

Załącznik nr 3

do wniosku o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia
doktora habilitowanego

Autoreferat

dr inż. **Dariusz Garbiec**

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Obróbki Plastycznej

Poznań 2021

1. Dane osobowe

Imię i nazwisko: **Dariusz Garbiec**

Miejsce pracy: **Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Obróbki Plastycznej**

Stanowisko: **Lider obszaru** (pion badawczy)

ORCID: **0000-0003-1114-6323**

Web of Science ResearcherID: **E-6071-2019**

Scopus Author Identifier: **56528460600**

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne

Stopień naukowy: **doktor nauk technicznych**

Dyscyplina naukowa: **inżynieria materiałowa**

Specjalność: **metalurgia proszków**

Data nadania stopnia naukowego: **29.11.2013**

Jednostka nadająca stopień naukowy: **Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Politechnika Poznańska**

Tytuł rozprawy: **Wpływ parametrów prądowych metody iskrowego spiekania plazmowego na właściwości materiałów kompozytowych Al-Al₂O₃ i Al-SiC**

Promotor: **prof. dr hab. Mieczysław Jurczyk**

Recenzent: **prof. dr hab. inż. Waldemar Kaszuwara**

Recenzent: **prof. dr hab. inż. Jarosław Jakubowicz**

Tytuł zawodowy: **magister inżynier**

Data uzyskania tytułu zawodowego: **14.04.2009**

Jednostka na której uzyskano tytuł zawodowy: **Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Politechnika Poznańska**

Tytuł pracy: **Drogowy przewóz materiałów łatwopalnych. Aspekty prawne, organizacyjne i techniczne**

Promotor: **dr inż. Zbigniew Rybak**

Recenzent: **prof. dr hab. inż. Wiesław Zwierzycki**

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

01.03.2020 – obecnie **Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań**
Lider obszaru (pion badawczy)

01.04.2019 – 29.02.2020 **Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań**
Adiunkt

01.04.2014 – 31.03.2019 Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań
Adiunkt

01.09.2010 – 31.03.2014 Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań
Laborant-Konstruktor

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy

Osiągnięciem naukowym pt. „**Kształtowanie mikrostruktury i właściwości mechanicznych oraz tribologicznych wybranych materiałów poprzez optymalizację procesu spiekania wspomaganego polem elektrycznym FAST/SPS**”, o którym mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.) jest cykl ośmiu powiązanych tematycznie publikacji naukowych, które w roku opublikowania artykułów w ostatecznej formie były ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 kryteria ewaluacji jakości działalności naukowej ust. 2 pkt 2 lit. B, a ich liczba punktów MEiN wynosi **586** pkt., a sumaryczny IF wynosi **16,258**.

[H1] **D. Garbiec**: Consolidation of Mg-SiC composites by spark plasma sintering, Composites Theory and Practice, r. 16, nr 2, 2016 s. 74–78 (MEiN: 11)

[H2] A. Mróz, **D. Garbiec**, A. Wielowiejska-Giertuga, T. Wiśniewski, M. Gierzyńska-Dolna, A. Martyła: Structural, mechanical and tribological properties of spark plasma sintered Ti6Al4V alloy, Archives of Metallurgy and Materials, vol. 61, nr 2, 2016, s. 665–670 (MEiN: 30, IF: 0,571, liczba cytowań: 0)

Mój wkład w powstanie publikacji polegał na opracowaniu koncepcji, założeń i metodyki prowadzonych badań. Wytworzyłem materiał do badań, wykonałem badania właściwości mechanicznych i przeprowadziłem analizę uzyskanych wyników (za wyjątkiem badań tribologicznych). Napisałem manuskrypt w części dotyczącej wyników i dyskusji mikrostruktury i właściwości mechanicznych (za wyjątkiem badań tribologicznych) w wersji pierwotnej oraz ostatecznej po recenzjach.

[H3] **D. Garbiec**, P. Siwak: Study on microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered Alumix 431 powder, Powder Metallurgy, vol. 59, nr 4, 2016, s. 242–248 (MEiN: 25, IF: 0,779, liczba cytowań: 7)

Mój wkład w powstanie publikacji polegał na opracowaniu koncepcji, założeń i metodyki prowadzonych badań. Wytworzyłem materiał do badań, wykonałem badania i przeprowadziłem analizę uzyskanych wyników (za wyjątkiem badań tomografii komputerowej). Napisałem manuskrypt w całości w wersji pierwotnej oraz ostatecznej po recenzjach.

[H4] **D. Garbiec**, P. Siwak, A. Mróz: Effect of compaction pressure and heating rate on microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered Ti6Al4V alloy, Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol. 16, nr 4, 2016, s. 702–707 (MEiN: 30, IF: 2,216, liczba cytowań: 19)

Mój wkład w powstanie publikacji polegał na opracowaniu koncepcji, założeń i metodyki prowadzonych badań. Wytworzyłem materiał do badań, wykonałem badania i przeprowadziłem analizę uzyskanych wyników (za wyjątkiem analizy obrazu celem wyznaczenia wielkości ziaren i wyznaczenia modułu Younga metodą indentacji). Napisałem manuskrypt w całości w wersji pierwotnej oraz ostatecznej po recenzjach.

- [H5] B. Leszczyńska-Madej, **D. Garbiec**, M. Madej: Effect of sintering temperature on microstructure and selected properties of spark plasma sintered Al-SiC composites, Vacuum, vol. 164, 2019, s. 250–255 (MEiN: 70, IF: 2,906, liczba cytowań: 14)

Mój wkład w powstanie publikacji polegał na opracowaniu założeń i metodyki prowadzonych badań w zakresie spiekania FAST/SPS. Wytworzyłem materiał do badań i przeprowadziłem analizę wpływu procesu FAST/SPS na mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne kompozytów.

- [H6] **D. Garbiec**, V. Leshchynsky, A. Colella, P. Matteazzi, P. Siwak: Structure and deformation behavior of Ti-SiC composites made by mechanical alloying and spark plasma sintering, Materials, vol. 12, nr 8, 2019, 1276 (MEiN: 140, IF: 3,057, liczba cytowań: 1)

Mój wkład w powstanie publikacji polegał na opracowaniu metodyki prowadzonych badań w zakresie spiekania FAST/SPS i badań materiałowych. Wytworzyłem materiał do badań, wykonałem badania i przeprowadziłem analizę uzyskanych wyników (za wyjątkiem pomiarów nanotwardości metodą indentacji). Napisałem manuskrypt w wersji pierwotnej oraz ostatecznej po recenzjach (za wyjątkiem wprowadzenia).

- [H7] B. Leszczyńska-Madej, M. Madej, **D. Garbiec**: Tribological properties of spark plasma sintered Al-SiC composites, Materials, vol. 13, nr 21, 2020, 4969 (MEiN: 140, IF: 3,057, liczba cytowań: 0)

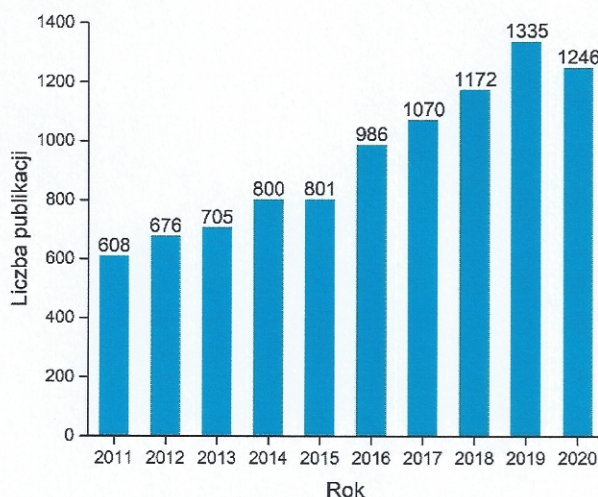
Mój wkład w powstanie publikacji polegał na opracowaniu koncepcji, założeń i metodyki prowadzonych badań w zakresie spiekania FAST/SPS. Wytworzyłem materiał do badań i przeprowadziłem analizę wpływu procesu FAST/SPS na mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne i tribologiczne kompozytów.

- [H8] **D. Garbiec**, M. Wiśniewska, R. Psiuk, P. Denis, N. Levintant-Zayonts, V. Leshchynsky, R. Rubach, T. Mościcki: Zirconium alloyed tungsten borides synthesized by spark plasma sintering, Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol. 21, nr 1, 2021, 37 (MEiN: 140, IF: 3,672, liczba cytowań: 0)

Mój wkład w powstanie publikacji polegał na opracowaniu koncepcji, założeń i metodyki prowadzonych badań. Dokonałem analizy uzyskanych wyników. Napisałem manuskrypt w całości w wersji pierwotnej oraz ostatecznej po recenzjach.

Wprowadzenie

Nieustanny rozwój techniki stawia przed inżynierią materiałową nowe wyzwania. Oprócz poszukiwania nowych materiałów, prowadzone są liczne prace badawcze nad polepszaniem właściwości materiałów już znanych, m.in. przez stosowanie nowych technologii wytwarzania czy też optymalizację procesów. Jednym z dynamicznie rozwijających się na świecie wątków tematycznych jest zastosowanie i rozwój wysoce obiecujących technik spiekania wspomaganego polem elektrycznym (ang. *Field Assisted Sintering Technique, FAST*), do których zaliczane jest spiekanie iskrowo-plazmowe (ang. *Spark Plasma Sintering, SPS*). Jak można wnioskować z wykresu przedstawionego na rys. 1, ilość prac naukowych opublikowanych w ostatnich dziesięciu latach (2011–2020) [1] podejmujących tematykę FAST/SPS jest z roku na rok coraz większa i staje się przedmiotem zainteresowania nie tylko świata nauki, ale – co istotne – także przemysłu.



Rys. 1. Liczba prac naukowych dotyczących techniki FAST/SPS opublikowanych w latach 2011–2020 [1]

Podstaw techniki FAST/SPS należy doszukiwać się w pierwszych próbach spiekania rezystancyjnego proszków realizowanych w Niemczech w pierwszych latach XX wieku, przy czym za pierwszy kamień milowy w historii rozwoju współczesnego spiekania FAST/SPS uznaje się 1933 rok, kiedy to George F. Taylor z firmy General Electric Co. opatentował metodę i urządzenie do prasowania na gorąco z jednoczesnym spiekaniem rezystancyjnym węglików spiekanych [2]. Kolejnym kamieniem milowym był patent George’a D. Cremera z 1944 roku na sposób spiekania proszków brązu, mosiądzu i aluminium, łączący prasowanie na gorąco z wysokoczęstotliwościowym indukcyjnym systemem nagrzewania [3]. Przełomu w dalszym rozwoju nowej techniki spiekania proszków dokonał w 1962 roku Kiyoshi Inoue [4, 5] z japońskiej firmy Japax Inc., prezentując urządzenie Spark Sintering (SS), które zalicza się do tzw. pierwszej generacji urządzeń FAST/SPS. Druga generacja pojawiła się w 1986 roku, kiedy to firma Inoue-Japax Research Inc. przedstawiła urządzenie Plasma Activated Sintering (PAS). Pierwsze pełnoprawne urządzenie FAST/SPS powstało w 1990 roku, także w Japonii, w firmie Sumitomo Coal Mining Co. Ltd, stanowiąc trzecią generację urządzeń FAST/SPS [6].

Technika FAST/SPS jest szeroko stosowana do konsolidacji materiałów proszkowych, w tym metali, ceramiki i kompozytów w znacznie krótszym czasie i w niższej temperaturze niż w przypadku technik klasycznych [7]. Proces FAST/SPS polega na zagęszczaniu materiału proszkowego poprzez przyłożenie jednostronnego i jednoosiowego nacisku oraz prądu stałego (najczęściej impulsowego) o gęstości do 100 A/cm^2 . W praktyce technika FAST/SPS umożliwia bardzo szybkie nagrzewanie materiałów proszkowych z szybkością do 1000°C/min , w szczególności w porównaniu do prasowania na gorąco (ang. *Hot Pressing, HP*), gdzie szybkość nagrzewania wynosi $5\text{--}10^\circ\text{C/min}$ [8]. Technika FAST/SPS pozwala na szybkie zagęszczanie materiałów proszkowych w niższej temperaturze niż w przypadku technik tradycyjnych, co skutkuje zachowaniem mikrostruktury nanokrystalicznej i nierównowagowości w stopach wytwarzanych poprzez wysokoenergetyczne mielenie kulowe (ang. *High Energy Ball Milling, HEBM*) oraz związanych z tym właściwości [8, 9]. Duże szybkości nagrzewania umożliwiają zagęszczanie materiałów proszkowych z jednoczesnym ograniczeniem dyfuzji powierzchniowej podczas spiekania, która utrudnia konsolidację [8, 10]. Proces FAST/SPS umożliwia także zachowanie wielkości rozdrobnionych ziaren, które są uzyskiwane w wyniku mielenia [11]. Rozrost ziaren można zminimalizować poprzez kontrolę parametrów procesu FAST/SPS, takich jak: temperatura spiekania, czas spiekania, ciśnienie prasowania oraz szybkość nagrzewania i chłodzenia.

Niemniej jednak, aby dokonać postępu w rozwoju techniki FAST/SPS i doprowadzić ją do pełni dojrzałości, wiele prac badawczo-rozwojowych musi jeszcze zostać przeprowadzonych. Z jednej strony wciąż konieczne są do przeprowadzenia badania podstawowe nad mechanizmami przejściowymi związanymi z dużymi szybkościami nagrzewania i chłodzenia. Wpływ pola elektrycznego na dyfuzję, reaktywność, kształtowanie mikrostruktury, zagęszczalność i właściwości końcowe także wymaga lepszego poznania i charakteryzacji [7]. Z drugiej strony lekkie stopy metali i kompozyty (na podstawie Mg, Al, faz MAX z układu Ti-Si-C, borków metali przejściowych) zyskują coraz większe zainteresowanie naukowe, ponieważ materiały te odznaczają się wysokimi właściwościami mechanicznymi oraz dobrymi właściwościami tribologicznymi i eksploatacyjnymi. Jednakże wpływ parametrów spiekania FAST/SPS na mikrostrukturę i właściwości spiekanych kompozytów nie został wciąż szczegółowo zbadany. Mechaniczna synteza (ang. *Mechanical Alloying, MA*) lub proces HEBM są stosowane do syntezy szerokiej grupy materiałów, m.in. do materiałów dyspersyjnie umacnianych tlenkami, ceramiki, związków międzymetalicznych, nankompozytów, stopów o wysokiej entropii i stopów nanokrystalicznych [12]. Ostatnie prace dotyczące stopów Mg [12] i Al [13] wykazały, że proces HEBM może poprawić zarówno odporność na korozję jak i wytrzymałość lekkich stopów i kompozytów. Rozdrobnienie ziaren do wielkości poniżej 100 nm wydłuża rozpuszczalność pierwiastków stopowych w stanie stałym i zapewnia równomierną dyspersję rozdrobnionych faz wtórnych, powodując zwiększenie odporności na korozję i wytrzymałości mechanicznej. Ponadto znacząca poprawa właściwości Al i stopu Al-20Cr spiekanego techniką FAST/SPS została opisana przez autorów pracy [13], którzy przypisywali to jednoczesnemu wpływowi nanokrystalicznej mikrostruktury, zwiększonej rozpuszczalności Cr w Al, oraz reakcjom w układzie Al-Cr, w wyniku których powstały związki międzymetaliczne. Podsumowując, połączenie MA i techniki FAST/SPS jest wysoce obiecującą technologią syntezy nanostrukturalnych kompozytów.

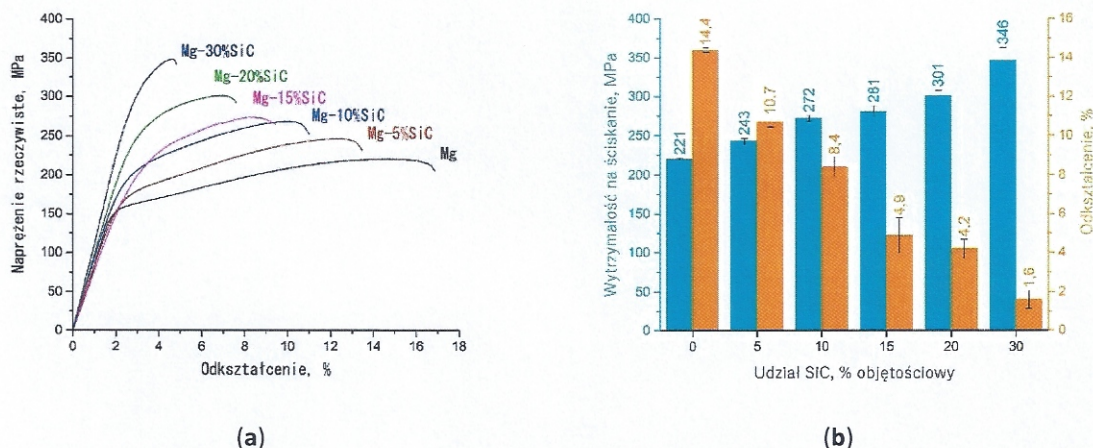
Cel naukowy

Celem naukowym prowadzonych badań stanowiących przedmiot wniosku habilitacyjnego jest zastosowanie szybkiego spiekania wspomaganego polem elektrycznym (FAST/SPS) do wytwarzania materiałów lekkich i kompozytów biorąc pod uwagę m.in.: nanostrukturalne cechy proszków wytwarzanych na drodze MA, reakcje chemiczne zachodzące podczas spiekania kompozytów kontrolowane parametrami procesu, kształtowanie mikrostruktury oraz relacje mikrostruktura–właściwości. Dodatkowym celem jest optymalizacja parametrów technologicznych procesu FAST/SPS, umożliwiająca takie kształtowanie mikrostruktury wytwarzanych materiałów, które pozwolą uzyskać wysokie właściwości mechaniczne i tribologiczne, takie jak twardość, odporność na kruche pękanie czy też wytrzymałość na rozciąganie, ściskanie i zginanie oraz niski współczynnik tarcia i dużą odporność na zużycie.

Szczegółowe omówienie zrealizowanych badań i uzyskanych wyników

Wyniki badań pierwszej grupy materiałów, do której należą metale lekkie (Mg, Al) i ich stopy oraz kompozyty na ich podstawie przedstawiono w pracach [H1, H3, H5, H7].

Cykl artykułów wchodzących w skład osiągnięcia naukowego otwiera praca [H1], w której – stosując technikę FAST/SPS – wytworzyłem kompozyty Mg-SiC o zawartości fazy wzmacniającej w zakresie 5–30% obj. Kompozyty te charakteryzowały się gęstością względną w zakresie 98,0–99,8%, co w praktyce oznacza niemalże lity materiał. Zastosowanie szybkiego spiekania FAST/SPS pozwoliło mi uzyskać w stosunkowo krótkim czasie (ok. 20 min) kompozyty odznaczające się korzystnymi właściwościami mechanicznymi, tj. twardość wzrosła dwukrotnie w odniesieniu do spieku z proszku Mg od 53 do 111 HV_{0,5}, a wytrzymałość na ściskanie wzrosła półtorakrotnie z 221 do 346 MPa. Wykazałem wpływ procesu FAST/SPS na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne kompozytów, tj. utworzenie faz wtórnych Mg₂Si i β-SiO₂ (badania dyfrakcji rentgenowskiej) oraz względnie dużą plastyczność (1,6–10,7%) w statycznej próbie ściskania. Oznacza to, że kompozyty te mogą być wyciskane, pomimo dużej zawartości SiC na granicach cząstek, co przedstawiono na rys. 2. W najnowszych badaniach [14] wykazano, że dodatek SiC doprowadził do znacznego rozdrobnienia i równomiernej dyspersji stabilnej fazy Mg₂Si w kompozycie, co znacząco utrudnia ruch granic ziaren. Dodatkowo zawartość Mg₂Si w kompozycie jest względnie wysoka na skutek reakcji chemicznych zachodzących podczas spiekania, jednakże optymalizacja parametrów procesu FAST/SPS umożliwia uzyskanie maksymalnego efektu umocnienia.

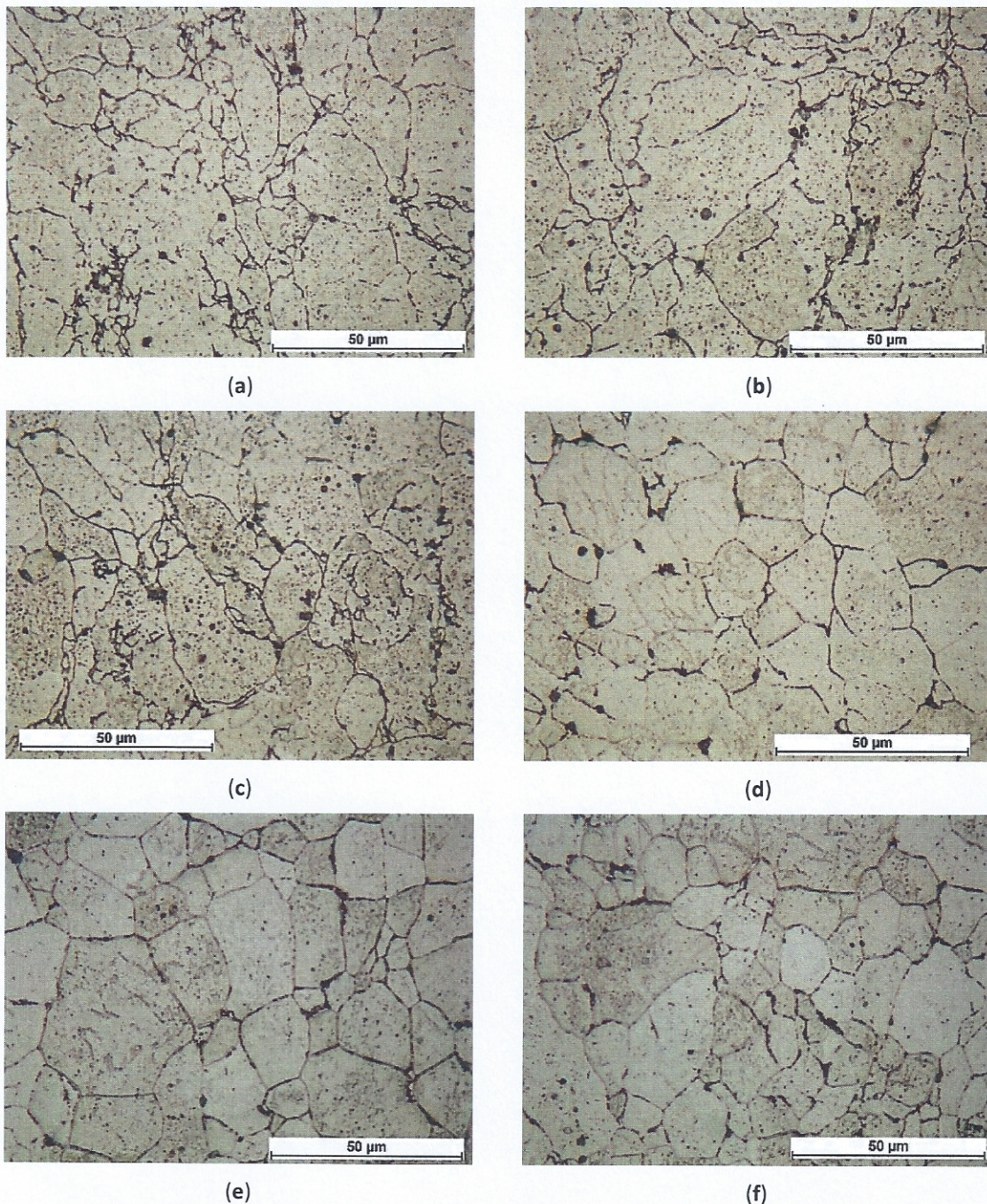


Rys. 2. Właściwości kompozytów Mg-SiC wyznaczone w statycznej próbie ściskania: (a) krzywe napężenie-odkształcenie, (b) wytrzymałość na ściskanie i odkształcenie [H1]

W pracy [H3] podjąłem się zadania zbadania wpływu temperatury i czasu spiekania na mikrostrukturę i wybrane właściwości mechaniczne stopu AA7075 wytworzonego z proszku Alumix 431. Spiekanie realizowałem w temperaturze 450 i 500°C, w czasie 2,5, 5 i 10 min. W efekcie przeprowadzonych badań wykazałem, że kluczowym parametrem w konsolidacji proszku Alumix 431 jest temperatura spiekania, w mniejszym stopniu czas spiekania. Zwiększenie temperatury spiekania z 450 do 500°C spowodowało znaczące zmiany w mikrostrukturze badanych spieków, oraz znacząco zredukowało porowatość (do 0,34%), co potwierdzono w badaniu tomografii komputerowej, a w praktyce oznacza to uzyskanie litego materiału.

W przypadku spieków, które wytworzyłem, uzyskany materiał jest częściowo przesycony w wyniku szybkiego chłodzenia w komorze próżniowej urządzenia FAST/SPS. W mikrostrukturze widoczne są dyspersyjne wydzielenia faz międzymetalicznych (rys. 3), które umocniły otrzymany stop. Fazy międzymetaliczne zidentyfikowano metodami dyfrakcji rentgenowskiej (XRD) i mikroanalizy składu chemicznego (EDS) w próbkach kompozytów poddanych wstępnie trawieniu. Co niezwykle istotne w przeprowadzonych badaniach, to fakt, że otrzymane mikrostruktury różnią się od tych zaprezentowanych przez innych autorów [15–17]. Ma to swoje przełożenie na twardość i wytrzymałość na rozciąganie, która zbliżona jest do wartości typowych dla tego stopu, ale poddanego dodatkowo obróbce do stanu T6. Uzyskana twardość wynosi od 1304 MPa do 1412 MPa, z kolei wytrzymałość na rozciąganie mieści się w zakresie 345–350 MPa dla spieków wytworzonych w czasie do 5 min. W przypadku spiekania w czasie 10 min, w wyniku dyfuzji, następuje zwiększenie objętości faz międzymetalicznych zlokalizowanych na granicach cząstek Al. Skutkuje to zmniejszeniem wytrzymałości na rozciąganie, szczególnie w przypadku spiekania w temperaturze 500°C, gdzie wynosi ona 241 MPa. Związane jest to ze znaczną kruchością faz międzymetalicznych, które stanowią miejsce inicjacji pęknięć w próbie rozciągania, których propagacja następuje po granicach cząstek. W przypadku spieków z tego proszku, inni autorzy [15, 17, 18] raportowali o twardości w zakresie od 804 MPa do 1157 MPa w stanie T0 i od 1402 MPa do 1697 MPa w stanie T6 oraz wytrzymałości na rozciąganie 323 MPa w stanie T0 i 448 MPa w stanie T6. Oznacza to, że zaproponowany przeze mnie zakres parametrów procesu FAST/SPS

umożliwia skrócenie procesu technologicznego wytwarzania stopu AA7075 do stanu T6 poprzez pominięcie operacji przesycania.



Rys. 3. Mikrostruktura stopu AA7075 spiekane go w temperaturze i czasie spiekania wynoszącym: (a) 450°C i 2,5 min, (b) 450°C i 5 min, (c) 450°C i 10 min, (d) 500°C i 2,5 min, (e) 500°C i 5 min, (f) 500°C i 10 min; LM [H3]

Ponadto uzyskany materiał może być z powodzeniem przerabiany plastycznie na drodze wyciskania metodą KOBO, co przedstawiłem wraz ze współautorami w pracy [19]. Praca ta jednak nie wchodzi w skład powiązanych tematycznie publikacji naukowych przedstawionych w niniejszym autoreferacie z uwagi na fakt, że wyniki tych badań zostały opublikowane w formie recenzowanego artykułu naukowego w materiałach konferencyjnych z konferencji Euro PM2019 (materiały z tej konferencji nie zostały uwzględnione w wykazie sporządzonym zgodnie

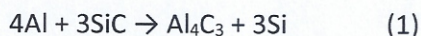
z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 kryteria ewaluacji jakości działalności naukowej ust. 2 pkt 2 lit. B). Wygłoszony przeze mnie referat spotkał się z zainteresowaniem redaktora naczelnego czasopisma „Powder Metallurgy Review”, Dr. Davida Whittakera, który uznał łączoną technologię SPS-KOBO za jedną z trzech najbardziej obiecujących w zakresie metalurgii proszków w 2019 roku [20].

Podsumowując, głównymi rezultatami prac **H1**, **H3** są:

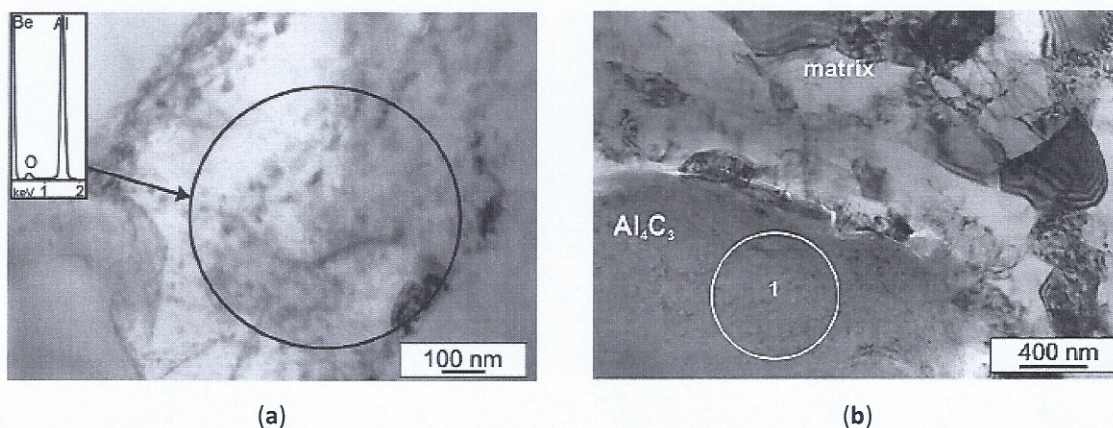
- określenie parametrów procesu FAST/SPS pozwalających na kontrolowanie spiekania, w tym spiekania reaktywnego,
- ocena zależności mikrostruktura–właściwości mechaniczne,
- określenie możliwości łączenia techniki FAST/SPS z metodami dużych odkształceń plastycznych (ang. *Severe Plastic Deformation, SPD*), takich jak wyciskanie KOBO, co umożliwi wdrożenie tych procesów do wytwarzania profili i komponentów z lekkich stopów i kompozytów na ich podstawie do produkcji przemysłowej.

Moje dalsze badania dotyczyły materiałów kompozytowych z układu Al-SiC wytwarzanych techniką FAST/SPS, zarówno przy mniejszym udziale fazy wzmacniającej w zakresie 10–30% mas. co przedstawiono w pracy [H5], jak i przy większym udziale w zakresie 50–70% mas., co przedstawiono w pracy [H7].

W pracy [H5] do wytworzenia kompozytów Al-SiC zastosowałem temperaturę spiekania wynoszącą 580 i 600°C, co pozwoliło mi uzyskać praktycznie lite kompozyty o gęstości względnej w zakresie 97–99%. Otrzymane kompozyty odznaczały się równomiernym rozmieszczeniem cząstek SiC na granicach cząstek Al, z lokalnymi obszarami występowania aglomeratów SiC, w szczególności w kompozytach, w których zawartość tej fazy była największa. Co jest ciekawym elementem opublikowanych wyników badań, to potwierdzenie występowania w mikrostrukturze kompozytów regularnej siatki nanometrycznego Al₂O₃, która dodatkowo umacnia kompozyt, co przedstawiono na rys. 4. Zaprezentowane w pracy wyniki badań jednoznacznie wskazują na występowanie reakcji chemicznej tworzenia kruchej fazy Al₄C₃ (1) podczas spiekania FAST/SPS w temperaturze 600°C, podczas gdy spiekanie w temperaturze 580°C nie prowadzi do utworzenia tej fazy.



Tak więc staranna kontrola procesu FAST/SPS pozwala sterować reakcjami spiekania, aby zapobiegać tworzeniu się niepożądanych faz w przeciwieństwie do odlewania lub innych technologii [21].



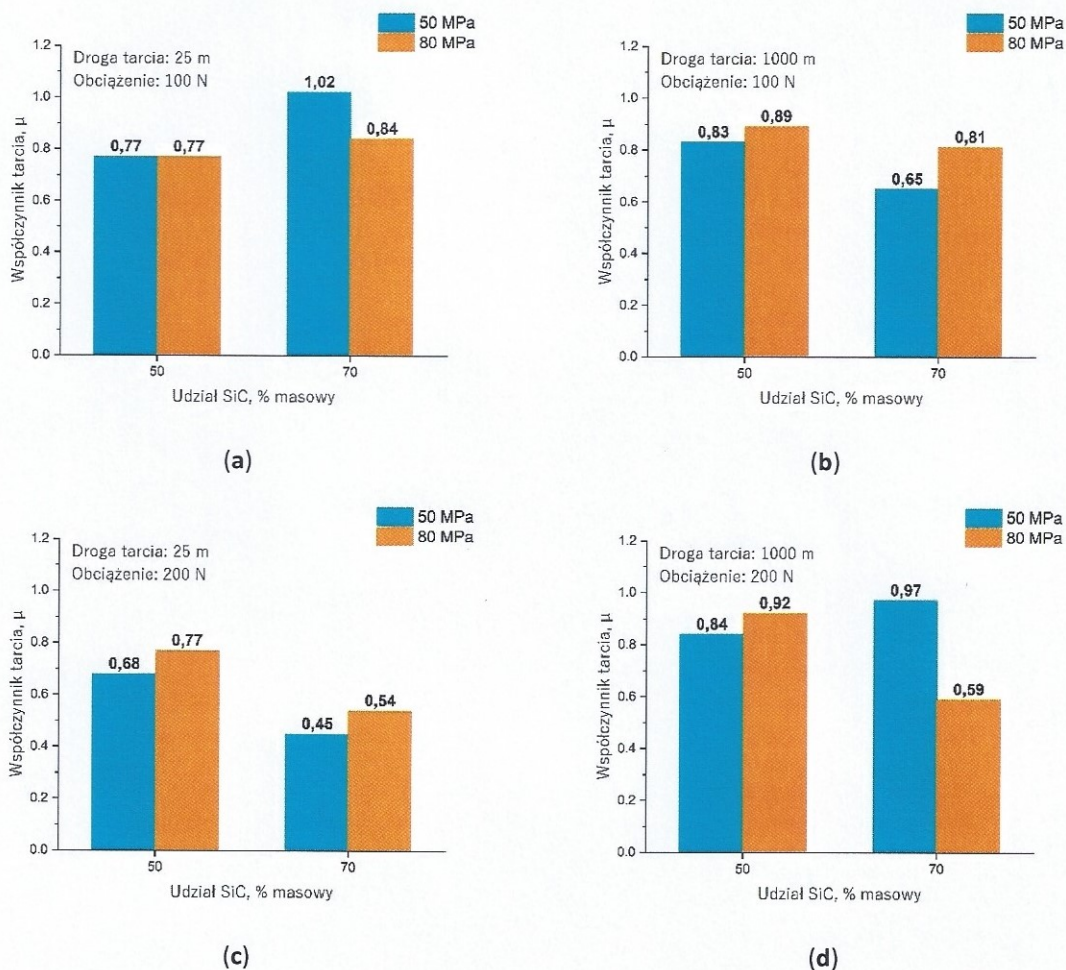
Rys. 4. Mikrostruktura kompozytu Al-10SiC spiekane w temperaturze 600°C (a) z widoczną siatką nanometrycznego Al_2O_3 i (b) fazą Al_4C_3 ; TEM [H5]

Wytworzone kompozyty charakteryzowały się szeregiem korzystnych właściwości mechanicznych. Odnotowano znaczący wpływ temperatury spiekania na twardość badanych kompozytów, gdyż jej zwiększenie o 20°C, z 580 do 600°C, spowodowało prawie dwukrotny wzrost twardości. W przypadku kompozytów z 10 i 20% zawartością SiC twardość wzrosła od 31 HB 2,5/62,5 (spiek Al) do odpowiednio 52 i 55 HB 2,5/62,5. W przypadku kompozytów z 30% zawartością SiC nie wykazano istotnego wpływu temperatury spiekania na przyrost twardości. Kompozyty te charakteryzują się jednocześnie najmniejszą wytrzymałością na zginanie w zakresie 78–89 MPa, co w porównaniu do wytrzymałości na zginanie spieków z proszku Al na poziomie 225 MPa jest niską wartością. Największą wytrzymałością na zginanie odznaczają się kompozyty z 10 i 20% zawartością SiC, które jednocześnie mają największą twardość. Wytrzymałość na rozciąganie tych materiałów wynosi odpowiednio 328 i 331 MPa.

W kolejnym kroku, wraz ze współautorami, zdecydowaliśmy się na próbę wytworzenia kompozytów o zdecydowanie wyższej zawartości fazy wzmacniającej wynoszącej 50 i 70% mas. SiC. Dostępna literatura jest stosunkowo uboga w informacje o właściwościach tego typu kompozytów wytwarzanych techniką FAST/SPS, w szczególności właściwości tribologicznych. Wyniki naszych badań zostały przedstawione w pracy [H7]. Kompozyty wytworzyłem techniką FAST/SPS, stosując spiekanie w temperaturze 600°C z jednoczesnym ciśnieniem prasowania wynoszącym 50 i 80 MPa. W efekcie uzyskałem kompozyty o gęstości w zakresie 99,41–99,63% dla 50% zawartości SiC i 90,68–92,72% dla 70% zawartości SiC, w zależności od ciśnienia prasowania. Wzrost ciśnienia prasowania z 50 do 80 MPa spowodował nieznaczny przyrost gęstości spieków. Uzyskane wyniki pomiarów gęstości jednoznacznie wykazały, że wzrost ciśnienia prasowania nie jest na tyle istotny w przypadku techniki FAST/SPS, co wzrost temperatury spiekania. Wytworzone kompozyty odznaczają się zdecydowanie większą twardością niż te omówione w pracy [H5]. Twardość kompozytów Al-50SiC wynosi odpowiednio 80 i 89 HB 2,5/62,5 dla ciśnienia prasowania wynoszącego 50 i 80 MPa. W przypadku kompozytów Al-70SiC, twardość jest niższa przy ciśnieniu prasowania wynoszącym 50 MPa i wynosi 65 HB 2,5/62,5. Jest to wynik znacznej porowatości tych kompozytów, wynoszącej blisko 10%. W przypadku spieków wytworzonych przy ciśnieniu prasowania wynoszącym 80 MPa porowatość wynosi ponad 7% i kompozyt ten odznacza się praktycznie taką samą twardością wynoszącą 88 HB 2,5/62,5 jak kompozyt Al-50SiC. Związane jest

to z dwoma czynnikami, które w tym przypadku się wzajemnie kompensują. Zwiększenie udziału twardej fazy ceramicznej z 50 do 70% spowodowało zwiększenie twardości kompozytu, z kolei większa porowatość wpływa na zmniejszenie twardości. W efekcie kompozyty Al-50SiC i Al-70SiC spiekane przy ciśnieniu prasowania wynoszącym 80 MPa charakteryzują się taką samą twardością wynoszącą 88–89 HB 2,5/62,5, przy czym porowatość w tym pierwszym wynosi zaledwie 0,4%, a w drugim już 7,3%.

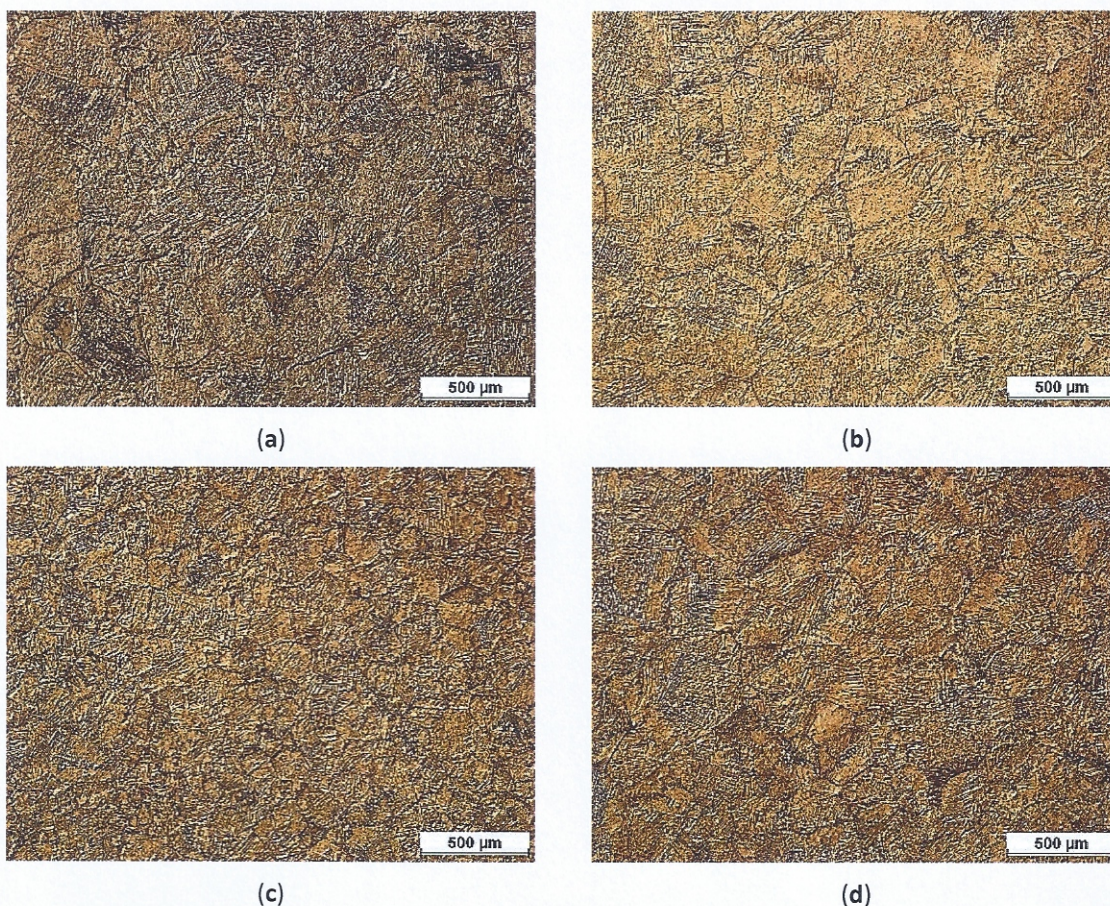
W przypadku właściwości tribologicznych wykazano znaczące różnice w wartościach współczynnika tarcia (rys. 5), w szczególności w okresie dotarcia kompozytu Al-70SiC spiekanego przy ciśnieniu prasowania wynoszącym 50 MPa. W początkowym przebiegu tarcia, zmiana współczynnika tarcia zależała od przyłożonego obciążenia. Z kolei w przypadku kompozytów spiekanych przy ciśnieniu prasowania wynoszącym 80 MPa wartości współczynnika tarcia stabilizowały się szybciej. Wyznaczona wartość współczynnika tarcia była w przeważającej części wyższa w przypadku kompozytów z mniejszą zawartością SiC, co wynikało bezpośrednio z roli osnowy aluminiowej w procesie tarcia. Obecność większej liczby cząstek Al w węźle tarcia zmieniała mechanizm tarcia, powodując zwiększenie roli adhezji w zużyciu, co skutkowało zwiększeniem wartości współczynnika tarcia w czasie testu na drodze 1000 m.



Rys. 5. Wartości współczynnika tarcia przy obciążeniu: (a, b) 100 N i (c, d) 200 N [H7]

Wyniki badań drugiej grupy materiałów przedstawiono w pracach [H2, H4, H6, H8].

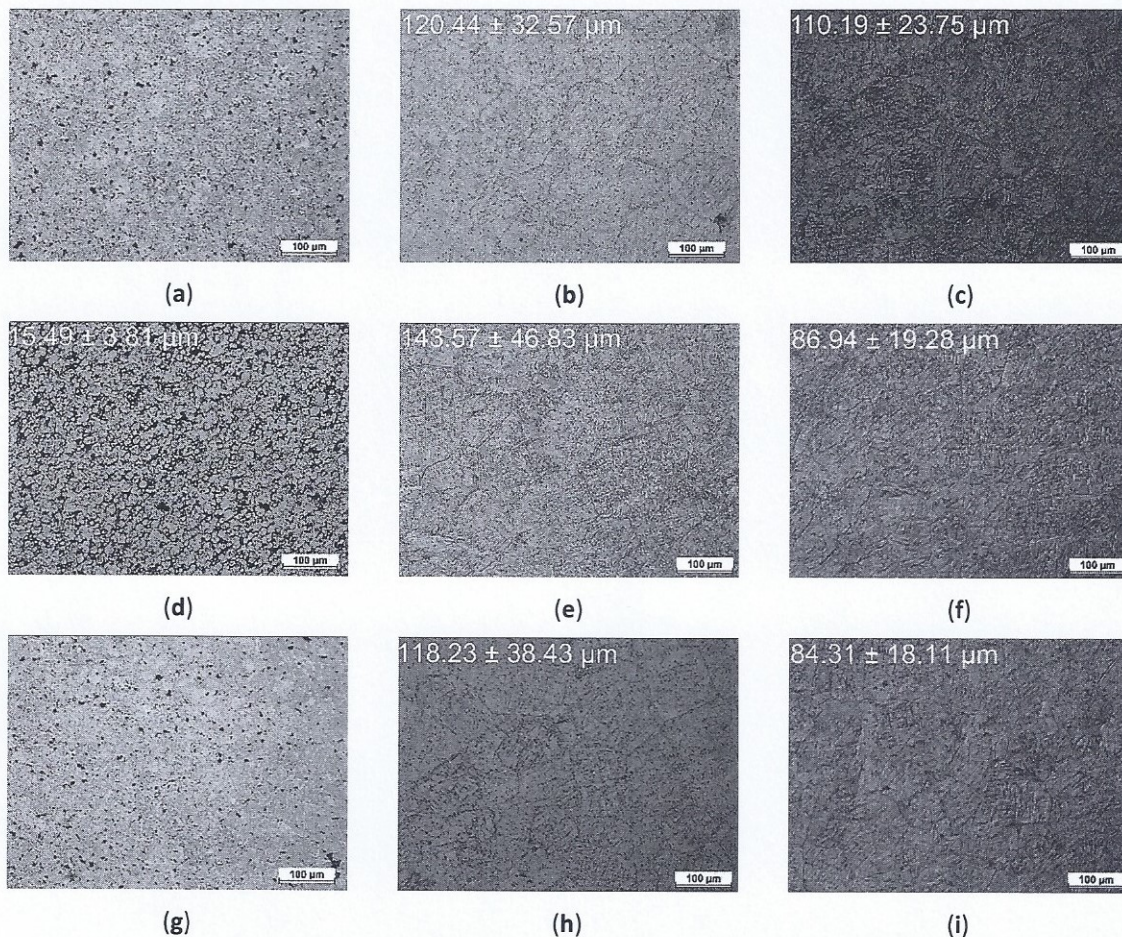
Do badań wybrałem stop Ti6Al4V ze względu na jego szerokie zastosowanie przy produkcji implantów i kompozytów. Stop Ti6Al4V wytworzyłem przy zastosowaniu temperatury spiekania w zakresie 1000–1300°C, czyli powyżej temperatury przemiany α -Ti \leftrightarrow β -Ti oraz różnego ciśnienia prasowania i szybkości nagrzewania. Wyniki tych badań przedstawiłem w pracach [H2, H4]. W technice FAST/SPS nagrzewanie odbywa się z jednoczesnym prasowaniem, co skutkuje zagęszczaniem materiałów proszkowych. Udowodniono także, że nagrzewanie ciepłem Joule'a może prowadzić do dalszego zagęszczenia spieków w wyniku lokalnego plastycznego płynięcia materiału w szybkach pomiędzy połączonymi cząstkami proszków [22]. Z kolei wysoka temperatura spiekania jest niezbędna do uzyskania jednorodnej mikrostruktury w stopach Ti ze względu na konieczność dyfuzji pierwiastków stopowych, co powoduje wzrost wielkości ziaren. Dlatego istotnym elementem obu prac jest wykazanie wpływu ciśnienia prasowania na powstającą mikrostrukturę stopu Ti6Al4V (rys. 6 i 7). Jak wykazałem, rozrost ziaren Ti związany jest ze wzrostem ciśnienia prasowania do wartości 25 i 50 MPa, niezależnie od wielkości cząstek proszku (1–15 μm [H4] i 20–63 μm [H2]), zastosowanej temperatury spiekania (1000°C [H4], 1200 i 1300°C [H2]) czy szybkości nagrzewania (100°C/min [H2], 200, 300 i 400°C/min [H4]). Zjawisko to ma swoją podstawę w mechanizmie procesu FAST/SPS. W przypadku zastosowania niskiego ciśnienia prasowania (5 MPa) wyładowania elektryczne pomiędzy cząstkami proszku dominują przez cały czas trwania procesu, w przeciwieństwie do wyższego ciśnienia prasowania (>25 MPa), gdzie wyładowania elektryczne są dominujące tylko we wczesnym etapie. Zastosowanie wyższego ciśnienia prasowania wspomaga zagęszczanie podczas nagrzewania i szybsze tworzenie się szybek, co prowadzi do stopniowego tłumienia wyładowań elektrycznych na korzyść efektu Joule'a, który wzmacnia dyfuzję, a w konsekwencji doprowadza do rozrostu ziaren. W pracy [H2], gdzie wielkość cząstek proszku stopu Ti6Al4V mieściła się w zakresie 20–63 μm , wielkość ziaren w próbkach spiekanych przy ciśnieniu prasowania wynoszącym 25 MPa wynosi ok. 500 μm . Zwiększenie temperatury spiekania od 1200 do 1300°C nie spowodowało znacznego zwiększenia wielkości ziaren. W przypadku próbek spiekanych przy ciśnieniu prasowania wynoszącym 50 MPa wielkość ziaren jest mniejsza, szczególnie w temperaturze 1200°C. Wyniki badań sugerują, że efekt ten wynika z różnicy wartości współczynników dyfuzji, określających strumień dyfuzji pomiędzy cząstkami proszku, zależnych od właściwości proszku, drogi spiekania i szczególnie przyłożonego ciśnienia prasowania, co przedstawiono w pracy [23]. Te badania wykazały, że przyłożone ciśnienie prasowania może przyspieszyć dyfuzję atomów i sprzyjać zagęszczeniu proszków oraz rozrostowi ziaren dzięki zwiększonemu strumieniowi dyfuzji między cząstkami proszku.



Rys. 6. Mikrostruktura stopu Ti6Al4V spiekanego w temperaturze i przy ciśnieniu prasowania wynoszącym: (a) 1200°C i 25 MPa, (b) 1300°C i 25 MPa, (c) 1200°C i 50 MPa, (d) 1300°C i 50 MPa; LM [H2]

Z kolei w pracy [H4] – ze względu na brak wyraźnie widocznych granic ziaren w próbkach spiekanych przy ciśnieniu prasowania wynoszącym 5 MPa, przy szybkościach nagrzewania wynoszących 200 i 400°C/min – pomiar uziarnienia nie był możliwy. Jedynie w próbce o najniższej gęstości względnej, spiekanej przy szybkości nagrzewania wynoszącej 300°C/min, można było dokonać pomiaru średniej wielkości ziaren, która wyniosła 15 µm. W próbkach spiekanych przy ciśnieniu prasowania wynoszącym 50 MPa, wielkość ziaren zmieniała się w zakresie 84–110 µm, w przeciwieństwie do tych spiekanych przy ciśnieniu prasowania wynoszącym 25 MPa, gdzie rozmiary ziaren mieszczą się w zakresie 118–144 µm (rys. 7). Oznacza to, że nagrzewanie ciepłem Joule'a dominuje podczas spiekania proszku Ti6Al4V. W efekcie mechanizmy zagęszczenia i tworzenia mikrostruktury są zintensyfikowane w wyniku odkształceń plastycznych w podwyższonej temperaturze [24]. Skutkuje to zwiększoną dyfuzją i wpływa na zmniejszenie porowatości oraz zwiększenie wielkości ziaren stopu Ti6Al4V. Podsumowując, wpływ ciśnienia prasowania oraz szybkości nagrzewania na kinetykę rekrytalizacji (statycznej i dynamicznej) powinien być uwzględniany przy ustalaniu parametrów procesu FAST/SPS przy wytwarzaniu m.in. implantów. Mając na uwadze potencjalne zastosowanie stopów Ti na implanty, w pracy [H2] przeprowadzono testy tribologiczne w warunkach tarcia suchego w układzie rolka-kłosek oraz w środowisku surowicy bydłowej w układzie trzpień-tarcza (warunki zbliżone do panujących w organizmie człowieka). W wyniku przeprowadzonych badań wykazano, że w warunkach tarcia suchego przy współpracy z przeciwpróbką wykonaną ze stali 100Cr6, najmniejszym zużyciem

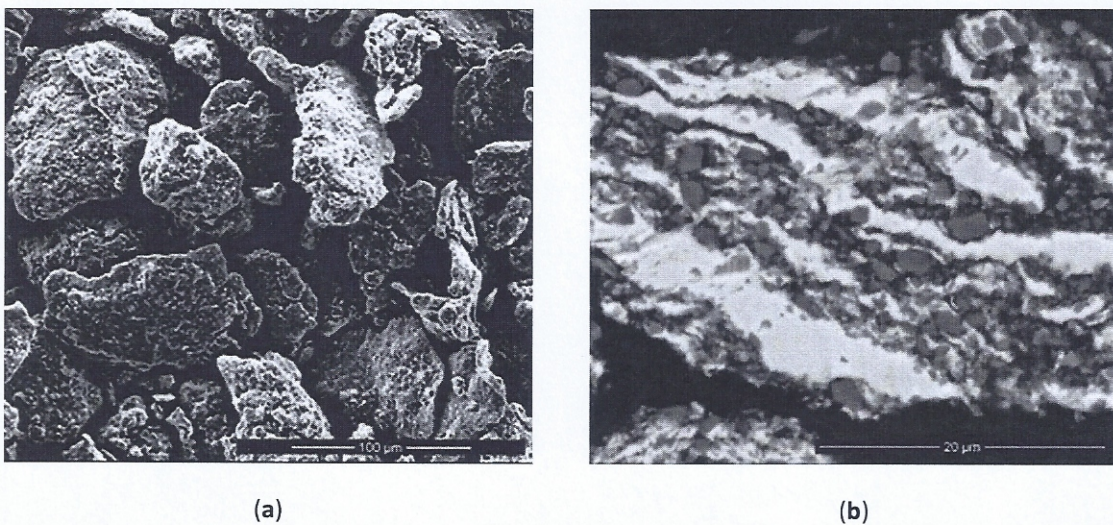
charakteryzują się próbki ze spieków wytworzonych w temperaturze 1300°C i przy ciśnieniu prasowania wynoszącym 50 MPa. Z kolei największym zużyciem odznaczały się próbki ze spieków wytworzonych w 1200°C i 25 MPa. Mniejsze zużycie jest najprawdopodobniej związane z większą zawartością fazy β -Ti w mikrostrukturze spieków. Ilość tej fazy zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury spiekania i ciśnienia prasowania, co potwierdzono w badaniu XRD. Próbki ze spieku wytworzonego w 1300°C i 50 MPa testowano we współpracy z polietylenem o ultrawysokiej masie cząsteczkowej (UHMWPE) w środowisku surowicy bydlęcej w temperaturze 37°C. W przypadku tego materiału uzyskano podobne zużycie jak w przypadku komercyjnie dostępnego stopu Ti6Al4V. Średnie zużycie próbek ze spieku stopu Ti6Al4V wynosiło 0,072 mg, natomiast średnie zużycie próbek wykonanych z pręta stopu Ti6Al4V wynosiło 0,069 mg. Istotne zmiany zauważono w wartościach współczynnika tarcia. W przypadku próbek ze spieków wartości współczynnika tarcia były niższe (0,039–0,041) niż w przypadku próbek z pręta (0,052–0,063), co z aplikacyjnego punktu widzenia stanowi o wyższości spieków ze stopu Ti6Al4V wytworzonych techniką FAST/SPS.



Rys. 7. Mikrostruktura stopu Ti6Al4V spiekanego w temperaturze 1000°C z szybkością nagrzewania i ciśnieniem prasowania wynoszącym: (a) 200°C/min i 5 MPa, (b) 200°C/min i 25 MPa, (c) 200°C/min i 50 MPa, (d) 300°C/min i 5 MPa, (e) 300°C/min i 25 MPa, (f) 300°C/min i 50 MPa, (g) 400°C/min i 5MPa, (h) 400°C/min i 25 MPa, (i) 400°C/min i 50 MPa, LM [H4]

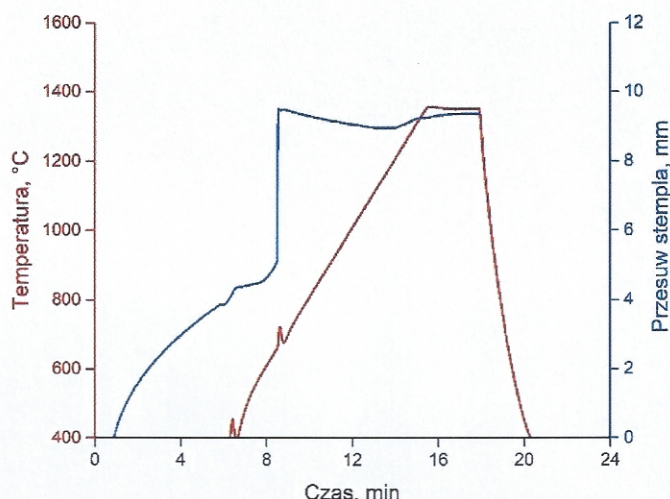
W pracy [H6], która jest wynikiem badań wykonanych w ramach projektu międzynarodowego współfinansowanego z 7 PR UE pt. „Pilot manufacturing line for production of highly innovative materials (PilotManu)”, bazując na proszku kompozytowym opracowanym i dostarczony przez

koordynatora projektu – włoską firmę MBN Nanomaterialia S.p.A., dokonałem doboru i oceny wpływu parametrów procesu FAST/SPS, takich jak: temperatura i czas spiekania na przebieg procesu spiekania i powstałą w jego wyniku mikrostrukturę spieku, co determinowało zmiany właściwości mechanicznych, takich jak: twardość i odporność na kruche pękanie. Ponadto na podstawie pomiarów twardości wykonywanych przy względnie niskim obciążeniu w poszczególnych fazach możliwe było określenie wpływu wielkości wgłębienia na uzyskaną twardość (ang. *Indentation Size Effect, ISE*). Materiałem wyjściowym był proszek kompozytowy Ti/SiC o udziale objętościowym SiC wynoszącym 50% wytworzony metodą HEBM. Badania XRD wytworzonego proszku wykazały obecność dwóch faz: Ti i SiC, zatem – poza utworzeniem podczas mielenia aglomeratów składających się z cząstek SiC w tytanowej osnowie – nie utworzyły się żadne nowe fazy. Morfologię uzyskanego proszku oraz jego mikrostrukturę przedstawiono na rys. 8. Na rys. 8b widoczne są wyraźnie cząstki SiC (szara faza) w tytanowej osnowie (biała faza).



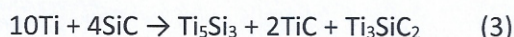
Rys. 8. Obrazy proszku Ti/SiC wytworzonego metodą HEBM: (a) morfologia, (b) mikrostruktura; SEM [H6]

Proszek kompozytowy poddany został spiekanu techniką FAST/SPS. Procesy spiekania wykonałem w temperaturze spiekania wynoszącej odpowiednio 1350, 1400 i 1450°C. W wyniku spiekania reaktywnego uzyskałem materiał kompozytowy ze znacznym udziałem zsyntetyzowanej fazy MAX z układu Ti-Si-C, jaką jest Ti_3SiC_2 , oraz z dodatkowymi fazami, takimi jak TiC, SiC oraz Ti_5Si_3 . Analizując przebieg procesu FAST/SPS dowiodłem wystąpienia podczas nagrzewania, w temperaturze ok. 700°C, samorozwijającej się syntezy wysokotemperaturowej (ang. *Self-propagating High-temperature Synthesis, SHS*), co widoczne jest na rys. 9. Wraz z nagłym wzrostem temperatury nastąpił gwałtowny przesuw stempla w kierunku dolnym, świadczący o skurczu spieku.



Rys. 9. Zależność temperatury i przesuwu stempla od czasu spiekania proszku Ti/SiC techniką FAST/SPS w temperaturze 1400°C [H6]

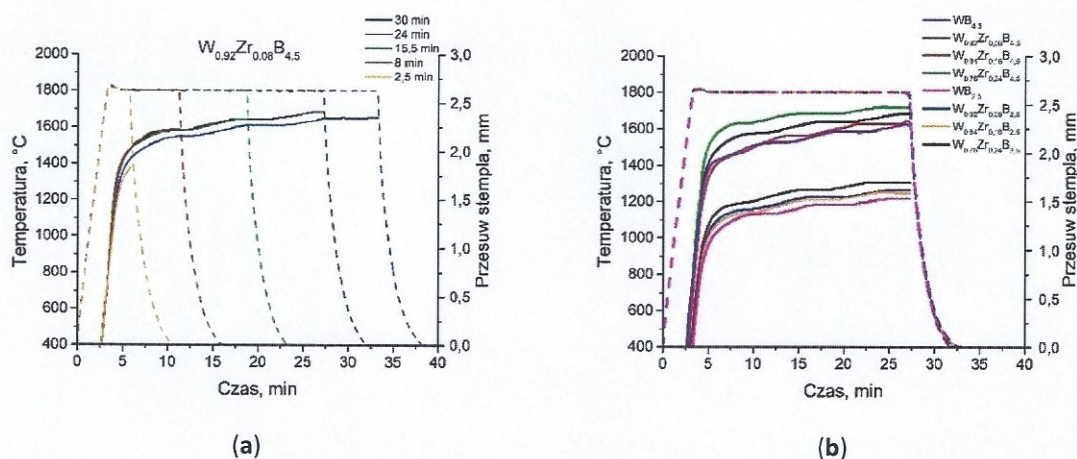
Co istotne, zwiększenie temperatury spiekania z 1350 do 1450°C spowodowało rozrost ziaren fazy MAX. W prowadzonych badaniach wykazałem, że wewnątrz dyfuzja atomów w danych fazach, a także na granicach faz znacząco determinuje właściwości spieków. Powstająca „in situ” cienka warstwa składająca się z fazy TiC oraz Ti_5Si_3 na granicy faz Ti + SiC stanowi barierę dla dyfuzji atomów Si do tytanowej osnowy, przy czym wykazałem dyfuzję atomów Ti do dużych cząstek SiC w analizowanym układzie. Na bazie pracy Gotmana i in. [25] wskazałem najbardziej prawdopodobne reakcje (2–6) zachodzące w spiekany układzie:



Ważnym elementem prowadzonych przeze mnie badań było określenie odkształcenia poszczególnych faz w badanych kompozytach na podstawie analizy ISE. Wykazałem, że ISE w nanoskali wynika ze zmiany gęstości geometrycznie niezbędnych dyslokacji (ang. *Geometrically Necessary Dislocations, GNDs*) w fazie MAX Ti_3SiC_2 , co jest zgodne z teorią plastyczności gradientu odkształcenia (ang. *Strain Gradient Plasticity, SGP*). Pozostałe fazy TiC + Ti_5Si_3 oraz SiC nie wykazują właściwości odkształceniowych w oparciu o teorię SGP i odznaczają się niską odpornością na pękanie. Tak więc dalszy rozwój kompozytów na bazie fazy MAX Ti_3SiC_2 będzie prowadzony w kierunku uzyskania mikrostruktury warstwowej fazy MAX o względnie dużej czystości, która charakteryzuje się unikalną podatnością do obróbki mechanicznej oraz korzystnymi właściwościami samosmarnymi [26]. Biorąc pod uwagę korzystny zestaw właściwości, jakimi wykazują się fazy MAX, w szczególności ich stabilność w wysokiej temperaturze, odporność na szok termiczny, dobrą skrawalność oraz znaczącą odporność na utlenianie, rozwój syntezy FAST/SPS w oparciu o opisane powyżej nowe i unikalne wyniki badań będzie kontynuowany przeze mnie w przyszłych pracach.

W efekcie prac badawczych procesu syntezy elementarnych proszków W, B i Zr na drodze spiekania reaktywnego celem wytworzenia ceramicznych spieków z borków wolframu domieszkowanych Zr, w pracy [H8] zaprezentowałem wyniki badań dotyczące syntezy, ewolucji mikrostruktury i właściwości mechanicznych oraz tribologicznych spieków ceramicznych na bazie borków wolframu. Zaprezentowane w tej pracy badania są nowatorskie i nie były do tej pory przez nikogo publikowane, zarówno w zakresie rozwiązania materiałowego, jak i zastosowanej techniki wytwarzania. Z aplikacyjnego punktu widzenia materiały ceramiczne na bazie borków wolframu, dzięki szeregowi korzystnych właściwości, takich jak wysoka twardość i odporność na zużycie przez tarcie, są istotnymi kandydatami do stosowania ich na powłoki w matrycach do wyciskania, kucia czy ciągnięcia. Podjąłem się zatem zadania syntezy spieków ceramicznych na bazie borków wolframu techniką FAST/SPS, które – oprócz bardzo korzystnych właściwości jako materiał lity – będą również wykorzystywane jako tarcze z materiałów niedostępnych komercyjnie do osadzania cienkich powłok metodą rozpylania magnetronowego (ang. *Magnetron Sputtering, MS*).

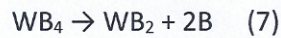
W wyniku mieszania proszków wyjściowych o odpowiednio dobranym udziale masowym, przygotowane mieszaniny proszkowe spiekaniem techniką FAST/SPS. Spiekanie rozpocząłem od długiego czasu spiekania dla materiału $W_{0,92}Zr_{0,08}B_{4,5}$, wynoszącego 30 min, celem optymalizacji czasu spiekania. Na podstawie uzyskanych danych, skorelowanych z wynikami pomiarów gęstości, wyznaczyłem czasy spiekania wynoszące 2,5, 8, 15,5 i 24 min. Zaproponowane czasy spiekania związane są z poszczególnymi etapami wygrzewania w temperaturze spiekania, w których w wyniku reakcji następowała zmiana składu fazowego. Obszary, w których krzywa przesuwu górnego stempla osiągnęła plateau oznaczają, że w danych warunkach spiekania materiał został zagęszczony (rys. 10). W wyniku przeprowadzonych analiz wykazałem, że zwiększenie czasu spiekania z 24 do 30 min nie powodowało żadnych zmian położenia stempla. W dalszych badaniach stosowałem czas spiekania wynoszący 24 min, co jest związane z niższymi kosztami realizacji procesu spiekania.



Rys. 10. Krzywe spiekania (a) spieków $W_{0,92}Zr_{0,08}B_{4,5}$ wytworzonych przy różnym czasie spiekania oraz (b) spieków $W_{1-x}Zr_xB_{2,5}$ i $W_{1-x}Zr_xB_{4,5}$ ($0 < x \leq 0,24$) spiekanych w czasie 24 min [H8]

W wyniku przeprowadzenia badań materiałowych wykazałem, że ilość B i Zr wpływa na konsolidację mieszanin proszkowych podczas procesu FAST/SPS. Wraz ze wzrostem zawartości Zr zaobserwowałem zmniejszenie gęstości pozornej spieków. Spieki, w których zawartość B była

większa, odznaczały się mniejszą gęstością pozorną, co wynika bezpośrednio z ich gęstości. B ma znacznie niższą gęstość ($2,08 \text{ g/cm}^3$) niż W ($19,28 \text{ g/cm}^3$) i Zr ($6,49 \text{ g/cm}^3$). Wraz z wydłużeniem czasu spiekania ($>9 \text{ min}$) zaobserwowałem dwa okresy spiekania reaktywnego, podczas których następowała dekompozycja zsyntetyzowanej fazy WB_4 , wg reakcji (7):



Pomimo zastosowania relatywnie wysokiej temperatury spiekania wynoszącej 1800°C , czyli powyżej temperatury występowania WB_4 , w mikrostrukturze wytworzonych spieków faza ta była cały czas obecna. Jest to wynikiem nie tylko domieszkowania Zr i nadstechiometrii B (B at./ (W+Zr) at. = 4,5), ale także szybkiego nagrzewania (400°C/min) i relatywnie krótkiego czasu spiekania ($>2,5 \text{ min}$), co jest niewątpliwą zaletą techniki FAST/SPS. Wraz z wydłużeniem czasu spiekania, ilość WB_4 ulegała zmniejszeniu, aczkolwiek dalej była wykrywalna w badaniu XRD. Innym ważnym wnioskiem z przeprowadzonych badań jest zależność pomiędzy ilością Zr i twardością. W przypadku spieków z większą zawartością B (B at./ (W+Zr) at. = 4,5), wyższa zawartość Zr spowodowała zmniejszenie twardości od 26,6 do 11,9 GPa. Odwrotną zależność zaobserwowano w przypadku mniejszej zawartości B (B at./ (W+Zr) at. = 2,5), gdzie z kolei twardość wzrosła z 15,0 do 24,8 GPa. Badane materiały poddano także testom tribologicznym. Przeprowadzone testy wykazały, że nowe materiały charakteryzują się wskaźnikiem zużycia (ang. *Specific Wear Rate, SWR*) w zakresie od $1 \cdot 10^{-6}$ – $3 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$. Co ważne z aplikacyjnego punktu widzenia, w węźle tarcia powstaje film smarujący z B, który odgrywa rolę smaru stałego. Oznacza to, że opracowane nowe materiały ceramiczne na bazie borków wolframu, mogą być stosowane na części maszyn pracujące w trudnych warunkach eksploatacyjnych. Ponadto zmierzono przewodność elektryczną nowo opracowanych materiałów, która wynosi od 2,57 do $3,96 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ dla materiałów z większą zawartością B, zatem jest porównywalna z przewodnością elektryczną węglików spiekanych typu WC-Co ($4,76 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ [27]). Dzięki temu nowe materiały mogą być obrabiane metodą elektroerozyjną (ang. *Electrical Discharge Machining, EDM*), co potwierdzono w warunkach laboratoryjnych.

Podsumowanie

Jak wykazałem w niniejszym autoreferacie, technika FAST/SPS jest wysoce skuteczna w zakresie wytwarzania w stosunkowo krótkim czasie szerokiej grupy materiałów, w szczególności metali lekkich (Mg), stopów metali lekkich (AA7075, Ti6Al4V) i kompozytów na osnowie metali lekkich (Mg-SiC, Al-SiC) oraz materiałów twardych (Ti-SiC, W-Zr-B). Podstawą wyboru materiałów badawczych, głównie materiałów lekkich, były aplikacyjne oczekiwania dotyczące zarówno dużej twardości, wytrzymałości, odporności na zużycie przez tarcie, jak i możliwości ich dalszej obróbki (plastycznej, mechanicznej).

Wytwarzane techniką FAST/SPS stopy metali lekkich i kompozyty na ich osnowie odznaczają się szeregiem korzystnych właściwości mechanicznych i tribologicznych. Uzyskane półprodukty mogą być wyciskane metodami SPD (KOB0) celem wytwarzania profili czy też komponentów o ulepszonych właściwościach w stosunku do tradycyjnych technologii wytwarzania. Szeroko rozpowszechniony w technice stop Ti6Al4V wymaga uważnego doboru parametrów procesu FAST/SPS, takich jak ciśnienie prasowania i szybkość nagrzewania z uwagi na kinetykę

rekrytalizacji. Otrzymywanie i rozwój kompozytów na bazie faz MAX z układu Ti-Si-C jest jednym z wysoce obiecujących wątków tematycznych w inżynierii materiałowej ze względu na unikalne właściwości tych materiałów. Stąd też mój wkład w badania podstawowe na rzecz wyjaśnienia mechanizmu procesów zachodzących w warunkach spiekania proszków z układu Ti/SiC techniką FAST/SPS celem wytwarzania kompozytów na osnowie fazy MAX Ti_3SiC_2 . Innym, równie ważnym wątkiem tematycznym w inżynierii materiałowej są badania dotyczące borków wolframu domieszkowanych metalami przejściowymi. Dzięki połączeniu techniki FAST/SPS z technikami PVD, możliwe będzie wytwarzanie nowej generacji powłok o dużej twardości i odporności za zużycie przez tarcie do zastosowania m.in. w narzędziach do obróbki plastycznej.

Na podstawie przeprowadzonych badań określiłem także:

- zależność twardości, wytrzymałości na ściskanie i plastyczności od udziału SiC w kompozytach z układu Mg-SiC,
- zależność twardości, wytrzymałości na rozciąganie oraz ściskanie i plastyczności od temperatury i czasu spiekania stopu AA7075,
- warunki występowania reakcji tworzenia fazy Al_4C_3 podczas spiekania w temperaturze $600^\circ C$ w kompozytach z układu Al-SiC,
- wpływ szybkości nagrzewania i ciśnienia prasowania na kinetykę rekrytalizacji (statycznej i dynamicznej) stopu Ti6Al4V,
- temperaturę występowania reakcji SHS oraz reakcje chemiczne prowadzące do utworzenia fazy MAX Ti_3SiC_2 , TiC i Ti_5Si_3 , przy spiekaniu kompozytów z układu Ti-Si-C,
- wpływ parametrów spiekania na dekompozycję fazy WB_4 do WB_2 i zdefiniowałem wpływ B na mały wskaźnik zużycia wynikający z powstania filmu smarującego.

W wyniku przeprowadzonych badań wykazałem, że dalsze prace powinny dotyczyć łączenia techniki FAST/SPS z wyciskaniem KOBO celem wykonywania profili z kompozytów z układu Mg-SiC i Al-SiC. Innym obszarem wartym dalszych badań jest modyfikacja składu chemicznego proszków kompozytowych z układu Ti-Si-C. W efekcie możliwa będzie synteza, na drodze spiekania reaktywnego FAST/SPS, fazy MAX Ti_3SiC_2 ze znacząco zmniejszonym udziałem faz SiC, TiC i Ti_5Si_3 , które utrudniają obróbkę mechaniczną wytworzonych spieków z wykorzystaniem klasycznych narzędzi z węglików spiekanych. Ponadto koszt proszku fazy MAX Ti_3SiC_2 jest ok. dziesięciokrotnie większy niż koszt proszku kompozytowego Ti/SiC, zatem z ekonomicznego punktu widzenia dalsze prowadzenie badań w tym obszarze także wydaje się wskazane. Z kolei dalsze badania nad twardymi materiałami na bazie borków wolframu syntetyzowanymi techniką FAST/SPS powinny dotyczyć wykorzystania innych metali przejściowych niż Zr, np. Ti, Re, Mo, Cr do wytwarzania kompozytów o twardości przekraczającej 20 GPa i małej odporności za zużycie przez tarcie.

Wskazane przeze mnie prace są obecnie realizowane przez zespół badawczy, któremu przewodzę. Wszystkie one mieszczą się w obszarze aktualnych trendów rozwojowych w inżynierii materiałowej. Lekkie i wytrzymałe materiały konstrukcyjne stanowią odpowiedź na oczekiwania inżynierów wynikające z konieczności stosowania nowoczesnego podejścia w duchu zrównoważonego rozwoju (ang. *eco-design*), umożliwiającego ocenę ekologiczną projektowanych konstrukcji z uwzględnieniem oceny śladu węglowego, możliwości recyklingu, użycia materiałów przyjaznych środowisku, efektywności energetycznej. Opracowane przeze mnie materiały mogą

być z powodzeniem stosowane w wielu gałęziach przemysłu: od przemysłu maszynowego i narzędziowego, po przemysł motoryzacyjny, lotniczy oraz kosmiczny. W porównaniu do innych technik wytwarzania technika FAST/SPS ze względu na krótki czas trwania procesu, a tym samym mniejsze zużycie energii i w konsekwencji mniejsze zanieczyszczenie środowiska naturalnego, staje się coraz atrakcyjniejsza dla przemysłu wysokich technologii.

Bibliografia

- [1] <https://www.scopus.com> (25.02.2021)
- [2] G.F. Taylor: Apparatus for making hard metal compositions, patent nr 1896854, USA, 1933
- [3] G.D. Cremer: Sintering together powders metals such as bronze, brass or aluminum, patent nr 2355954, USA, 1944
- [4] I. Kiyoshi: Electric-discharge sintering, patent nr 3241956, Japonia, 1966
- [5] I. Kiyoshi: Apparatus for electrically sintering discrete bodies, patent nr 3250892, Japonia, 1966
- [6] M. Tokita: Spark Plasma Sintering (SPS) Method, Systems, and Applications, Handbook of Advanced Ceramics (Second Edition), Academic Press, Oxford, 2013, s. 1149–1177
- [7] O. Guillon, J. Gonzalez-Julian, B. Dargatz, T. Kessel, G. Schierning, J. Räthel, M. Herrmann: Field-Assisted Sintering Technology/Spark Plasma Sintering: Mechanisms, Materials, and Technology Developments, *Advanced Engineering Materials*, vol. 16, nr 7, 2014, s. 830–849
- [8] J. Trapp, B. Kieback: Fundamental principles of spark plasma sintering of metals: part I – Joule heating controlled by the evolution of powder resistivity and local current densities, *Powder Metallurgy*, vol. 62, nr 5, 2019, s. 297–306
- [9] R. Orrù, R. Licheri, A.M. Locci, A. Cincotti, G. Cao: Consolidation/synthesis of materials by electric current activated/assisted sintering, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 63, nr 4, 2009, s. 127–287
- [10] R.M. German: Thermodynamic and Kinetic Treatments, *Sintering: From Empirical Observations to Scientific Principles*, Butterworth-Heinemann, Boston, 2014, s. 183–226
- [11] Z.A. Munir, U. Anselmi-Tamburini, M. Ohyanagi: The effect of electric field and pressure on the synthesis and consolidation of materials: A review of the spark plasma sintering method, *Journal of Materials Science*, vol. 41, nr 3, 2006, s. 763–777
- [12] M.U.F. Khan, A. Patil, J. Christudasjustus, T. Borkar, R.K. Gupta: Spark plasma sintering of a high-energy ball milled Mg-10 wt% Al alloy, *Journal of Magnesium and Alloys*, vol. 8, nr 2, 2020, s. 319–328
- [13] R.K. Gupta, D. Fabijanac, T. Dorin, Y. Qiu, J.T. Wang, N. Birbilis: Simultaneous improvement in the strength and corrosion resistance of Al via high-energy ball milling and Cr alloying, *Materials & Design*, 84, 2015, s. 270–276
- [14] P. Zhou, S. Zhang, M. Li, H. Wang, W. Cheng, L. Wang, H. Li, W. Liang, Y. Liu: The creep behavior of Mg-9Al-1Si-1SiC composite at elevated temperature, *Journal of Magnesium and Alloys*, vol. 8, nr 3, 2020, s. 944–951

- [15] A.D.P. LaDelpha, H. Neubing, D.P. Bishop: Metallurgical assessment of an emerging Al-Zn-Mg-Cu P/M alloy, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 520, nr 1, 2009, s. 105–113
- [16] S. Rudinsky, J.M. Aguirre, G. Sweet, J. Milligan, D.P. Bishop, M. Brochu: Spark plasma sintering of an Al-based powder blend, *Materials Science and Engineering: A*, 621, 2015, s. 18–27
- [17] S. Rudinsky, P. Hendrickx, D.P. Bishop, M. Brochu: Spark plasma sintering and age hardening of an Al-Zn-Mg alloy powder blend, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 650, 2016, s. 129–138
- [18] M.M. Tünçay, J.A. Muñiz-Lerma, D.P. Bishop, M. Brochu: Spark plasma sintering and spark plasma upsetting of an Al-Zn-Mg-Cu alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 704, 2017, s. 154–163
- [19] D. Garbiec, V. Leshchynsky, A. García-Junceda, F. Heyduk: Association Spark Plasma Sintering and KOBOL Extrusion Routes for Aluminum Matrix Composite Profiles Manufacturing, *Euro PM2019 Congress & Exhibition Proceedings*, Maastricht, 2019, s. 1–6
- [20] D. Whittaker, D. Garbiec, J. Schurr, H. Chaves: Euro PM2019: Novel process developments highlight new opportunities for PM, *Powder Metallurgy Review*, vol. 9, nr 1, 2020, s. 77–86
- [21] A. Ureña, E.E. Martínez, P. Rodrigo, L. Gil: Oxidation treatments for SiC particles used as reinforcement in aluminium matrix composites, *Composites Science and Technology*, vol. 64, s. 12, 2004, s. 1843–1854
- [22] Z.Z. Fang, J.D. Paramore, P. Sun, K.S. Ravi Chandran, Y. Zhang, Y. Xia, F. Cao, M. Koopman, M. Free: Powder metallurgy of titanium – past, present, and future, *International Materials Review*, vol. 63, nr 7, 2018, s. 407–459
- [23] X.X. Li, C. Yang, T. Chen, Z.Q. Fu, Y.Y. Li, O.M. Ivasishin, E.J. Lavernia: Effective atomic diffusion coefficient dependence on applied pressure during spark plasma sintering, *Materialia*, vol. 6, 2019, 100334
- [24] J. Bustillos, Ch. Zhang, A. Loganathan, B. Boesl, A. Agarwal: Ultralow temperature densification of a titanium alloy by spark plasma sintering, *Advanced Engineering Materials*, vol. 22, nr 6, 2020, 2000076
- [25] I. Gotman, E.Y. Gutmanas, P. Mogilevsky: Interaction between SiC and Ti powder, *Journal of Materials Research*, vol. 8, nr 10, 1993, s. 2725–2733
- [26] M. Radovic, M.W. Barsoum: MAX phases: Bridging the gap between metals and ceramics, *American Ceramic Society Bulletin*, vol. 92, s. 3, 2013, s. 20–27
- [27] B. Guimarães, C.M. Fernandes, D. Figueiredo, M.F. Cerqueira, O. Carvalho, F.S. Silva, G. Miranda: A novel approach to reduce in-service temperature in WC-Co cutting tools, *Ceramics International*, vol. 46, nr 3, 2020, s. 3002–3008

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

W dniach 1.04.2019–30.04.2019 odbyłem jednomiesięczny staż naukowy we Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS w Dreźnie (Niemcy) w zespole Dr. rer. nat. Mathiasa Herrmanna, kierownika Departamentu Spiekania i Charakteryzacji. Podczas pobytu w Fraunhofer IKTS prowadziłem prace badawcze we współpracy z Dipl.-Ing. Janem Rätthelem i Dr.-Ing. Johannesem Pötschke dotyczące konsolidacji techniką FAST/SPS kompozytów z proszków WC/Ti oraz ich charakteryzacji. Ważnym efektem odbytego przeze mnie stażu było nawiązanie współpracy z zespołem badawczym rozwijającym technologię FAST/SPS we Fraunhofer IKTS. Konsekwencją tego było zaproszenie mnie do uczestnictwa w spotkaniu ekspertów ds. technologii FAST/SPS (The 15th meeting of the Expert Group "Field Assisted Sintering Technique / Spark Plasma Sintering") zorganizowane przez Prof. Dr. Oliviera Guillona, które odbyło się w Berlinie (Niemcy) w dniu 23.05.2019. Na spotkaniu tym zostałem poproszony o wygłoszenie wykładu na kolejnym spotkaniu, które odbyło się w dniu 16.12.2019. Wygłosiłem wtedy – jako pierwszy przedstawiciel polskiego środowiska naukowego – wykład pt. „Overview of FAST/SPS activities in Poland”. Wymiernym z praktycznego punktu widzenia efektem odbytego stażu naukowego, było aplikowanie o wspólny projekt badawczy w konsorcjum (w składzie Łukasiewicz – INOP, Fraunhofer IKTS i jedna z polskich firm z branży obróbki metali) w konkursie M.Era-Net 2 Call 2020. Ponadto przygotowuję cykl trzech publikacji naukowych dotyczących: 1) charakteryzacji mikrostruktury kompozytów WC-Ti wytworzonych techniką FAST/SPS, 2) ich właściwości mechanicznych i 3) właściwości eksploatacyjnych w warunkach przemysłowych. Publikacje te zostaną przygotowane w latach 2021–2022.

Ponadto od 2017 roku aktywnie współpracuję z zespołem Prof. Dr. Eng. José Manuel Torralba z University Carlos III of Madrid i IMDEA Materials Institute w Madrycie (Hiszpania), czego efektem jest kilka opublikowanych artykułów naukowych dotyczących nowych, bezkobaltowych węglików spiekanych na bazie chromu:

1. D. Xiangxing, **D. Garbiec**, J. Wang, J.M. Torralba, A. García-Junceda: Development of Cr-based hardmetals by spark plasma sintering: Thermodynamic modeling and hardness/toughness assessment, Euro PM2018 Proceedings, European Powder Metallurgy Association, Bilbao 2018, s. 1–6 (liczba cytowań: 1),
2. D. Xiangxing, N. Cinca, **D. Garbiec**, J.M. Torralba, A. García-Junceda: Oxidation and wear resistance of Cr-based hardmetals with nanosized carbide grain size, Euro PM2019 Proceedings, European Powder Metallurgy Association, Maastricht 2019, ID 4347252, s. 1–6 (liczba cytowań: 0),
3. D. Xiangxing, **D. Garbiec**, J.M. Torralba, J. Wang, A. García-Junceda: Development and characterization of novel Cr-based hardmetals strengthened by nanosized tungsten carbide, Materials Science & Engineering A, vol. 767, 2019, 138413 (MEiN: 140, IF: 4,652, liczba cytowań: 0),
4. D. Xiangxing, N. Cinca, **D. Garbiec**, J.M. Torralba, A. García-Junceda: Wear resistance of nanostructured Cr-based WC hardmetals sintered by spark plasma sintering, International

Journal of Refractory Metals and Hard Materials, vol. 86, 2020, 105092 (MEiN: 140, IF: 3,407, liczba cytowań: 1).

Ponadto od 2016 roku aktywnie współpracuję także z Dr. Andreą García-Juncedą z IMDEA Materials Institute w Madrycie (Hiszpania) i z European Commission DG Joint Research Centre w Petten (Holandia). Wymiernym efektem tej współpracy jest opublikowany artykuł naukowy dotyczący zastosowania techniki FAST/SPS do wytwarzania stali ferrytycznych dyspersyjnie umacnianych tlenkami (ODS) i domieszkowanych cyrkonem:

1. A. García-Junceda, E. Macía, **D. Garbiec**, M. Serrano, J.M. Torralba, M. Campos: Effect of small variations in Zr content on the microstructure and properties of ferritic ODS steels consolidated by SPS, Metals, vol. 10, nr 3, 2020, 348 (MEiN: 70, IF: 2,117, liczba cytowań: 4).

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

Osiągnięcia dydaktyczne

Moja działalność dydaktyczna rozpoczęła się od opieki nad praktykantami odbywającymi praktyki studenckie w Zakładzie Zaawansowanych Technologii Kształtowania w Instytucie Obróbki Plastycznej. Ponadto byłem recenzentem jednej pracy inżynierskiej zrealizowanej na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej oraz dwóch prac magisterskich zrealizowanych na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej, które dotyczyły materiałów otrzymywanych techniką FAST/SPS oraz próżniowego natryskiwania na zimno (ang. *Vacuum Cold Spray, VCS*).

Obecnie pełnię rolę promotora pomocniczego mgr inż. Michała Kowalskiego z Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytutu Pojazdów Szynowych „TABOR” w otwartym przewodzie doktorskim, na Wydziale Inżynierii Lądowej i Transportu Politechniki Poznańskiej, którego promotorem jest prof. dr hab. inż. Franciszek Tomaszewski. Planowany termin zamknięcia przewodu doktorskiego przypada na grudzień 2021 roku. Tematem realizowanej pracy jest „Nienormatywne badania stanowiskowe wytrzymałości wybranych elementów taboru kolejowego”. Ponadto, jestem promotorem pomocniczym dwóch pracowników Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytutu Obróbki Plastycznej, którzy w latach 2020–2024 są beneficjentami IV edycji programu „Doktorat wdrożeniowy”. Mgr inż. Maria Wiśniewska realizuje doktorat wdrożeniowy pt. „Opracowanie technologii wytwarzania metodą FAST/SPS kompozytów na bazie ceramiki ZrO_2 przeznaczonych na osłony termiczne” w Szkole Doktorskiej Politechniki Poznańskiej, którego promotorem jest dr hab. Mirosław Szybowicz, prof. PP. Mgr inż. Rafał Rubach realizuje doktorat wdrożeniowy pt. „Opracowanie warunków spiekania metodą iskrowego spiekania-plazmowego (SPS) proszków Ti i węgla typu $nc-Mo_xTi_{1-x}C$ w celu otrzymania nanokompozytów charakteryzujących się wysoką odpornością na zużycie, kruszenie oraz korozję” w Szkole Doktorskiej Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, którego promotorem jest prof. dr hab. inż. Anna Biedunkiewicz.

Byłem także opiekunem naukowym Dr. Ahmeda Elseddawy’ego z University of Windsor w Windsorze (Kanada), który w dniach 30.04.2019–26.09.2019 odbywał staż naukowy w Sieć

Badawcza Łukasiewicz – Instytucie Obróbki Plastycznej, realizując projekt finansowany przez Mitacs, Kanada pt. „Investigation of Aerosol Cold Spray Technology for ceramic”.

Prowadziłem również ćwiczenia z przedmiotu „Technologiczność montowanych wyrobów” na studiach podyplomowych „Ekotechnologie i montaż” współfinansowanych przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej (Projekt nr POKL.04.03.00-00-131/12).

Prowadziłem także szkolenia z zakresu metalurgii proszków dla pracowników firmy General Motors Manufacturing Poland z Gliwic oraz WABCO Polska z Wrocławia.

Osiągnięcia organizacyjne

W zakresie organizacyjnym utworzyłem z początkiem 2019 roku w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytucie Obróbki Plastycznej grupę badawczą zajmującą się rozwojem techniki FAST/SPS, w skład której wchodzi obecnie, poza mną, 5 osób (3 magistrów inżynierów, w tym 2 doktorantów, oraz 2 profesorów).

Byłem przewodniczącym komitetu organizacyjnego Seminarium Obróbki Plastycznej pt. „Innowacje w zastosowaniach przemysłowych”, które odbyło się w dniu 6.06.2018 w Poznaniu. Byłem także Członkiem Komitetu Organizacyjnego XXII Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej pt. „Advanced Forming Technologies and Nanostructured Materials”, która odbyła się w Opalenicy w dniach 18–20.09.2019.

Za moje największe osiągnięcie organizacyjne uznaję stworzenie i organizację Ogólnopolskiego Seminarium Spark Plasma Sintering, którego celem jest integracja polskiego i zagranicznego środowiska naukowego oraz przemysłu związanego z tą nowoczesną technologią konsolidacji materiałów proszkowych. Nieprzerwanie od 2018 roku pełnię funkcję Przewodniczącego Komitetu Organizacyjnego tego wydarzenia. W dniu 24.10.2018 roku odbyło się I Ogólnopolskie Seminarium Spark Plasma Sintering w Poznaniu, w siedzibie Instytutu Obróbki Plastycznej (więcej na <https://1sps.inop.poznan.pl>). W seminarium wzięło udział 45 uczestników, w tym: 34 osoby z 14 instytucji naukowych i 11 osób z 5 przedsiębiorstw. Wygłoszono 15 referatów. Druga edycja wydarzenia – II Ogólnopolskie Seminarium Spark Plasma Sintering odbyło się 24.10.2019 w Warszawie, w siedzibie Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych oraz w siedzibie firmy GeniCore Sp. z o.o. (więcej na <https://2sps.inop.poznan.pl>). W seminarium wzięły udział łącznie 62 osoby, w tym 40 osób z 12 jednostek naukowych i 22 osoby z 6 przedsiębiorstw. Podczas seminarium wygłoszono 19 referatów. Trzecia edycja – III Ogólnopolskie Seminarium Spark Plasma Sintering, ze względu na ograniczenia związane z pandemią koronawirusa SARS-CoV-2, zorganizowano w formie zdalnej w dniu 23.10.2020 roku, za pomocą platformy MS Teams (więcej na <https://3sps.inop.poznan.pl>). W seminarium wzięły udział 83 osoby z 11 krajów Europy, Ameryki Północnej i Azji. Wygłoszono 18 referatów (9 z Polski, 9 z zagranicy). W związku ze wzrastającym zainteresowaniem tym wydarzeniem przez naukowców z zagranicy, w 2021 roku planuję zmianę formuły i organizację spotkania w formie konferencji międzynarodowej pod nazwą – 1st Conference on FAST/SPS: from Research to Industry.

Osiągnięcia popularyzujące naukę

W ramach działalności popularyzującej naukę, bazując na wynikach badań własnych, opublikowałem dwa artykuły techniczne w czasopiśmie branżowym „Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie”, dotyczące zastosowania techniki FAST/SPS do wytwarzania materiałów kompozytowych, w tym do wybranych narzędzi i części budowy maszyn:

1. **D. Garbiec:** Wytwarzanie kompozytów metodą iskrowego spiekania plazmowego (SPS), Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie, nr 11, 2012, s. 20–23,
2. **D. Garbiec:** SPS: Spiekanie iskrowo-plazmowe, Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie, nr 10, 2018, s. 22–26.

Ponadto jestem współautorem artykułu popularyzującego w światowym przemyśle opracowaną przeze mnie i prof. dr. hab. inż. Volfa Leshchynsky’ego łączoną technologię SPS-KOBO, który ukazał się w czasopiśmie branżowym o zasięgu międzynarodowym „Powder Metallurgy Review”:

1. D. Whittaker, **D. Garbiec**, J. Schurr, H. Chaves: Euro PM2019: Novel process developments highlight new opportunities for PM, Powder Metallurgy Review, vol. 9, nr 1, 2020, s. 77–86.

Od wielu lat aktywnie promuję osiągnięcia naukowo-techniczne, najpierw Instytutu Obróbki Plastycznej, a obecnie Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytutu Obróbki Plastycznej m.in. podczas międzynarodowych targów „ITM INDUSTRY EUROPE” w Poznaniu w ramach przedsięwzięcia „Nauka dla Gospodarki”.

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1–6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

Od początku zatrudnienia, najpierw w Instytucie Obróbki Plastycznej, a później w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytucie Obróbki Plastycznej, opublikowałem 22 artykuły naukowe w czasopismach posiadających współczynnik wpływu (ang. *Impact Factor, IF*), 33 artykuły naukowe w czasopismach nieposiadających IF, 3 rozdziały w monografiach, 8 artykułów naukowych w materiałach konferencyjnych, 44 streszczenia w materiałach konferencyjnych oraz 3 artykuły w czasopismach branżowych. Jestem współautorem 1 wynalazku pt. „Endoproteza krążka międzykręgowego kręgosłupa” (udział 15%), chronionego patentem nr 219179 oraz 3 zgłoszeń patentowych zarejestrowanych pod nr P.427642 z dnia 5.11.2018 „Sposób otrzymywania półwyrobów z cyrkonu” (udział 34%), P.435568 z dnia 1.10.2020 pt. „Sposób niskociśnieniowego natryskiwania na zimno powłok z proszków cząstek stałych i układ do niskociśnieniowego natryskiwania na zimno powłok z proszków cząstek stałych” (udział 15%), oraz P.437441 z dnia 29.03.2021 pt. „Sposób otrzymywania półwyrobów z niobu” (udział 33%). Szczegółowe zestawienie ww. osiągnięć przedstawiłem w Tablicy 1.

Tablica 1. Lista opublikowanych artykułów naukowych, rozdziałów w monografiach, streszczeń i artykułów technicznych w latach 2011–2021

CZASOPISMA Z IF												
Czasopismo	Przed uzyskaniem stopnia doktora			Po uzyskaniu stopnia doktora								Suma
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Archives of Civil and Mechanical Engineering (e-ISSN: 1644-9665)					1	1			1		1	4
Materials (ISSN: 1996-1944)									1	1	1	3
Archives of Metallurgy and Materials (ISSN: 1733-3490)						1		2				3
Metals (ISSN: 2075-4701)										2		2
Surface and Coatings Technology (ISSN: 0257-8972)								1		1		2
Materials Science and Engineering: A (ISSN: 0921-5093)									1			1
International Journal of Refractory Metals and Hard Materials (ISSN: 0263-4368)										1		1
Ceramics International (ISSN: 0272-8842)					1							1
Advanced Powder Technology (ISSN: 0921-8831)								1				1
Transactions of Nonferrous Metals Society of China (ISSN: 1003-6326)						1						1
Powder Metallurgy (ISSN: 0032-5899)						1						1
Vacuum (ISSN: 0042-207X)									1			1
Materials Research Ibero-american Journal of Materials (ISSN: 1516-1439)							1					1
Suma	0	0	0	0	2	4	1	4	4	5	2	22

CZASOPISMA BEZ IF												
Czasopismo	Przed uzyskaniem stopnia doktora			Po uzyskaniu stopnia doktora								Suma
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Obróbka Plastyczna Metali (ISSN: 0867-2628)	1	3	1	2	1	1	2	1	2			14
Inżynieria Materiałowa (ISSN: 0208-6247)					2	1	1	1				5
Composites Theory and Practice (ISSN: 2084-6096)			1	1	1	1						4
Mechanik (ISSN: 0025-6552)				1	1	1						3
Hutnik – Wiadomości Hutnicze (ISSN: 1230-3534)		1			1							2
Rudy i Metale Nieżelazne (ISSN: 0035-9696)			1		1							2
Tribologia (ISSN: 0208-7774)					1							1
Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering (ISSN: 1734-8412)						1						1
Manufacturing Technology (ISSN: 1213-2489)											1	1
Suma	1	4	3	4	8	5	3	2	2	0	1	33
ROZDZIAŁY W MONOGRAFIACH												
Monografia	Przed uzyskaniem stopnia doktora			Po uzyskaniu stopnia doktora								Suma
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
Mechanika w Medycynie 11 (ISBN 978-83-7199-749)		1										1

Najnowsze doniesienia z zakresu nanotechnologii (ISBN 978-83-65932-26-6)									1				1
Materials, Technologies, Constructions "Special purpose processes" (ISBN: 978-83-7934-358-4)										1			1
Suma	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	3
ARTYKUŁY W MATERIAŁACH KONFERENCYJNYCH													
Konferencja	Przed uzyskaniem stopnia doktora			Po uzyskaniu stopnia doktora									Suma
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021		
Prace XLII Szkoły Inżynierii Materiałowej (ISBN: 978-83-63663-49-0)				2									2
Advanced Metal Forming Processes in Automotive Industry						1							1
Prace XLVI Szkoły Inżynierii Materiałowej (ISBN 978-83-65955-14-2)								1					1
Euro PM2018 Proceedings (ISBN: 978-1-899072-50-7)								1					1
Euro PM2019 Proceedings (ISBN: 978-1-899072-51-4)									3				3
Suma	0	0	0	2	0	1	0	2	3	0	0		8
STRESZCZENIA W MATERIAŁACH KONFERENCYJNYCH													
Konferencja	Przed uzyskaniem stopnia doktora			Po uzyskaniu stopnia doktora									Suma
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021		
XIX Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna KONTECH pt. „Advanced forming technologies and nanostructured materials”		1											1

Biomechanics 2012		1										1
II Seminarium Microstructure and Chemistry Characterization of Advanced Materials			4									4
XX Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna KONTECH pt. „Advanced Forming technologies and nanostructured materials”				2								2
4 th National Conference on nano- and micromechanics				1								1
European Congress and Exhibit on Advanced Materials and Process EUROMAT 2015					2							2
XII Ogólnopolska Konferencja Naukowa Tytan i jego stopy – 2015					2							2
7 th International Conference on Innovations in Thin Film Processing and Characterization ITFPC'2015					1							1
40 th Solid Mechanics Conference SolMech 2016						1						1
XXI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna KONTECH pt. „Advanced Forming technologies and nanostructured materials”						1						1
6 th European Young Engineers Conference							1					1
Ogólnopolska Konferencja Naukowa Nanotechnologia wobec oczekiwań XXI w.							1					1
Seminarium Obróbki Plastycznej pt. „Innowacje w zastosowaniach przemysłowych”							3	1				4
VII Krajowa Konferencja Nowe Materiały – Nowe Technologie w przemyśle okrętowym i maszynowym									2			2
I Ogólnopolskie Seminarium Spark Plasma Sintering									4			4

The XXII Physical Metallurgy and Materials Science Conference Advanced Materials and Technologies AMT 2019										1			1
XXII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna KONTECH pt. „Advanced Forming technologies and nanostructured materials”										3			3
II Ogólnopolskie Seminarium Spark Plasma Sintering										7			7
III Ogólnopolskie Seminarium Spark Plasma Sintering (ISBN 978-83-957026-1-7)											5		5
Suma	0	2	4	3	5	2	5	7	11	5	0	44	
ARTYKUŁY W CZASOPISMACH BRANŻOWYCH													
Czasopismo	Przed uzyskaniem stopnia doktora			Po uzyskaniu stopnia doktora									Suma
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021		
Projektowanie i Konstrukcje Inżynierskie (ISSN: 1899-699X)		1						1					2
Powder Metallurgy Review (ISSN: 2050-9693)										1			1
Suma	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	3	

W latach 2010–2020 uczestniczyłem w 47 konferencjach międzynarodowych i krajowych oraz różnego rodzaju seminariach i warsztatach, podczas których wygłosiłem 2 referaty zaproszone (podczas Seminarium Zakładu Mechaniki Doświadczalnej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN, które odbyło się w Warszawie w dniu 4.03.2020, a także podczas The 16th meeting of the Expert Group "Field Assisted Sintering Technique / Spark Plasma Sintering", które odbyło się w Jülich, w Niemczech w dniu 10.12.2019), oraz kolejnych 11 referatów i 13 posterów.

Jestem członkiem Polskiego Towarzystwa Materiałów Kompozytowych (Polska) od 2015 roku, International Association of Advanced Materials (Szwecja) od 2017 roku, Expert Group "Field Assisted Sintering Technique / Spark Plasma Sintering" (Niemcy) od 2019 roku, European Powder Metallurgy Association (Francja) od 2021 roku oraz The Deutsche Gesellschaft für Materialkunde (Niemcy) od 2021 roku.

Od 2019 roku jestem członkiem Rady Recenzentów czasopisma Materials (ISSN: 1996-1944, IF: 3,057). Obecnie, wraz z prof. dr. hab. inż. Alexandrem Laptevem, jestem redaktorem

specjalnego wydania czasopisma Metals (ISSN: 2075-4701, MEiN: 70, IF: 2,117) pt. „Recent Advances in Field-Assisted Sintering Technologies”.

W latach 2013–2020 wykonałem 18 recenzji wniosków projektowych w różnych konkursach na zamówienie Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. W latach 2017–2019 wykonałem 13 recenzji na zamówienie Polskiej Agencji Rozwoju Przedsiębiorczości. Od 2021 roku jestem ekspertem Komisji Europejskiej w Programie Horyzont 2020 i Horyzont Europa.

W latach 2015–2021 wykonałem 150 recenzji manuskryptów dla 33 różnych czasopism naukowych, w większości posiadających współczynnik IF. Szczegółową listę publikacji wraz z liczbą wykonanych recenzji w poszczególnych latach zestawiałem w Tablicy 2. Aktualna lista dostępna jest na moim profilu w serwisie ORCID i Publons. Za działalność recenzencką w 2019 roku otrzymałem dwie nagrody przyznawane przez Publons (Clarivate Analytics) dla 1% najbardziej aktywnych recenzentów. Pierwsza nagroda to „Top Peer Reviewer 2019 in Material Science”, druga nagroda to „Top Peer Reviewer 2019 in Cross-Field”. W 2020 roku nagród nie przyznawano.

Tablica 2. Lista czasopism, dla których wykonałem recenzje manuskryptów w latach 2015–2021

Czasopismo	IF	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Suma
Journal of Alloys and Compounds (ISSN: 0925-8388)	4,650				1		1		2
Advanced Powder Technology (ISSN: 0921-8831)	4,217			1			5	1	7
Materials Research Bulletin (ISSN: 0025-5408)	4,019				1	4			5
Results in Physics (ISSN: 2211-3797)	4,019						1		1
Scientific Reports (ISSN 2045-2322)	3,998					2	1		3
Ceramics International (ISSN 0272-8842)	3,830							3	3
Archives of Civil and Mechanical Engineering (e-ISSN: 1644-9665)	3,672		3	2	2	4	1	1	13
International Journal of Refractory Metals and Hard Materials (ISSN: 0263-4368)	3,407							1	1
Materials (ISSN: 1996-1944)	3,057				9	29	16	3	57
Materials Today Communications (ISSN: 2352-4928)	2,678						1	1	2

Symmetry (ISSN: 2073-8994)	2,645						1		1
Transactions of Nonferrous Metals Society of China (ISSN: 1003-6326)	2,615	1	1	1		1	1	1	6
Applied Sciences (ISSN 2076-3417)	2,474					1			1
Coatings (ISSN 2079-6412)	2,436					2	2		4
Journal of the Air & Waste Management Association (ISSN: 1096-2247)	2,245					1	1		2
Metals (ISSN: 2075-4701)	2,117					2	4		6
Metals and Materials International (ISSN: 1598-9623)	1,990					1	5		6
Nuclear Engineering and Technology (ISSN: 1738-5733)	1,846					1	1		2
Philosophical Magazine (ISSN: 1478-6435)	1,778						3		3
International Journal of Applied Ceramic Technology (ISSN: 1744-7402)	1,762				1				1
Nuclear Science and Techniques (ISSN: 1001-8042)	1,556					2	1		3
Materials Research Ibero-american Journal of Materials (ISSN: 1516-1439)	1,468		1				2	1	4
Advances in Materials Science and Engineering (ISSN: 1687-8434)	1,271						1		1
Advances in Mechanical Engineering (ISSN: 1687-8140)	1,162						3		3
Journal of Testing and Evaluation (ISSN: 0090-3973)	0,877				1				1
High Temperature Materials and Processes (e-ISSN: 2191-0324)	0,677						1		1
Tribology in Industry (ISSN: 0354-8996)	-			1					1
Tribology – Materials, Surfaces & Interfaces (ISSN: 1751-5831)	-			1	1				2

International Wood Products Journal (ISSN: 2042-6445)	-							1	1
Journal of Composites Science (ISSN: 2504-477X)	-						2		2
Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity (ISSN: 2199-8531)	-						2		2
Journal of Applied Materials Engineering (ISSN: 2658-1744)	-						1	1	2
Advances in Metallurgical and Material Engineering (ISSN: 2689-8705)	-						1		1
Suma	-	1	5	6	16	50	58	14	150

Pełniłem także funkcję Członka Komitetu Naukowego konferencji World Symposium of Civil Engineering zorganizowanego przez International Association of Engineers w Hongkongu w dniach 15–17.03.2017.

W latach 2010–2021 uczestniczyłem w realizacji 7 projektów międzynarodowych, 14 projektów krajowych (w tym w 3 w roli Kierownika B+R w projektach TECHMATSTRATEG III, LIDER XI oraz w projekcie regionalnym), 2 projektów krajowych jako podwykonawca (w tym w 1 w roli kierownika B+R po stronie podwykonawcy – Instytutu Obróbki Plastycznej) oraz w 19 pracach statutowych Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytutu Obróbki Plastycznej (w tym w 8 w roli głównego wykonawcy). Szczegółową listę projektów wraz z pełnioną w nich funkcją zestawilem w Tablicy 3.

Tablica 3. Lista projektów, w których realizacji uczestniczyłem w latach 2010–2021 wraz z pełnioną funkcją

PROJEKTY MIĘDZYNARODOWE				
Program	Nr projektu	Tytuł projektu	Lata realizacji	Rola w projekcie
EUREKA	NEGFORT E!4249	New generation of forging tools	2009–2012	Członek personelu pomocniczego
7 Program Ramowy UE (7PR)	263942	Development of new nanocomposites using materials from mining industry (Nanomining)	2010–2013	Członek personelu pomocniczego
7 Program Ramowy UE (7PR)	606009	Incorporation of solid lubricants into surface of friction parts (Higraph)	2013–2015	Członek personelu pomocniczego
7 Program Ramowy UE (7PR)	604344	Pilot manufacturing line for production of highly innovative materials (PilotManu)	2013–2017	Członek personelu B+R

7 Program Ramowy UE (7PR)	602398	New approaches in the development of hypoallergenic implant material in orthopedics: steps to personalized medicine (HypOrth)	2013–2018	Członek personelu pomocniczego
Horyzont 2020 (H2020)	814552	Open Innovation Ecosystem for upscaling production processes of lightweight metal alloys composites (LightMe)	2019–2022	Kierownik grupy badawczej Łukasiewicz – INOP w konsorcjum
Horyzont 2020 (H2020)	814632	Building an Ecosystem for the upscaling of lightweight multi-functional concrete and ceramic materials and structures (LightCoce)	2019–2022	Kierownik grupy badawczej Łukasiewicz – INOP w konsorcjum międzynarodowym
PROJEKTY KRAJOWE				
Program / Konkurs	Nr projektu	Tytuł projektu	Lata realizacji	Rola w projekcie
Projekt Badawczy Własny	N N507 479537	Badanie i ocena funkcjonalności implantów kręgosłupa w aspekcie materiałowym i tribologicznym	2009–2012	Członek personelu pomocniczego
Projekt Badawczy Własny	N N508 589739	Materiały o niskim współczynniku tarcia na osnowie proszku żelaza i brązu na łożyska z powierzchnią modyfikowaną nanocząstkami	2010–2013	Członek personelu pomocniczego
Program Badań Stosowanych (PBS)	PBS1/B6/3 /2012	Technologia wytwarzania wałów monolitycznych dla przemysłu energetycznego i maszynowego	2012–2015	Członek personelu pomocniczego
10 Konkurs Projektów Rozwojowych NCBR	NR03- 0081- 10/2011	Badanie parametrów tarcia i zużycia przy różnym ustawieniu wzajemnym elementów endoprotez	2011–2013	Członek personelu pomocniczego
10 Konkurs Projektów Rozwojowych NCBR	NR13- 0014- 10/2011	Endoproteza krążka międzykręgowego kręgosłupa – konstrukcja, badania, technologia wytwarzania i przygotowania do zastosowań klinicznych	2011–2013	Członek personelu pomocniczego
Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka (POIG)	POIG.01.0 3.01-00- 015/08	NANOMET – Nowe materiały metaliczne o strukturze nanometrycznej do zastosowań w nowoczesnych gałęziach gospodarki	2010–2015	Członek personelu pomocniczego

Demonstrator+	WND-DEM-1-335/00	Opracowanie innowacyjnej technologii wyciskania kształtowników z trudnoodkształcalnych stopów aluminium serii 5xxx	2014–2016	Członek personelu pomocniczego
PRELUDIUM 7	2014/13/N/ST8/00601	Efekt nanoskali w biokompozytowych strukturach na osnowie tytanu	2015–2018	Członek personelu pomocniczego
OPUS 13	2017/25/B/ST8/01789	Osadzanie i badanie nowych super-twardych pokryć z domieszkowanych borków wolframu	2018–2021	Członek personelu B+R
Program Operacyjny Inteligentny Rozwój (POIR)	POIR.04.01.04-00-0074/17	Kompleksowe opracowanie i przygotowanie do wdrożenia nowatorskich rozwiązań implantów w leczeniu zwierząt, narzędzi chirurgicznych do ich implantacji oraz chirurgicznych nici biodegradowalnych dla weterynarii	2018–2021	Członek personelu B+R
Wielkopolski Regionalny Program Operacyjny (WRPO)	RPWP.01.02.00-30-0004/17	Innowacyjne stanowisko do gazodynamicznego natryskiwania warstw na zimno z proszków metalicznych i ceramicznych w Instytucie Obróbki Plastycznej	2018–2019	Członek personelu B+R
Wielkopolski Regionalny Program Operacyjny (WRPO)	RPWP.01.02.00-30-0110/17	Innowacyjne technologie wykonywania mieszanin proszkowych stosowanych jako nowej generacji materiałów narzędziowych w przedsiębiorstwie USŁUGI ŚLUSARSKIE mgr inż. Paweł SIWAK	2019–2020	Kierownik B+R
LIDER XI	0071/L-11/2019	Materiał narzędziowy nowej generacji na osnowie tytanu wytwarzany w szybkim procesie spiekania iskrowo-plazmowego	2021–2023	Kierownik projektu
TECHMATSTRATEG III	TECHMATSTRATEGIII/0017/2019	Nowe powłoki zwiększające trwałość narzędzi w procesach kucia i wyciskania	2021–2023	Kierownik B+R

PODWYKONAWSTWO W PROJEKTACH KRAJOWYCH				
Program	Nr projektu	Tytuł projektu	Lata realizacji	Rola w projekcie
Program Operacyjny Inteligentny Rozwój (POIR)	POIR.01.01.01-0-1380/15	Prace B+R nad innowacyjnymi wielkogabarytowymi łożyskami wieńcowymi na bazie lekkich materiałów konstrukcyjnych	2016–2018	Członek personelu pomocniczego po stronie INOP
Program Operacyjny Inteligentny Rozwój (POIR)	POIR.01.01.01-00-0267/16	Wytwarzanie innowacyjnych elektrod do nagrzewania i hartowania drutu oraz narzędzi do obróbki twardych materiałów z nanokrystalicznych proszków WC-Co spiekanych metodą SPS	2017–2019	Kierownik B+R po stronie INOP

W ramach prowadzonej przeze mnie działalności naukowej utrzymuję stałą współpracę z kilkoma ośrodkami naukowymi z kraju i zagranicy oraz z działami B+R kilku firm. Szczegółową listę osób, z którymi współpracuję wraz z realizowaną tematyką badawczą zestawilem w Tablicy 4.

Tablica 4. Lista osób, z którymi współpracuję w ramach prowadzonej przeze mnie działalności naukowej

Imię i nazwisko	Ośrodek naukowy	Okres współpracy	Tematyka badawcza
Dr inż. Piotr Siwak	Wydział Inżynierii Mechanicznej, Politechnika Poznańska	od 2013	Węglik spiekane WC-Co wytwarzane techniką FAST/SPS
Dr hab. inż. Tomasz Mościcki, prof. IPPT PAN	Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa	od 2013	Ceramika WB _x domieszkowana metalami przejściowymi wytwarzana techniką FAST/SPS
Prof. dr hab. inż. Anna Biedunkiewicz	Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin	od 2014	Materiały kompozytowe Ti-(Ti,Mo)C wytwarzane techniką FAST/SPS
Dr hab. inż. Marcin Madej, prof. AGH	Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków	od 2014	Stale szybko tnące wytwarzane techniką FAST/SPS
Dr hab. inż. Beata Leszczyńska-Madej, prof. AGH	Wydział Metali Nieżelaznych, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków	od 2014	Materiały kompozytowe Al-SiC wytwarzane techniką FAST/SPS
Dr. Andrea García-Junceda	European Commission, DG Joint Research Centre, Petten (Holandia); IMDEA Materials Institute, Madryt (Hiszpania)	od 2016	Stale dyspersyjnie umacniane tlenkami (ODS) wytwarzane techniką FAST/SPS

Prof. Dr. Eng. José Manuel Torralba	Universidad Carlos III de Madrid, Madryt (Hiszpania); IMDEA Materials Institute, Madryt (Hiszpania)	od 2017	Bezkobaltowe węgliki spiekane na bazie Cr wytwarzane techniką FAST/SPS
Mgr inż. Paweł Siwak	Usługi Ślusarskie mgr inż. Paweł Siwak, Sieroszewice	od 2016	Węgliki spiekane WC-Co wytwarzane techniką FAST/SPS
Dr inż. Marcin Rosiński	GeniCore Sp. z o.o., Warszawa	od 2018	Rozwój techniki FAST/SPS
Dr. Julian Fordham, Mgr inż. Tomasz Rybak	John Crane, Slough (Wielka Brytania)	od 2019	Kompozyty na bazie ceramiki wytwarzane techniką FAST/SPS (umowa o poufności)

Podczas mojej pracy w Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytucie Obróbki Plastycznej odbyłem kilka szkoleń w zakresie prowadzonej przeze mnie działalności zawodowej/naukowej:

1. kurs „Obróbka Ciepna Metali” zorganizowany przez Instytut Mechaniki Precyzyjnej, który odbył się w dniach 18–22.11.2013 w Warszawie,
2. letnia szkoła „Powder Metallurgy Summer School 2019” zorganizowana przez European Powder Metallurgy Association, która odbyła się w Trydencie (Włochy) w dniach 15–19.07.2019,
3. warsztaty „Definiowanie struktury projektów i przygotowanie budżetów” zorganizowane przez Silfra Sp. z o.o. sk, które odbyło się w formie zdalnej w dniach 22–23.06.2020,
4. wiosenna szkoła „European School on Ceramics for Energy Conversion and Storage” zorganizowana przez Forschungszentrum Jülich GmbH, która odbyła się w formie zdalnej w dniach 25–27.11.2020.

Dane naukometryczne:

1. Liczba cytowań wg bazy Scopus: **179**
2. Liczba cytowań bez autocytowań wg bazy Scopus: **162**
3. Indeks Hirscha wg bazy Scopus: **7**
4. Sumaryczny IF: **54,297**
5. Liczba punktów MEiN: **2003**

.....*Dariusz Galbre*.....
(podpis wnioskodawcy)