CV Naukowe

dr inż. **Piotr Siwak**

Wydział Inżynierii Mechanicznej

Politechnika Poznańska

Poznań, 2021

1. **Dane osobowe**

Imię i nazwisko: Piotr Siwak

Miejsce pracy: Instytut Technologii Mechanicznej, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Politechnika Poznańska

Stanowisko: adiunkt

2. **Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne**

Doktor nauk technicznych: 01.06.2012 r.

Podmiot nadający stopień: Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, Politechnika Poznańska

Tytuł rozprawy doktorskiej: *Badania właściwości technologicznych i eksploatacyjnych ostrzy skrawających z nanowęglików spiekanych wytwarzanych przy użyciu plazmy impulsowej*

Promotor: prof. dr hab. inż. Maciej Jan Kupczyk

Magister inżynier: 26.06.2006 r.

Uczelnia: Politechnika Poznańska, Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania, kierunek: Mechanika i Budowa Maszyn

Tytuł pracy: *Zaprojektowanie specjalistycznego oprzyrządowania do wytaczania długiego stożka wewnętrznego*

Promotor: prof. dr hab. inż. Maciej Jan Kupczyk

3. **Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych**

01.12.2019 r. do dziś: **Adiunkt**

Instytut Technologii Mechanicznej, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Politechnika Poznańska

01.10.2010 – 30.11.2019 r.: **Asystent**

Instytut Technologii Mechanicznej, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Politechnika Poznańska

Od 01.02.2007 r. do dziś: **Właściciel**

Usługi Ślusarskie – CUT STEEL, ul. Ostrowska 147A, 63-405 Sieroszewice (obróbka mechaniczna; cięcie laserem i plazmą CNC; zaginanie CNC; spawanie w technologiach MIG, MAG, TIG)

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

Osiągnięcie habilitacyjne, o którym mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy, pn. ***Technologia iskrowo-plazmowego wytwarzania kompozytów z węglików spiekanych typu WC-Co oraz badania ich właściwości technologicznych i eksploatacyjnych***, stanowi cykl siedmiu powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych, które w roku ich opublikowania były ujęte w wykazie zgodnym z art. 267. *Kryteria ewaluacji jakości działalności naukowej* ust. 2 pkt 2 lit. B, a ich sumaryczny ImpactFactor wynosi 9,871.

[H1] **P. Siwak**: *Indentation induced mechanical behaviour of spark plasma sintered WC-Co cemented carbides alloyed with Cr_3C_2, TaC-NbC, TiC and VC*, Materials, vol. 14, nr 1, 2021, s. 217 (MNiSW: 140, IF: 3,057, liczba cytowań: 1)

[H2] D. Garbiec, **P. Siwak**: *Microstructural evolution and development of mechanical properties of spark plasma sintered WC-Co cemented carbides for machine parts and engineering tools*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol. 19, nr 1, 2019, s. 215-223 (MNiSW: 140, IF: 3,672, liczba cytowań: 11)

[H3] **P. Siwak**, D. Garbiec: *WC-5Co cemented carbides fabricated by SPS*, Archives of Metallurgy and Materials, vol. 63, nr 4, 2018, s. 2031-2037 (MNiSW: 30, IF: 0,697, liczba cytowań: 1)

[H4] **P. Siwak**, D. Garbiec, M. Rogalewicz: *The effect of Cr3C2 and TaC additives on microstructure, hardness and fracture toughness of WC-6Co tool material fabricated by spark plasma sintering*, Materials Research Ibero-american Journal of Materials, vol. 20, nr 3, 2017, s. 780-785 (MNiSW: 20, IF: 1,103, liczba cytowań: 3)

[H5] **P. Siwak**, D. Garbiec: *The microstructure and mechanical properties of WC-Co, WC-Co-Cr_3C_2 and WC-Co-TaCcermets fabricated by spark plasma sintering*, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, vol. 26, nr 10, 2016, s. 2641-2646 (MNiSW: 30, IF: 1,342, liczba cytowań: 22)

[H6] **P. Siwak**, K. Peta, D. Garbiec: *Analysis of improvements in technological properties of WC-Co tool materials fabricated by spark plasma sintering*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, vol. 75, nr 2, 2016, s. 61-65 (MNiSW: 12, liczba cytowań: 1)

[H7] D. Garbiec, **P. Siwak**, J. Jakubowicz: *The effect of heating rate and sintering time on properties of WC-6Co nanocrystalline composites produced by spark plasma sintering*, Composites Theory and Practice, r. 15, nr 1, 2015, s. 48-53 (MNiSW: 11, liczba cytowań: 3)

4.1. Wprowadzenie

Badania w zakresie inżynierii mechanicznej, a w szczególności obróbki mechanicznej, bardzo często wiążą się z osiągnięciami dotyczącymi projektowania i wytwarzania nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych i narzędziowych oraz inżynierii ich powierzchni. Ta ostatnia dziedzina obejmuje problematykę niekonwencjonalnego modyfikowania powierzchni nowych materiałów kompozytowych, które mogą w ten sposób uzyskać pożądane właściwości technologiczne i eksploatacyjne (użytkowe) – istotne z punktu widzenia mechaniki i budowy maszyn oraz materiałów narzędziowych i konstrukcyjnych stosowanych w inżynierii mechanicznej.

Stale rosnące wymagania przemysłu maszynowego coraz częściej wymuszają stosowanie materiałów konstrukcyjnych o określonych właściwościach mechanicznych, przede wszystkim zwiększonej odporności na oddziaływanie wysokiej temperatury i czynników korozyjno-erozyjnych lub na zużycie podczas tarcia. Z drugiej jednak strony materiały charakteryzujące się dobrymi właściwościami użytkowymi (eksploatacyjnymi) sprawiają bardzo wiele problemów podczas obróbki, a ich skrawanie wiąże się z dużymi kosztami wynikającymi z intensywnego zużycia narzędzi oraz niewielkiej wydajności procesu. Jednym ze sposobów ograniczenia zużycia jest zastosowanie nowych materiałów objętościowych do wytwarzania narzędzi oraz elementów budowy maszyn, które będą się charakteryzowały m.in. lepszymi właściwościami mechanicznymi, aniżeli konwencjonalne materiałystosowane obecnie.

Podejmując się realizacji tematu badań, kierowano się także tym, że w literaturze [5-10, 30÷32, 41, 45, 55, 68, 70, 74, 75] można spotkać przykłady stosowania nanomateriałów, które charakteryzują się dużo lepszymi właściwościami mechanicznymi niż konwencjonalne materiały – podjęcie kompleksowych badań w tym zakresie wydawało się jak najbardziej zasadne.

Spiekane nanomateriały muszą spełniać wiele wymogów dotyczących jakości technologicznej, a w szczególności właściwej struktury i składu chemicznego, aby uzyskać większa twardość, odporność na kruche pękanie itp. Ponadto powinny charakteryzować się odpowiednią jakością użytkową (trwałość, niezawodność) determinowaną przez wiele parametrów jakości technologicznej. Uwzględniając powyższe, oprócz badań jakości eksploatacyjnej kompozytów z węglików spiekanych, przeprowadzono również badania jakości technologicznej.

Węgliki spiekane należą do grupy materiałów kompozytowych, w których rolę osnowy pełni metal – najczęściej miękki i plastyczny kobalt Co, natomiast wzmocnienia – ceramika, czyli głównie twardy i kruchy węglik wolframu WC [1]. Połączenie zalet obu związków zaowocowało uzyskaniem materiału kompozytowego o dużej twardości oraz dobrej odporności na pękanie i zużycie ścierne [1]. W 1927 roku firma Krupp zaprezentowała pierwsze materiały z węglika spiekanego, które nazwano Vidia (*wie diamant*). Natychmiast stały się one niezwykle popularne, gdyż umożliwiały zwiększenie parametrów procesów obróbki przy jednoczesnym wydłużeniu trwałości narzędzi. Takie znakomite właściwości materiału na bazie węglika wolframu wynikają z unikalnego połączenia jego właściwości,

tj. dużej twardości (1550÷1650 HV30) oraz wartości modułu sprężystości (500÷650 GPa), a także wysokiej temperatury odpuszczania (800÷1000°C).

Kobalt ze względu na swoje właściwości, tj. wysoką temperaturę topnienia (1495°C), dużą przewodność cieplną (100 W/m·K) oraz dobrą zwilżalność z węglikiem wolframu (kąt zwilżania ≈0°), jest obecnie najczęściej stosowanym materiałem wiążącym. Od pewnego już czasu podejmowane są liczne prace badawcze mające na celu opracowanie nowej generacji węglików spiekanych, w których kobaltowa osnowa zastępowana jest m. in. przez żelazo Fe [1, 2], nikiel Ni [1, 3] lub miedź Cu [1], jednak żaden z nowo opracowanych materiałów nie został w sposób istotny rozpowszechniony, a tym samym powszechnie zastosowany w przemyśle maszynowym. Związane jest to z wieloma pojawiającymi się problemami natury materiałowej oraz technologicznej. Większość proponowanych materiałów odznacza się dużo gorszą przewodnością cieplną niż kobalt, co ogranicza obszar zastosowań tych materiałów.

W przypadku obróbki mechanicznej niewystarczające odprowadzenie ciepła ze strefy współpracy narzędzia z obrabianym materiałem skutkuje jego przyspieszonym zużyciem. W związku z powyższym oprócz nieustannego poszukiwania nowych rozwiązań materiałowych, istotne jest prowadzenie równoległych badań mających na celu poprawę właściwości mechanicznych węglików spiekanych z osnową kobaltową. Zakres tych prac można podzielić na trzy główne obszary:

- stosowanie materiałów o nano- i/lub ultradrobnej wielkości ziaren WC oraz ich charakterystyka,
- modyfikacja mikrostruktury poprzez wprowadzenie dodatków w postaci tzw. inhibitorów wzrostu ziaren WC, których celem jest ograniczenie rozrostu krystalitów podczas spiekania w celu poprawy właściwości mechanicznych,
- stosowanie innowacyjnych technologii konsolidacji zorientowanych na takie prowadzenie procesu spiekania, aby zahamować lub ograniczyć rozrost ziaren WC.

W przypadku węglików spiekanych wykazano, że zwiększenie twardości, wytrzymałości na zginanie i odporności na pękanie wynika bezpośrednio z mikrostruktury materiału spiekanego, a najlepsze efekty uzyskuje się, gdy wielkość ziaren WC wynosi mniej niż 500 nm[4]. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że wielkość ziarna w przypadku nanomateriałów wynosi mniej niż 100 nm, a w przypadku mikrostruktury ultradrobnoziarnistej zawiera się w przedziale od 100 nm do 1 µm. Stosowanie inhibitorów wzrostu ziaren WC, do których należą m. in. węgliki: wanadu VC [5-12], chromu Cr_3C_2[5-8, 10, 11, 13-15], tytanu TiC[16, 17], tantalu TaC[9, 12, 17-20], niobu NbC[11, 17, 21], cyrkonu ZrC[17] oraz tlenek itru Y_2O_3[22], skutecznie zahamowuje rozrost ziaren podczas spiekania.

Od ponad 80 lat węgliki spiekane WC-Co są powszechnie stosowane do produkcji narzędzi skrawających oraz różnych elementów (części) budowy maszyn. Jedną z ważniejszych pożądanych właściwości tego materiału jest jak największa odporność na zużycie ścierne oraz kruche pękanie. W celu ustalenia zmian, jakich należy dokonać,dążąc do poprawy właściwości mechanicznych kompozytów z węglików spiekanych, dokonano szczegółowej analizy ich budowy oraz metod wytwarzania.

Po uzyskaniu proszków węglików i metali wiążących o odpowiedniej ziarnistości oraz ustaleniu techniki formowania, materiały z węglików spiekanych wytwarza się najczęściej według trzech metod: 1) jednostopniowej, 2) wielostopniowej, 3) skróconej.

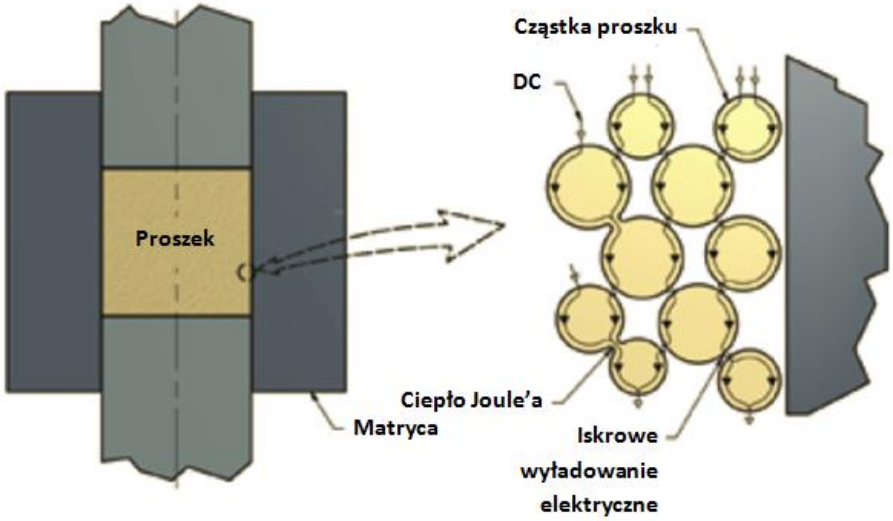
Niezależnie od wyboru sposobu uzyskiwania konwencjonalnych węglików spiekanych, proces wytwarzania rozpoczyna się od otrzymania proszków materiałów wsadowych (węglików spiekanych i metali wiążących).Następnie uzyskany materiał przesiewa się, a dalejmiesza – zwykle w wodzie lub alkoholu etylowym i mieli – w młynach kulowych lub wibracyjnych. Proces ten trwa kilkadziesiąt godzin, po czy rozdrobniony i wymieszany proszek poddaje się suszeniu w piecu w atmosferze wodoru w temperaturze 870 K lub, częściej, w suszarce próżniowej w temperaturze 350 K. Otrzymane połączone proszki węglików i metalu wiążącego są przesiewane, a następnie rozpoczyna się proces wytwarzania węglików spiekanych – różny dla każdej z wymienionych wyżej metod. W technikach skróconej i wielostopniowej przed procesem prasowania mieszaninę proszków zwilża się glikolem, gliceryną lub stearyną – w ten sposób uzyskuje się poślizg polepszający warunki prasowania. Po sprasowaniu pod ciśnieniem około 100 MPa półwyroby poddaje się spiekaniu
w temperaturze 1070÷1270 K w atmosferze wodoru w piecach przepychowych, natomiast spiekanie końcowe przeprowadza się w piecach indukcyjnych w temperaturze 1620÷1870 K [23, 24]. Metoda jednostopniowa jest najczęściej stosowana do produkcji dużychwyrobów, przy czym konieczne jest w tym przypadku zastosowanie jeszcze jednej operacji – dodatkowego dogęszczania podczas prasowania izostatycznego na gorąco w temperaturze 1620÷1720 K pod ciśnieniem argonu wynoszącym 100÷300 MPa. Dodatkowe dogęszczanie powoduje znaczące zwiększenie wytrzymałości na zginanie węglików spiekanych, co umożliwia ich zastosowanie w warunkach obciążeń udarowych (uderzeniowych) [25÷27].

Do wytwarzania węglików spiekanych stosuje się również procesy metalurgii proszków, w tym: prasowanie matrycowe na zimno i spiekanie swobodne [23], prasowanie na gorąco (ang. *Hot Pressing – HP*) [24] oraz izostatyczne na gorąco (ang. *Hot Isostatic Pressing – HIP*) [25], a także spiekanie mikrofalowe [26, 27]. Te tzw. techniki konwencjonalne są bardzo pracochłonne i czasochłonne (czas wytwarzania wynosi ok. 12 godzin). Wyróżniamy również spiekanie indukcyjne (ang. *High Frequency Induction Heat Sintring – HFIHS*) [28, 29]i iskrowo-plazmowe (ang. *Spark Plasma Sintering – SPS*) [2, 8, 11, 13, 30-45]. Ostatnia z wymienionych metod – technologia SPS, która polega na jednoczesnym prasowaniu i spiekaniu wspomaganym polem elektrycznym, jest od kilku ostatnich lat coraz mocniej rozwijana zarówno w świecie nauki, jak i przemysłu.

Podstaw technologii SPS*(Spark PlasmaSintering)* należy doszukiwać się w pierwszych próbach spiekania rezystancyjnego proszków, które wykonano ok. 1910 r. w Niemczech, aczkolwiek za pierwszy przełom w historii rozwoju współczesnego spiekania iskrowo-plazmowego uznaje się opatentowanie w 1933 roku urządzenia do spiekania twardych materiałów przez Georga F. Taylora z firmy General Electric[46]. Kolejnym kamieniem milowym był patent George D. Cremera z 1944 roku dotyczącysposobu spiekania proszków brązu, mosiądzu lub aluminium, który łączył prasowanie na gorąco z wysoko

częstotliwościowym indukcyjnym systemem nagrzewania [47]. Przełomu w dalszym rozwoju nowej technologii spiekania proszków dokonał w 1962 roku KiyoshiInoue z japońskiej firmy Japax Inc., który zaprezentował urządzenie Spark Sintering (SS) zaliczane do tzw. pierwszej generacji urządzeń SPS. Druga generacja pojawiła się w 1986 roku, kiedy to firma Inoue-JapaxResearch Inc. przedstawiła urządzenie PlasmaActivatedSinteirng (PAS). Pierwsze kompletne urządzenie SPS powstało w 1989 roku, także w Japonii, w firmie Sumitomo CoalMining Co. Ltd, stanowiąc trzecią generację urządzeń SPS [48].

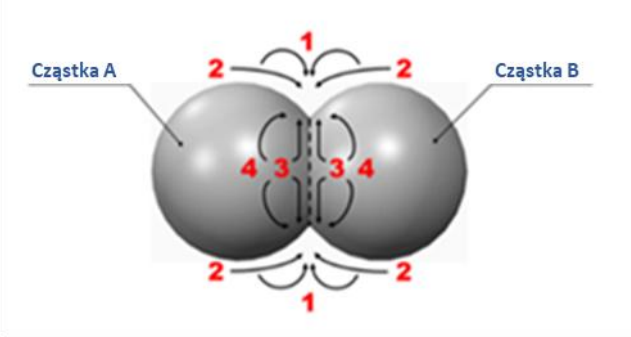
Technologia SPS polega na jednoczesnym prasowaniu i spiekaniu materiału proszkowego, przy czym do jego nagrzewania nie stosuje się zewnętrznego źródła ciepła (tak jak w przypadku prasowania na gorąco, czy innych klasycznych technik metalurgii proszków). Do tego celu stosuje się grzanie bezpośrednie, które polega na samonagrzewaniu cząstek proszku na skutek wydzielania się ciepła Joule'a, będącego efektem przepływu prądu stałego o impulsowym charakterze. W początkowym etapie spiekania (rys. 4.1), kiedy pomiędzy zagęszczanymi cząstkami proszku występują jeszcze wolne przestrzenie, dochodzi do mikrowyładowań iskrowych pomiędzy cząstkami, czego efektem jest lokalny wzrost temperatury na powierzchniach tych cząstek dochodzący nawet do 10 000°C. Powoduje to natychmiastowe odparowanie tlenków oraz zaadsorbowanych gazów z powierzchni cząstek, a tym samym odsłonięcie czystych powierzchni metalicznych stanowiących drogę dla dyfuzji.



Rys. 4.1. *Schemat mechanizmu spiekania metodą SPS* [49]

Dalsze nagrzewanie powoduje intensyfikację zjawisk dyfuzyjnych, wytworzenie połączeń pomiędzy cząstkami oraz zbliżenie środków cząstek. Następnie wyładowania iskrowe ulegają wygaszeniu, a prąd impulsowy przepływa przez dogęszczany spiek. Zjawiska dyfuzyjne towarzyszące spiekaniu metodą SPS są takie same jak w przypadku innych metod spiekania, ale mogą różnić się intensywnością. Transport materii odbywa się poprzez parowanie

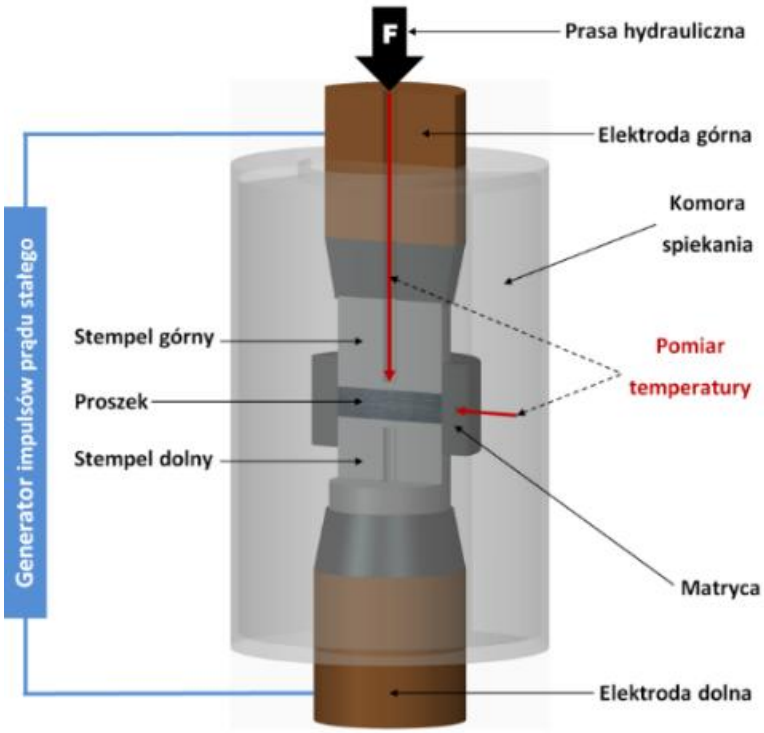
i kondensację, dyfuzję powierzchniową i objętościową oraz po granicach ziaren, co schematycznie przedstawiono na rysunku 4.2 [48, 49].



Rys. 4.2. *Mechanizm transportu materii podczas spiekania metodą SPS (1-Parowanie i kondensacja, 2-Dyfuzja powierzchniowa, 3- Dyfuzja objętościowa, 4- Dyfuzja po granicach ziaren)*[49]

Zasadniczo każde urządzenie SPS składa się z następujących podzespołów (rys. 4.3.):

- generatora prądu impulsowego,
- prasy hydraulicznej, która wywiera nacisk na stemple; w większości przypadków jednoosiowe prasowanie wykonywane jest jednostronnie za pomocą elektrody górnej,
- urządzeń do pomiaru temperatury, takich jak: termopary umieszczone bezpośrednio w matrycy lub/oraz pirometr optyczny umieszczony w osi stempla lub w osi matrycy,
- urządzeń do pomiaru ciśnienia w komorze roboczej,
- komory roboczej,
- układu chłodzenia komory roboczej, elektrod oraz generatora prądu impulsowego,
- pompy próżniowej,
- systemu sterowania i kontroli.



Rys. 4.3. *Schemat urządzenia SPS* [49]

Spiekanie proszków wykonuje się za pomocą narzędzi wykonanych najczęściej z grafitu [50-52], rzadziej ze stali [53] lub węglików spiekanych [54, 55]. Pomiędzy proszkiem a matrycą i stemplami umieszcza się folię wykonaną z grafitu (sporadycznie z wolframu), aby ograniczyć tarcie pomiędzy cząstkami proszku a powierzchniami roboczymi narzędzi.

Na właściwości mechaniczne materiałów wpływa ich mikrostruktura, która kształtuje się w procesie wytwarzania. Istotne znaczenie ma zatem nie tylko zastosowana technologia, ale także parametry wytwarzania. Do podstawowych wielkości charakteryzującychproces spiekania technologią SPS, można zaliczyć:

- temperaturę spiekania,
- ciśnienie prasowania,
- czas spiekania,
- szybkość nagrzewania,
- czas trwania pojedynczego impulsu prądowego,
- czas przerwy pomiędzy tymi impulsami.

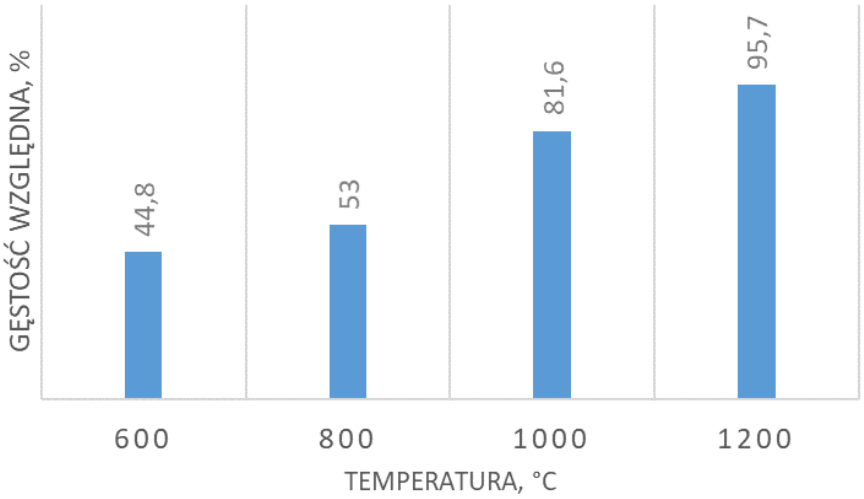
Możliwe jest kształtowanie mikrostruktury i właściwości węglików spiekanych WC-Co w bardzo szerokim zakresie, na co wskazuje bogata literatura przedmiotu. W pracach [4, 6, 8, 10, 11, 13, 18, 21, 30, 38-40, 42, 44, 45, 56-76] autorzy stosowali:

- temperaturę spiekania o bardzo szerokim zakresie: od 600 do 1600°C,
- ciśnienie prasowania: 25-100 MPa,
- czas spiekania: 2-10 min,
- szybkość nagrzewania: od 100 do aż 600°C/min,
- czas trwania impulsu: 10-12 ms,

– czas przerwy pomiędzy impulsami: 2-5 ms.

W rezultacie otrzymali węgliki spiekane o różnorodnej mikrostrukturze i właściwościach mechanicznych.

Pierwszym z najistotniejszych parametrów technologii SPS jest **temperatura spiekania**. Autorzy pracy [38] wykazali, że zakres od 600 do 1000°C nie jest wystarczający do uzyskania odpowiedniej konsolidacji – gęstość względna węglików spiekanych WC-10Co nie przekracza 82% (rys. 4.4). Z analizy literatury można wnioskować, że spiekanie w temperaturze 1200°C pozwala uzyskać materiał o gęstości względnej powyżej 95%. Autorzy zastosowali stosunkowo niskie ciśnienie prasowania, tj. 30 MPa, tymczasem jego dwukrotne zwiększenie (do 60 MPa) w połączeniu z taką samą temperaturą skutkuje wzrostem gęstości względnej węglików WC-6Co do 98,79% [77]. Z kolei spiekanie w temperaturze powyżej 1450°C, ze względu na powstanie ciekłej fazy Co, również nie należy do efektywnych, gdyż powoduje rozrost ziaren WC. Zatem za najwłaściwszy, najefektywniejszy należy uznać zakres 1200-1400°C. Wyjątkiem jest jednak spiekanie proszków o nanometrycznej wielkości cząstek – stosując temperaturę 1100°C, uzyskuje się węgliki spiekane WC-Co o gęstości względnej bliskiej materiału litego [68].



Rys. 4.4. *Gęstość względna węglików spiekanych WC-10Co w zależności od temperatury spiekania* [38]

Drugim niezwykle istotnym parametrem procesu SPS jest **ciśnienie prasowania**, przy czym dopiero od poziomu 40 MPa [42] iw temperaturze 1200°C [8] możliwe jest uzyskanie węglików spiekanych WC-11Co o gęstości względnej wynoszącej powyżej 99,5%.Najlepsze rezultaty przynosi jednak ciśnienie prasowania w zakresie 50–80 MPa [78]. Należy także zwrócićuwagę nazależność temperatury spiekania i ciśnienia prasowania: zwiększając temperaturę spiekania, można stosować niższe ciśnienie prasowania i uzyskać podobne rezultaty; i odwrotnie: im niższa temperatura spiekania, tym ciśnienie prasowania powinno być większe, np. 1000°C i 100 MPa[31, 59]; 1300°C i 75 MPa[65, 71] lub 1200°C i 60 MPa [73, 77].

Niezależnie od przyjętej wartości temperatury spiekania i ciśnienia prasowania **czas spiekania** powinien zawierać się w przedziale 5-10 min. Niepożądanym efektem krótszego

czasu spiekania będzie niewystarczający poziom konsolidacji materiału, czyli mniejsza gęstość względna, zaś spiekania dłuższego niż 10 min: niedogęszczenie materiału i niekorzystny rozrost ziaren WC. Ponadto dłuższe spiekanie zwiększa energochłonność procesu, a w konsekwencji koszty wytworzenia materiału.

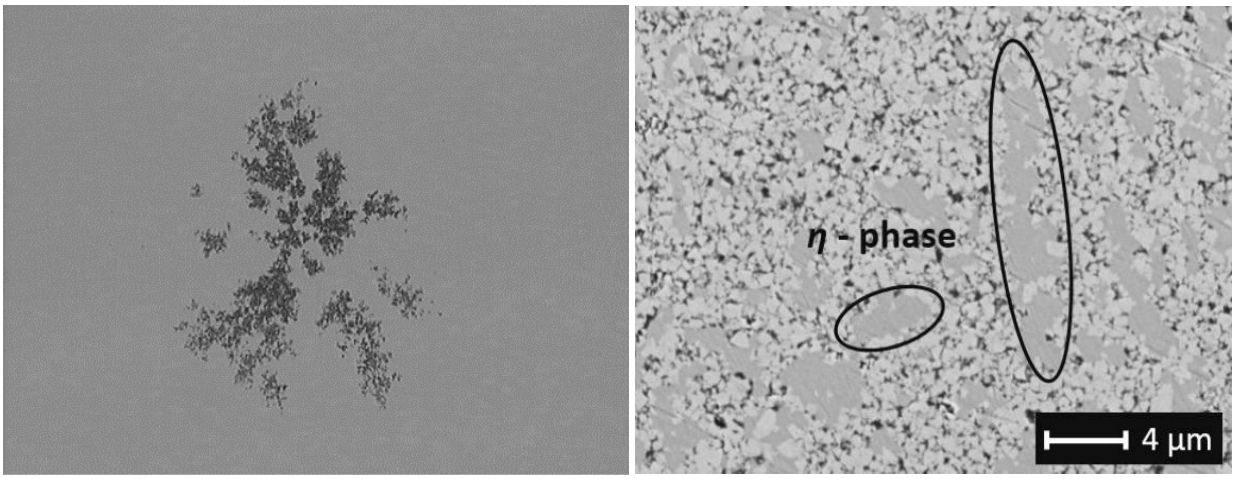
Kolejnym parametrem mającym wpływ na właściwości mechaniczne uzyskiwanych materiałów w procesie spiekania metodą SPS jest **szybkość nagrzewania** powiązana z wartością napięcia prądu stałego w pojedynczym impulsie. Udowodniono, że spiekanie zachodzi, gdy napięcie jest większe niż 3 V [79].

W przypadku węglików spiekanych WC-Co o ich właściwościach mechanicznych końcowych decyduje przede wszystkim wielkość ziaren WC i ich udział procentowy w kompozycie. Zwiększając ten udział i/lub redukując wielkość ziaren, uzyskuje się wzrost twardości kompozytu i jego odporności na zużycie, przy jednoczesnym zmniejszeniu odporności na kruche pękanie, które analogicznie wzrasta w przypadku zwiększenia udziału osnowy w kompozycie lub wielkości ziaren WC [80, 81]. Najlepszą relację twardość/odporność na kruche pękanie uzyskuje się, stosując wagowy udział procentowy osnowy kobaltowej Co w zakresie od 5 do 10% [81].

Niezwykle istotnym elementem procesu spiekania jest możliwość kontrolowania **rozrostu ziaren**. Zjawiska tego co prawda nie da się powstrzymać, jednak można je skutecznie ograniczać, chociażby poprzez szybkie nagrzewanie proszku i krótki czas spiekania. Metoda SPS jest bardzo dobrym rozwiązaniem do wytwarzania węglików spiekanych o ulepszonych właściwościach mechanicznych. Gruboziarnistą mikrostrukturę tworzą ziarna WC o wielkości powyżej 5 µm, a najdrobniejszą – cząstki o wielkości mniejszej niż 500 nm.

Spiekanie mieszanin proszków WC-Co niejednokrotnie skutkuje reakcjami chemicznymi zachodzącymi pomiędzy W, C i Co. W zależności od temperatury spiekania oprócz pierwotnej fazy WC i Co, mogą powstawać inne: 1) wtórne ubogie w węgiel, takie jak W_2C, czy WC_{1-x} oraz 2) złożone, np.: Co_3W_3C czy Co_6W_6C. Fazy te powstają w głównej mierze na skutek odwęglenia związku węglika wolframu (WC)pod wpływem spiekania. Jeśli utrata węgla jest stosunkowo duża, uzyskuje się stabilną formę W_2C, zaś jeżeli jest niewielka, ale zjawisku towarzyszy wysoka temperatura, należy spodziewać się powstania WC_{1-x} – struktury, która może ulec niepożądanej w mikrostrukturze węglików spiekanych WC-Co dekompozycji do form WC i W_2C [82]. Z kolei w przypadku faz złożonych (η) – Co_3W_3C oraz Co_6W_6C, za ich powstanie odpowiada kilka czynników, w tym najważniejszy, tj.: obecność fazy ciekłej Co i/lub znaczny deficyt węgla w fazie WC. Faza Co_3W_3C powstaje w temperaturze 1425°C, natomiast Co_6W_6C już w temperaturze 1000°C. Co do zasady struktury te pod względem morfologii mają kształt dendrytyczny, jeśli jednak wystąpi znaczący niedomiar węgla, uzyskują kształt nieregularny (rys. 4.1.5) [83]. Powyższe fazy są niepożądane w mikrostrukturze węglików spiekanych WC-Co wytwarzanych klasycznymi metodami metalurgii proszków, gdyż wpływają niekorzystnie na odporność na kruche pękanie. Badania własne [77, 84] wykazały jednak, że w przypadku spiekania metodą SPS obecność tych faz w

mikrostrukturze WC-6 Co (zarówno w temperaturze 1200, jak i 1400°C), nie zmniejsza jej odporności na kruche pękanie, przeciwnie –poprawia twardość.



a) b)

Rys. 4. 5. *Morfologia faz η w mikrostrukturze węglików spiekanych: a) kształt dendrytyczny (LM, 200x)*[85], *b) kształt nieregularny (SEM)* [2]

4.2. Omówienie wyników badań własnych

Głównym celem realizowanych badań oraz prowadzonych prac rozwojowych było:

1) zastosowanie nowoczesnej i efektywnej technologii spiekania iskrowo-plazmowego (SPS) do wytwarzania materiałów kompozytowych WC-Co (stosowanych
w przemyśle maszynowym) o ulepszonych właściwościach mechanicznych;

2) opracowanie nowej metody oceny mechanizmów ich odkształcenia podczas pomiarów twardości (z zastosowaniem różnych obciążeń metodą indentacji) za pomocą innowacyjnego, autorskiego stanowiska badawczego wyposażonego w nanointeder firmy Fischer Picodentor HM500;

3) zaprojektowanie i wykonanie nowego oprzyrządowania narzędziowego zwiększającego wydajność wytwarzania płytek skrawających do 9 szt. w jednym procesie, przy jednoczesnym zastosowaniu minimalnej liczby przejść drutu w procesie cięcia elektroerozyjnego.

Dzięki zrealizowaniu powyższych założeń, a także przeprowadzeniu licznych badań oraz prac wdrożeniowych na skalę przemysłową, proces SPS zyskał na utylitarności: można zastosować go w półprzemysłowej skali do wykonywania płytek skrawających o wymiarach 9,70 x 9,70 x 3,18 mm, a także, co bardzo ważne, elementów i części budowy maszyn, np. tulej, dysz przewodzących, elektrod do nagrzewania i hartowania drutu.

Poniżej szczegółowo omówiono osiągnięcia wchodzące w skład tematycznie powiązanych artykułów naukowych, stanowiących podstawę do ubiegania się o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego.

W pracy [**H7**] do badań zastosowano proszek kompozytowy WC-6Co firmy Inframat Advanced Materials (USA) o wielkości cząstek WC w zakresie 40-80 nm i czystości 99,9%. Poddano go spiekaniu metodą SPS w temperaturze 1500°C, czyli nieznacznie powyżej temperatury topnienia Co, w czasie 5 i 10 min z szybkością nagrzewania od temperatury otoczenia do temperatury spiekania – 400 i 600°C/min. Ciśnienie prasowania wynosiło 50 MPa, a proces odbywał się w próżni.

W wyniku spiekania uzyskano materiały o następujących parametrach:

- gęstość: 93,79-97,40%,
- twardość: 1241-1842 HV30,
- odporności na kruche pękanie: 11.58-13.93 MPa $m^{1/2}$,
- moduł Younga: 645-703 GPa.

Istotne jest to, że w mikrostrukturze nie powstały fazy wtórne, uzyskano natomiast materiał dwufazowy, składający się wyłącznie z fazy WC i Co. Za pomocą metody Scherrera przeanalizowano wielkość krystalitów WC oraz Co i ustalono, że znacząca większość struktur osiągnęła wymiar poniżej 50 nm, przy czym najmniejszą wielkością(poniżej 40 nm) odznaczały się krystality w kompozytach, w których spiekanie odbywało się z szybkością nagrzewania 600°C/min. Zaobserwowano także, że wydłużając czas spiekania z 5 do 10 min, rozmiary krystalitów WC zwiększają się, zaś ziarna Co zachowują się inaczej:zwiększają się przy wolniejszym, amaleją przy szybszym nagrzewaniu materiału proszkowego. Analizując wpływ szybkości nagrzewania na rozrost krystalitów (z zachowaniem takiego samego czasu spiekania), wykazano, że zarówno krystality WC jak i Co osiągają mniejsze rozmiary przy zastosowaniu większej szybkości nagrzewania.

Istotnym elementem analizowanej pracy było także określenie wpływu szybkości nagrzewania oraz czasu spiekania na mikrostrukturę, a w konsekwencji na właściwości mechaniczne węglików spiekanych typu WC-6Co wytwarzanych metodą SPS. W pracy wykazano, że wraz ze wzrostem szybkości nagrzewania zwiększało się napięcie prądu impulsowego: zwiększenie szybkości z 400 do 600°C/min o połowę skróciło czas fazy pośredniej, tj. pomiędzy stanem wyjściowym a tym, w którym następuje spiekanie w temperaturze ustalonej. Co oczywiste – osiągnięcie temperatury 1500°C w jak najkrótszym czasie przełożyło się na większe zapotrzebowanie energetyczne.

W trakcie badań zaobserwowanoponadto, że zdecydowanie większe napięcie i natężenie prądu impulsowego występuje w przypadku nagrzewania z szybkością 600°C/min. Większym napięciem i natężeniem charakteryzowały się także iskrowe wyładowania elektryczne pomiędzy cząstkami proszku, w tym w rozwijającej się szyjce. W efekcie procesy dyfuzji przebiegały szybciej, intensyfikując proces spiekania. Dzięki temu kompozyt spiekany z większą szybkością nagrzewania przy takim samym czasie spiekania charakteryzował się lepszą konsolidacją.

Porowatość oraz obszary o niepełnej konsolidacji wpływają na twardość spieków: twardość kompozytu z widoczną porowatością wyniosła 1241 HV30 i była znacznie mniejsza niż materiałów, które charakteryzują się mikrostrukturą zbliżoną do litej. Materiał o mniejszej twardości okazał się także mniej kruchy, o czym świadczy wartość krytycznego

współczynnika intensywności naprężeń – 13,93 MPa·m$^{1/2}$. Dwukrotne zwiększenie czasu spiekania (z 5 do 10 min), niezależnie od zastosowanej szybkości nagrzewania, pozwoliło uzyskać pełną konsolidację materiału bez wyraźnej porowatości. Materiały charakteryzowały się także znacznie większą twardością wynoszącą: 1724 HV30 – dla spieku nagrzewanego do temperatury spiekania z szybkością 400°C/min i 1815 HV30 – dla 600°C/min. Ponadto w przypadku kompozytów spiekanych w czasie 10 minzaobserwowano wzrost twardości materiału spiekanego z większą szybkością nagrzewania, przy czym nie byłon aż tak duży, jak w przypadku materiałów spiekanych w czasie 5 min. Kompozyt spiekany w czasie 10 min z szybkością nagrzewania wynoszącą 600°C/min odznaczał się twardością 1815 HV30, co stanowiło wzrost średniej twardości w stosunku do kompozytu spiekanego z szybkością nagrzewania 400°C/min o 91 HV30.

Wymienione wyżej spieki charakteryzowały się korzystną odpornością na kruche pękanie – wartość krytycznego współczynnika intensywności naprężeń we wszystkich przypadkach wynosił ponad 11.5 MPa·m$^{1/2}$, przy czym najtwardszy z materiałów (1842 HV30) odznaczał się wartością K_{1c} wynoszącą 12.39 MPa·m$^{1/2}$.

Udowodniono, że zarówno szybkość nagrzewania, jak i czas spiekania w istotny sposób zmieniają właściwości materiałów. Spiekanie z większą szybkością nagrzewania intensyfikuje proces konsolidacji, ponieważ napięcie i natężenie iskrowych wyładowań elektrycznych pomiędzy spiekanymi cząstkami proszku jest znacznie większe w stosunku do wolniejszego nagrzewania, w związku z tym większa jest także gęstość prądu w kształtujących się szyjkach proszków. Natomiast procesy dyfuzyjne aktywowane są w niższej temperaturze i przebiegają intensywniej. W przypadku wydłużenia czasu spiekania również obserwowano poprawę właściwości mechanicznych badanych materiałów.

Otrzymane w wyniku konsolidacji metodą SPS kompozyty odznaczały się stosunkowo dużą jak na węgliki spiekane sztywnością – wartość modułu sprężystości wynosił od 645 do 703 GPa. Na podstawie uśrednionego wyniku z pięciu pomiarów modułu sprężystości można wnioskować, że wzrost szybkości nagrzewania konsolidowanego proszku tylko nieznacznie wpływa na zmniejszenie sztywności spieków. Z kolei w przypadku wydłużenia czasu spiekania z 5 do 10 min, zarówno dla materiału nagrzewanego do temperatury spiekania z szybkością 400°C/min, jak i 600°C/min, odnotowano wzrost modułu Younga (E_{IT}), odpowiednio o 53 GPa dla 400°C/min i 27 GPa dla 600°C/min.

Kolejne badania opublikowane w pracy [**H6**] dotyczyły porównania wpływu różnych wielkości cząstek proszku WC-6Co po procesie spiekania SPSna mikrostruktury i właściwości mechaniczneuzyskanych spieków, które wyznaczono metodą indentacji (tab. 4.1).

Do badań zastosowano dwa rodzaje mieszanin proszkowych WC-6Co o wielkości cząstek WC w zakresie 100-200 nm i 30-50 µm, które poddano spiekaniu w temperaturze 1450°C, czyli nieznacznie poniżej temperatury topnienia Co, w czasie 3 i 6 min, z szybkością nagrzewania od temperatury otoczenia do temperatury spiekania wynoszącą 300 oraz 600°C/min. Ciśnienie prasowania wynosiło 50 MPa, a proces odbywał się w próżni.

Tabela 4.1.*Wpływ wybranych parametrów procesu SPS na właściwości uzyskanych kompozytów* [**H6**]

Wielkość cząstek	Czas spiekania	Zmienna/przyczyna	Wynik/skutek
WC-6Co: 100-200 nm	3 min	zwiększenie szybkości nagrzewania z 300 do 600°C/min	– zwiększenie wielkości ziaren WC – mniej jednorodna mikrostruktura
	6 min	wydłużenie czasu spiekania z 3 do 6 min	– zwiększenie wielkości ziaren WC – bardziej jednorodna mikrostruktura
WC: 30-50 µm Co: 4 µm	3/6 min	wydłużenie czasu spiekania z 3 do 6 min	– zwiększenie zagęszczenia spieków niezależnie od zastosowanej szybkości nagrzewania

Na podstawie uzyskanych wyników w postaci krzywych obciążenia/wgłębienia zarejestrowanych podczas indentacji wykonanej przy obciążeniu 300 mN wykazano, że istnieje zależność pomiędzy twardością, a czasem spiekania i szybkością nagrzewania w procesie SPS proszków WC-6Co (tab. 4.2).

Tabela 4.2. *Wpływ wybranych parametrów procesu SPS na właściwości uzyskanych kompozytów* [**H6**]

Wielkość cząstek	Czas spiekania	Szybkość nagrzewania	Nanotwardość
0,2-0,5 µm	3 min	300°C/min	2144 HV
	6 min		2096 HV
	3 min	600°C/min	2089 HV
	6 min		1912 HV
0,5-1,5 µm	3 min	300°C/min	1982 HV
	6 min		1487HV
	3 min	600°C/min	1739 HV
	6 min		1382 HV

Nanotwardość spieków WC-6Co wytworzonych z proszku o ultradrobnej wielkości cząstek wyniosła 2089 i 1912 HV dla czasu spiekania odpowiednio 3 i 6 min oraz szybkości nagrzewania równej 600°C/min. Przy nagrzewaniu proszku z szybkością 300°C/min uzyskano spieki o większej twardości, wynoszącej 2144 i 2096 HV dla analogicznego czasu spiekania. Oznacza to, że nanotwardość spieków z proszku o ultradrobnej wielkości cząstek zwiększa się wraz ze skróceniem czasu spiekania i zmniejszeniem szybkości nagrzewania. Taką samą zależność zaobserwowano w przypadku spieków wytworzonych z proszku mikrometrycznego. Pomiar nanotwardości tych materiałów, ze względu na uzyskaną mikrostrukturę, prowadzono tylko na ziarnach WC. Oznacza to, że przedstawione wyniki nie uwzględniają fazy Co oraz porowatości, a tym samym nie dają pełnego poglądu na rzeczywistą twardość tych spieków.

W ramach przeprowadzonych badań wykonano również pomiary modułu Younga uzyskanych węglików po procesie spiekania SPS. Na podstawie uzyskanych wyników (tab. 4.3) można wnioskować, że najlepszą sprężystość wzdłużną osiągają kompozyty o największej twardości (przy tych samych parametrach procesu wytwarzania).

Tabela 4.3. *Wpływ wybranych parametrów procesu SPS na właściwości uzyskanych kompozytów* [**H6**]

Wielkość cząstek	Czas spiekania	Szybkość nagrzewania	Moduł Younga
0,2-0,5 µm	3 min	300°C/min	673 GPa
	6 min		652 GPa
	3 min	600°C/min	654 GPa
	6 min		649 GPa
0,5-1,5 µm	3 min	300°C/min	674 GPa
	6 min		550 GPa
	3 min	600°C/min	607 GPa
	6 min		541 GPa

Odporność materiałów na ścieranie jest zwykle tym większa, im większa jest ich twardość. Twarde materiały przeznaczone na narzędzia skrawające podlegają najczęściej typowemu zużyciu ściernemu, przy czym należy mieć na uwadze, że w warunkach pracy uderzeniowej proces zużycia następuje przede wszystkim poprzez pękanie, a tylko w ograniczonym stopniu przez typowe zużycie ścierne. Biorąc pod uwagę powyższe ustalono, że podatność na kruche pękanie badanych próbek wyniosło 0,57 i 0,60 µm/N, przy czym jedynie spiek wytworzony z proszku mikrometrycznego charakteryzujący się najmniejszą twardością i modułem Younga (spiekanie w czasie 6 min z szybkością nagrzewania 600°C/min)osiągnął wynik 0,53 µm/N. Większe wartości tego parametru (0,59-0,60 µm/N) uzyskały spieki wykonane z proszku o ultradrobnej wielkości cząstek, których twardość wyniosła powyżej 2000 HV.

Praca pękania węglików spiekanych wytworzonych z proszku o wielkości cząstek w zakresie 100-200 nm, niezależnie od zastosowanego czasu spiekania i szybkości nagrzewania, wyniosła 0,09 µJ. Większe wartości odnotowano dla węglików spiekanych typu WC-6Co otrzymanych z proszku mikrometrycznego (0,09-0,13 µJ), co oznacza, że praca pękania tych materiałów niewiele wzrasta wraz ze znaczącymzmniejszeniem twardości.

Wyniki dalszych prac nad węglikami spiekanymi typu WC-Co wytwarzanymi metodą SPS opublikowano w pracy [**H5**] – w artykule m.in. przeanalizowano wpływ dodatku inhibitorów wzrostu ziaren WC, tj. Cr_3C_2 i TaC na mikrostrukturę oraz twardość i odporność na kruche pękanie kompozytu. Rozmiary zastosowanych do badań proszków wynosiły odpowiednio:
WC – ok. 0,2 µm, Co – ok. 4 µm, Cr_3C_2 – 6µm oraz TaC – 3µm. Proces spiekania techniką SPS wykonano z zastosowaniem parametrów opisanych w pracy [H7], tj. w próżni i temperaturze 1500°C oraz czasie spiekania równym 5 min. Szybkość nagrzewania wynosiła 600°C/min, a ciśnienie prasowania 50 MPa.

Obserwacje mikrostruktury umożliwiłyokreślenie rozkładu ziaren WC i fazy wiążącej, czyli Co. Większe pory zaobserwowano tylko w próbce WC-5Co-2Cr_3C_2, na co miała wpływ większa lepkość fazy ciekłej zawierającej Cr_3C_2 i jednocześnie mniejsza zdolność do wypełniania porowatości. W spiekach zawierających TaC zaobserwowano tylko porowatość resztkową, co wynika z faktu, że dodatek TaC ma niewielki wpływ na zmniejszenie lepkości fazy ciekłej podczas spiekania. Wielkość ziaren oszacowana metodą Scherrera dowiodła skuteczności ograniczenia rozrostu ziaren WC za pomocą wprowadzenia do ich mikrostruktury inhibitorów wielkości ziaren. Po zastosowaniu Cr_3C_2wielkość cząstek kompozytu WC-5Co z początkowej wartości 47 nm zmniejszyła się do 26nm, zaś po dodaniu TaC – do 38 nm. Oznacza to, że Cr_3C_2 ma lepsze właściwości w zakresie ograniczenia rozrostu ziaren niż TaC.

Wszystkie otrzymane węgliki spiekanecharakteryzowały sięgęstością względną powyżej 97% (spiek WC-5Co osiągnął wartość 99%.) Największą porowatością odznaczał się węglik spiekany WC-5Co z dodatkiem Cr_3C_2. Uzyskane wyniki pomiarów gęstości potwierdziły obserwacje mikrostruktury.Na ich podstawie wykazano, żespiek WC-5Co-2Cr_3C_2charakteryzuje się największą twardością spośród badanych materiałów i wynosi 2105

HV30, tj. o 39% więcej niż w przypadku próbki WC-5Co i 22% więcej w stosunku do próbki WC-5Co-2TaC. Spiek WC-5Co-2TaC okazał się natomiast o 14% twardszy niż WC-5Co.

Otrzymane kompozytyz dodatkiem inhibitorów wzrostu ziaren charakteryzowały się większą odpornością na kruche pękanie (powyżej 8 MPa·$m^{1/2}$) niż WC-5Co bez ich dodatku (7,4 MPa·$m^{1/2}$), przy czym największą odpornościąwykazał się spiek WC-5Co-2TaC (8,6 MPa·$m^{1/2}$,tj. o 15% więcej niż w przypadku WC-5Co). Poprawę tego parametruuzyskano poprzez dobór odpowiednich warunków spiekania techniką SPS i właściwy rodzaj wytypowanych dodatków stopowych i inhibitorów wzrostu, takich jak Cr_3C_2 i TaC.

Moduł Younga węglików spiekanych bez dodatków stopowych wynosił 610 GPa, zaś dla węglika z dodatkiem Cr_3C_2. – 675 GPa. Próbka zawierająca TaC wykazywała największą wartość modułu Younga wynoszącą 708 GPa, czyli o 16% większą niż w przypadku węglika spiekanego bez inhibitora wzrostu i o około 5% większą niż w przypadku próbki z dodatkiem Cr_3C_2. Można zatem jednoznacznie stwierdzić, że obecność tego inhibitora wpływa na poprawę sztywności materiału (tab. 4.4).

Tabela 4.4.*Wpływ wybranych parametrów procesu SPS na właściwości uzyskanych kompozytów* [**H6**]

Inhibitor rozrostu ziaren WC	Zmienna/przyczyna	Wynik/skutek
Cr_3C_2	– większa lepkość fazy ciekłej – mniejsza zdolność do wypełniania wolnych przestrzeni	– ograniczenie rozrostu ziaren WC do 26 nm – zwiększenie twardości do 2105 HV30 – zwiększenie odporności na kruche pękanie do 8,3 MPa·$m^{1/2}$ – zwiększenie moduły Younga do 675 GPa – zmniejszenie gęstości względnej do 97,16%
TaC	– mniejsza lepkość fazy ciekłej – większa zdolność do wypełniania wolnych przestrzeni	– ograniczenie rozrostu ziaren WC do 38 nm – zwiększenie twardości do 1725 HV30 – zwiększenie odporności na kruche pękanie do 8,6 MPa·$m^{1/2}$ – zwiększenie moduły Younga do 708 GPa – zmniejszenie gęstości względnej do 97,41%

Kontynuacją badań nad wpływem dodatków Cr_3C_2 i TaC na właściwości mechaniczne węglików spiekanych typu WC-Co wytwarzanych technologią SPS są wyniki zaprezentowane w pracy [**H4**]. Do badań użyto proszków dostarczonych przez Inframat Advanced Materials (USA), tj.: nanokrystaliczny WC-6Co (czystość 99,9%, rozmiary ziaren 40-80 nm), mikrokrystaliczny Cr_3C_2 (czystość 99,9%, wielkość cząstek ok. 6 µm) oraz mikrokrystaliczny TaC (czystość 99,9%, wielkość cząstek ok. 3 µm).Zastosowano następujące parametry procesu spiekania:

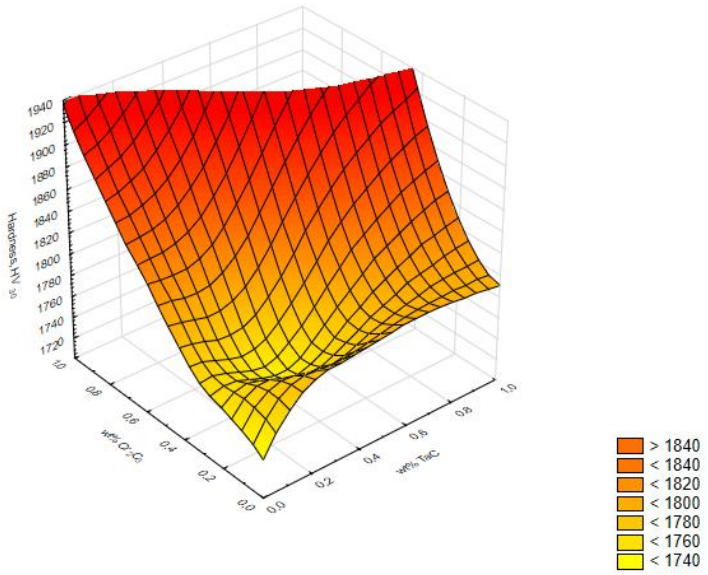
- temperatura: 1450°C,
- szybkość nagrzewania: 600°C/min,
- ciśnienie prasowania: 60 MPa,
- czas spiekania: 5 min.

Obserwacje mikrostruktury pozwoliły na określenie rozkładu ziaren WC i Co. W wybranych próbkach wykazano równomierny rozkład ziaren. W materiale WC-6Co-0,6TaC zauważono wady mikrostrukturalne w postaci aglomeratów, które zaistniały również w próbce WC-6Co-0,5Cr3C2-0,5TaC, osiągając jeszcze większe rozmiary. Należy przyjąć, że potencjalną przyczyną powstawania tego zjawiska jest proces mieszania proszków i wynikająca z niego segregacja cząstek. Jednym ze sposobów zapobiegania aglomeracji cząstek proszków może być mieszanie ultradźwiękowe. Próbki z 1,0% wag. Cr3C2 i TaC wykazały drobniejszą mikrostrukturę niż próbki z 0,6% wag. W innych spiekach, m.in. WC-6Co-1TaC również wystąpiły tego rodzaju wady mikrostrukturalne. Oznacza to, że zwiększenie zawartości dodatków w materiałach kompozytowych (typu węglików spiekanych) może zapobiegać powstawaniu aglomeracji cząstek proszków, dzięki czemu uzyska się drobną mikrostrukturę bez wewnątrzstrukturalnych wad po procesie SPS.

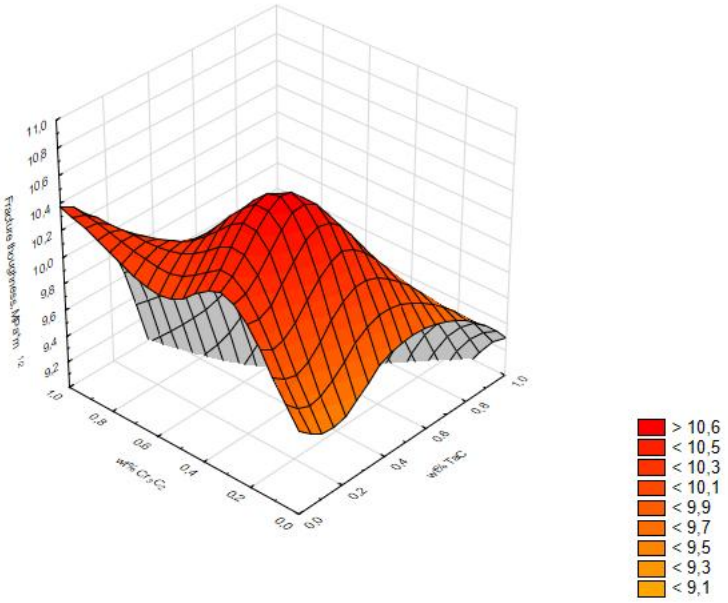
W wynikumodyfikacjimikrostruktury węglika spiekanego WC-6Co, tj. dodania 0,2% wag; 0,6% wag. i 1% wag. Cr_3C_2zwiększyła się twardość węglika (z początkowej wartości 1728 HV30), a ponadtopoprawiła odporność na kruche pękanie. Próbka o największej zawartości Cr_3C_2 (1% wag.) charakteryzowała się największą twardością – 1936 HV30 i odpornością na kruche pękanie – 10,38 $MPa \cdot m^{1/2}$. Z kolei węgliki spiekane z dodatkiem TaC wykazały sięnieco gorszymi właściwościami parametru K_{IC}, osiągającwartości od 9,29 $MPa \cdot m^{1/2}$(próbki z największą zawartościąTaC) do 9,76 $MPa \cdot m^{1/2}$(średniej zawartość dodatku). Biorąc pod uwagę twardość tych materiałów, uzyskano nieco lepsze wartości (1784-1799 HV30) niż te, charakteryzujące materiał podstawowy. Największą twardością odznaczał siejednak węglik spiekany z dodatkami zarówno Cr_3C_2, jak iTaC:w przypadku WC-6Co-0,5Cr_3C_2-0,5TaC uzyskano wartości do 1870 HV30, przy jednoczesnejodporności na pękanie równej 9,48 $MPa \cdot m^{1/2}$. Najmniejszą twardość uzyskanonatomiast dlaspieku WC-6Co-0,3Cr_3C_2-0,3TaC (1732 HV30), na cobezpośredni wpływ miała porowatość występująca w mikrostrukturze próbki (porowatość to krytyczny parametr wpływający na twardość węglików spiekanych). Z drugiej strony omawiany materiał uzyskał największą odporność na pękanie wynoszącą 11,02 $MPa \cdot m^{1/2}$.

Istotnym etapem przeprowadzonych badań było także porównanie właściwości mechanicznych uzyskanych kompozytów metodą SPS z materiałami dostępnymi w handlu i przemyślemaszynowym, tj. płytkami skrawającymi firmy Baildonit (Polska) z grupy ISO K10, takimi jak H10 (WC-6Co) i H10S (WC-4,5Co-4,5TaC-NbC). Przeprowadzone badania wykazały m.in., że twardość handlowychpłytek skrawających(wynoszących odpowiednio 1600 i 1650 HV30) jest mniejsza niż w przypadku autorskich próbek o podobnym składzie chemicznym, ale z zawartością inhibitorów wzrostu.

Na podstawie uzyskanych wyników porównania można wyraźnie zauważyć pozytywny wpływ zastosowania dodatków stopowych zarówno na twardość kompozytów, jak i na inne właściwości mechaniczne węglików spiekanych wytwarzanych metodą SPS (rys. 4.6).



(a)



(b)

Rys. 4.6. *Zależność twardości (a) i odporności na kruche pękanie (b) od zawartości Cr3C2 i TaC w spiekach WC-Co*[**H4***]*

W pracy [**H2**], która jest kontynuacją poprzednich prac [H4–H7], przeanalizowano wpływdodatkuwybranych inhibitorów wzrostu ziaren WC, takich jak Cr_3C_2 i TaC-NbC, na ewolucję mikrostruktury i wybrane właściwości mechaniczne węglików spiekanych typu WC-6Co.

Do badań zastosowano następujące proszki:

- WC-6Co – czystość 99,9%, wielkość cząstek w zakresie 100-200 nm,
- Cr_3C_2 – czystość 99,9%, wielkość cząstek 6 µm oraz
- TaC-NbC – czystość 99,9%, w stosunku 60:40 wag., wielkość cząstek 3 µm.

W pierwszym etapie badań mieszano przez 5 min węglik podstawowy typu WC-6Co w zawiesinie bezwodnego acetonu za pomocą ultradźwięków wywoływanych homogenizatorem ultradźwiękowym z inhibitorami: Cr_3C_2 oraz TaC-NbC. Następnie konsolidowano uzyskane mieszaniny proszków przy zastosowaniu różnych parametrów procesu SPS celem wyznaczenia najkorzystniejszego wariantu temperatury spiekania i ciśnienia prasowania. W dalszym procesie podjęto próby spiekania mieszanin proszków WC-6Co-xCr_3C_2 i WC-6Co-xTaC-NbC (x = 1, 2, 3% wag.),stosując następujące parametry:

- temperatura: 1400°C,
- szybkość nagrzewania: 200-400°C/min,
- ciśnienie prasowania: 50-60 MPa,
- czas spiekania: 10 min,
- próżnia: 0,05 mbar.

W mikrostrukturze węglików spiekanych WC-6Co wykazano obecność fazy η o prawie kulistym kształcie. Badania rentgenowskie potwierdziły, że wspiekach wykonanych zszybkością nagrzewania wynoszącą 200°C/min i ciśnieniem prasowania równym 50 MPa udział tego typu ziaren był większy niż w przypadku spiekania z większą szybkością nagrzewania (400°C/min i ciśnienie 60 MPa). Można zatem przyjąć, że udział faz wtórnych zmniejsza się wraz ze wzrostem ciśnienia prasowania i szybkością nagrzewania.

Na podstawie analizy mikrostruktury węglika typu WC6-Co spiekanego z szybkością nagrzewania wynoszącą 400°C/min przy ciśnieniu prasowania równym 60 MPa, dodatek inhibitorów wzrostu ziarna Cr_3C_2 i TaC-NbC wpłynął na ewolucję mikrostruktury w zakresie intensywniejszego tworzenia się faz wtórnych. Ponadto fazy te pojawiły się w postaci aglomeratów i były zlokalizowane na granicach cząstek WC.

Węgliki spiekane WC-6Co przy niższym ciśnieniu prasowania wynoszącym 50 MPa charakteryzowały się podobną twardością (1775 i 1773 HV30) i mniejszą odpornością na kruche pękanie (9,19 i 9,49 MPa·$m^{1/2}$) niż otrzymane przy zastosowaniu większego ciśnieniaprasowania, tj. 60 MPa (1704 HV30, 9,65 MPa·$m^{1/2}$i 1712 HV30, 9,84 MPa·$m^{1/2}$; tab. 4.5).Pomimo tego, że gęstość spieków powstałych z użyciem niższego ciśnienia(50 MPa) była niewielka, to stosunkowo duża zawartość twardych i kruchych faz W_2C, Co_3W_3C i Co_6W_6C wpłynęła na zwiększenieich twardości, zwłaszcza przy zastosowaniu mniejszej szybkości nagrzewania. Generalnie tworzenie tych faz w węglikach spiekanych WC-Co jest niepożądane, gdyż ich obecność zmniejsza odporność na kruche pękanie. Najlepsze właściwości w tym zakresie, tj. wartość 9,84 MPa·$m^{1/2}$ uzyskano dlaspieków wytworzonych przy 60 MPa i 400°C/min – w ich przypadku obecność faz wtórnych była niewielka.

Tabela 4.5.*Wpływ wybranych parametrów procesu SPS na właściwości uzyskanych kompozytów* [**H4**]

Ciśnienie prasowania	Szybkość nagrzewania	Nanotwardość	Odporność na kruche pękanie
50 MPa	200°C/min	1775 HV	9,19 MPa·$m^{1/2}$
60 MPa		1773 HV	9,49 MPa·$m^{1/2}$
50 MPa	400°C/min	1704 HV	9,65 MPa·$m^{1/2}$

60 MPa		1712 HV	9,84 MPa·m$^{1/2}$

Dodatek inhibitorów wzrostu ziaren, takich jak badane wcześniej Cr_3C_2 i TaC-NbC, wpłynął na poprawę twardości węglików spiekanych, tylko wówczas, gdy ich zawartość nie przekroczyła 2% udziału wagowego składu chemicznego kompozytu (tab. 2.6). W przeciwnym razie właściwości mechaniczne ulegały pogorszeniu, prawdopodobnie na skutek tworzenia się aglomeratów o dużych rozmiarach ziaren.

Tabela 4.6. *Wpływ procentowego udziału wagowego inhibitorów wzrostu na twardość i odporność na kruche pękanie kompozytów z węglików spiekanych* [**H2**]

Inhibitory wzrostu	% udział wagowy	Twardość	Odporność na kruche pękanie
Cr_3C_2	1%	1787 HV30	10,17 MPa·m$^{1/2}$
	2%	1787 HV30`	
TaC-NbC	1%	1787 HV30	9,76 MPa·m$^{1/2}$
	2%	1787 HV30	

Odporność na kruche pękanie spieków WC-6Co-2TaC-NbC jest mniejsza niż węglika spiekanego WC-6Co-1Cr_3C_2, ponieważ zawartość fazy W_2C w mikrostrukturze jest większa. W innych przypadkach, czyli wtedy, gdy zawartość faz W_2C, Co_3W_3C i Co_6W_6C jest większa, odporność na kruche pękanie mieści się w zakresie od 9,36 do 9,76 MPa·m$^{1/2}$.

Kolejnym krokiem pracy badawczej było wdrożenie uzyskanych wyników badań do praktyki przemysłowej w celu uzyskania narzędzi skrawających wykonanych z węglików spiekanych typu WC-Co metodą SPS, w tym także elementów budowy maszyn szczególnie narażonych na występowanie dużych obciążeń mechanicznych.

Wyniki badań zaprezentowane w artykule [**H3**] stanowią rezultat prac wykonywanych w ramach projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR): *Wytwarzanie innowacyjnych elektrod do nagrzewania i hartowania drutu oraz narzędzi do obróbki twardych materiałów z nanokrystalicznych proszków WC-Co spiekanych metodą SPS* (nr umowy POIR.01.01.01-00-0267/16-00, 2017–2019; Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego w Programie Operacyjnym Inteligentny Rozwój na lata 2014-2020; oś priorytetowa: wsparcie prowadzenia prac B+R przez przedsiębiorstwa, działanie: projekty B+R przedsiębiorstw; poddziałanie badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa; nabór 1/1.1.1/2016; pełniona funkcja: kierownik).

W wyniku prac badawczych i rozwojowych zaprojektowano oraz wyprodukowano nowe narzędzia grafitowe do wytwarzania na skalę półprzemysłową płytek skrawających o wymiarach 9,70 x 9,70 x 3,16 mm uzyskanych z jednego spieku o wymiarach 29,8 x 29,8 mm za pomocą czterech przejść ciecia metodą elektroerozyjną.

W ramach projektu badano również proces wytwarzania kompozytów z węglika spiekanego WC-5Co z zastosowaniem następujących parametrów:

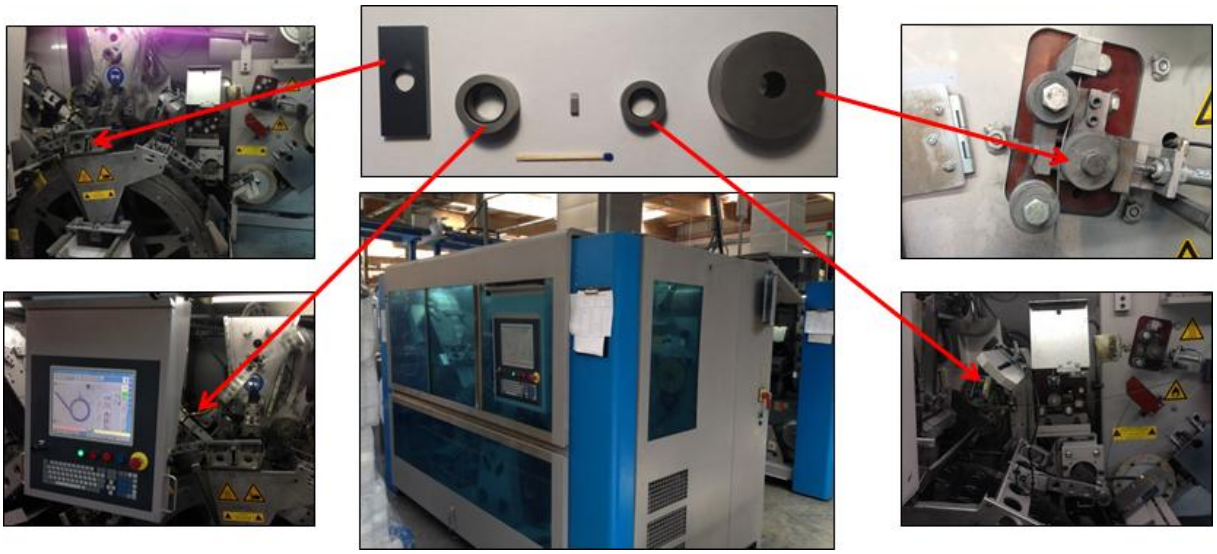
- temperatura: 1200°C,
- szybkość nagrzewania: 200 oraz 400°C/min,
- ciśnienie prasowania: 50 MPa oraz zwiększone do 80 MPa,

– czas spiekania: 5 i 10 min.

Oszacowana metodą Sherrera wielkość krystalitów WC we wszystkich spiekachmieściła się w zakresie od 33 do 40 nm, a jej niewielki wzrost był najprawdopodobniejefektem niskiej temperatury spiekania (1200°C), szybkiego nagrzewania (200 i 400° C min) oraz krótkiego czasu spiekania (5 i 10 min) proszku.Twardość wszystkich uzyskanych spiekówwyniósł ponad 1750 HV30, tj.:

– WC-5Co bez fazy η w mikrostrukturze – 1754-1797 HV30,
– WC-5Co z twardą fazaη w mikrostrukturze – 1780-1861 HV30.

W procesie spiekania uwzględniającego parametry: 1) ciśnienie prasowania: 50 MPa, 2) szybkość nagrzewania 400°C/min, 3) czas spiekania 10 min, uzyskano próbkę o twardości 1754 HV30 i odporności na kruche pękanie 8,38 MPa·m$^{1/2}$. W tym przypadku większa kruchośćbyła wynikiem obecności fazy złożonej Co_3W_3C. W innych próbkach, w których zsyntetyzowano fazy η, odporność na kruche pękanie również była mniejsza i wynosiła od 8,56 MPa·m$^{1/2}$do 9,30 MPa·m$^{1/2}$.Dla porównania: odporność na kruche pękanie próbek o mikrostrukturze składającej się wyłącznie z fazy WC osadzonej w spoiwie Co mieściła się w zakresie8,91-9,95 MPa·m$^{1/2}$. Istotne jest to, że z przemysłowego punktu widzenia otrzymane węgliki spiekane WC-5Co charakteryzowały się większą twardością i jednocześnie taką samą odpornością na kruche pękanie jak komercyjne płytki skrawającedostępne w handlu, np. wkładka skrawająca H10 z grupy ISO K10 o składzie WC-6Co ma twardość 1695 HV30 i odporność na pękanie równe 9,31 MPa·m$^{1/2}$.



Rys. 4.7. *Widok uzyskanych elementów budowy maszyn wytworzonych metodą SPS i zamontowanych w urządzeniu firmy Sphul do wytwarzania sprężyn*

Należy w szczególności podkreślić efekt autorskiego zastosowania technologii SPS, tj. możliwość wytwarzania odpornych na zużycie ścierne elementów (części) budowy maszyn, takich jak: tuleje, dysze przewodzące, elektrody do nagrzewania i hartowania drutu (rys. 4.2).

W pracy [**H1**] określono mikrostruktury węglików spiekanych typu WC-Co z dodatkiem Cr_3C_2, TaC-NbC, TiC i VC i wpływ tych dodatków stopowych na twardość kompozytów.

Wielkość ziaren WC kontrolowano za pomocą inhibitorów wzrostu. Mikrotwardość węglików spiekanych WC-Co dla wszystkich badanych wariantówbyła większa niż uzyskana podczas badań twardości kompozytów z węglików, co wskazuje na możliwy rozwój pękania w trakcie procesu mikrowgłębienia oraz zmniejszenie naprężenia kompozytu WC-Co. W związku z tym wykazano, że stosunek eksperymentalnych i obliczonych wartości mikrotwardości stanowi przybliżony wskaźnik zmienności WC-Co w procesie wgniatania wgłębnika do wewnątrz materiału. Mechaniczne odkształcenia węglików spiekanych WC-Co podczas mikro- i nanoindentacji wskazały na mechanizmy deformacji i pękania faz WC i Co. Stwierdzono, że oba procesy wpływają na parametryrównania gradientu teorii plastyczności (Nix i Gao). Stałe Nix i Gao wyznaczono dla faz WC i Co badanych gatunków węglików spiekanych. Wykazano, że uzyskane wyniki są zgodne z danymi literaturowymi dla fazy Co oraz WC, apewne różnice w parametrze h* dla fazy Co wynikają z wpływu składu i mikrostruktury węglika spiekanego WC-Co. Procesy pękania węglika spiekanego typu WC-Co można scharakteryzować, porównując wewnętrzne wartości twardości określone w badaniach nano- i mikroindentacji. Stwierdzono, że H_{0nano} węglika WC i H_{0micro} węglika spiekanego WC-6Co różnią się o $\Delta H0 \approx 5$ GPa, co wskazuje na możliwość wystąpienia procesów pękania na dużych głębokościach wgłębienia. Z porównania krzywych indentacji fazy WC dla obciążeń 50 i 500 mN wynika, że funkcje liniowe Nix i Gao osiągają podobne wartości. Stwierdzono, że 10-cyklowa krzywa wgłębienia zbudowana na podstawie cykli obciążenia w zakresie 50–500 mN wykazuje zmiany z ujemnymi wartościami H_0. Współczynnik spadku twardości w przypadku 10-cyklowego obciążenia jest trzykrotnie, a nawet czterokrotnie mniejszy, co powoduje ujemne wartości H_0. Powyższe wyniki mogą pomóc określić wstępny proces pękania podczas wciskania wgłębnika w badany materiał.

4.3. Podsumowanie

W opisanych powyżej autorskich badaniach dotyczących wytwarzania węglików spiekanych typu WC-Co z dodatkami stopowymi o zwiększonej twardości i odporności na kruche pękanie zastosowano nowoczesną i szybką technikę spiekania SPS. Dzięki przeanalizowaniu wpływu parametrów tego procesu na właściwości mechaniczne węglików spiekanych typu WC-Co można było jednoznacznie udowodnić, że użycie parametrów, m.in. dużych szybkości nagrzewania (w odróżnieniu od innych technik spiekania) wpływa korzystnie na kształtowanie mikrostruktury tych materiałów kompozytowych. Ograniczając rozrost cząstek poprzez zastosowanie odpowiednich inhibitorów wzrostu ziaren, możliwe jest otrzymywanie materiałów o dużo lepszych właściwościach technologicznych. W ramach uzyskanych wyników opracowano najkorzystniejsze warunki i parametry procesu spiekania technologią SPS do wytwarzania materiałów kompozytowych typu WC-Co.

Istotne jest również to, że w prowadzonych badaniach podjęto się określenia wpływu tzw. efektu wgłębienia na wartość twardości kompozytów z węglików spiekanych. Należy także podkreślić, że badania właściwości mechanicznych kompozytów prowadzono za pomocą najnowszej aparatury – nanoindentera firmy Fischer Picodentor HM500. Uzyskane

wyniki pozwoliły na wstępne określenie procesu pękania podczas wciskania wgłębnika w badany materiał.

Dzięki odpowiednim modyfikacjom procesu SPS, polegającym na przepływie impulsowego prądu elektrycznego przez zaprojektowany autorski zestaw narzędziowy (stemple i matryce grafitowe) oraz konsolidowany w nim proszek, uzyskano: 1) znacząco lepszą produktywność technologii SPS wytwarzania płytek skrawających orazelementów i części budowy maszyn (tj. tuleje, dysze przewodzące, elektrody do nagrzewania i hartowania drutu)oraz 2) lepsze właściwości technologiczne i eksploatacyjne narzędzi skrawających
(w porównaniu dowytwarzanych technikami konwencjonalnymi).

4.4. Cel naukowy oraz rezultaty osiągniętych wyników w ramach osiągnięcia habilitacyjnego

Podjęte prace badawcze i rozwojoweprzyniosły wymierne efekty naukowe zaprezentowane w omówionych wyżej publikacjach. Do głównych osiągnieć można zaliczyć:

a) **istotną poprawę właściwości mechanicznych (twardości, odporności na kruche pękanie, modułu sprężystości wzdłużnej, gęstości, naprężeń plastycznych, odporności na zużycie ścierne) kompozytów z węglików spiekanych typu WC-Co, w stosunku do materiałów konwencjonalnych, dzięki zastosowaniu nanoproszków oraz dodatków stopowych jako inhibitorów wzrostu ziaren;**
b) **uzyskanie materiałów narzędziowych oraz elementów i części budowy maszyn o dużo lepszych właściwościach technologicznych i eksploatacyjnych w wyniku zastosowania nowoczesnej technologii SPS (*Spark PlasmaSintering*)do konsolidacji proszków;**
c) **opracowanie najkorzystniejszych warunków i parametrów procesu spiekania technologią SPS do wytwarzania materiałów kompozytowych typu WC-Co;**
d) **uzyskanie znacząco lepszej produktywności procesu SPS do wytwarzania części budowy maszyn poprzez odpowiednie modyfikacje technologii, tj.zastosowanie przepływu impulsowego prądu elektrycznego przez zaprojektowany zestaw narzędziowy (stemple i matryce grafitowe) oraz konsolidowany w nich proszek.**

Literatura:

1. Li, J. F.; Cheng, J. G.; Chen, P. Q.; Chen, W. C.; Wei, B. Z.; Liu, J. W., Effects of partial substitution of copper for cobalt on the microstructure and properties of ultrafine-grained WC-Co cemented carbides. *J. Alloy. Compd.* **2018,** 735, 43-50.
2. Tarraste, M., Kübarsepp, J., Juhani, K., Suurkivi, T., Pirso J., Spark Plasma Sintering of WC Hardmetals with Fe-based Binder. In *World PM2016*, Hamburg, Germany, 2016.
3. Ghasali, E.; Ebadzadeh, T.; Alizadeh, M.; Razavi, M., Mechanical and microstructural properties of WC-based cermets: A comparative study on the effect of Ni and Mo binder phases. *Ceramics International* **2018,** 44, (2), 2283-2291.
4. Liu, W.; Song, X.; Zhang, J.; Yin, F.; Zhang, G., A novel route to prepare ultrafine-grained WC–Co cemented carbides. *J. Alloy. Compd.* **2008,** 458, (1), 366-371.

5. Sun, J.; Zhao, J.; Chen, M.; Ni, X.; Li, Z.; Gong, F., Determination of microstructure and mechanical properties of VC/Cr3C2 reinforced functionally graded WC-TiC-Al2O3 micro-nano composite tool materials via two-step sintering. *J. Alloy. Compd.* **2017,** 709, 197-205.
6. Espinosa-Fernández, L.; Borrell, A.; Salvador, M. D.; Gutierrez-Gonzalez, C. F., Sliding wear behavior of WC–Co–Cr3C2–VC composites fabricated by conventional and non-conventional techniques. *Wear* **2013,** 307, (1), 60-67.
7. Juhani, K.; Pirso, J.; Viljus, M.; Letunovitš, S.; Tarraste, M., The influence of Cr3C2 and VC as alloying additives on the microstructure and properties of reactive sintered WC-Co cermets. *Medziagotyra* **2012,** 18, (1), 79-83.
8. Sun, L.; Yang, T. e.; Jia, C.; Xiong, J., VC, Cr3C2 doped ultrafine WC–Co cemented carbides prepared by spark plasma sintering. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2011,** 29, (2), 147-152.
9. Mahmoodan, M.; Aliakbarzadeh, H.; Gholamipour, R., Sintering of WC-10%Co nano powders containing TaC and VC grain growth inhibitors. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* **2011,** 21, (5), 1080-1084.
10. Bonache, V.; Salvador, M. D.; Rocha, V. G.; Borrell, A., Microstructural control of ultrafine and nanocrystalline WC–12Co–VC/Cr3C2 mixture by spark plasma sintering. *Ceramics International* **2011,** 37, (3), 1139-1142.
11. Huang, S. G.; Li, L.; Vanmeensel, K.; Van der Biest, O.; Vleugels, J., VC, Cr3C2 and NbC doped WC–Co cemented carbides prepared by pulsed electric current sintering. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2007,** 25, (5), 417-422.
12. Kim, B. K.; Ha, G. H.; Lee, G. G.; Lee, D. W., Structure and properties of nanophase WC/Co/VC/TaC hardmetal. *Nanostructured Materials* **1997,** 9, (1), 233-236.
13. Sun, L.; Jia, C.; Cao, R.; Lin, C., Effects of Cr3C2 additions on the densification, grain growth and properties of ultrafine WC–11Co composites by spark plasma sintering. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2008,** 26, (4), 357-361.
14. Zackrisson, J.; Jansson, B.; Uphadyaya, G. S.; Andr´en, H. O., WC-Co based cemented carbides with large Cr3C2 additions. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **1998,** 16, (4), 417-422.
15. Banerjee, D.; Lai, G. K.; Upadhyaya, G. S., Effect of binder-phase modification and Cr3C2 addition on properties of WC-IOC0 cemented carbide. *Journal of Materials Engineering and Performance* **1995,** 4, (5), 563-572.
16. Huang, S.; Xiong, J.; Guo, Z.; Wan, W.; Tang, L.; Zhong, H.; Zhou, W.; Wang, B., Oxidation of WC-TiC-TaC-Co hard materials at relatively low temperature. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2015,** 48, 134-140.
17. Weidow, J.; Andrén, H.-O., Grain and phase boundary segregation in WC–Co with TiC, ZrC, NbC or TaC additions. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2011,** 29, (1), 38-43.
18. Siwak, P.; Garbiec, D., Microstructure and mechanical properties of WC–Co, WC–Co–Cr3C2 and WC–Co–TaC cermets fabricated by spark plasma sintering. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* **2016,** 26, (10), 2641-2646.
19. Mahmoodan, M.; Aliakbarzadeh, H.; Gholamipour, R., Microstructural and mechanical characterization of high energy ball milled and sintered WC–10wt%Co–xTaC nano powders. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2009,** 27, (4), 801-805.
20. Östberg, G.; Buss, K.; Christensen, M.; Norgren, S.; Andrén, H.-O.; Mari, D.; Wahnström, G.; Reineck, I., Effect of TaC on plastic deformation of WC–Co and Ti(C,N)–WC–Co. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2006,** 24, (1), 145-154.
21. Huang, S. G.; Liu, R. L.; Li, L.; Van der Biest, O.; Vleugels, J., NbC as grain growth inhibitor and carbide in WC–Co hardmetals. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2008,** 26, (5), 389-395.

22. Xiao, D. H.; He, Y. H.; Song, M.; Lin, N.; Zhang, R. F., Y2O3- and NbC-doped ultrafine WC–10Co alloys by low pressure sintering. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2010,** 28, (3), 407-411.
23. Arató, P.; Bartha, L.; Porat, R.; Berger, S.; Rosen, A., Solid or liquid phase sintering of nanocrystalline WC/Co hardmetals. *Nanostructured Materials* **1998,** 10, (2), 245-255.
24. Jia, C.; Sun, L.; Tang, H.; Qu, X., Hot pressing of nanometer WC–Co powder. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2007,** 25, (1), 53-56.
25. Wei, C.; Song, X.; Zhao, S.; Zhang, L.; Liu, W., In-situ synthesis of WC–Co composite powder and densification by sinter-HIP. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2010,** 28, (5), 567-571.
26. Bao, R.; Yi, J.-h.; Peng, Y.-d.; Zhang, H.-z.; Li, A.-k., Decarburization and improvement of ultra fine straight WC–8Co sintered via microwave sintering. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* **2012,** 22, (4), 853-857.
27. Bao, R.; Yi, J., Effect of sintering atmosphere on microwave prepared WC–8wt.%Co cemented carbide. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2013,** 41, 315-321.
28. Kim, H.-C.; Oh, D.-Y.; Shon, I.-J., Sintering of nanophase WC–15vol.%Co hard metals by rapid sintering process. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2004,** 22, (4), 197-203.
29. Kim, H.-C.; Oh, D.-Y.; Guojian, J.; Shon, I.-J., Synthesis of WC and dense WC–5vol.% Co hard materials by high-frequency induction heated combustion. *Materials Science and Engineering: A* **2004,** 368, (1), 10-17.
30. Al-Aqeeli, N.; Mohammad, K.; Laoui, T.; Saheb, N., VC and Cr3C2 doped WC-based nano-cermets prepared by MA and SPS. *Ceramics International* **2014,** 40, (8 Part A), 11759-11765.
31. Cha, S. I.; Hong, S. H.; Kim, B. K., Spark plasma sintering behavior of nanocrystalline WC–10Co cemented carbide powders. *Materials Science and Engineering: A* **2003,** 351, (1), 31-38.
32. Chen, W.-H.; Nayak, P. K.; Lin, H.-T.; Lee, A. C.; Huang, J.-L., Enhanced mechanical properties of WC-reinforced Al2O3 ceramics via spark plasma sintering. *Ceramics International* **2015,** 41, (1, Part B), 1317-1321.
33. Eriksson, M.; Radwan, M.; Shen, Z., Spark plasma sintering of WC, cemented carbide and functional graded materials. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2013,** 36, 31-37.
34. Guo, S. D.; Bao, R.; Yang, J. G.; Chen, H.; Yi, J. H., Effect of Mo and Y2O3 additions on the microstructure and properties of fine WC-Co cemented carbides fabricated by spark plasma sintering. *Int J Refract Met H* **2017,** 69, 1-10.
35. Huang, S. G.; Vanmeensel, K.; Li, L.; Van der Biest, O.; Vleugels, J., Influence of starting powder on the microstructure of WC–Co hardmetals obtained by spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering: A* **2008,** 475, (1), 87-91.
36. Hulbert, D. M.; Jiang, D.; Dudina, D. V.; Mukherjee, A. K., The synthesis and consolidation of hard materials by spark plasma sintering. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2009,** 27, (2), 367-375.
37. Liu, W.; Song, X.; Wang, K.; Zhang, J.; Zhang, G.; Liu, X., A novel rapid route for synthesizing WC–Co bulk by in situ reactions in spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering: A* **2009,** 499, (1), 476-481.
38. Liu, X.; Song, X.; Zhang, J.; Zhao, S., Temperature distribution and neck formation of WC–Co combined particles during spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering: A* **2008,** 488, (1), 1-7.
39. Machado, I. F.; Girardini, L.; Lonardelli, I.; Molinari, A., The study of ternary carbides formation during SPS consolidation process in the WC–Co–steel system. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2009,** 27, (5), 883-891.
40. Rumman, M. R.; Xie, Z.; Hong, S.-J.; Ghomashchi, R., Effect of spark plasma sintering pressure on mechanical properties of WC–7.5wt% Nano Co. *Mater. Des.* **2015,** 68, 221-227.

41. Sivaprahasam, D.; Chandrasekar, S. B.; Sundaresan, R., Microstructure and mechanical properties of nanocrystalline WC–12Co consolidated by spark plasma sintering. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2007,** 25, (2), 144-152.
42. Sun, L.; Jia, C.-c.; Lin, C.-g.; Cao, R.-j., VC Addition Prepared Ultrafine WC-11Co Composites by Spark Plasma Sintering. *Journal of Iron and Steel Research, International* **2007,** 14, (5, Supplement 1), 85-89.
43. Xi, X.; Pi, X.; Nie, Z.; Song, S.; Xu, X.; Zuo, T., Synthesis and characterization of ultrafine WC–Co by freeze-drying and spark plasma sintering. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2009,** 27, (1), 101-104.
44. Zhao, S.; Song, X.; Wei, C.; Zhang, L.; Liu, X.; Zhang, J., Effects of WC particle size on densification and properties of spark plasma sintered WC–Co cermet. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2009,** 27, (6), 1014-1018.
45. Zhao, S.; Song, X.; Zhang, J.; Liu, X., Effects of scale combination and contact condition of raw powders on SPS sintered near-nanocrystalline WC–Co alloy. *Materials Science and Engineering: A* **2008,** 473, (1), 323-329.
46. Taylor, G. F. Apparatus for making hard metal compositions. 1,896.854, 1930-06-19, 1933.
47. Cremer, G. D. Sintering together powders metals such as bronze, brass or aluminum. 2,355.954, 1944.
48. Tokita, M., Chapter 11.2.3 - Spark Plasma Sintering (SPS) Method, Systems, and Applications A2 - Somiya, Shigeyuki. In *Handbook of Advanced Ceramics (Second Edition)*, Academic Press: Oxford, 2013; pp 1149-1177.
49. Garbiec, D., Iskrowe spiekanie plazmowe (SPS): teoria i praktyka. *Inżynieria Materiałowa* **2015,** Vol. 36, nr 2, 60-64.
50. Sweet, G. A.; Brochu, M.; Hexemer, R. L.; Donaldson, I. W.; Bishop, D. P., Microstructure and mechanical properties of air atomized aluminum powder consolidated via spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering: A* **2014,** 608, 273-282.
51. Tünçay, M. M.; Muñiz-Lerma, J. A.; Bishop, D. P.; Brochu, M., Spark plasma sintering and spark plasma upsetting of an Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Materials Science and Engineering: A* **2017,** 704, 154-163.
52. Garbiec, D.; Siwak, P., Study on microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered Alumix 431 powder. *Powder Metall.* **2016,** 59, (4), 242-248.
53. Paraskevas, D.; Vanmeensel, K.; Vleugels, J.; Dewulf, W.; Duflou, J. R., The Use of Spark Plasma Sintering to Fabricate a Two-phase Material from Blended Aluminium Alloy Scrap and Gas Atomized Powder. *Procedia CIRP* **2015,** 26, 455-460.
54. Liu, D.; Wen, H.; Zhang, D.; Wang, C.; Lin, Y.; Xiong, Y.; Topping, T.; Schoenung, J. M.; Lavernia, E. J., Stress-enhanced grain growth in a nanostructured aluminium alloy during spark plasma sintering. *Philosophical Magazine Letters* **2014,** 94, (11), 741-748.
55. Liu, D.; Xiong, Y.; Li, Y.; Topping, T. D.; Zhou, Y.; Haines, C.; Paras, J.; Martin, D.; Kapoor, D.; Schoenung, J. M.; Lavernia, E. J., Spark Plasma Sintering of Nanostructured Aluminum: Influence of Tooling Material on Microstructure. *Metallurgical and Materials Transactions A* **2012,** 44, (4), 1908-1916.
56. Ige, O. O.; Aribo, S.; Obadele, B. A.; Langa, T.; Oluwasegun, K. M.; Shongwe, M. B.; Olubambi, P. A., Erosion–corrosion behaviour of spark plasma sintered WC - 12Co in aggressive media. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2017,** 66, 36-43.
57. Xia, X.; Li, X.; Li, J.; Zheng, D., Microstructure and characterization of WC-2.8wt% Al2O3-6.8wt% ZrO2 composites produced by spark plasma sintering. *Ceramics International* **2016,** 42, (12), 14182-14188.
58. Liu, Y.; Cheng, J.; Yin, B.; Zhu, S.; Qiao, Z.; Yang, J., Study of the tribological behaviors and wear mechanisms of WC-Co and WC-Fe3Al hard materials under dry sliding condition. *Tribology International* **2017,** 109, 19-25.

59. Raihanuzzaman, R. M.; Rosinski, M.; Xie, Z.; Ghomashchi, R., Microstructure and mechanical properties and of pulse plasma compacted WC - Co. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2016,** 60, 58-67.
60. Lee, S.; Hong, H. S.; Kim, H.-S.; Hong, S.-J.; Yoon, J.-H., Spark plasma sintering of WC–Co tool materials prepared with emphasis on WC core–Co shell structure development. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2015,** 53, 41-45.
61. Olubambi, P. A.; Alaneme, K. K.; Andrews, A., Mechanical and tribological characteristics of tungsten cermet composites sintered with Co-based and zirconia mixed binders. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2015,** 50, 163-177.
62. Al-Aqeeli, N., Characterization of nano-cemented carbides Co-doped with vanadium and chromium carbides. *Powder Technology* **2015,** 273, 47-53.
63. Picas, J. A.; Xiong, Y.; Punset, M.; Ajdelsztajn, L.; Forn, A.; Schoenung, J. M., Microstructure and wear resistance of WC–Co by three consolidation processing techniques. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2009,** 27, (2), 344-349.
64. Krüger, L.; Mandel, K.; Krause, R.; Radajewski, M., Damage evolution in WC–Co after repeated dynamic compressive loading detected by eddy current testing. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2015,** 51, 324-331.
65. Yaman, B.; Mandal, H., Spark plasma sintering of Co–WC cubic boron nitride composites. *Mater. Lett.* **2009,** 63, (12), 1041-1043.
66. Mandel, K.; Krüger, L.; Krause, R.; Radajewski, M., The influence of stress state on the compressive strength of WC–Co with different Co contents. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2014,** 47, 124-130.
67. Chen, W.-H.; Lin, H.-T.; Nayak, P. K.; Huang, J.-L., Material properties of tungsten carbide–alumina composites fabricated by spark plasma sintering. *Ceramics International* **2014,** 40, (9, Part B), 15007-15012.
68. Jia, C.-C.; Tang, H.; Mei, X.-Z.; Yin, F.-Z.; Qu, X.-H., Spark plasma sintering on nanometer scale WC–Co powder. *Mater. Lett.* **2005,** 59, (19), 2566-2569.
69. Mandel, K.; Radajewski, M.; Krüger, L., Strain-rate dependence of the compressive strength of WC–Co hard metals. *Materials Science and Engineering: A* **2014,** 612, 115-122.
70. Zhang, F.; Shen, J.; Sun, J., Processing and properties of carbon nanotubes-nano-WC-Co composites. *Materials Science and Engineering: A* **2004,** 381, (1), 86-91.
71. Yaman, B.; Mandal, H., Wear performance of spark plasma sintered Co/WC and cBN/Co/WC composites. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2014,** 42, 9-16.
72. Wei, C. B.; Song, X. Y.; Fu, J.; Liu, X. M.; Gao, Y.; Wang, H. B.; Zhao, S. X., Microstructure and properties of ultrafine cemented carbides—Differences in spark plasma sintering and sinter-HIP. *Materials Science and Engineering: A* **2012,** 552, 427-433.
73. Huang, S. G.; Vanmeensel, K.; Li, L.; Van der Biest, O.; Vleugels, J., Tailored sintering of VC-doped WC–Co cemented carbides by pulsed electric current sintering. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2008,** 26, (3), 256-262.
74. Sun, X.; Wang, Y.; Li, D. Y., Mechanical properties and erosion resistance of ceria nano-particle-doped ultrafine WC–12Co composite prepared by spark plasma sintering. *Wear* **2013,** 301, (1-2), 406-414.
75. Bonache, V.; Salvador, M. D.; Fernández, A.; Borrell, A., Fabrication of full density near-nanostructured cemented carbides by combination of VC/Cr3C2 addition and consolidation by SPS and HIP technologies. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2011,** 29, (2), 202-208.
76. Raihanuzzaman, R. M.; Jeong, T. S.; Ghomashchi, R.; Xie, Z.; Hong, S.-J., Characterization of short-duration high-energy ball milled WC–Co powders and subsequent consolidations. *J. Alloy. Compd.* **2014,** 615, S564-S568.
77. Garbiec, D.; Siwak, P., Microstructure and properties of spark plasma sintered WC-6Co cemented carbides. *Metal Forming* **2017,** 28, (2), 123-132.

78. Siwak, P.; Garbiec, D., WC-5Co CEMENTED CARBIDES FABRICATED BY SPS. *Arch. Metall. Mater.* **2018,** 63, (4), 2031-2037.
79. Liu, L.; Hou, Z.; Zhang, B.; Ye, F.; Zhang, Z.; Zhou, Y., A new heating route of spark plasma sintering and its effect on alumina ceramic densification. *Materials Science and Engineering: A* **2013,** 559, 462-466.
80. Kim, H.-C.; Shon, I.-J.; Yoon, J.-K.; Doh, J.-M., Consolidation of ultra fine WC and WC–Co hard materials by pulsed current activated sintering and its mechanical properties. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2007,** 25, (1), 46-52.
81. Su, W.; Sun, Y.-x.; Yang, H.-l.; Zhang, X.-q.; Ruan, J.-m., Effects of TaC on microstructure and mechanical properties of coarse grained WC–9Co cemented carbides. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* **2015,** 25, (4), 1194-1199.
82. Kumar, N.; Watabe, M.; Yamauchi, A.; Kobayashi, A.; Kurokawa, K., Spark Plasma Sintering of Binderless n-WC - X (X=Nb, Re, Ta, Ti, B, Si). *Transactions of JWRI* **2010,** 39, (1), 47-56.
83. Eso, O.; Fang, Z. Z.; Griffo, A., Kinetics of cobalt gradient formation during the liquid phase sintering of functionally graded WC–Co. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2007,** 25, (4), 286-292.
84. Garbiec, D.; Siwak, P., Microstructural evolution and development of mechanical properties of spark plasma sintered WC–Co cemented carbides for machine parts and engineering tools. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* **2019,** 19, (1), 215-223.
85. A. Formisano, F. C. M., A. Caraviello, L. Carrino, M. Durante, and A. Langella, Influence of Eta-Phase on Wear Behavior of WC-Co Carbides. *Advances in Tribology* **2016,** 2016, 6.
86. Engqvist, H.; Jacobson, S.; Axén, N., A model for the hardness of cemented carbides. *Wear* **2002,** 252, (5), 384-393.

4.5. Dorobek uzupełniający,niewchodzący w skład habilitacyjnego osiągnięcia naukowo-badawczego

4.5.1. Artykuły opublikowane w czasopismach posiadających współczynnik wpływu IF (*ImpactFactor*):

1. Mateusz Sopata, **Piotr Siwak**, Grzegorz Adamek, Jarosław Jakubowicz: *The Mechanical Properties of the Novel Nanocrystalline Refractory Tantalum Alloys*, Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2020, vol. 56, nr 4, s. 759-765 (40 pkt., IF 0,985).
2. Jarosław Jakubowicz, Grzegorz Adamek, **Piotr Siwak**, Krzysztof Pałka, Mieczysława UrszulaJurczyk, Przemysław Krzysztof Wirstłein, Michał Pilch, Dewidar Montasse rMarasy: *Micromechanical Measurements and Biocompatibility of the High Porosity Ti Scaffold Made with Saccharose as a Space Holder*, Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2019, vol. 55, nr 6, s. 1124-1133 (40 pkt., IF 0,985).
3. DariuszGarbiec, Volf Leshchynsky, Alberto Colella, Paolo Matteazzi, **Piotr Siwak**: *Structure and deformation behavior of Ti-SiC composites made by mechanical alloying and spark plasma sintering*, Materials, 2019, vol. 12, nr 8, ID 1276 (140 pkt., IF 2,972).
4. Dariusz Garbiec, **Piotr Siwak**: *Microstructural evolution and development of mechanical properties of spark plasma sintered WC-Co cemented carbides for machine parts and engineering tools*, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2019, vol. 19, nr 1, s. 215-223 (140 pkt., IF 2,846).
5. Artur Wypych, **Piotr Siwak**, Daniel Andrzejewski, Jarosław Jakubowicz:*Titanium Plasma-Sprayed Coatings on Polymers for Hard Tissue Applications*, Materials, 2018, vol. 11, nr 12, ID 2536 (35 pkt., IF 2,972).

6. Jarosław Jakubowicz, Mateusz Sopata, Grzegorz Adamek, **Piotr Siwak**, Tomasz Kachlicki: *Formation and Properties of the Ta-Y_2O_3, Ta-ZrO_2, and Ta-TaC Nanocomposites*, Advances in Materials Science and Engineering, 2018, vol. 2018, ID 2085368 (30 pkt., IF 2,216).
7. Mourad Keddam, Redoune Chegroune, MichałKulka, Natalia Makuch, Dominika Panfil, **Piotr Siwak**, SukruTaktak: *Characterization, Tribological and Mechanical Properties of Plasma Paste Borided AISI 316 Steel*, Transactions of the Indian Institute of Metals, 2018, vol. 71, nr 1, s. 79-90 (20 pkt., IF 1,176).
8. Kazimierz Czapczyk, Stanisław Legutko, **Piotr Siwak**, Bartosz Gapiński, Grzegorz Cieślak: *Właściwości mechaniczne nanokompozytowych warstw Ni-P/Si_3N_4 wytwarzanych metodą redukcji chemicznej na stopie aluminium AW-7075*, Przemysł Chemiczny, 2018, t. 97, nr 6, s. 942-948 (15 pkt. IF 0,428).
9. Dariusz Garbiec, **Piotr Siwak**: *Study on microstructure and mechanical properties of spark plasma sintered Alumix 431 powder*, Powder Metallurgy, 2016, vol. 59, nr 4, s. 242-248 (25 pkt., IF 0,780).
10. Dariusz Garbiec, **Piotr Siwak**, Adrian 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, 2016, vol. 16, nr. 4, s. 702-707 (30 pkt., IF 2,216).
11. Krzysztof Zdunek, Katarzyna Nowakowska-Langier, Maciej Jan Kupczyk, **Piotr Siwak**: *Properties of TiN coatings deposited by the modifield IPD metod*, Vacuum, 2010, vol. 85, nr 4, s. 514-517 (30 pkt., IF 2,746).

4.5.2. Artykuły opublikowane w czasopismach nieposiadających współczynnika wpływu IF*(ImpactFactor)*:

1. Kazimierz Czapczyk, **Piotr Siwak**, Stanisław Legutko: *Study of the effect of the electroless Ni-P coating thickness applied on AW-7075 aluminum alloy on its mechanical properties*, Advances in Science and Technology Research Journal, 2018, vol. 12, nr. 2, s. 291-297 (10 pkt.).
2. Kazimierz Czapczyk, Stanisław Legutko, **Piotr Siwak**, Karol Grochalski, Anna Mazurek: *Wpływ grubości warstwy Ni-P osadzanych na stopie aluminium AW-7075 na ich adhezję i właściwości mechaniczne*, Inżynieria Powierzchni, 2018, t. 23, nr 1, s.18-26 (8 pkt.).
3. **Piotr Siwak**, Dariusz Garbiec, Katarzyna Peta*: Effect of TaC-NbCadditive on durability of WC-Co cuttingedges*, Inżynieria Materiałowa, 2018, nr 4 (13 pkt.).
4. Dariusz Garbiec, **Piotr Siwak**: *Mikrostruktura i właściwości węglików spiekanych WC-6Co wytwarzanych metodą spiekania iskrowo-plazmowego (SPS)*, Obróbka Plastyczna Metali, 2017, vol. 28, nr 2, s. 123-132 (10 pkt.).
5. Katarzyna Peta, **Piotr Siwak**, Karol Grochalski: *Research on mechanical properties of aluminum alloys used in automotive industry*, Inżynieria Materiałowa, 2017, nr 3, s. 114-118 (13 pkt.).
6. Maciej Jan Kupczyk, **Piotr Siwak**, Jędrzej Komolka: *Wpływ wybranych inhibitorów wzrostu na właściwości ostrzy skrawających z nanowęglików spiekanych*, Mechanik, 2016, nr 8-9, s.1028-1029 (11 pkt.).
7. Krzysztof Dziedzic, Joanna Zubrzycka-Wróbel, Jerzy Jóźwik, Marcin Barszcz, **Piotr Siwak**, Renata Chałas: *Research on tribological properties of dental composite Materials*,

Advanced in Science and Technology Research Journal, 2016, vol. 10, nr 32, s. 144-149 (10 pkt.).

8. Kazimierz Czapczyk, **Piotr Siwak**, Piotr Jabłoński, Łukasz Furmański, Paweł Grobelny, Stanisław Legutko: *Influence of thickness of Ni-P coating applied on 7075 aluminum alloy on its hardness*, Advances in Since and Technology Research Journal, 2016, vol.10, no.32, s. 53-58 (10 pkt.).
9. Tadeusz Chwalczuk, Paweł Lisiak, **Piotr Siwak**, Damian Przestacki, Piotr Szablewski: *Laserowe wspomaganie toczenia stopu Inconel 718*, Mechanik, 2016, nr 8-9, s. 1118-1119 (11 pkt.).
10. **Piotr Siwak**, Piotr Jabłoński: *Badania odporności na zużycie ścierne węglikowych ostrzy skrawających*, Mechanik, 2016, nr 10, s. 1406-1407 (11 pkt.).
11. **Piotr Siwak**, Dariusz Garbiec, Tadeusz Chwalczuk: Wpływ parametrów procesu spiekania na właściwości płytek skrawających wytwarzanych metodą iskrowego spiekania plazmowego, Mechanik, 2016, nr 10, s. 1408-1409 (11 pkt.).
12. **Piotr Siwak**, Adam Patalas, Piotr Jabłoński, Katarzyna Peta: *A tribological assessment of UHMW polyethylene in dry and lubricated conditions*, Tribologia, 2016, nr 6, s. 139-148 (15 pkt.).
13. **Piotr Siwak**, Dariusz Garbiec, Tadeusz Chwalczuk: *Badania właściwości technologicznych płytek skrawających typu WC-6Co wytwarzanych metodą impulsowo plazmową*, Mechanik, 2015, nr 8-9, s. 113-122 (11 pkt.).
14. Damian Przestacki, Tadeusz Chwalczuk, **Piotr Siwak**: *Zastosowanie nagrzewania laserowego do obróbki ubytkowej materiałów trudnoobrabialnych*, Mechanik, 2014, nr 8-9, s.419-426 (11 pkt.).
15. **Piotr Siwak**, Damian Przestacki, Tadeusz Chwalczuk, Dariusz Garbiec, Filip Heyduk: *Analiza możliwości spiekania oraz poprawy właściwości technologicznych ostrzy skrawających z węglików spiekanych wytwarzanych metodą SPS*, Mechanik, 2014, nr 8-9, s.151-159 (11 pkt.).
16. **Piotr Siwak**, Maciej Jan Kupczyk: *Badania trwałości nanowęglików spiekanych typu WC-5Co+TaC-NbC wytworzonych przy użyciu plazmy impulsowej*, Mechanik, 2013, nr 8-9, s.153-160 (11 pkt.).
17. **Piotr Siwak**, Maciej Jan Kupczyk: *Analiza wpływu inhibitorów wzrostu na trwałość ostrzy skrawających z nanowęglików spiekanych wytwarzanych metodą PPS*, Mechanik, 2013, nr 8-9, s.143-152 (11 pkt.).
18. Maciej Jan Kupczyk, Andrzej Michalski, **Piotr Siwak**, Marcin Rosinski: *Evaluation of Cutting Edges Made of Nanocrystalline Cemented Carbides Sintered by the Pulse Plasma Method*, Journal of ASTM International, 2012, vol. 8, no. 2, ID JAI103258.
19. Maciej Jan Kupczyk, **Piotr Siwak**: *Influence of Structure on Brittleness of Boron Nitride Coatings Deposited on Cemented Fine-Grained Carbides*, Journal of ASTM International, 2011, vol. 8, nr. 7, ID JAI103266.
20. **Piotr Siwak**, Maciej Jan Kupczyk: *Badania kruchości nanowęglików spiekanych typu WC-Co wytworzonych metodą PulsePlasmaSintering*, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej: Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją, 2011, vol. 16, nr 2, s. 215-223.
21. Maciej Jan Kupczyk, **Piotr Siwak**, Jan Żurek, Andrzej Michalski, Marcin Rosiński: *Wpływ parametrów procesu impulsowo-plazmowego spiekania nanokrystalicznych węglików na ich mikrostrukturę*, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 2011, vol. 31, nr 3, s.21-28.

22. Maciej Jan Kupczyk, Mikołaj Popławski, **Piotr Siwak**: *Badania nad zwiększeniem trwałości ostrzy skrawających z nanowęglików spiekanych typu WC-5Co przez zastosowanie dodatku Cr_3C_2*, Zeszyty Naukowe, Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją, 2011, nr 16, s. 110-118.
23. **Piotr Siwak**, Maciej Jan Kupczyk, Jan Żurek, Andrzej Michalski, Marcin Rosiński: *Zużycie i trwałość ostrzy skrawających z nanowęglików spiekanych typu WC-5Co z dodatkiem TaC-NbC przy obróbce stali austenitycznej kwasoodpornej EN 1.4541*, Zeszyty Naukowe, Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją, 2011, nr 15, s. 145-154.
24. Maciej Jan Kupczyk, Przemysław Libuda, **Piotr Siwak**: *Ocena korelacji pomiędzy twardością powłok a trwałością powleczonych ostrzy w warunkach dominacji zużycia ściernego*, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, 2009, vol.29, nr 2, s.123-133.
25. Maciej Jan Kupczyk, Andrzej Michalski, **Piotr Siwak**: *Analiza możliwości poprawy właściwości technologicznych i eksploatacyjnych ostrzy skrawających z węglików spiekanych, Zeszyty Naukowe, Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją*, 2009, nr 11, s. 71-79.
26. Maciej Jan Kupczyk, **Piotr Siwak**: *Przegląd materiałów spiekanych na ostrza skrawające i określenie kierunków ich rozwoju*, Zeszyty Naukowe, Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją, 2009, nr 10, s. 49-70

4.5.3. Rozdziały opublikowane w monografiach

1. Maciej Jan Kupczyk, **Piotr Siwak**, JędrzejKomolka: *Application of Cutting Edges with High Durability Made of Nanocrystalline Cemented Carbides*, w:Materials Design and Applications, red. Lucas F.M. da Silva, Springer International Publishing, 2017, s. 39-48.
2. Maciej Jan Kupczyk, Andrzej Michalski, **Piotr Siwak**: *Increase of adhesion force of superhard boron nitride coatings to cemented nanocarbides using interfacial layers*, ANAIS Journal, 2010, no.n1, s. 5249-5257, ISSN 1516-392X.
3. Maciej Jan Kupczyk, Andrzej Michalski, **Piotr Siwak**, Marcin Rosiński: *High durability of cutting edges made of nanocrystaline cemented carbides sintered by the pulse plasma method*, ANAIS Journal, 2010, no.1, s. 5258-5267, ISSN 1516-392X.

4.5.4. Artykuły opublikowane w materiałach konferencyjnych

1. Maciej Jan Kupczyk, **Piotr Siwak**: *Special preparation of surface of cemented carbides substrate on adhesion of boron nitride coatings*, 4th International Conference on Structural Adhesive Bonding AB 2017, 6-7 VII 2017 r., Porto, Portugalia.
2. Maciej Jan Kupczyk, **Piotr Siwak**, JędrzejKomolka: *Application of Cutting Edges with High Durability Made of Nanocrystalline Cemented Carbides*, 1st International Conference on Material Design and Application MDA 2016, Porto, Portugalia, 30 VI-1 VII 2016 r.
3. **Piotr Siwak**, Dariusz Garbiec, Tadeusz Chwalczuk: *Wpływ parametrów procesu spiekania na właściwości płytek skrawających wywarzanych metodą iskrowego spiekania plazmowego*, Obróbka skrawaniem X, Obróbka skrawaniem-badania i rozwój, red. Jan Burek, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2016, s. 345-350.
4. **Piotr Siwak**, Piotr Jabłoński: *Badania odporności na zużycie ścierne ostrzy skrawających z węglików*, Obróbka skrawaniem X, Obróbka skrawaniem-badania i rozwój, red. Jan Burek, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Drukarnia Oficyny

Wydawniczej Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2016, s. 211-216.

5. Tadeusz Chwalczuk, Paweł Lisiak, **Piotr Siwak,** Damian Przestacki, Piotr Szablewski: *Laserowe wspomaganie toczenia stopu Inconel 718*, Obróbka skrawaniem – badania i rozwój, red. Jan Burek, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2016, s. 55-60.
6. Maciej Jan Kupczyk, **Piotr Siwak**, Jędrzej Komolka: *Wpływ wybranych inhibitorów wzrostu na właściwości ostrzy skrawających z nanowęglików spiekanych*, Obróbka skrawaniem X, Obróbka skrawaniem-badania i rozwój, red. Jan Burek, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2016, s. 236-240.
7. **Piotr Siwak**, Damian Przestacki, Tadeusz Chwalczuk, Dariusz Garbiec, Filip Heyduk: *Analiza możliwości spiekania oraz poprawy właściwości technologicznych ostrzy skrawających z węglików spiekanych wytwarzanych metodą SPS*, Obróbka skrawaniem. VIII, Synergia nauki z przemysłem/ pod red. Mirosława Pajora, Międzyzdroje-Szczecin, 2014 Szkoła Obróbki Skrawaniem, s. 151-159, materiały z VIII Konferencji Naukowej Szkoła Obróbki Skrawaniem, 17-19 IX 2014 r.
8. Damian Przestacki, Tadeusz Chwalczuk, **Piotr Siwak**, Piotr Laskowski: *Zastosowanie nagrzewania laserowego do obróbki ubytkowej materiałów trudnoobrabialnych*, Obróbka skrawaniem. VIII, Synergia nauki z przemysłem / pod red. Mirosława Pajora, Międzyzdroje-Szczecin, 2014 Szkoła Obróbki Skrawaniem, s. 419-426, materiały z VIII Konferencji Naukowej Szkoła Obróbki Skrawaniem, 17-19IX 2014 r.
9. **Piotr Siwak,** Dariusz Garbiec, Tadeusz Chwalczuk: *Badania właściwości technologicznych płytek skrawających z węglików spiekanych typu WC-6Co wytwarzanych metodą impulsowo-plazmową*, Obróbka Skrawaniem IX, Obróbka skrawaniem podstawą rozwoju metrologii, red. Edward Miko, Sandomierz-Kielce 2015, Szkoła Obróbki skrawaniem s. 113-122, materiały zIX Konferencji Naukowej Szkoła Obróbki Skrawaniem, 23-25 IX 2015 r.
10. **Piotr Siwak**, Maciej Jan Kupczyk*: Analiza wpływu inhibitorów wzrostu na trwałość ostrzy skrawających z nanowęglików spiekanych wytwarzanych metodą PPS*, Obróbka skrawaniem. VII, Interakcja proces-obrabiarka/ pod red. Pawła Twardowskiego, Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2013, Szkoła Obróbki Skrawaniem, s. 143-152, materiały z VII Konferencji Naukowej Szkoła Obróbki Skrawaniem, Mierzęcin 11-13 IX 2013 r., ISBN: 978-83-7775-268-5.
11. **Piotr Siwak**, Maciej Jan Kupczyk: *Badania trwałości nanowęglików spiekanych typu WC-5Co+TaC-NbC wytworzonych przy użyciu plazmy impulsowej*, Obróbka skrawaniem. VII, Interakcja proces- obrabiarka/ pod red. Pawła Twardowskiego, Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2013, Szkoła Obróbki Skrawaniem,s. 153-160, materiały z VII Konferencji Naukowej Szkoła Obróbki Skrawaniem, Mierzęcin 11-13IX 2013 r, ISBN: 978-83-7775-268-5.

4.5.5Streszczenia opublikowane w materiałach konferencyjnych

1. **Piotr Siwak**, Dariusz Garbiec, Rafał Rubach, Maria Wiśniewska: *Zastosowanie metody FAST/SPS do wytwarzania elektrod do nagrzewania i hartowania drutu z węglików spiekanych WC-5Co*, II Ogólnopolskie Seminarium Spark PlasmaSintering, Zeszyt streszczeń, s. 14-15, Warszawa, 24 X 2019.
2. Rafał Rubach, Dariusz Garbiec, Maria Wiśniewska, **Piotr Siwak**:*Mikrostruktura i właściwości węglików spiekanych WC-Co oraz WC-FeNi wytwarzanych metodą*

FAST/SPS, II Ogólnopolskie Seminarium Spark PlasmaSintering, Zeszyt streszczeń, s. 16-17, Warszawa, 24 X 2019.

3. Dariusz Garbiec, Piotr Siwak: *Hardness and Fracture Toughness of Spark Plasma Sintering WC-Co and WC-Co-Cr_3C_2 cemented carbides*, Advanced Materials and Technologies- ATM 2019, The XXII Physical Metallurgy and Materials Science Conference, Zeszyt streszczeń, Bukowina Tatrzańska, 9-12 VI 2019 r.
4. Dariusz Garbiec, **Piotr Siwak**: Wpływ parametrów spiekania iskrowo-plazmowego na wybrane właściwości węglików spiekanych WC-5Co, I Ogólnopolskie Seminarium Spark PlasmaSintering, Zeszyt streszczeń, s. 8-9, Poznań, 24 X 2018 r.
5. **Piotr Siwak**, Dariusz Garbiec, Katarzyna. Peta: *Analiza wpływu inhibitorów wzrostu na trwałość ostrzy skrawających z węglików spiekanych wytwarzanych metodą impulsowo-plazmową*, VII Krajowa Konferencja Nowe Materiały-Nowe Technologie w przemyśle okrętowym i maszynowym, Zeszyt streszczeń, s. 96, Szczecin-Ystad, 11-14 VI 2018 r.
6. Dariusz Garbiec, **Piotr Siwak**: *Węgliki spiekane WC-5Co wytwarzane metodą SPS*, VII Krajowa Konferencja Nowe Materiały-Nowe Technologie w przemyśle okrętowym i maszynowym, Zeszyt streszczeń, s. 44, Szczecin-Ystad, 11-14 VI 2018 r.
7. Jarosław Jakubowicz, Grzegorz Adamek, Mateusz Sopata, Jeremiasz Krzysztof Koper, **Piotr Siwak**: *Hot pressing of nanocrystalline tantalum using high frequency induction heating and pulse plasma sintering*, IOP Conference Series: Materials Science and Enginering 2017, vol. 283, ID 012001.
8. Kazimierz Czapczyk, **Piotr Siwak**, Stanisław Legutko: *Study of the effect of the electroless Ni-P coating thickness applied on AW-7075 aluminum alloy on its mechanical properties*, ITP. 2017 Innovative Technologies in Engineering Production: 2nd International Scientific Conference, 4-6 IX 2017 r., Kazimierz Dolny.
9. Piotr Jabłoński, Kazimierz Czapczyk, **Piotr Siwak**, Łukasz Furmański, Paweł Grobelny, Piotr Czajka, Adam Patalas: *Tribological properties evaluation of Ni-P coating manufactured with electroless plating on aluminum alloy substrate*, MATEC Web of Conferences 2017, vol. 112, ID 04014, 21st Innovative Manufacturing Engineering & Energy International Conference – IManE&E 2017, 24-27 V 2017, Iasi, Rumunia.
10. Dariusz Garbiec, **Piotr Siwak,** Filip Heyduk, Volf Leshchynsky: *Kompozyty WC-12Co spiekane metodą SPS*, XLII Szkoła Inżynierii Materiałowej, Kraków-Rytro 23-26IX 2014 r.

4.5.6. Patenty

1. **Piotr Siwak**: Wzór użytkowy pt. *Grawerko frezarka,* Usługi Ślusarskie –Cut Steel, Sieroszewice, nr 68055 z dnia 17 XII 2012.
2. **Piotr Siwak**: Patent pt. Włącznik i wyłącznik do parasola ogrodowego, Usługi Ślusarskie - Cut Steel, Sieroszewice, nr 217930 z dnia 07 XII 2010.

4.5.7. Konferencje naukowe

1. III Ogólnopolskie Seminarium Spark PlasmaSintering, Online/Kraków, 23 X 2020.
2. II Ogólnopolskie Seminarium Spark PlasmaSintering, Warszawa, 24 X 2019 r. – **autor referatu**: *Zastosowanie metody FAST/SPS do wytwarzania elektrod do nagrzewania i hartowania drutu z węglików spiekanych WC-5Co*; **współautor referatu**: *Mikrostruktura i właściwości węglików spiekanych WC-Co oraz WC-FeNi wytwarzanych metodą FAST/SPS*.

3. The XXII Physical Metallurgy and Materials Science Conference AMT 2019, Bukowina Tatrzańska, Kraków, 09-12 VI 2019 – **autorposteru**: *Hardness and fracture toughness of spark plasma sintered WC-Co and WC-Co-Cr_3C_2 cemented carbides*.
4. Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna KONTECH „Advanced Forming Technologies And Nanostructured Materials", Opalenica, 18-20 IX 2019 – *autor posteru*: *Spiekane iskrowo-plazmowo węgliki spiekane WC-5Co: Wywarzanie i właściwości*.
5. I Ogólnopolskie Seminarium Spark PlasmaSintering, Poznań, 24 X 2018 – **współautor referatu**: *Wpływ parametrów spiekania iskrowo-plazmowego na wybrane właściwości węglików spiekanych WC-5Co*.
6. VII Krajowa Konferencja Nowe Materiały - Nowe Technologie w przemyśle okrętowym i maszynowym, Szczecin-Ystad, 11-14 VI 2018 – **współautor referatu**: *Węgliki spiekane WC-5Co wytwarzane metodą SPS*; **autor posteru**: *Analiza wpływu inhibitorów wzrostu na trwałość ostrzy skrawających z węglików spiekanych wytwarzanych metodą impulsowo-plazmową*.
7. X Jubileuszowa Konferencja: Szkoła Obróbki Skrawaniem, Rzeszów-Łańcut, 05-07 IX 2016 – **autor referatu**: *Wpływ parametrów procesu spiekania na właściwości płytek skrawających wytwarzanych metodą iskrowego spiekania plazmowego*, **współautor referatu**: *Badania odporności na zużycie ścierne ostrzy skrawających z węglików spiekanych za pomocą nowoczesnego stanowiska UMT-2 firmy BRUCKER*.
8. VI Ogólnopolska Konferencja Naukowa: Nowoczesne Technologie w Inżynierii Powierzchni, Łódź-Spała, 25-28 IX 2016 – **autor referatów**: *Ocena właściwości tribologicznych polietylenu UHMW w warunkach pracy na sucho i ze smarowaniem*, *Analiza poprawy właściwości technologicznych spieków typu WC-Co wytwarzanych metodą iskrowo-plazmową*.
9. IX Konferencja Szkoła Obróbki Skrawaniem: Obróbka skrawaniem podstawą rozwoju metrologii, Sandomierz-Kielce 23-25 IX 2015 – **autor referatu**: *Badania właściwości technologicznych płytek skrawających z węglików spiekanych typu WC-6Co wytwarzanych metodą impulsowo plazmową*.
10. VIII Konferencja Naukowa Szkoły Obróbki Skrawaniem: Synergia nauki z przemysłem, Międzyzdroje-Szczecin, 17-19 IX 2014 – **autor referatu**: *Analiza możliwości spiekania oraz poprawy właściwości technologicznych ostrzy skrawających z węglików spiekanych wytwarzanych metodą SPS*.
11. VII Konferencja Naukowa Szkoły Obróbki Skrawaniem: Interakcja proces-obrabiarka, Mierzęcin, 11-13 IX 2013 – **autor referatu**: *Analiza wpływu inhibitorów wzrostu na trwałość ostrzy skrawających z nanowęglików spiekanych wytwarzanych metodą PPS*, **współautor referatu**: *Badania trwałości nanowęglików spiekanych typu WC-5Co+TaC-NbC wytworzonych przy użyciu plazmy impulsowej*.

4.5.8. Projekty B+R realizowane we współpracy z przemysłem

1. *Wytwarzanie innowacyjnych elektrod do nagrzewania i hartowania drutu oraz narzędzi do obróbki twardych materiałów z nanokrystalicznych proszków WC-Co spiekanych metodą SPS*, nr umowy POIR.01.01.01-00-0267/16-00, 2017–2019, projekt realizowany w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w Programie Operacyjnym Inteligentny Rozwój na lata 2014-2020;oś priorytetowa: Wsparcie prowadzenia prac B+R przez przedsiębiorstwa, działanie: Projekty B+R przedsiębiorstw,poddziałanie:

Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa,numer naboru: 1/1.1.1/2016, rola: **kierownik B+R**.

2. *Opracowanie systemu Smart Work2B szansą na wzrost konkurencyjności ZAP Rachunkowość Sp. z o.o.*, projekt nr RPWP.01.02.00-30-0115/17-00 w ramach Osi Priorytetowej 1: Innowacyjna i konkurencyjna gospodarka,działanie 1.2: Wzmocnienie potencjału innowacyjnego przedsiębiorstw Wielkopolski, Wielkopolski Regionalny Program Operacyjny na lata 2014-2020, rola: **członek zespołu badawczego**.
3. *Innowacyjne technologie wykonywania mieszanin proszkowych stosowanych jako nowej generacji materiał narzędziowy*, projekt nr RPWP.01.02.00-30-0110/17 w ramach Osi Priorytetowej 1: Innowacyjna i konkurencyjna gospodarka,działanie 1.2: Wzmocnienie potencjału innowacyjnego przedsiębiorstw Wielkopolski, Wielkopolski Regionalny Program Operacyjny na lata 2014-2020, rola: **członek zespołu badawczego**.
4. *System chłodzenia narzędzi do laserowo wspomaganego toczenia stopów lotniczych*, projekt nr LIDER/164/L-6/14/NCBR/2015 finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu LIDER VI, okres realizacji 2016-2018 r.,rola: **członek zespołu badawczego**.
5. *Laserowe wspomaganie toczenia węglików spiekanych napawanych laserowo*, projekt nr LIDER/005/141/L-5/13/NCBR/2014 finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu LIDER V, okres realizacji 2015-2017r.,rola: **członek zespołu badawczego**.
6. *Wdrożenie autorskiej technologii skrawania z zastosowaniem narzędzi z nanowęglików spiekanych*, projekt nr POIG.04.03.00-00-253/11 realizowany w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, działanie 4.3, okres realizacji 2011–2012,rola: **członek zespołu badawczego.**
7. *Realizacja prac badawczych szansą rozwoju marki CUT STEEL*, projekt numer: RPWP.01.02.00-30-0064/19, nr naboru 189/RPWP.01.02.00-IZ.00-30-001/19; projekt realizowany ze środków Wielkopolskiego Regionalnego Programu Operacyjnego na lata 2014-2020 (oś priorytetowa 1: Innowacyjna i konkurencyjna gospodarka; działanie 1.2: Wzmocnienie potencjału innowacyjnego przedsiębiorstw Wielkopolski),rola: **członek zespołu badawczego.**
8. *Badania właściwości technologicznych krążków z nanowęglików spiekanych do hartowania sprężyn, wytworzonych metodą iskrowego spiekania plazmowego*, projekt nr DRG-226/2014 na konkurs realizowany w ramach zadania: Innowacyjna Wielkopolska "Vouchery dla przedsiębiorstw" służący wsparciu współpracy biznesu i nauki na rzecz realizacji prac badawczo-rozwojowych, projekt: Wsparcie współpracy sfery nauki i przedsiębiorstw w Wielkopolsce, Program Operacyjny Kapitał Ludzki, priorytet VIII: Regionalne kadry gospodarki, działanie 8.2 – Transfer Wiedzy, poddziałanie 8.2.1. – Wsparcie dla współpracy sfery nauki i przedsiębiorstw, rola: **kierownik projektu**.
9. *Materiały bionanokompozytowe na osnowie magnezu z udziałem bioceramiki na implanty o strukturze scaffoldowej*, projekt nr NCN 02/24/PNCN/4394, 2014–2017,**wykonawca zadania** pt. *Wyznaczenie modułu Younga dla serii próbek na bazie magnezu*.
10. *System do kompleksowego badania w skali nano, mikro i makro cech i właściwości elementów urządzeń mechanicznych i mechatronicznych oraz narzędzi dla poprawy ich niezawodności*, projekt nr 765/FNiTP/136/2013, Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego z Funduszu Nauki i Technologii Polskiej,rola: **członek zespołu badawczego**.

11. *Wdrożenie autorskiej technologii skrawania z zastosowaniem narzędzi z nanowęglików spiekanych*, projekt nr POIG.04.03.00-00-253/11 realizowany w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, działanie 4.3, okres realizacji 2011–2012, rola: **członek zespołu badawczego**.
12. *Badania właściwości technologicznych i eksploatacyjnych ostrzy skrawających z nanowęglików spiekanych konsolidowanych przy użyciu plazmy impulsowej*, projekt nr N N503 147734, rola: **wykonawca**.

4.5.9. Projekty B+R realizowane na Politechnice Poznańskiej

1. *Wykonanie technicznej analizy materiału rolki transportującej*, Volkswagen Poznań Sp. z o.o., 02/22/PRJG/1402, 2018, rola: **kierownik projektu.**
2. Udział wprojekcie *Czas zawodowców BIS- zawodowa Wielkopolska*– Wielkopolski Regionalny Program Operacyjny na lata 2014-2020, priorytet inwestycyjny 10iv: Lepsze dostosowanie systemów kształcenia i szkolenia do potrzeb rynku pracy, ułatwienie przechodzenia z etapu kształcenia do etapu zatrudnienia oraz wzmacnianie systemów kształcenia i szkolenia zawodowego i ich jakości, w tym poprzez mechanizmy prognozowania umiejętności, dostosowania programów nauczania oraz tworzenia i rozwoju systemów uczenia się poprzez praktyczną naukę zawodu realizowaną w ścisłej współpracy z pracodawcami, działanie 8.3.3 Czas zawodowców BIS-zawodowa Wielkopolska- tryb pozakonkursowy, określony we wniosku o dofinansowanie projektu nr RPWP.08.03.03-30-0001/15 realizowanego na podstawie Uchwały Zarządu Województwa Wielkopolskiego nr 1825/2016 z dnia 31.03.2016 oraz projektu nr RPWP.08.03.03-30-0001/19, przez Departament Edukacji i Nauki Urzędu Marszałkowskiego Województwa Wielkopolskiego w partnerstwie z Politechniką Poznańską, rola: **członek zespołu.**
3. *Opracowanie nowych nanokrystalicznych stopów i kompozytów tantalu wytworzonych metodą mechanicznej syntezy i spiekania impulsowo-plazmowego, nr umowy 2015/19/B/ST5/02595-OPUS, 2016–2018, rola: członek zespołu badawczego.*
4. *Projektowanie właściwości stopów tytanu typu beta metodami modyfikacji mikrostruktury i obróbki powierzchniowej dla aplikacji medycznych*, ERP/MPK 02/24/PNCN/2494m, 2018–2020,rola: **wykonawca w projekcie badawczym**.
5. Udział w pracach badawczych Zakładu Projektowania Technologii – PT (02/22/DSPB/1433) w zadaniu pt. *Wpływ dodatku TaC-NbC na trwałość ostrzy skrawających WC-Co* w roku 2018.
6. *Wykonanie badań właściwości technologicznych wrzeciona prasy STORD 2500 i opracowanie wyników*, 02/22/PRJG/1403, PFEIFER & LANGEN POLSKA S.A. Cukrownia Środa Wielkopolska, 2017, rola: **kierownik projektu**.
7. Udział w pracach badawczych Zakładu Projektowania Technologii – PT (02/22//DSPB/1388) w zadaniu pt. *Określenie możliwości stosowania powłok z materiałów kompozytowych na koła zębate i inne części maszyn* w roku 2017.
8. *Wytwarzanie materiałów kompozytowych na bazie węglika wolframu i kobaltu metodą iskrowego spiekania plazmowego*, 02/22/DSMK/1333, 2016, rola: **kierownik projektu.**
9. *Zbadanie procesu wytwarzania i właściwości pianek metalowych na bazie nanokrystalicznych stopów tytanu beta w procesie odstopowania magnezu*, nr ERP/MPK 02/24/PNCN/3969, 2016, rola: **wykonawca w projekcie badawczym**.
10. Opracowanie opinii o innowacyjności pt. *Innowacyjny proces wytwarzania broszur i leg drukarskich w drukarni Trans-Druk* –w ramach dotacji projektów realizowanych przez

Wielkopolskiego Regionalny Program Operacyjny na lata 2014 2020 WRPO,poddziałanie 1.5.2: Wzmocnienie konkurencyjności kluczowych obszarów gospodarki regionu, 2015.

11. Opracowanie opinii o innowacyjności pt.:*Wdrożenie innowacyjnych rozwiązań w Wytwórni Sit* Sitono *poprzez zakup środków trwałych oraz wartości niematerialnych i prawnych*, w ramach dotacji projektów realizowanych przez Wielkopolskiego Regionalny Program Operacyjny na lata 2014 2020 WRPO,poddziałanie 1.5.2: Wzmocnienie konkurencyjności kluczowych obszarów gospodarki regionu, 2015.
12. Udział w pracach badawczych Zakładu Projektowania Technologii –PT02/22/DSPB/1207 wzadaniu pt. *Badania i symulacja procesów obróbki ubytkowej* w roku 2015.
13. **Wykonawca** w projekcie:*Mechanika i Budowa Maszyn kierunkiem twoich sukcesów*, zadanie nr 4: Robotyzacja procesów wytwórczych, nr UDA-POKL-04.01.02-00-164/10-00; Kapitał Ludzki, Narodowa Strategia Spójności z Europejskiego Funduszu Społecznego.
14. **Wykonawca** w projekcie:*Inżynieria wiedzy dla inteligentnego rozwoju*, zadanie nr 4: studia podyplomowe: Ekotechnologie i montaż, nr PKOL 04.03.00-00-131/12, Kapitał Ludzki, Narodowa Strategia Spójności z Europejskiego Funduszu Społecznego.
15. **Kierownik tematu** w ramach DdMNiD (Dotacja dla Młodych Naukowców i Doktorantów), nr tematu 514 22-858/2012/DS-MK pt. *Badanie właściwości technologicznych i eksploatacyjnych ostrzy skrawających z nanowęglików spiekanych wytworzonych przy użyciu plazmy impulsowej*.
16. Udział w pracach badawczych Zakładu PT – Pracowni Podstaw Technologii w zakresie Działalności Statutowej Zakładu (511 22-806/2012/DS-PB), pt. *Badania trwałości nanowęglików spiekanych typu WC-5Co+(TaC-NbC) wytworzonych przy użyciu plazmy impulsowej*.
17. Udział w zadaniu nr 2projektu:*Era inżyniera. Rozbudowa potencjału rozwojowego Politechniki Poznańskiej*, 1 grudnia 2011-30 stycznia 2012r., nr AK-111/1678/11, Kapitał Ludzki, Narodowa Strategia Spójności z Europejskiego Funduszu Społecznego.
18. Udział w pracach badawczych Zakładu PT – Pracowni Podstaw Technologii w zakresie BW (Badań Własnych 22-858/2011/DS-MK):*Badania twardości nanowęglików spiekanych wytworzonych metodą impulsowo plazmową*– 2011 r.
19. Udział w pracach badawczych w zakresie BW (Badań Własnych – 22-700/10/BW):*Ocena kruchości nanowęglików spiekanych typu WC-Co wytworzonych metodą PulsePlasmaSintering*– 2010 r.
20. Udział w pracach badawczych w zakresie BW (Badań Własnych – 22-573/09/BW):*Metody wytwarzania spiekanych stali szybkotnących i węglików spiekanych oraz tendencje ich rozwoju*– 2009 r.
21. Udział w pracach badawczych w zakresie DS (Działalności Statutowej – 22-568/09/DS):*Przegląd i kierunki rozwoju objętościowych materiałów ceramicznych na ostrza skrawające*– 2009 r.
22. Udział w pracach badawczych w zakresie BW (Badań Własnych – 22-501/08/BW):*Analiza możliwości poprawy właściwości ostrzy skrawających z węglików*

spiekanych poprzez wytwarzanie ich z nanoproszków przy użyciu plazmy impulsowej– 2008 r.

23. Udział w pracach badawczych w zakresie DS (Działalności Statutowej – 22-495/08/DS):*Analiza i rozwoju i możliwości wykorzystanie różnych materiałów powłokowych na ostrza skrawające*– 2010 r.

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

Okres	Nazwa instytucji, miejscowość	Charakter studiów, szkolenia lub stażu
01.12.2019-31.12.2019	Sieć Badawcza Łukasiewicz– Instytut Obróbki Plastycznej w Poznaniu	Realizacja prac badawczych polegająca na konsolidacji wytworzonych mieszanin proszkowych z wykorzystaniem urządzenia SPS HP D 25/3
28.11.2018-19.08.2019	University of Windsor Canada University Avenue West Windsor, Ontario, Kanada	Badania właściwości mechanicznych zgodnie z normami ISO I ASTM

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

6.1. Działalność dydaktyczna

1. Promotor pomocniczy w przewodnie doktorskim mgr. inż. Kazimierza Czapczyka,tytuł rozprawy:*Badania właściwości mechanicznych i tribologicznych nanokompozytowej powłoki Ni-P/Si_3N_4 osadzanej metodą redukcji chemicznej na stopie aluminium AW-7075 stosowanym na części maszyn*, publiczna obrona 31.05.2019 r. oraz zamknięcie przewodu doktorskiego.
2. Promotor pomocniczy w przewodnie doktorskim mgr. inż. Damiana Smierzchalskiego, tytuł rozprawy:*Ocena twardości powierzchni metalicznych na podstawie topografii odcisków wgłębnika*,otwarty przewód doktorski.
3. Zajęcia dydaktyczne prowadzone na studiach I, II, III stopnia studiów stacjonarnych i niestacjonarnych oraz podyplomowych (przedmiot i rodzaj):
   - projektowanie procesów technologicznych (proj.),
   - technologia i organizacja montażu (proj.),
   - podstawy robotyzacji (lab.),
   - programowanie robotów (lab.),
   - elastyczne systemy wytwarzania (lab.),
   - technologia maszyn/Technologia wytwarzania (lab.),
   - inżynieria wytwarzania I – LOM (lab.),

- podstawy informatyki (ćw.),
- robotyzacja procesów technologicznych (ćw.),
- praca przejściowa (proj.),
- technologiczność montowanych wyrobów – DFM (ćw.) – zajęcia w ramach studiów podyplomowych- Ekotechnologie i montaż (projekt nr POKL.04.03.00-00-131/12),
- inżynieria powierzchni biomateriałów (wykład, lab.),
- inżynieria powierzchni (wykład, lab.),
- praca przejściowa (proj.),
- seminarium dyplomowe.

4. Organizacja zajęć dydaktycznych i prac w laboratorium badań właściwości technologicznych; opieka i nadzór nad laboratorium badawczym właściwości mechanicznych; opracowanie instrukcji do zajęć z inżynierii powierzchni biomateriałów oraz inżynierii powierzchni - forma zajęć: laboratorium.
5. Członek zespołu odpowiedzialnego za moduł kształcenia na studiach stacjonarnych II stopnia na kierunku inżynieria biomedycznana Wydziale BudowyMaszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej, decyzja dziekana WBMiZ nr 594/03/2016.
6. Członek zespołu odpowiedzialnego za moduł kształcenia na studiach niestacjonarnych I stopnia na kierunku mechanika i budowa maszyn na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej, decyzja dziekana WBMiZ nr 674/03/2016.
7. Członek zespołu odpowiedzialnego za moduł kształcenia na studiach niestacjonarnych I stopnia na kierunku mechatronika na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej, decyzja dziekana WBMiZnr 790/03/2016.
8. Promotor oraz recenzent prac magisterskich i inżynierskich z zakresu: mechaniki i budowy maszyn, mechatroniki i inżynierii biomedycznej w:
   - 2013 r. – promotor 6 prac inżynierskich,
   - 2014 r. – promotor 5 prac inżynierskich,
   - 2015 r. – promotor 4 prac magisterskich oraz 1 pracy inżynierskiej,
   - 2016 r. – promotor 5 prac inżynierskich,
   - 2017 r. – promotor 5 prac magisterskich 3 prac inżynierskich,
   - 2018 r. – promotor 3 prac inżynierskich,
   - 2019 r. – promotor 2 prac magisterskich 2 prac inżynierskich,
   - 2020r. – promotor 1 pracy inżynierskiej.
9. Upoważnieniedziekana WBMiZdo pełnienia funkcji przewodniczącego komisji egzaminacyjnej w przypadku studiów pierwszego stopnia; upoważnienie nr 1 z dnia 16 stycznia 2020r.

6.2. Działalność organizacyjna

1. Członek komisji ds. nauki i ewaluacji działalności naukowej na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej.

2. Zastępca przewodniczącego Komitetu Organizacyjnego II Ogólnopolskiego Seminarium *Spark PlasmaSintering* zorganizowanego z Siecią Badawczą Łukasiewicz - Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie, Siecią Badawczą Łukasiewicz - Instytut Obróbki Plastycznej w Poznaniu, GeniCore Sp. z o.o. z Warszawy w dniu 24 X 2019 r. (więcej na https://2sps.inop.poznan.pl/index.php/cel-seminarium/).
3. Zastępca przewodniczącego Komitetu Organizacyjnego I Ogólnopolskiego Seminarium Spark PlasmaSintering zorganizowanego z Instytutem Obróbki Plastycznej w Poznaniu w dniu 24 X 2018 r. (więcej na https://1sps.inop.poznan.pl/index.php/cel-seminarium/).
4. Członek Wydziałowej Komisji Kwalifikacyjnej w Politechnice Poznańskiej do przeprowadzania postępowania kwalifikacyjnego w ramach rekrutacji na studia stacjonarne II stopnia studiów dziennych, kierunki: zarządzanie i inżynieria produkcji oraz mechatronika.
5. Członek dziekańskiej komisji ds. nagród na Wydziale Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej w okresie 2018-2020r.
6. Promocja Politechniki Poznańskiej na Międzynarodowych Targach Poznańskich: wykonanie opinii i ekspertyzy produktów zgłoszonych do konkursu o Złoty Medal MTP na targach ITM Polska 2013r,umowa nr 467/2013 z dnia 15 IV 2013 w Poznaniu zawarta z BIT- Biznes-Innowacje-Technologie Sp. z. o.o. z siedzibą w Poznaniu.
7. Prezentowanie jednostki badawczej Politechniki Poznańskiej na Międzynarodowych Targach Poznańskich z cyklu Innowacje – Technologie – Maszyny, Poznań 2009.
8. Członek komitetu organizacyjnego Konferencji Naukowo-Technicznej TPP'09 Projektowanie Procesów Technologicznych, Poznań, 2009.
9. Udział w pracach związanych z przygotowaniem Sympozjum Naukowego pt. *Najnowsze osiągnięcia i kierunki rozwoju technologii maszyn* organizowanego pod patronatem dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Zarządzania oraz dyrektora Instytutu Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, rola: sekretarz Sympozjum, Poznań, 2008.

6.3. Działalność naukowa i współpraca z jednostkami naukowo-badawczymi

1. Recenzent w czasopiśmie *Materials,* wydawca MDPI AG, ISSN 1996-1994, 140 pkt., IF 3,057.
2. Współpraca naukowa z University of Windsor, Kanada.
3. Współpraca naukowa z Siecią Badawczą Łukasiewicz – Instytut Obróbki Plastycznej w Poznaniu (od 2014 r.) w zakresie zaawansowanych technik wytwarzania i kształtowania nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych.
4. Współpraca naukowa z Siecią Badawczą Łukasiewicz – Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych w Warszawie.
5. Współpraca naukowa z Siecią Badawczą Łukasiewicz – Krakowski Instytut Technologiczny.

6. Kierowanie i prowadzenie prac w laboratorium właściwości mechanicznych i trybologii WMiT zlokalizowanym w budynku Centrum Mechatroniki, Biomechaniki i Nanoinżynierii Politechniki Poznańskiej.

6.4. Nagrody i wyróżnienia

1. Nagroda JM Rektora Politechniki Poznańskiej za osiągnięcia naukowe uzyskane w roku akademickim 2018/2019, RO-1170/3/19/994.
2. Polska Nagroda Innowacyjności w roku 2020 przyznana przez Polską Agencję Przedsiębiorczości oraz Forum Przedsiębiorczości w Dzienniku Gazecie Prawnej.
3. Nagroda EuropeanQualityCertificate 2020 przyznana przez fundację Qualitas, Katowice 2020.
4. Wyróżnienie na Międzynarodowych Targach w Japonii, PrecisonSheet Metal Technology Fair w 2019r.
5. Nagroda i dyplom na konferencji Nowe Materiały-Nowe Technologie w Przemyśle Okrętowym i Maszynowym za najlepszą fotografię naukową, Instytut Inżynierii Materiałowej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Instytut Podstawowych Nauk Technicznych, Akademia Morska w Szczecinie, 11-14 czerwca 2018r.
6. Nagroda Ambasadora Innowacyjności za dokonania w roku 2018, przyznana przez Polską Agencję Rozwoju Biznesu, Europejski Ośrodek Rozwoju Gospodarki.
7. Polska Nagroda Jakości w roku 2018 przyznana przez Polską Agencję Przedsiębiorczości oraz Forum Przedsiębiorczości w Dzienniku Gazecie Prawnej.
8. Polska Nagroda Innowacyjności w roku 2017 przyznana przez Polską Agencję Przedsiębiorczości oraz Forum Przedsiębiorczości w Dzienniku Gazecie Prawnej.
9. Nagroda i wyróżnienie na Międzynarodowych Targach AmadaAward, *(Awardwinnigproduct),* 33rd PrecisonSheet Metal Technology Fair w 2021r.

6.5. Członkostwo w towarzystwach naukowych i instytucjach

1. Członek Stowarzyszenia Inżynierów i Mechaników Polskich – SIMP, koło nr 1 przy Politechnice Poznańskiej.
2. Członek zespołu Forum Grup Roboczych -*Przemysł Jutra*, Wielkopolskie Obserwatorium Innowacji, Departament Gospodarki, Urząd Marszałkowski Województwa Wielkopolskiego w Poznaniu.
3. Członek Rady Programowej przy Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Koninie.
4. Członek Regionalnej Izby Gospodarczej w Kaliszu.

6.6. Artykuły opublikowane w czasopismach i magazynach branżowych/popularnonaukowych

1. Publikacja:*Narzędziownie regionu wielkopolskiego*, Forum Narzędziowe Oberon, nr 6 (93), 2018, s. 1-3.
2. Artykuł:*25 lat jakości*, Forum Przedsiębiorczości, nr 7 (51), 2018, s. 3.

3. Artykuł:*Innowacyjni w każdym calu*, Forum Przedsiębiorczości, nr 5 (49), 2018, s. 3.
4. Artykuł:*Klucz do sukcesu*, Forum Przedsiębiorczości, nr 5 (41), 2017, s. 3.
5. Artykuł:*Wielkie polskie innowacje*, Wydawnictwo promocyjne Polskiej Agencji Przedsiębiorczości, Forum Przedsiębiorczości, nr 3 (59), 24 września 2020r., s.4.
6. Artykuł: *Jakość, Nauka, Rozwój*,Quality magazyn dla praktyków, Fundacja Qualitas, nr 009, listopad 2020 r.

7. Inne ważne informacje dotyczące kariery zawodowej

7.1. Specjalistyczne szkolenia i staże

1. Szkoła językowa Manchester Academy of English, British Council, ARELS English in Britain, St. Margaret's Chamber 5 Newton Street, Manchester M1 1HL, UK, 2003 r.
2. Dwa kursy językowe w szkole East London School of English, 154-170 Cannon Street Road, London E1 2LH, 2004 r.,2005 r.
3. Audytor wewnętrzny zintegrowanego systemu zarządzania (wg ISO 9001, ISO 14001 i OHSAS/PN-N-18001), Poznań 2007 r.
4. Staż zawodowy w Przedsiębiorstwie produkcji strunobetonowych żerdzi wirowanych „WIRBET" w Ostrowie Wielkopolskimw latach: 2006 r.; 2007 r.; 2008 r.
5. Staż zawodowy w przedsiębiorstwie Saint-Gobain HPM Polska w zakładzie Abrasive, Koło od 1.04.2014 do 31.12.2014
6. Uczestnictwo w seminariach: *Automatyzacja linii produkcyjnych,* 2012 (Katowice), 2013 (Kraków), 2014 (Kraków).
7. Ukończone szkolenie w DMG Polska Sp. z o.o. z zakresu obsługi oraz programowania obrabiarek sterowanych numerycznie CNC, sterowanie Heidenhain 530, sonda detalu TS640, cykl 19, Pleszew 2012 r.
8. Uczestnictwo w szkoleniu: *Jak interpretować prawa autorskie na uczelni*, PWN, Polska Izba Szkoleniowa, Poznań 2014 r.
9. Ukończenie autoryzowanego kursu obsługi i zastosowania zestawu CAM-edukacja (EdgeCAM), ZERO Technologia Produkcji, Mechatronik, 2015 r.
10. Procedury ochrony danych osobowych w świetle unijnej reformy ochrony danych (RODO), BDM-EDU Group, Hanceleski&Wyjatek, Poznań, 23.04.2018 r.
11. 2-letnie studium pedagogiczne przy Politechnice Poznańskiej.

7.2. Współpraca z sektorem gospodarczym

1. Współpraca z Zoller Polska Sp. z o.o. w zakresie oprzyrządowania oraz procesów kontrolno-pomiarowych, 2018 r.
2. Współpraca z Hass Automation Europe, Abplanalp(Bruksela, Belgia) w zakresie procesów wytwarzania, automatyzacji, obróbki mechanicznej, 2018-2021.
3. Współpraca z AMADA GMBH Hann Niemcy, AMADA Polska Sp. z o .o. w zakresie procesów obróbki plastycznej, 2013-2021.
4. Współpraca z NETZSCH Pumpen & Systeme GmbH, GeretsriederStraße 184478, Waldkraiburg, Deutschland, Obróbka skrawaniem trudnoobrabialnych materiałów z gatunku 1.4301, 2015-2021.
5. Współpraca z DMG MORI, GILDEMEISTER Drehmaschinen GmbH, Bielefeld, w zakresie obróbki mechanicznej elementów metalowych, 2019-2021.
6. Współpraca z DMG MORI Polska Sp. z o.o., Pleszew, w zakresie obróbki skrawaniem, 2007-2021r.
7. Współpraca z FARO GmbH Niemcy w zakresie procesów kontrolno-pomiarowych, 2019-2020.
8. Współpraca z MAHLE Behr Ostrów Wielkopolski Sp. z o.o., obróbka elementów aluminiowych płyt podwozia do samochodów z napędem elektrycznym, 2020-2021.
9. Współpraca z SANDVICK Coromant Polska w zakresie procesów doboru narzędzi skrawających oraz badań i analiz materiałów narzędziowych 2007-2021.

Tabela 7.1.*Zbiorcze zestawienie osiągnieć naukowychprzed i po uzyskaniu stopnia doktora*

Rodzaj osiągnięć naukowych	Przed doktoratem	Po doktoracie	SUMA
Publikacje z bazy JCR *(Journal Citation Reports)*	1	14	15
Publikacje spoza bazy JCR	8	20	28
Wystąpienia na konferencjach międzynarodowych i krajowych	1	9	10
Udzielone patenty	1	-	1
Udzielone wzory użytkowe	-	1	1
Artykuły opublikowane w materiałach konferencyjnych	1	11	12
Streszczenia opublikowane w materiałach konferencyjnych	1	10	11
Udział w zrealizowanych projektach naukowo-badawczych	2	6	8
Udział w projektach europejskich i międzynarodowych	-	3	3
Kierowanie i udział w zespołach realizujących projekty komercyjne/przemysłowe	-	4	4
Współpraca z zagranicznymi oraz krajowymi jednostkami naukowo-badawczymi	1	7	8
Wykonanie ekspertyz naukowych oraz opinii o innowacyjności	-	8	8
Członkostwo i udział w zespołach eksperckich oraz konkursowych	-	6	6
Wdrożenia technologiczne do przemysłu wyników prac B+R w ramach zrealizowanych projektów naukowych	1	6	7
Współpraca z sektorem gospodarczym przemysłu maszynowego	3	8	11
Członkostwo w krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych	1	3	4
Promotor prac magisterskich	-	11	11
Promotor prac inżynierskich	-	26	26
Nagrody i wyróżnienia	1	8	9

Tabela 7.2.*Wskaźniki naukometryczne wg. bazy SCOPUS*

Baza SCOPUS (Sco)	Liczba publikacji	Liczba cytowań	Indeks Hirscha (h)
	26	**107** z autocytowaniami oraz **104** bez autocytowań	**6**
Sumaryczny ImpactFactor według *listy JournalCitationReports* (JCR), zgodny z rokiem opublikowania:		**IF = 24,920**na dzień 10.05.2021 r.	
Liczbie punktów MNiSW / MEiN:		**1043 pkt** na dzień 10.05.2021 r.	

.....

(podpis wnioskodawcy)