje z motywacją pracy i jej kontekstem społecznym.

### 3. Ocena dorobku naukowego doktoranta

Dorobek naukowy mgr inż. Jakuba Wiśniewskiego, zaprezentowany w rozprawie, należy ocenić jako bardzo dobry i w pełni odpowiadający wymaganiom stawianym kandydatom do stopnia doktora w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa. Doktorant wykazał się znaczną aktywnością publikacyjną, udziałem w projektach badawczych oraz zaangażowaniem w działalność konferencyjną, co świadczy o jego dojrzałości naukowej i umiejętności pracy w środowisku badawczym.

W okresie realizacji doktoratu autor opublikował **pięć artykułów naukowych** w czasopismach znajdujących się na liście JCR, w tym w czasopismach o wysokim współczynniku wpływu (IF 4–6) oraz jeden artykuł w materiałach konferencyjnych. W trzech publikacjach mgr inż. Jakub Wiśniewski jest pierwszym autorem. Warto podkreślić, że dwie z jego prac dotyczą bezpośrednio tematyki rozprawy, a większość pozostałych jest związana z techniką FAST/SPS, co świadczy o umiejętności doktoranta w publikowaniu wyników badań własnych w uznanych czasopismach branżowych.

Istotnym elementem dorobku jest **6 wystąpień ustnych oraz 4 postery** doktoranta, co potwierdza jego aktywność w środowisku naukowym oraz zdolność do prezentowania wyników badań szerokiemu gronu odbiorców.

Na szczególne podkreślenie zasługuje udział doktoranta w projektach badawczo-rozwojowych, zarówno krajowych, jak i międzynarodowych. W trakcie realizacji doktoratu uczestniczył w kilku projektach finansowanych ze środków NCBiR, **Horyzontu 2020** oraz programu **Swiss-Polish Cooperation**. Udział w projektach o tak szerokim zakresie tematycznym i organizacyjnym świadczy o umiejętności pracy zespołowej, kompetencjach technicznych oraz zdolności do realizacji złożonych zadań badawczych.

W dorobku doktoranta znajdują się również **trzy zgłoszenia patentowe**, dotyczące technologii wytwarzania węglików i kompozytów ceramicznych. Jest to osiągnięcie szczególnie cenne, ponieważ potwierdza nie tylko naukowy, ale także aplikacyjny charakter prowadzonych badań. Zgłoszenia patentowe świadczą o potencjale wdrożeniowym wyników

pracy oraz o umiejętności doktoranta do generowania rozwiązań o charakterze innowacyjnym.

Warto również zwrócić uwagę na wskaźniki bibliometryczne doktoranta: **18 cytowań** (16 bez autocytowań) oraz **indeks Hirscha równy 2** według bazy Scopus. Jak na etap kariery naukowej, na którym znajduje się autor, są to wartości w pełni satysfakcjonujące i potwierdzające, że jego prace są dostrzegane i cytowane przez innych badaczy.

Podsumowując, dorobek naukowy mgr inż. Jakuba Wiśniewskiego jest bogaty, różnorodny i w pełni adekwatny do wymagań stawianych kandydatom do stopnia doktora.

#### 4. Uwagi i pytania recenzenta

Recenzowana rozprawa posiada niewątpliwie istotne walory poznawcze i stanowi wartościowy wkład mgr inż. Jakuba Wiśniewskiego w rozwój wiedzy i technologii dotyczącej otrzymywania kompozytów WC-Ti. Praca nie jest pozbawiona pewnych niedociągnięć i elementów wymagających komentarza krytycznego. Poniższe uwagi nie podważają ogólnej jakości rozprawy, lecz wskazują obszary, które mogłyby zostać dopracowane lub rozszerzone, aby jeszcze pełniej ukazać potencjał badawczy autora oraz zwiększyć przejrzystość i kompletność prezentowanych wyników.

1. **Str. 7. Streszczenie.** Autor twierdzi, że „...opracowano metodykę prowadzenia procesów spiekania FAST/SPS z zastosowaniem niespotykanej dotąd w literaturze szybkości nagrzewania przekraczającej 2000 °C/min.” Recenzent chciałby zauważyć, że stwierdzenie to nie jest do końca prawdziwe, bo choć prędkość nagrzewania przekraczająca wartość 2000 °C/min jest rzeczywiście ekstremalnie wysoka jak na procesy FAST/SPS, to jednak w literaturze można znaleźć sporo opisów eksperymentów „**flash SPS**” prowadzonych z taką lub większą prędkością nagrzewania, przykładowo:

[1] S. Grasso, T. Saunders, H. Porwal, O. Cedillos-Barraza, D.D. Jayaseelan, W.E. Lee, M.J. Reece, Flash spark plasma sintering (FSPS) of pure ZrB<sub>2</sub>, J. Am. Ceram. Soc. 97 (2014) 2405–2408. [doi:10.1111/jace.13109](https://doi.org/10.1111/jace.13109). W pracy osiągnięto ekstremalnie wysoką prędkość nagrzewania rzędu ~4000 °C/min, charakterystyczną dla zjawiska **flash SPS**;

[2] E. Zapata-Solvas, D. Gómez-García, A. Domínguez-Rodríguez, R.I. Todd, Ultra-fast and energy-efficient sintering of ceramics by electric current concentration, Sci. Rep. 5 (2015) 1–7. [doi:10.1038/srep08513](https://doi.org/10.1038/srep08513). Autorzy raportują prędkości nagrzewania sięgające ~2000 °C/min, wynikające z lokalnej koncentracji prądu w próbce;

[3] R. McKinnon, S. Grasso, A. Tudball, M.J. Reece, Flash spark plasma sintering of cold-Pressed TiB<sub>2</sub>-hBN, J. Eur. Ceram. Soc. 37 (2017) 2787–2794.

[doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2017.01.029](https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.01.029). Pomimo, że badacze nie byli w stanie precyzyjnie mierzyć temperatury w swoim eksperymencie a sterowanie odbywało się poprzez zadawanie parametrów elektrycznych grzania, to wnioskując pośrednio po czasie trwania procesu i właściwościach otrzymanych materiałów, osiągnięto prędkości nagrzewania przekraczające **2000 °C/min**, typowe dla procesu **flash SPS**;

[4] J. Zou, S. Grasso, L.F. Liu, H. Bin Ma, M. Reece, J. Binner, Flash spark plasma sintering of HfB<sub>2</sub> ceramics without pre-sintering, *Scr. Mater.* 156 (2018) 115–119. [doi:10.1016/j.scriptamat.2018.07.026](https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.07.026). Autorzy również raportują spiekanie **flash SPS**;

[5] C. Manière, G. Lee, E.A. Olevsky, Flash sintering of complex shapes, *Appl. Mater. Today* 26 (2022). [doi:10.1016/j.apmt.2021.101293](https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101293). Kolejny przykład **flash SPS**.

2. **Str. 34.** W rozdziale **1.3.2 Produkcja kobaltu**, autor przedstawia zatrważające fakty z Demokratycznej Republiki Konga, dotyczące warunków pracy ludzi, w tym dzieci, związanych z wydobywaniem tego pierwiastka. W **Motywacji podjęcia pracy** zaznacza natomiast, że między innymi w związku z "...poważnymi zastrzeżeniami etycznymi związanymi z warunkami wydobywania w DRK" istnieje konieczność poszukiwania materiałów alternatywnych. Nasuwa się w związku z tym pytanie o charakterze mniej technicznym a bardziej humanistycznym, jak substytucja Co i uniezależnienie się Europy od sprowadzania go z DRK wpłynie na warunki życia tysięcy dzieci zmuszanych do katorżniczej pracy przy wydobywaniu w tym kraju?
3. **Str. 58. Właściwości tribologiczne.** Testy Ball-on-Disc przeprowadzono przy relatywnie dużym obciążeniu 40 N bez podania średnicy kulki. Jaka była średnica kulki i wynikające z niej naciski Hertza dla zadanego obciążenia oraz testowanych par materiałów? Jakie były wartości naprężeń kontaktowych w doniesieniu do wytrzymałości poszczególnych materiałów?
4. **Str. 93, Charakterystyka opracowanego materiału. Rys. 49.** Brak dyfrakcji elektronów z poszczególnych ziaren mogących pomóc w bardziej precyzyjnym w określeniu składu fazowego materiału.
5. **Str. 94. Charakterystyka opracowanego materiału.** Zoptymalizowany materiał zawiera w swoim składzie jedynie WC oraz węglík złożony (Ti, W)C bez udziału fazy metalicznej na bazie Ti. Proszę omówić jakie są zalety takiego kompozytu, de facto czysto ceramicznego, otrzymywanego reakcyjnie, w porównaniu do węglików spiekanych bez udziału metali?
6. **Str. 95, Charakterystyka opracowanego materiału. Tab. 11.** Brak informacji w tytule tabeli którego materiału dotyczą wyniki (skład i parametry otrzymywania). Wiadomo, że jest to „wariant ostateczny” materiału zdefiniowany na stronie 92, jednak to co jest oczywiste dla autora zmusza nieraz osobę czytającą, niezaznajomioną z całą pracą, do szukania takich informacji w tekście, co bywa irytujące. Zdaniem recenzenta rysunki i

tabele powinny być opisane w sposób „samowyjaśniający” (ang. self-explanatory), tj. zrozumiały bez konieczności szukania dodatkowych informacji w tekście pracy. Podejście takie stanowi duże udogodnienie dla czytelnika. Uwaga to dotyczy również pozostałych tabel i rysunków, gdzie brak jest jednoznacznej identyfikacji materiału.

7. **Str. 95, Charakterystyka opracowanego materiału. Tab. 11.** Brak materiału odniesienia (np. płytki z węgliku spiekanego), dlatego wartości wskaźnika zużycia są trudne do jednoznacznej interpretacji.
8. **Str. 100. Wnioski.** Brak wniosków bezpośrednio dotyczących obszernego rozdziału związanego z wysokoenergetycznym mieleniem. Jeden lub dwa wnioski podsumowujące wyniki uzyskane z eksperymentów HEBM byłyby bardzo pomocne czytelnikowi w usystematyzowaniu wiedzy o procesach badanych w ramach niniejszej pracy.
9. **Str. 100. Wnioski.** Brak we wnioskach informacji o wadach spiekania „UltraFAST” i jednoznacznego wyartykułowania, że metoda ta nie sprawdziła się w omawianej pracy. Wnioski są tendencyjnie optymistyczne. Powinny być przedstawione zarówno zalety jak i wady procesu.
10. **Str. 100. Wnioski.** We wnioskach odnotowano, że opracowana metodyka znalazła zastosowanie w Łukasiewicz – PIT do otrzymywania również innych trudnospiekalnych materiałów ceramicznych i kompozytowych. Czy zastosowanie to zakończyło się sukcesem? Czy inne materiały otrzymywane z wykorzystaniem superszybkiego nagrzewania miały lepsze właściwości niż w przypadku nagrzewania klasycznego? Czy rozwiązano problem niszczenia matryc i stempli w wyniku ich lokalnego przegrzewania i odkształceń?
11. **Str. 102. Podsumowanie.** Co autor sądzi o potencjale wdrożeniowym rozwiązania w odniesieniu do małej produktywności metody FAST/SPS. W przypadku płytek skrawających wolumeny miesięczne firm narzędziowych sięgają setek tysięcy sztuk podczas gdy klasyczny proces FAST/SPS jest w stanie wyprodukować jedynie kilkaset sztuk miesięcznie, co stanowi trzy rzędy wielkości mniej. Przy takich dysproporcjach wolumenu cena jednostkowa takiego produktu nie będzie więc konkurencyjna rynkowo. Proszę się wypowiedzieć na temat możliwości ewentualnego zastosowania innych, bardziej produktywnych metod otrzymywania opracowanego materiału.

## 5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Wiśniewskiego stanowi dojrzałą i spójną pracę badawczą, wpisującą się w aktualne kierunki rozwoju inżynierii materiałowej w zakresie technologii wytwarzania materiałów narzędziowych metodami spiekania. Autor podjął temat istotny zarówno z naukowego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia, dotyczący opracowania kompozytów WC-Ti jako bezkobaltowej alternatywy dla klasycznych węglików spiekanych WC-Co. Problem ten ma szczególne znaczenie w kontekście rosnących ograniczeń związanych z dostępnością i toksycznością kobaltu oraz potrzeby wdrażania technologii bardziej zrównoważonych i bezpiecznych dla środowiska.

Praca prezentuje kompleksowe podejście do zagadnienia, od analizy literaturowej, przez opracowanie metodyki badań, aż po szczegółową charakterystykę otrzymanych materiałów i ich weryfikację w warunkach eksploatacyjnych. Szczególnie wartościowy jest wkład autora w rozwój technologii FAST/SPS, obejmujący opracowanie metodyki spiekania z ekstremalnie wysoką szybkością nagrzewania przekraczającą 2000 °C/min.

Wyniki badań własnych są przedstawione w sposób uporządkowany i przejrzysty. Autor wykazał, że materiał WC-Ti charakteryzuje się właściwościami mechanicznymi co najmniej porównywalnymi z konwencjonalnymi węglikami WC-Co, a w testach eksploatacyjnych wykazuje wyższą trwałość narzędzia. Jest to rezultat o dużym znaczeniu praktycznym, potwierdzający potencjał wdrożeniowy tego tworzywa.

Rozprawa jest napisana poprawnym, klarownym językiem, a jej struktura jest logiczna. Autor wykazał się umiejętnością prowadzenia badań eksperymentalnych o wysokim stopniu złożoności, znajomością zaawansowanych technik badawczych oraz zdolnością do krytycznej interpretacji wyników. Pomimo kilku niedociągnięć, które nie wpływają w sposób istotny na ogólną wartość naukową rozprawy, spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.

Biorąc pod uwagę nowatorski charakter podjętego tematu, poprawność merytoryczną i metodologiczną pracy, znaczący wkład autora w rozwój technologii wytwarzania kompozytów WC-Ti, wysoką jakość przeprowadzonych badań oraz ich praktyczne znaczenie, wyrażam opinię, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska pt. *„Opracowanie technologii wytwarzania kompozytów z proszków WC/Ti techniką FAST/SPS”* jest oryginalnym osiągnięciem naukowym mgr inż. Jakuba Wiśniewskiego i spełnia wszystkie warunki określone Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz.U. 2018 poz. 1668). W związku z powyższym wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Poznańskiej o dopuszczenie mgr inż. Jakuba Wiśniewskiego do jej publicznej obrony.

  
Piotr Klimczyk