

Załącznik 3a
do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

AUTOREFERAT

przedstawiający opis osiągnięć naukowych, w szczególności określonych w art. 16 ust. 2 ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki w języku polskim

dr inż. Krzysztof Kudła
Zakład Spawalnictwa
Instytut Technologii Mechanicznych
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki
Politechnika Częstochowska
ul. Dąbrowskiego 69, 42-201 Częstochowa
kudla@itm.pcz.pl



Częstochowa, 11.02.2019 r.

Spis treści

1. Imiona i nazwisko	3
2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe	3
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	3
4. Wskazanie osiągnięcia naukowego	4
4.1. Tytuł cyklu publikacji powiązanych tematycznie	4
4.2. Wykaz publikacji tworzących cykl publikacji powiązanych tematycznie	4
4.3. Omówienie celu naukowego prac cyklu i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania	6
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych wnioskodawcy	30
5.1. Działalność prowadzona przed doktoratem	30
5.2. Działalność prowadzona po doktoracie	32

1. Imiona i nazwisko

Krzysztof Kudła

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

- **26.06.2003 – doktor nauk technicznych;** dyscyplina: *Budowa i Eksploatacja Maszyn*, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechnika Częstochowska, Częstochowa.

Temat pracy dyplomowej: *Określenie relacji między wielkościami opisowymi spawania impulsowego elektrodą topliwą w osłonie gazów ochronnych*. Promotor: dr hab. inż. Roman Kensik, recenzenci: prof. dr hab. inż. Włodzimierz Walczak, Politechnika Gdańska i prof. dr hab. inż. Rościsław Melechów, Politechnika Częstochowska.

- **27.11.1999 – dyplom Europejskiego Inżyniera Spawalnika (EWE)**, Instytut Spawalnictwa Gliwice, Gliwice.
- **27.11.1999 – certyfikat kompetencji Europejskiego Inżyniera Spawalnika** PL/EWE/00379/99, Instytut Spawalnictwa w Gliwicach.
- **16.02.1996 – świadectwo ukończenia studium przygotowania pedagogicznego**, Międzywydziałowe Studium Kształcenia Nauczycieli Przedmiotów Technicznych, Politechnika Częstochowska.
- **27.10.1995 – magister inżynier;** specjalność: *Obrabiarki i urządzenia technologiczne*, Wydział Budowy Maszyn, Politechnika Częstochowska, Częstochowa.

Temat pracy dyplomowej: *Projekt rezystora symulującego elektryczny łuk spawalniczy*. Promotor: dr hab. inż. Roman Kensik.

- **1995 – technik;** specjalność: *Budowa Maszyn*, Techniczne Zakłady Naukowe w Częstochowie.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu

Miejsce zatrudnienia:

Zakład Spawalnictwa
Instytut Technologii Mechanicznych
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki
Politechnika Częstochowska
ul. Dąbrowskiego 69, 42-201 Częstochowa

Historia zatrudnienia:

- **01.10.1996 -30.06.2003** – asystent: Samodzielny Zakład Spawalnictwa, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechnika Częstochowska.
- **od 01.07.2003** – adiunkt: Samodzielny Zakład Spawalnictwa (obecnie Zakład Spawalnictwa, Instytut Technologii Mechanicznych) Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechnika Częstochowska.

4. Wskazanie osiągnięcia naukowego

4.1. Tytuł cyklu publikacji powiązanych tematycznie

Moje osiągnięcie naukowe wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz.1311) stanowi **cykl publikacji powiązanych tematycznie** pt.:

**WYKORZYSTANIE NOWATORSKICH ROZWIĄZAŃ TECHNOLOGICZNYCH I
APARATUROWYCH W KONSTYTUOWANIU WARSTW POWIERZCHNIOWYCH
MATERIAŁÓW INŻYNIERSKICH**

Na cykl składa się siedem artykułów opublikowanych w czasopismach indeksowanych w Journal Citation Report [A3, A4, A9, A10, A13, A15, A18*], pięć artykułów z listy B MNiSW [A1, A2, A7, A8, A11] oraz sześć patentów na wynalazki i rozwiązania technologiczne [A5, A6, A12, A14, A16, A17] związanych z wytwarzaniem warstw powierzchniowych za pomocą nowo opracowanych rozwiązań technologicznych i aparaturowych. W przedstawionych publikacjach na każdym etapie ich przygotowania autor niniejszego postępowania habilitacyjnego wniósł istotny i oryginalny wkład merytoryczny. W szczególności dotyczy to koncepcji opracowanych rozwiązań konstrukcyjno-technologicznych, założeń i metodologii badawczej, realizacji badań i analiz związanych z wdrażanymi autorskimi technologiami. Oświadczenia współautorów określające ich indywidualny udział w tworzeniu publikacji zamieszczono w załączniku 5.

*- artykuł w druku (potwierdzenie w zał.7)

4.2. Wykaz tworzących cykl powiązanych tematycznie publikacji pt.: „**Wykorzystanie nowatorskich rozwiązań technologicznych i aparaturowych w konstituowaniu warstw powierzchniowych materiałów inżynierskich**”.

- A1. Iwaszko J., **Kudła K.**, Szafarska M., 2010, *Modyfikacja warstwy wierzchniej materiałów nieprzewodzących za pomocą metody GTAW*, Inżynieria Materiałowa, Vol. 31, Nr 2, s., 153-156. (Punkty MNiSW: 9, udział 65% obejmował przegląd literatury, opracowanie metodologii obróbki powierzchniowej, realizację badań, interpretację wyników badań, przygotowanie tekstu publikacji)
- A2. Szafarska M., Iwaszko J., **Kudła K.**, 2011, *Modyfikacja warstwy wierzchniej stopów magnezu za pomocą metody GTAW*, Inżynieria Materiałowa, Vol. 32, Nr 4, s. 747-750. (Punkty MNiSW: 7, udział 30% obejmował: zaplanowanie prób eksperymentalnych, realizację badań, interpretację wyników badań, nanoszenie poprawek)
- A3. Iwaszko J., **Kudła K.**, Szafarska M., 2012, *Remelting Treatment of the Non-Conductive Oxide Coatings by Means of the Modified GTAW Method*. Surface & Coatings Technology, Vol. 206, Iss. 11-12, s. 2845-2850. (wykaz A MNiSW, liczba punktów w roku wydania 40, **IF=1,941**, mój udział wynosi 60% obejmował: opracowanie metody przetapiania, przeprowadzenie badań eksperymentalnych, interpretację wyników badań, przygotowanie tekstu publikacji)
- A4. Szafarska M., Iwaszko J., **Kudła K.**, Łęgowik I., 2013, *Utilisation Of High-Energy Heat Sources In Magnesium Alloy Surface Layer Treatment*, Archives of Metallurgy and Materials, Vol. 58, Issue 2, s. 619-624; (wykaz A MNiSW, liczba punktów w roku

- wydania 20, **IF= 0,763**, mój udział wynosi 50% obejmował: opracowanie metodologii obróbki powierzchniowej, optymalizację parametrów obróbki, wykonanie doświadczeń eksperymentalnych, interpretację wyników badań, nanoszenie poprawek)
- A5. **Kudła K.**, Iwaszko J., 2013, *Zespół spawalniczy do modyfikowania warstwy wierzchniej materiałów*. Rzeczpospolita Polska. Opis patentowy. PL 214653 B1. Zgłosz. nr 385708 z dn. 21.07.2008. Opubl. 30.08.2013 WUP 08/13. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej. Ochrona Rzeczpospolita Polska. Mój wkład w powstanie tego patentu polegał na opracowaniu koncepcji rozwiązania, badaniu stanu techniki, przeglądzie literatury, opracowaniu zgłoszenia patentowego, kontaktach z rzecznikiem patentowym. Mój udział procentowy szacuję na 60%. Punkty MNiSW: 25.
- A6. **Kudła K.**, Iwaszko J., Szafarska M., 2014, *Zespół spawalniczy do modyfikowania warstwy wierzchniej materiałów*. Rzeczpospolita Polska. Opis patentowy. PL 218340 B1. Zgłosz. nr 394414 z dn. 01.04.2011. Opubl. 28.11.2014 WUP 11/14. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej. Ochrona Rzeczpospolita Polska. Mój wkład w powstanie tego patentu polegał na opracowaniu koncepcji rozwiązania, badaniu stanu techniki, przeglądzie literatury, opracowaniu zgłoszenia patentowego, kontaktach z rzecznikiem patentowym. Mój udział procentowy szacuję na 55%. Punkty MNiSW: 25.
- A7. Iwaszko J., **Kudła K.**, Przerada I., Zawada A., 2015, *Aspekty mikrostrukturalne modyfikacji tarciowej warstwy wierzchniej stopu magnezu AZ91 cząstkami Cr_2O_3* . Materiały Ceramiczne. T.67. Nr 4, s. 430-433. (Punkty MNiSW: 8, udział 30% obejmował: realizację badań, interpretację wyników badań, nanoszenie poprawek)
- A8. Iwaszko J., **Kudła K.**, Fila K., 2016, *Friction stir processing of the AZ91 magnesium alloy with SiC particles*. Archives of Materials Science and Engineering, Vol. 77(2), s. 85–92; DOI: 10.5604/18972764.1225604. (Punkty MNiSW: 13, udział 60% obejmował: przegląd literatury, opracowanie metodologii badań, realizację badań, interpretację wyników badań, sporządzenie manuskryptu)
- A9. Iwaszko J., **Kudła K.**, 2016, *Surface modification of ZrO_2 -10 wt. % CaO plasma sprayed coating*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, Vol. 64, No. 4, s. 937-94; DOI: 10.1515/bpasts-2016-0102; (wykaz A MNiSW, liczba punktów w roku wydania 20, **IF= 1,087** mój udział wynosi 60% obejmował: opracowanie planu badań, wykonanie doświadczeń eksperymentalnych, analizę wyników badań, sporządzenie manuskryptu)
- A10. Iwaszko J., **Kudła K.**, Fila K., Strzelecka M., 2016, *The effect of friction stir processing (FSP) on the microstructure and properties of AM60 magnesium alloy*. Archives of Metallurgy And Materials, Vol. 61, No 3, s. 1209-1214, DOI: 10.1515/amm-2016-0254; (wykaz A MNiSW, liczba punktów w roku wydania 30, **IF= 0,571**, mój udział wynosi 45% obejmował: opracowanie planu badań, wykonanie doświadczeń eksperymentalnych, analizę wyników badań)
- A11. Iwaszko J., **Kudła K.**, Fila K., Caban R., 2017, *Application of FSP technology in formation process of composite microstructure in AlZn5.5MgCu aluminium alloy surface layer reinforced with SiC particles*. Composites Theory And Practice. Nr 1, s. 51-56. (Punkty MNiSW: 7, udział 35% obejmował: realizację badań, interpretację wyników badań, nanoszenie poprawek)
- A12. Iwaszko J., **Kudła K.**, Strzelecka M., 2017, *Zespół spawalniczy do modyfikowania warstwy wierzchniej materiałów*. Opis patentowy. PL 226579 B1. Zgłosz. nr 412886 z dn. 26.06.2015. Opubl. 31.08.2017 WUP 08/17. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej. Ochrona Rzeczpospolita Polska. Mój wkład w powstanie tego patentu polegał na opracowaniu koncepcji rozwiązania, badaniu stanu techniki, przeglądzie literatury, opracowaniu zgłoszenia patentowego, kontaktach z rzecznikiem patentowym. Mój udział procentowy szacuję na 50%. Punkty MNiSW: 30.

- A13. Iwaszko J., Strzelecka M., **Kudła K.**, 2017, *Surface modification of AZ91 magnesium alloy using GTAW technology*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, Vol. 65, No. 6, s.917-926; DOI: 10.1515/bpasts-2017-0099. (wykaz A MNiSW, liczba punktów w roku wydania 25, **IF= 1,156**, mój udział wynosi 50% obejmował: przegląd literatury, opracowanie planu badań, wykonanie doświadczeń eksperymentalnych, analizę wyników badań, nanoszenie poprawek)
- A14. **Kudła K.**, Iwaszko J. 2017. Sposób modyfikowania warstwy wierzchniej materiałów wykazujących silne powinowactwo do tlenu. Opis patentowy. PL 227006 B1. Zgłosz. nr 409150 z dn. 11.08.2014. Opubl. 31.10.2017 WUP 10/17. Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej. Ochrona Rzeczypospolita Polska. Mój wkład w powstanie tego patentu polegał na opracowaniu koncepcji rozwiązania, badaniu stanu techniki, przeglądzie literatury, opracowaniu zgłoszenia patentowego, kontaktach z rzecznikiem patentowym. Mój udział procentowy szacuję na 60%. Punkty MNiSW: 30.
- A15. Iwaszko J., **Kudła K.**, Fila K., 2018, *Technological Aspects of Friction Stir Processing of AlZn5.5MgCu Aluminum Alloy*. Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, Vol. 66, No. 5, s. 713-719. (wykaz A MNiSW, liczba punktów w roku wydania 25, **IF=1,361**, mój udział wynosi 60% obejmował: przegląd literatury, realizację badań, interpretację wyników badań, sporządzeniu manuskryptu).
- A16. Iwaszko J., **Kudła K.** 2018. Sposób modyfikowania warstwy wierzchniej materiałów metalicznych. Opis patentowy. PL 228010 B1. Zgłosz. nr 416112 z dn. 11.02.2016. Opubl. 28.02.2018 WUP 02/18 . Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej. Ochrona Rzeczypospolita Polska. Mój wkład w powstanie tego patentu polegał na opracowaniu koncepcji rozwiązania, badaniu stanu techniki, przeglądzie literatury, opracowaniu zgłoszenia patentowego, kontaktach z rzecznikiem patentowym. Mój udział procentowy szacuję na 60%. Punkty MNiSW: 30.
- A17. **Kudła K.**, Iwaszko J. 2018. Sposób modyfikowania warstwy wierzchniej materiałów metalicznych. Opis patentowy. PL 230589 B1. Zgłosz. nr 419653 z dn. 01.12.2016. Opubl. 04.06.2018 WUP 11/18 . Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej. Ochrona Rzeczypospolita Polska. Mój wkład w powstanie tego patentu polegał na opracowaniu koncepcji rozwiązania, badaniu stanu techniki, przeglądzie literatury, opracowaniu zgłoszenia patentowego, kontaktach z rzecznikiem patentowym. Mój udział procentowy szacuję na 50%. Punkty MNiSW: 30.
- A18. Iwaszko J., **Kudła K.**, 2019, *Effect of friction stir processing (FSP) on microstructure and hardness of AlMg10/SiC composite*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, Vol. 67, (BPASTS-00944-2018-02), status "Article in Press" (wykaz A MNiSW, liczba punktów za 2018 rok: 25, **IF=1,361**, mój udział wynosi 40% obejmował: przegląd literatury, realizację badań, interpretację wyników badań, nanoszenie poprawek).

4.3. Przedstawienie celu naukowego prac cyklu i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

Prezentowany cykl powiązanych tematycznie publikacji dotyczy zastosowania innowacyjnych, autorskich metod spajania termicznego do modyfikacji warstw powierzchniowych materiałów z powłokami przewodzącymi i nieprzewodzącymi, w tym wytwarzania struktur kompozytowych co stanowi mój dorobek w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn. Celem ujęcia dominanty osiągnięć w tym zakresie opracowanie odwołuje się również do autorskich publikacji spoza przedstawianego cyklu. Zakres prac doświadczalnych i analiz zrealizowanych w przedstawianym osiągnięciu podzieliłem na trzy główne etapy. Każdy z etapów dotyczył oceny możliwości i efektów zastosowania nowatorskich rozwiązań w:

- I. Modyfikacji przetopieniowej natryskiwanych tlenkowych powłok ceramicznych.
- II. Modyfikacji przetopieniowej powierzchni stopów metali wykazujących silne powinowactwo do tlenu.

III. Modyfikacji tarciowej powierzchni stopów metali wykazujących silne powinowactwo do tlenu.

W dobie coraz wyższych wymagań związanych z własnościami materiałów a szczególnie ich warstw wierzchnich konieczne jest doskonalenie aparatury wykorzystywanej w procesie kształtowania struktury. Coraz częściej zatem działania zespołów badawczych i metodyka postępowania koncentrują się na warstwie powierzchniowej wyrobu, której cechy decydują w wielu przypadkach o potencjale aplikacyjnym danego wyrobu. Naniesienie powłoki czy konstytucja warstwy wierzchniej pozwalają uzyskać materiał o unikalnej charakterystyce materiałowej. Wymagany postęp w tej dziedzinie wyznacza ciągle nowe cele badawcze i określa jednocześnie priorytetowe kierunki badań. Staje się także czynnikiem motywującym i stymulującym działania racjonalizatorskie i wynalazcze, których wyniki mogą i powinny być aplikowane w tworzeniu warstw wierzchnich materiałów, obejmującym polepszenie własności mechanicznych i chemicznych jak również osiąganiu nowych morfologicznie struktur w tym struktur kompozytowych.

Obecnie dominują dwa główne nurty modyfikacji warstw wierzchnich wykorzystujące termiczne metody spajania: są to metody oparte o wykorzystanie skoncentrowanych źródeł ciepła takich jak laser, wiązka elektronów czy strumień plazmy oraz metody wywodzące się ze zgrzewania tarciowego z przemieszaniem FSW (Friction Stir Welding) określane jako proces FSP (Friction Stir Processing).

Głównym celem moich badań w obszarze konstituowania i modyfikacji warstwy powierzchniowej było wykazanie, że zastosowanie nowatorskich rozwiązań termicznego i termomechanicznego działania prowadzi do polepszenia własności mechanicznych i chemicznych warstwy powierzchniowej lub do ukonstituowania się warstwy powierzchniowej o całkiem nowych własnościach, niemożliwych do uzyskania klasycznymi metodami obróbki cieplnej lub cieplno-chemicznej. Istotność celu wynika z wysokiej częstotliwości awarii części maszyn i konstrukcji generowanych na powierzchni i w warstwie wierzchniej.

Mój wkład w rozwój dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn polega na wprowadzeniu i zastosowaniu autorskich wynalazków i nowatorskich sposobów modyfikacji i wytwarzania warstw wierzchnich metali, których efektem jest uzyskanie oryginalnych wyników dotyczących modyfikacji i konstituowania warstw powierzchniowych o oczekiwanych właściwościach. Opublikowane prace są oryginalne w skali międzynarodowej, czego potwierdzeniem są liczne międzynarodowe i krajowe nagrody za wynalazki (tab. 1 i 2) oraz prezentacja rezultatów badań w renomowanych pismach z listy JCR.

Opracowane rozwiązania są efektem wcześniejszych wieloletnich prac badawczych, w których uczestniczyłem i byłem głównym albo pomocniczym autorem. Dotyczyły one badań obejmujących zjawiska łukowe zachodzące w przestrzeni międzyelektrodowej, szacowania ciepła wprowadzanego do materiału podstawowego oraz zastosowania łukowego przetapiania do modyfikacji warstwy wierzchniej materiałów. Wyniki prowadzonych badań i analiz przedstawiłem w licznych publikacjach i opracowaniach [B2, B5, B6, B7, B8 (B15), B12, B13, B17, B26, B32-B34, B38, B39, B42, B43, B50-B58, B60-B62]. Efektem prowadzonych badań było opracowanie innowacyjnych rozwiązań, które stały się podstawą do uzyskania osiągnięć prezentowanych w niniejszym autoreferacie.

Jeden z głównych wątków badawczych dotyczył opracowania efektywnej metody modyfikacji powłok tlenkowych nanoszonych na metalowe podłoże metodą natryskiwania plazmowego. Inspiracją do podjęcia badań własnych były problemy technologiczne, jakie obserwuje się w trakcie przetapiania nieprzewodzących elektrycznie powłok tlenkowych za pomocą metod łukowych. Ambicją autora niniejszej pracy było wykazanie, że technologie łukowe, a w tym różne odmiany metody TIG stanowią mogą rozwiązanie alternatywne dla technologii laserowych, a zatem mogą być w pełni przydatne w procesie świadomego konstituowania warstw powierzchniowych o założonym spektrum właściwości. W kontekście ekspansji skoncentrowanych źródeł ciepła w inżynierii powierzchni podjęte przeze mnie działania zmierzające do wzbogacenia dostępnego instrumentarium i technologii obróbek powierzchniowych wpisują się nie tylko w aktualne trendy i kierunki badawcze, ale wyznaczają nowe obszary badawcze pozwalając przypisać technologii TIG inne funkcje i zadania dotąd zarezerwowane dla takich źródeł ciepła jak: wiązka lasera, strumień plazmy czy wiązka elektronów.

Opracowanie oryginalnej metodyki obróbki nieprzewodzących elektrycznie powłok tlenkowych za pomocą technologii łukowej stanowi ponadto krok ku przełamaniu stereotypów związanych z metodą TIG, wedle których jest to metoda służąca głównie do łączenia materiałów. W tym kontekście podjęte działania otwierają nowe możliwości implementacji tej technologii w nowoczesnej inżynierii powierzchni. Przeprowadzone prace koncepcyjne i eksperymentalne wykazały docelową możliwość efektywnego wdrożenia technologii TIG w obróbce powłok natrykiwanych plazmowo.

Problem ograniczający do tej pory możliwość zastosowania metod łukowych w obróbce przetopieniowej takich powłok został rozwiązany, a efektem prac koncepcyjnych było opracowanie i praktyczne zastosowanie oryginalnego układu generującego „niezależny elektryczny łuk swobodny”. W opracowanym rozwiązaniu łuk palił się pomiędzy katodą i anodą palnika, natomiast materiał przetapiany był jedynie biernym odbiorcą ciepła łuku. Problem braku przewodnictwa materiału przetapianego został zatem rozwiązany. Przeprowadzone studia literaturowe wykazały, że nie istnieje obecnie w świecie analogiczne rozwiązanie technologiczne i aparaturowe. Fakt ten skłonił mnie do zgłoszenia wniosku o ochronę praw własności intelektualnej na opracowane rozwiązanie. Patent o numerze PL 214653B1 [A5] został przyznany w 2013 roku i stanowi wymowny dowód oryginalnych i twórczych osiągnięć w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn.

Do równie wartościowych osiągnięć poznawczych i aplikacyjnych należy opracowanie metody modyfikacji warstw wierzchnich materiałów wykazujących silne powinowactwo do tlenu, np. stopów magnezu. Badania te obejmowały II etap badań. Dotychczas obróbka warstwy wierzchniej materiałów wykazujących silne powinowactwo do tlenu jak np. stopów magnezu realizowana była najczęściej przy użyciu lasera. Rozwiązania takie są jednak kosztowne zarówno w zakresie wymagań aparaturowych, jak i dostępności do technologii laserowych, problemem jest ponadto refleksyjność materiału. Spostrzeżenia poczynione w trakcie studiów literaturowych oraz wstępnych testów stały się przyczynkiem do opracowania rozwiązania aparaturowo-technologicznego, umożliwiającego skuteczną i co ważne powtarzalną obróbkę przetopieniową warstw wierzchnich tych materiałów, prowadzącą do korzystnych zmian w mikrostrukturze materiału podstawowego. Problem technologiczny wiążący się z zastosowaniem klasycznej metody TIG w obróbce tego rodzaju materiałów stanowił dotychczas ograniczenie w wykorzystaniu tej technologii w inżynierii powierzchni. Wynikał on z obecności na powierzchni materiału cienkiej i nieprzewodzącej warstwy tlenkowej, utrudniającej realizację obróbki

przetopieniowej. Standardowym rozwiązaniem jest w takim przypadku zastosowanie prądu przemiennego, którego skuteczność w wytwarzaniu wysokojakościowych warstw powierzchniowych jest jednak dyskusyjna. Skłoniło to autora do opracowania oryginalnego rozwiązania dwupalnikowego z łukami pracującymi w układzie tandem [A6]. Umożliwiło to jednoczesną realizację procesów oczyszczania katodowego, podgrzewania wstępnego i przetapiania. Studia literaturowe oraz doświadczenie własne, które nabyłem w trakcie licznych prac badawczych, udziału w konferencjach, seminariach i warsztatach wykazały, że analogiczne rozwiązania nie istnieją, co stało się bezpośrednim powodem podjęcia próby uzyskania praw własności intelektualnej na wynalazek i nową technologię obróbki powierzchniowej. Patenty na wynalazek [A6] i sposób modyfikacji [A14] zostały przyznane odpowiednio w 2014 i 2017 roku.

Kolejnym problemem prezentowanym w niniejszym autoreferacie było zintensyfikowanie chłodzenia strefy modyfikowanej i ograniczenie negatywnych efektów związanych z rozrostem ziarna. W tym celu został opracowany oryginalny system chłodzenia materiału zintegrowany z komorą kriogeniczną. Zespół spawalniczy stanowił przedmiot zgłoszenia patentowego. Patent na rozwiązanie został przyznany w roku 2017 [A12].

Wynalazki [A5, A6, A12] były prezentowane i nagradzane na licznych międzynarodowych wystawach wynalazczości, znajdując wszędzie uznanie i wzbudzając zainteresowanie świata nauki. Uzyskały 10 medali (1 złoty, 6 srebrnych i 3 brązowe) oraz 5 specjalnych nagród i wyróżnień. Do pozostałych efektów opracowanych innowacyjnych rozwiązań należy zaliczyć nagrody uzyskane podczas promocji wynalazków na międzynarodowych wystawach organizowanych w kraju, jak również uzyskane dyplomy i nagrody za działalność naukową Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz Rektora Politechniki Częstochowskiej (tab.1-2)

W okresie od 2011 do 2015 prowadziłem prace badawcze dotyczące wdrożenia procesu zgrzewania tarcowego FSW (Friction Stir Welding) stopów metali lekkich dla przemysłu lotniczego w ramach projektów B+R (Aeronet, Innolot) jako główny wykonawca. Wyniki badań prezentowałem w licznych publikacjach i opracowaniach [B11, B20, B21, B27, B31, B63-B67, B69-B76]. Zdobyta wiedza i doświadczenie zaowocowały opracowaniem innowacyjnych technologii modyfikacji warstw powierzchniowych metali będących nowymi odmianami procesu powierzchniowej obróbki tarcowej. Rozwiązania technologiczne [A16, A17] uzyskały ochronę patentową w 2016 roku (PL 228010 B1, PL 230589 B1). Na szczególną uwagę zasługuje nowatorska wielokomorowa technologia MChS-FSP (Multi Chamber System-Friction Stir Processing) umożliwiająca wytworzenie mikrostruktury kompozytowej w warstwie wierzchniej materiału, przewyższająca dotychczasowe konkurencyjne technologie modyfikacji tarcowej FSP z udziałem faz wzmacniających.

W opinii autora opracowane rozwiązania technologiczne i aparaturowe stanowią nową wiedzę o dużym potencjale aplikacyjnym, są wartościowe dla dyscypliny naukowej Budowa i Eksploatacja Maszyn, wyznaczają nowe kierunki badań i sposoby realizacji obróbki powierzchniowej materiałów inżynierskich.

I. Modyfikacja przetopieniowa natryskiwanych tlenkowych powłok ceramicznych.

Jednym z najczęstszych przykładów wykorzystania wysokoenergetycznych źródeł ciepła, jest kształtowanie struktury, budowy i własności warstwy wierzchniej w obecności powłok tlenkowych wytwarzanych na drodze m.in. natryskiwania plazmowego. Ich modyfikację przeprowadza się prawie wyłącznie za pomocą technik laserowych, których efektem jest uzyskanie wąskoobszarowego i głębokiego przetopienia, co niestety związane jest z niską ostateczną jakością powierzchni. Zauważalna dominacja tych technik w obróbce przetopieniowej i związane z nimi ograniczenia były powodem podjęcia prac badawczych mających na celu opracowanie nowatorskich i konkurencyjnych metod modyfikacji warstwy wierzchniej materiałów z tlenkowymi powłokami charakteryzującymi się brakiem bądź bardzo małym przewodnictwem elektrycznym. Decyzja o wyborze metody przetapiania nie zawsze podyktowana jest własnościami przetapianego materiału lub ekonomiką przedsięwzięcia. Często wywołana jest brakiem rozwiązań alternatywnych, dlatego ważne jest rozszerzenie stosowanych obecnie rozwiązań, poprzez doskonalenie i opracowanie nowych technologii modyfikacji warstw wierzchnich.

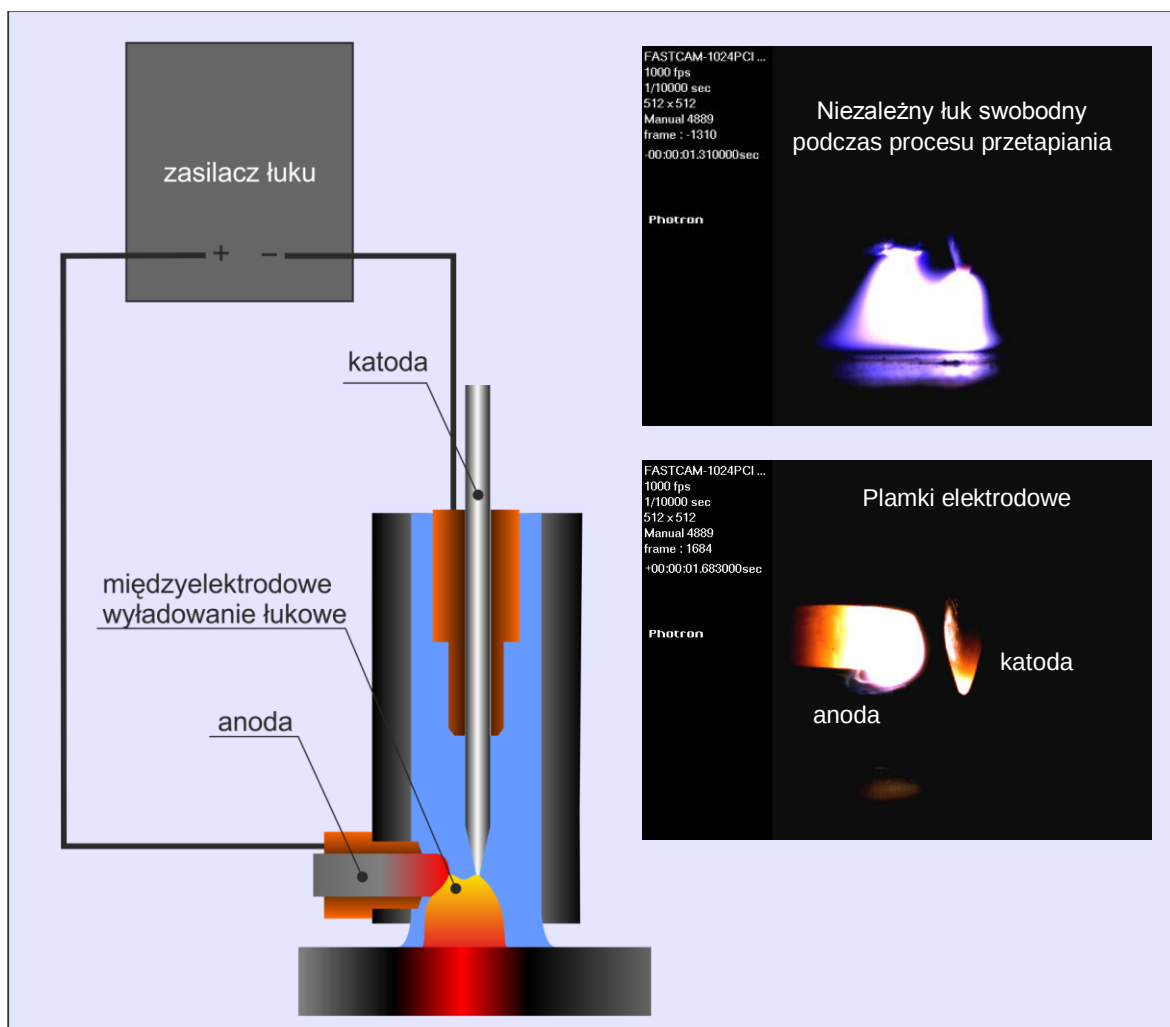
Ceramiczne powłoki tlenkowe stanowią istotny komponent m.in. w wytwarzaniu barier termicznych określanych jako Thermal Barrier Coatings (TBCs), charakteryzujących się wysoką wytrzymałością mechaniczną w obecności obciążeń termicznych i środowisk korozyjnych, stawiających je w grupie materiałów narażonych na ekstremalne obciążenia eksploatacyjne. Jednak możliwości szerszego i bezpiecznego wykorzystania tego typu powłok ograniczone są znacznym ryzykiem ich uszkodzenia eksploatacyjnego powodującego jednocześnie zniszczenie materiału podłoża. W przypadku np. turbin gazowych silników lotniczych może prowadzić to do katastrofalnych skutków. Niestety ograniczenia te wynikają ze skłonności ceramicznych powłok tlenkowych do pękania i oddzielania się od podłoża w wyniku ich słabego z nim związania oraz porowatości, która intensyfikuje negatywne procesy utleniania wysokotemperaturowego.

Wobec powyższego podjęte badania i zastosowane koncepcje rozwiązań technologiczno-aparaturowych skierowane były na praktyczne wykorzystanie obróbki przetopieniowej powłok tlenkowych natryskiwanych plazmowo celem zmniejszenia ich porowatości, poprawy jednorodności i koherencji powłoki z materiałem podstawowym.

Wstępne próby przetapiania powłok tlenkowych [A1] za pomocą konwencjonalnej metody TIG ujawniły szereg trudności w prawidłowej realizacji zadania. Trudności te spowodowane były własnościami termofizycznymi powierzchniowych tlenków, a zwłaszcza ich bardzo małym przewodnictwem elektrycznym. Przeprowadzone próby wykazały znaczną niestabilność łuku elektrycznego ponad powłoką tlenkową nawet po pokryciu jej przewodzącą warstwą węgla, a także trudność zainicjowania łuku nawet przy wykorzystaniu jonizatora. Problem ten dotyczył zarówno wykorzystania prądu jednokierunkowego jak i przemiennego. Przetapianie powłok tlenkowych prowadziło z reguły do wypalenia materiału powłokowego w miejscach oddziaływania płamek elektrodowych (katodowej i anodowej) oraz niekorzystnych zmian geometrii powierzchni warstwy, włącznie z wypchnięciem stopionego materiału poza obszar przetopienia.

Efektom podjętych prac było opracowanie oryginalnego rozwiązania konstrukcyjno-technologicznego generującego „niezależny łuk swobodny” (rys.1). Opatentowany wynalazek [A5] był prezentowany na międzynarodowych wystawach innowacyjności i wynalazczości, znajdując wszędzie uznanie i wzbudzając zainteresowanie świata nauki. W rozwiązaniu tym

modyfikowany materiał jest „biernym” odbiorcą ciepła wydzielanego z łuku elektrycznego, palącego się pomiędzy dwiema elektrodami nietopliwymi. Ponieważ zarówno płamka katodowa i anodowa ułożone są poza obszarem modyfikacji możliwe jest uniezależnienie zastosowanego rozwiązania od własności elektrycznych materiału obrabianego cieplnie. Rozwiązanie to umożliwia przetapianie metali i ich stopów z powłokami tlenkowymi wykazującymi brak lub ograniczoną przewodność elektryczną.



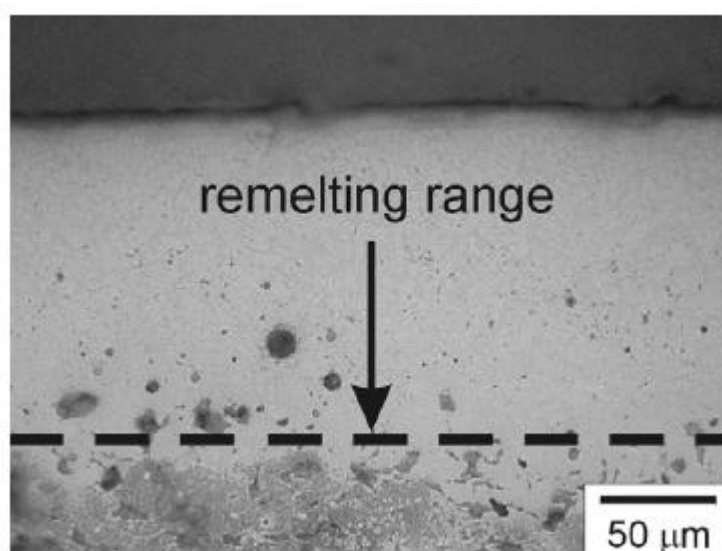
Rys.1. Zespół spawalniczy do modyfikowania powłok nieprzewodzących z „niezależnym łukiem swobodnym” (Pat. PL 214653 B1)

Przeprowadzone analizy i badania z zastosowaniem nowatorskiego układu spawalniczego, dotyczące przetapiania kompozycji tlenkowych na bazie ZrO_2 oraz Al_2O_3 zostały zaprezentowane w publikacjach [A1, A3, A9]. Powłoki naniesiono metodą natryskiwania plazmowego na stal X5CrNi18-10. Międzywarstwę w powłokach na bazie Al_2O_3 wykonano z proszku Ni-Al (80/20). Grubość wytworzonych warstw wynosiła 200-300 μm .

Analiza cech warstw natrykiwanych plazmowo ujawniła typowy dla zastosowanej techniki wytwarzania charakter powłok: warstwowość budowy oraz znaczną porowatość ułożoną głównie w przestrzeniach pomiędzy stykającymi się warstwami krzepnących lub krystalizujących materiałów. Badania skaningowe wykazały ponadto obecność nieprzetopionych, bądź zaledwie

powierzchniowo nadtopionych cząstek zachowujących częściowo swój pierwotny kształt i charakter, licznych mikropęknięć i rozwarstwień przebiegających zarówno w płaszczyznach równoległych, jak i prostopadłych do powierzchni powłoki oraz innych efektów powierzchniowych będących wynikiem intensywnego rozpryskiwania się stopionych cząstek.

Wyniki przetapiania [A3] wskazują na możliwość uzyskania pozbawionej porów i pęcherzy warstwy tlenkowej przetopionej od 10% do 100% grubości wcześniej naniesionej powłoki (w zależności od zastosowanych parametrów przetapiania). Jednak z uwagi na izolacyjność naniesionej plazmowo warstwy jej równoczesne stopienie i trwałe połączenie z materiałem podłoża często skutkowało uzyskaniem warstwy wierzchniej o niskiej jakości powierzchni, podobnie jak to ma miejsce w przypadku zastosowania przetapiania z udziałem lasera lub wiązki elektronów. Kolejne badania natryskiwanych powłok tlenkowych ZrO_2 [A9] z zakresu mikroskopii świetlnej i skaningowej mikroskopii elektronowej oraz badania składu chemicznego powłok tlenkowych, obejmowały analizę punktową oraz rozkłady liniowe promieniowania charakterystycznego pierwiastków potwierdziły wysoką jakość powłok uzyskanych na drodze przetapiania z zastosowaniem nowatorskiego rozwiązania [A5].



Rys.2. Powłoka tlenkowa $ZrO_2+24\%MgO$ przetopiona za pomocą niezależnego łuku swobodnego, mikroskopia świetlna [A3]

Badania EDX powłok natryskiwanych [A9] wykazały znaczną niejednorodność wyrażającą się skokową zmianą koncentracji poszczególnych pierwiastków wchodzących w ich skład. Biorąc pod uwagę specyfikę natryskiwania plazmowego oraz mechanizm „narastania” warstwy, stan powyższy jest w pełni wytłumaczalny. Z metodą tą wiąże się bowiem ryzyko wystąpienia powierzchniowego zaledwie nadtopienia nakładanego proszku, utrudniającego uzyskanie materiału jednorodnego pod względem chemicznym. Można temu co prawda zapobiec poprzez wydłużenie czasu przebywania proszku w łuku plazmowym lub zmniejszenie średnicy natryskiwanych cząstek, ale wiąże się to z kolei z ryzykiem wypalenia stabilizatora CaO (w przypadku powłok opartych na ZrO_2), bądź też wystąpienia przemian fazowych w stopniu nie zawsze korzystnym z punktu widzenia własności powłoki. Rezultaty badań EDX wskazują, że użyta w przypadku badanych warstw mieszanina tlenków nie została stopiona w łuku plazmowym na tyle, by mogło to zapobiec makroskopowej niejednorodności warstwy. Dowodem może być nie tylko wyraźnie zarysowana (na rozkładach liniowych) granica rozdzielająca miejsca występowania poszczególnych składowych powłoki, ale także sam kształt napylonych cząstek

zachowujących niejednokrotnie swoją pierwotną, sferyczną postać. Logiczne wytłumaczenie znajduje w takim przypadku także obecność na rozkładach liniowych wyraźnych „wysp” wykazujących podwyższoną koncentrację poszczególnych pierwiastków.

Po procesie modyfikacji przetopieniowej z zastosowaniem „niezależnego łuku swobodnego” większość porów w wyniku koalescencji uległa przemieszczeniu ku powierzchni powłoki, znajdując tam naturalne „ujścia”. Efektem tego procesu były kratery o charakterystycznej, sferoidalnej budowie. Badania skaningowe ujawniły ponadto obecność struktur mikrodendrytycznych i komórkowo-dendrytycznych w przetopionych powłokach. W przetopionych warstwach nie stwierdzono występowania mikropełnięć rozwarstwiających powłokę, licznie reprezentowanych w materiale natryskiwanym [A9].

Analiza wyników uzyskanych z badań punktowych EDX powłok natryskiwanych i przetapianych wykazała niewielkie zmniejszenie zawartości wapnia i tlenu, co może wskazywać na częściowe wypalenie stabilizatora w trakcie obróbki przetopieniowej. Zmiany ilościowe są jednakże nieznaczne, co jest o tyle istotne, że wszelkie zmiany składu chemicznego, a zwłaszcza zmniejszenie się zawartości pierwiastków wchodzących w skład stabilizatora, są niewskazane ze względu na możliwość wystąpienia niepożądanych przemian fazowych, do zapobieżenia którym wykorzystywane są właśnie stabilizatory takie jak CaO [A9]. Wyraźnie odmienny charakter rozkładów liniowych (w stosunku do materiału natryskiwanego) stwierdzono w warstwach poddanych obróbce przetopieniowej. Badania ich składu chemicznego wykazały większą równomierność rozkładu poszczególnych pierwiastków. Nieobecna była tak charakterystyczna dla warstw natryskiwanych, skokowa zmiana koncentracji pierwiastków.

Główne założenia prowadzonych badań zostały osiągnięte, gdyż przetopione powłoki tlenkowe pozbawione były porów oraz pęknięć powierzchniowych mogących prowadzić do delaminacji powłoki. Stwierdzenie, że obróbka przetopieniowa z zastosowaniem „niezależnego łuku swobodnego” oraz wywołana przez nią szybka krystalizacja stopionego materiału prowadzi do zmniejszenia niejednorodności składu chemicznego w obrębie warstwy jest słuszne. Dodatkowym aspektem w sensie praktycznym jest ekonomika wykorzystania zaproponowanego rozwiązania, gdyż umożliwia przeprowadzenie procesu modyfikacji z zastosowaniem konwencjonalnych źródeł spawalniczych, bez konieczności angażowania dodatkowych środków finansowych związanych z zakupem specjalistycznych urządzeń i systemów sterowania.

II. Modyfikacja przetopieniowa powierzchni stopów metali wykazujących silne powinowactwo do tlenu

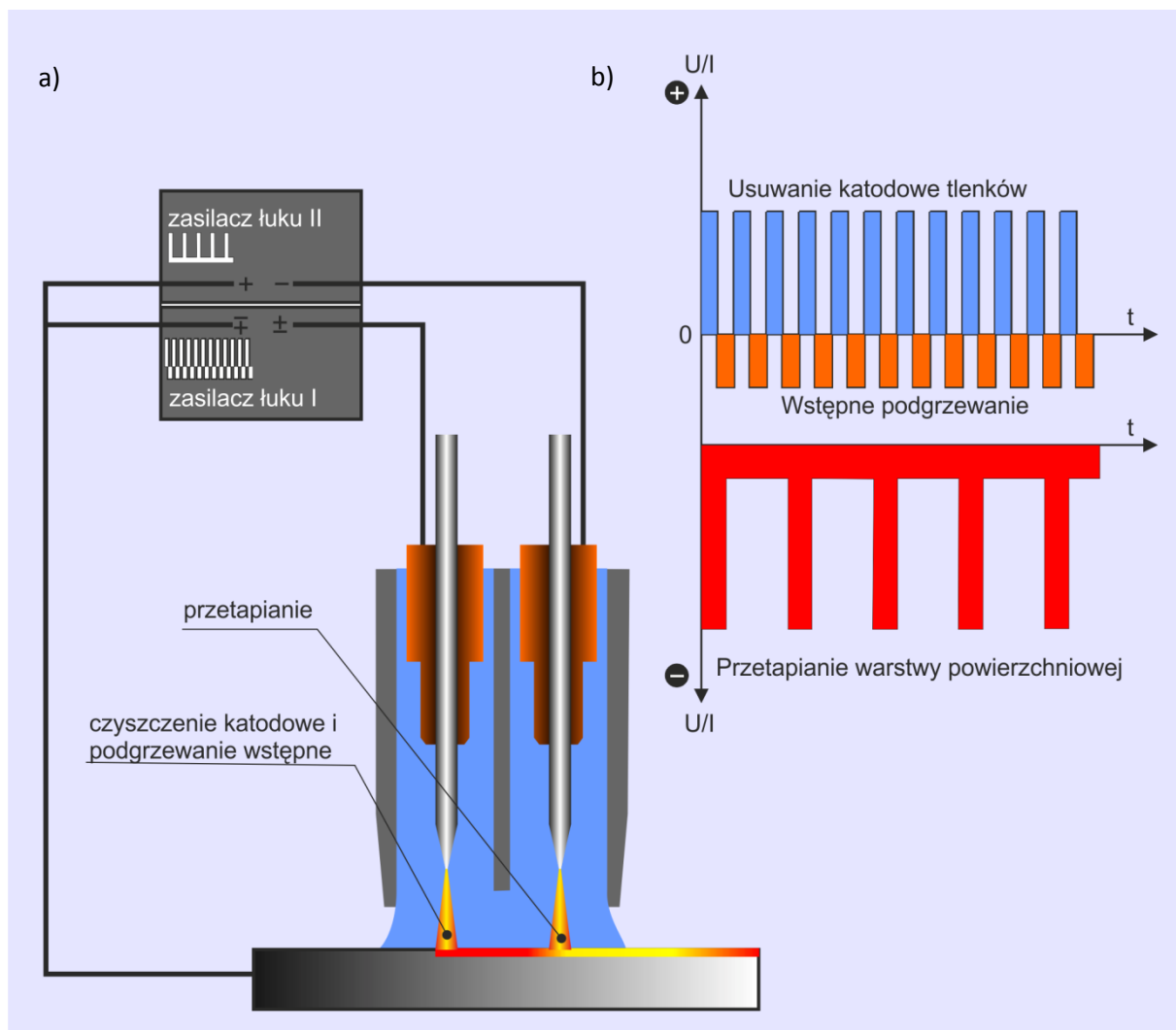
Stopy metali lekkich takie jak stopy aluminium czy stopy magnezu znajdują obecnie szerokie zastosowanie jako wszechstronny materiał konstrukcyjny, co wynika głównie z ich niskiego ciężaru, odporności na korozję atmosferyczną oraz łatwości kształtowania. Niestety właściwości warstwy wierzchniej tych stopów są barierą, która istotnie ogranicza ich stosowanie w warunkach zwiększonych obciążeń eksploatacyjnych, wpływających na szybkie zużycie powierzchni. Z tego powodu jednym z głównych wyzwań jest wytworzenie zwartej, nielaminarnej warstwy wierzchniej jednorodnej chemicznie i fazowo, posiadającej jednocześnie wysoką twardość i odporność na ścieranie.

Dwułukowe przetapianie powłok tlenkowych w układzie tandem

W pracach [A2, A4, A13] badaniom poddano komercyjne stopy magnezu AZ91 i AM60. Wstępne próby przetapiania stopów magnezu za pomocą konwencjonalnej metody TIG ujawniły szereg trudności uniemożliwiających uzyskania zamierzonego rezultatu. Przyczyna tych trudności wynikała z własności fizykochemicznych magnezu i jego stopów, a zwłaszcza silnego powinowactwa do tlenu, którego konsekwencją jest obecność na powierzchni materiału zwartej warstwy tlenkowej stanowiącej barierę dla przepływu prądu elektrycznego, wywołującej uginanie się łuku oraz zakłócającej proces przetapiania. Wysoka temperatura topnienia tlenków aluminium i magnezu ($2050^{\circ}\text{C}-\text{Al}_2\text{O}_3/2800^{\circ}\text{C}-\text{MgO}$); przekracza kilkakrotnie zakres ich temperatury topnienia. Czyni praktycznie niemożliwym jednoczesne pokonanie bariery termicznej w postaci tlenków i przetopienie stopu metalu bez wywołania negatywnych zmian geometrycznych powierzchni modyfikowanej skutkujących jej znaczną falistością. Tego typu efekty występowały mimo zastosowania zalecanych metod przetapiania prądem przemiennym bądź jednokierunkowym z biegunowością dodatnią. Znaczna zmienność grubości warstwy tlenkowej powodowała niemożność dobrania właściwych parametrów przetapiania, których efektem było albo wygaszanie łuku, albo wprowadzanie zbyt dużej ilości ciepła do materiału obrabianego powodując nadmierne topienie powierzchni modyfikowanej. Skutkiem była jej niska jakość. Zastosowanie prądu jednokierunkowego z biegunowością dodatnią związane było natomiast z małą efektywnością przetapiania i ograniczoną wytrzymałością termoemisyjną elektrody wolframowej powodując jej silne nagrzewania i topienie, co wstrzymywało proces dalszej modyfikacji powierzchni [A2].

Wymienione trudności wymusiły konieczność zastosowania niekonwencjonalnych rozwiązań, obejmujących opracowanie nowatorskiego rozwiązania [A6] oraz oryginalnego sposobu modyfikowania warstwy wierzchniej stopów metali wykazujących silne powinowactwo do tlenu [A14]. Opatentowane rozwiązania umożliwiają połączenie zabiegu oczyszczania powierzchni z tlenków oraz docelowe jej przetopienie. Istotę wynalazku stanowi zespół dwóch palników łukowych pracujących w układzie tandem (rys.3), z których pierwszy zasilany prądem dwukierunkowym usuwa warstwę tlenków na drodze czyszczenia katodowego i wstępnie podgrzewa materiał podstawowy w strefie przetapiania, natomiast drugi palnik połączony z zasilaczem pulsującego prądu jednokierunkowego przetapia na założoną głębokość warstwę wierzchnią. Rozwiązanie takie umożliwia modyfikację powierzchni metali z powłokami tlenkowymi bez konieczności uprzedniego oczyszczenia mechanicznego bądź chemicznego powierzchni materiału.

Wielkość i charakter zmian generowanych na powierzchni badanych stopów oceniano i weryfikowano na podstawie obserwacji makroskopowych i badań mikrostrukturalnych. Strukturę stopów z układu Mg-Al w stanie wyjściowym charakteryzuje obecność roztworu stałego α o ograniczonej rozpuszczalności aluminium w magnezie oraz eutektyki $\alpha+\gamma$, gdzie γ jest związkiem międzymetalicznym $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$. Charakter obserwowanych zmian strukturalnych po procesie przetapiania dowodzi, że w miejscu oddziaływania źródła ciepła materiał uległ przetopieniu z zachowaniem wysokiej jakości powierzchni, której nie można uzyskać z zastosowaniem przetapiania jedynie prądem dwukierunkowym. W wyniku tej obróbki w materiale wystąpiło zjawisko szybkiej krystalizacji, którego efektem było rozdrobnienie struktury i homogenizacja materiału [A2]. Największą zaletą przetapiania dwułukowego jest wysoka skuteczność usuwania warstwy tlenkowej i eliminowania w ten sposób ewentualnego wpływu zmiennej grubości tej warstwy na efekty prowadzonej obróbki termicznej.



Rys.3. Schemat stanowiska do modyfikowania warstwy wierzchniej materiałów wykazującymi silne powinowactwo do tlenu w układzie tandemowego dwułukowego przetapiania (Pat. PL 218340 B1)

Celem zweryfikowania skutków zastosowanego nowatorskiego rozwiązania porównałem wdrażaną technologię z najczęściej stosowaną metodą przetapiania laserowego. Efekty powierzchniowej obróbki realizowanej przy użyciu lasera dyskowego Trumpf truDisk 12002 oraz przedmiotowego rozwiązania przedstawiono w [A4]. Charakter zmian obserwowanych w strukturze warstw wierzchnich stopów przetopionych za pomocą promieniowania laserowego i podwójnego wyładowania łukowego przedstawiał się w analogiczny sposób. W obu przypadkach zaobserwowano wystąpienie trzech stref: warstwy przetopionej, granicy przetopienia oraz strefy nieprzetopionej. Analiza porównawcza efektów strukturalnych w połączeniu z pomiarami wymiarów stref przetopienia pozwoliła stwierdzić pewne zależności wynikające z zastosowanej metodyki przetapiania warstwy wierzchniej badanych materiałów. W przypadku obróbki laserowej wykazano, że w zakresie przyjętych parametrów następował wyraźny wzrost głębokości przetopienia w stosunku do wartości uzyskiwanych przy użyciu łukowych źródeł ciepła. Z kolei zastosowanie przetapiania łukowego prowadziło do uzyskania odwrotnego efektu, a mianowicie do zwiększenia szerokości pasma przetopionego i zmniejszenia głębokości przetopienia oraz mniej zarysowanej granicy przetop–podłoże niż w przypadku próbek poddanych modyfikacji

laserowej [A4]. Odnotowane w trakcie badań mikroskopowych zmiany w budowie i strukturze warstw przetapianych potwierdziły korzystne metamorfozy w ich właściwościach mechanicznych. Oczekiwania te znalazły swoje potwierdzenie w badaniach mikrotwardości. Jednakże różnice strukturalne w powierzchniach przetopionych łukowo oraz laserem uwidoczniły się w zarejestrowanych wartościach twardości materiałów. Otóż w przypadku próbek przetopionych laserem twardość zawierała się w przedziale 77-85 HV_{0,05} dla stopu AM60 oraz 90-120 HV_{0,05} dla stopu AZ91. Po przetopieniu zmodyfikowaną metodą TIG osiągnano natomiast twardości 68-75 HV_{0,05} dla stopu AM60 oraz 77-90 HV_{0,05} dla stopu AZ91. Dla porównania średnia twardość materiału wyjściowego wynosiła 53 HV_{0,05} dla stopu AM60 oraz 65 HV_{0,05} dla stopu AZ91 [A4].

Analiza porównawcza obu zastosowanych technik modyfikacji powierzchni (laserowej i dwułukowej) jest trudna, gdyż mamy do czynienia z różnymi źródłami ciepła o odmiennych charakterystykach przestrzennych i parametrycznych. Możliwe jest natomiast porównanie obu technik z punktu widzenia efektów strukturalnych uzyskiwanych w wyniku przetopienia powierzchni. Przyjmując takie założenie i ograniczając analizę wyłącznie do przypadków, w których nie stwierdzono dyskwalifikujących zmian w geometrii powierzchni można stwierdzić, że charakter zmian strukturalnych jest bardzo podobny, występuje bowiem znaczące rozdrobnienie struktury i homogenizacja materiału, a główną różnicą jest wyraźnie zaznaczona granica przetopienia wynikająca z wyższego gradientu temperatury promieniowania laserowego i gęstości używanych mocy. **Zatem zastosowanie metody „dwułukowego przetapiania” wypełnia obszar badań powierzchni nieobjęty dotychczasowymi dokonaniem i stanowi ekonomiczną alternatywą dla technik laserowej modyfikacji warstw wierzchnich stopów metali lekkich.**

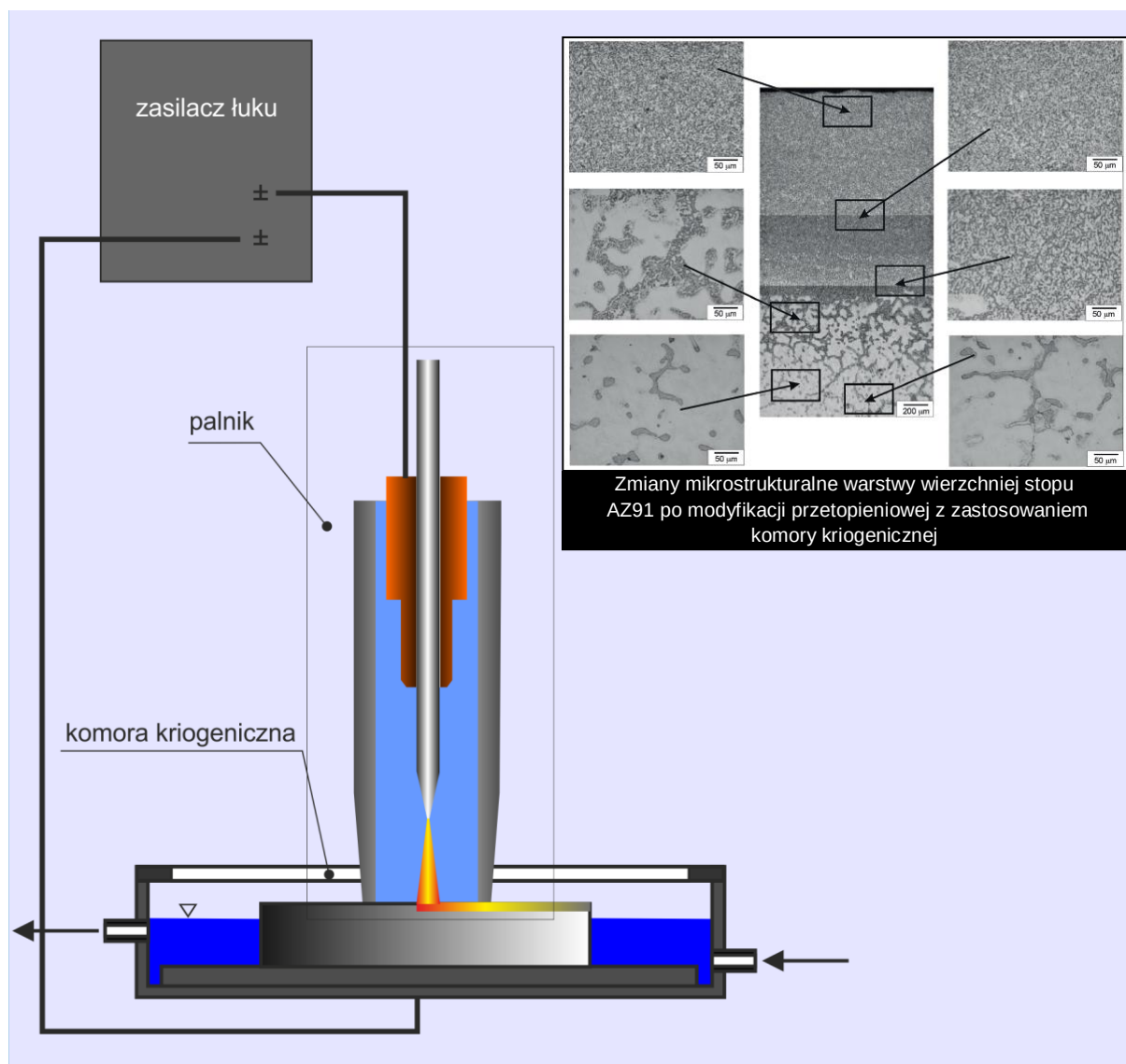
Przetapianie powłok tlenkowych w komorze kriogenicznej

Obszarem dalszych, możliwości zastosowań wdrażanych koncepcji aparaturowo-technologicznych jest rozwiązanie problemu związanego z nadmierną ilością ciepła wprowadzanego podczas procesu przetapiania warstw wierzchnich stopów metali wykazujących silne powinowactwo do tlenu, którego wyniki opisano w pracy [A13].

Zwiększenie intensywności odprowadzenia ciepła ze strefy przetopienia daje możliwość uzyskania większego rozdrobnienia struktury, a w rezultacie poprawę właściwości mechanicznych warstw przetopionych w porównaniu do ich nieprzetopionych odpowiedników bądź przetopionych bez zastosowania czynnika chłodzącego. W tym celu wykonano modyfikację warstwy wierzchniej stopu magnezu AZ91, w warunkach przyspieszonego chłodzenia z użyciem opatentowanego autorskiego rozwiązania [A12], w którym proces przetapiania przeprowadza się w kriogenicznej komorze (rys.4). Zastosowanie intensywnego chłodzenia pozwalało na zastosowania wyższych wartości skutecznych prądu dwukierunkowego niepowodujących dyskwalifikujących zmian w geometrii powierzchni – jak to ma miejsce podczas przetapiania warstw wierzchnich w warunkach z niewymuszonym chłodzeniem.

Badania makroskopowe przetopionych warstw [A13] pozwoliły dostrzec istotne różnice w geometrii poszczególnych pasm w zależności od zastosowanych parametrów obróbki. W warstwach przetopionych stwierdzono obecność wyraźnie ukształtowanej, zmienionej termicznie strefy i występującej pod nią strefy częściowego przetopienia, która jest specyficzna dla stopów magnezu, ze względu na niską temperaturę topnienia eutektyki (710 K) i wydzieleń fazy γ (ok. 723 K). W trakcie procesu przetapiania temperatura w materiale przylegającym bezpośrednio do obrabianego obszaru przetapianego przekracza temperaturę przemiany eutektycznej i temperaturę

topnienia wydzielań międzydendrytycznych, sprzyjając tym samym tworzeniu się strefy częściowego przetopienia.



Rys.4. Schemat stanowiska do modyfikacji warstwy wierzchniej z wymuszonym chłodzeniem w komorze kriogenicznej (Pat. PL 226579 B1)

Zastosowanie opatentowanego rozwiązania z wymuszonym chłodzeniem materiału, zaowocowało silnym rozdrobnieniem struktury i równomiernym rozmieszczeniem poszczególnych faz (rys.4). Wynikało to z faktu, że ilość ciepła pobrana przez materiał w trakcie procesu przetapiania oraz szybkość chłodzenia warstwy przetapianej decydują o rozkładzie temperatury w materiale, który z kolei determinuje grubość strefy częściowego przetopienia.

III. Modyfikacja tarciowa powierzchni stopów metali wykazujących silne powinowactwo do tlenu.

Wdrożenie metod spajania termicznego do modyfikacji warstwy wierzchniej metali z zastosowaniem wysokoenergetycznych źródeł ciepła wiąże się ze stosunkowo małą szerokością modyfikowanej warstwy wierzchniej oraz występowaniem w trakcie modyfikacji niekorzystnej fazy ciekłej. Dlatego podjąłem próbę implementacji nowych autorskich i opatentowanych rozwiązań [A16, A17] w wytwarzaniu warstw wierzchnich stopów metali wykazujących silne powinowactwo do tlenu za pomocą procesów, w których zmiany struktur i morfologii faz zachodzą w stanie stałym.

Na początkowym etapie badań [A10] przeprowadziłem wstępną ocenę zmian strukturalnych i wybranych właściwości stopu magnezu AM60 wywołanych modyfikacją tarciową. Obserwacje mikroskopowe próbek po modyfikacji tarciowej ujawniły znaczące zmiany w strukturze analizowanego materiału. W strukturze stopu magnezu stwierdzono obecność wyraźnej strefy wymieszania SZ (Stirred Zone), strefy termomechanicznie odkształconej TMAZ (Thermomechanically Affected Zone) z charakterystyczną dla niej strukturą odkształconych ziaren oraz słabo zaznaczonej strefy wpływu ciepła HAZ (Heat Affected Zone) graniczącej z materiałem rodzimym BM (Base Material). Na podstawie analizy rentgenowskiej stwierdziłem, że w wyniku kształtowania materiału w warunkach oddziaływania podwyższonej temperatury oraz sił wynikających z nacisku narzędzia, generowane są zmiany strukturalne odzwierciedlające warunki w jakich materiał był kształtowany i które w konsekwencji mogą prowadzić do wystąpienia uprzywilejowanej orientacji materiału. Przeprowadzone badania trybologiczne [A10] ujawniły, że materiał poddany modyfikacji tarciowej charakteryzuje się niższym współczynnikiem tarcia oraz wykazuje niższy liniowy ubytek materiału w teście trybologicznym. Konsekwencją wymienionych zmian strukturalnych materiału poddanego procesowi FSP jest wzrost twardości oraz odporności na zużycie cierne i ściernie w materiałach wykazujących silne powinowactwo do tlenu.

Główną barierą w wytwarzaniu kompozytów z udziałem tlenkowych powłok ceramicznych jest ich ograniczona trwałość związana głównie z niską odpornością na kruche pękanie w warunkach znacznych obciążeń mechanicznych i termicznych, co wykazałem w [A1, A3, A9]. Następny etap badań dotyczył zatem wytwarzania warstw wierzchnich o bardziej złożonej budowie. Postępu dokonano poprzez wprowadzanie cząstek ceramicznych do strefy modyfikowanej. Celem badań było uzyskanie nowych cech materiału kompozytowego, dzięki wykorzystaniu szerokiej gamy materiałów wzmacniających, których zastosowanie w technologiach prowadzonych w obecności fazy ciekłej mogłoby być niemożliwe np. ze względu na niekorzystne interakcje między komponentami (np. tworzenie się faz międzymetalicznych).

Badaniami objęto stopy magnezu AZ91, AM60 oraz stopy aluminium Al7075 i AlMg10, modyfikowane z udziałem cząstek ceramicznych Cr_2O_3 [A7] oraz SiC [A8, A11, A15]. Zarówno tlenek chromu jak i węgiel krzemu to materiały posiadające szereg unikalnych właściwości. W technologiach z zakresu inżynierii powierzchni wykorzystywane są gdy występuje ryzyko zużycia cierne i ściernego oraz erozyjnego materiału a także intensywnego oddziaływania czynników korozyjnych. Założyłem zatem, że wprowadzenie cząstek ceramicznych do warstwy wierzchniej badanych stopów pozwoli wytworzyć materiały o nowym potencjale aplikacyjnym.

Najczęściej stosowanym rozwiązaniem w technologii FSP z udziałem faz wzmacniających jest metoda polegająca na wykonaniu rowka w powierzchni materiału modyfikowanego i

umieszczeniu w nim fazy wzmacniającej w postaci proszku. Podczas obróbki wprowadzony proszek ma jednak tendencję do przemieszczania się i opuszczania rowka wskutek dynamicznego oddziaływania trącego narzędzia roboczego z materiałem modyfikowanym, czego konsekwencją jest nierównomierny udział fazy wzmacniającej w warstwie wierzchniej materiału modyfikowanego w różnych jej miejscach. Aby zminimalizować ten efekt stosuje się obróbkę dwuetapową, z reguły z użyciem dwóch różnych narzędzi roboczych. W pierwszym etapie następuje zamknięcie kanału z fazą wzmacniającą za pomocą narzędzia pozbawionego trzpienia, a następnie przeprowadzany jest proces modyfikacji tarciowej realizowany z reguły za pomocą narzędzia wyposażonego w co najmniej jeden trzpień mieszający.

Aby uniknąć stosowania wymienionej obróbki dwuetapowej z zastosowaniem różnych narzędzi oraz zapobiec przemieszczaniu się fazy wzmacniającej w materiale modyfikowanym zastosowano autorskie rozwiązanie polegające na wykonaniu kanału o średnicy 2,5 mm wydrążonego wzdłuż osi głównej przesuwu narzędzia roboczego na głębokości 0,5 mm od powierzchni próbki, do którego wprowadzono cząstki ceramiczne Cr_2O_3 [A7]. Zakres badań obejmował ocenę makro- i mikroskopową zmian strukturalnych wywołanych przeprowadzoną obróbką oraz pomiary twardości modyfikowanego stopu magnezu AZ91.

W zakresie przyjętych parametrów obróbki tarciowej obserwowano uplastycznienie stopu magnezu, co stanowiło warunek konieczny realizacji obróbki metodą FSP. W wyniku modyfikacji tarciowej następowało intensywne przemieszczanie fazy wzmacniającej Cr_2O_3 oraz uplastycznionego stopu wzdłuż kierunków, wynikających z ruchu obrotowego oraz liniowego narzędzia roboczego [A7]. Badania mikrostrukturalne stopu ujawniły obecność w strukturze materiału roztworu stałego $\alpha\text{-Mg}$, eutektyki $\alpha+\gamma$ oraz wtórnych wydzieleni fazy γ .

Odnotowano znaczące zmiany struktury w stosunku do stanu sprzed obróbki tarciowej. Głównymi składowymi tych zmian była obecność w warstwie wierzchniej struktury kompozytowej równomiernie rozmieszczonych cząstek Cr_2O_3 w osnowie metalicznej oraz rozpuszczenie fazy międzymetalicznej γ w roztworze $\alpha\text{-Mg}$. Badania mikrostrukturalne wykazały, że w wyniku modyfikacji tarciowej ukształtowały się w warstwie wierzchniej charakterystyczne dla procesu modyfikacji tarciowej z przemieszczaniem strefy [A7].

Cechą charakterystyczną obszaru wymieszania SZ była obecność bardzo drobnych, równoosiowych ziaren o wymiarach 5-15 μm . Ich obecność wskazuje, że w wyniku obróbki nastąpiła dynamiczna rekrytalizacja materiału. Odmienne efekty strukturalne stwierdzono natomiast w strefie odkształcenia termomechanicznego TMAZ. W strefie tej dominowały ziarna o wydłużonym kształcie, rozmieszczone wzdłuż linii wyznaczających kierunek przemieszczania się uplastycznionego materiału. Brak równoosiowości ziaren w obszarze odkształcenia termomechanicznego dowodzi, że w strefie tej nie wystąpiły warunki, umożliwiające zajście dynamicznej rekrytalizacji materiału. Cząstki Cr_2O_3 obecne były w strefie SZ i w mniejszym stopniu w TMAZ, przy czym o ile w strefie SZ były wyraźnie od siebie odseparowane i równomiernie rozmieszczone w objętości osnowy stopu, to w przypadku strefy TMAZ cząstki były rozłokowane wzdłuż linii przemieszczania się uplastycznionego materiału, nadając tej strefie cechy pasmowości [A7].

Badania mikrostrukturalne nie wykazały występowania nieciągłości materiałowych na granicach faz ceramika-metal. Przeprowadzone badania wykazały, że udział objętościowy cząstek Cr_2O_3 w strefie modyfikowanej wynosi ok. 6%. W trakcie badań mikrostrukturalnych stwierdzono, że część cząstek Cr_2O_3 uległa rozdrobnieniu w wyniku intensywnego oddziaływania

narzędzia roboczego z modyfikowanym materiałem, ujawniono bowiem obecność cząstek o wymiarach zdecydowanie mniejszych od rejestrowanych w proszku wyjściowym i zawartych w specyfikacji materiałowej producenta, bo wynoszących nawet $\sim 5\text{-}10\text{ }\mu\text{m}$. Podać wartość wyjściowe lub rys!!!! W trakcie badań strukturalnych nie stwierdzono by w przypadku próbek poddanych obróbce FSP z zastosowaniem cząstek Cr_2O_3 występował wyższy stopień rozdrobnienia struktury niż w materiale poddanym analogicznej obróbce, ale bez dodatku cząstek ceramicznych. Zmiany strukturalne w osnowie metalowej wywołane modyfikacją tarciovą, a przede wszystkim obecność cząstek Cr_2O_3 przyczyniły się do wzrostu twardości materiału. Pomiar twardości wykonany metodą Brinella wykazał wzrost twardości o ok. 30% w stosunku do twardości materiału przed modyfikacją tarciovą. Najwyższą twardość odnotowano w przypadku warstw modyfikowanych z zastosowaniem najmniejszej prędkości obrotowej narzędzia roboczego, co tłumaczyć należy najmniejszym efektem cieplnym towarzyszącym obróbce i wynikającymi stąd konsekwencjami strukturalnymi w postaci najmniejszego ziarna w strefie modyfikowanej.

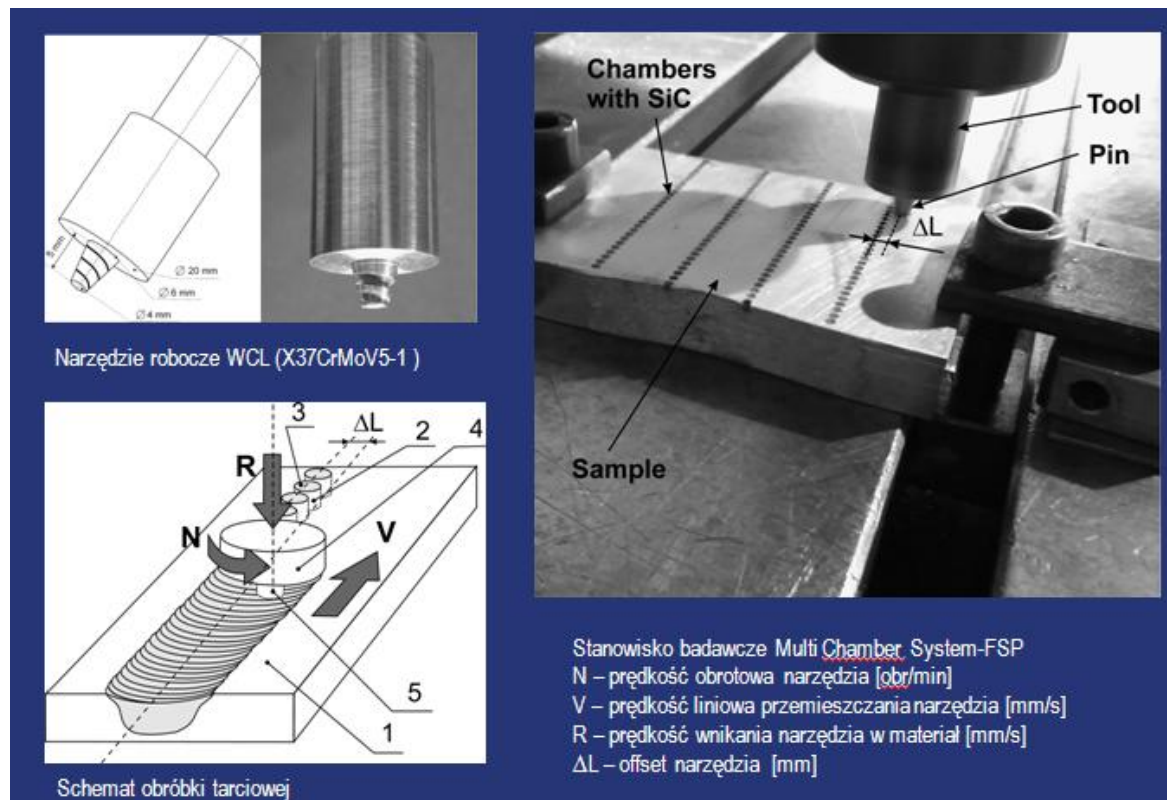
W trakcie badań stwierdzono lokalną obecność skupisk cząstek Cr_2O_3 w strefie odkształcenia termomechanicznego TMAZ. Sytuacja taka nie jest korzystna, gdyż w przypadku, gdy sąsiadujące ze sobą cząstki nie są oddzielone osnową kompozytu, występuje podwyższona skłonność do wykruszania się ich w trakcie eksploatacji materiału.

Mimo przewagi zastosowanej modyfikacji tarciovej FSP z wydrążonym pod powierzchnią kanałem nad powszechnie stosowaną technologią FSP z rowkiem również dochodzi do niewystarczającego wymieszania fazy wzmacniającej z metaliczną osnową. Aby uniknąć wymienionych negatywnych efektów modyfikacji tarciovej z udziałem faz wzmacniających opracowałem nowatorskie rozwiązanie oparte o wielokomorową modyfikację MChS-FSP (Multi Chamber System-Friction Stir Processing).

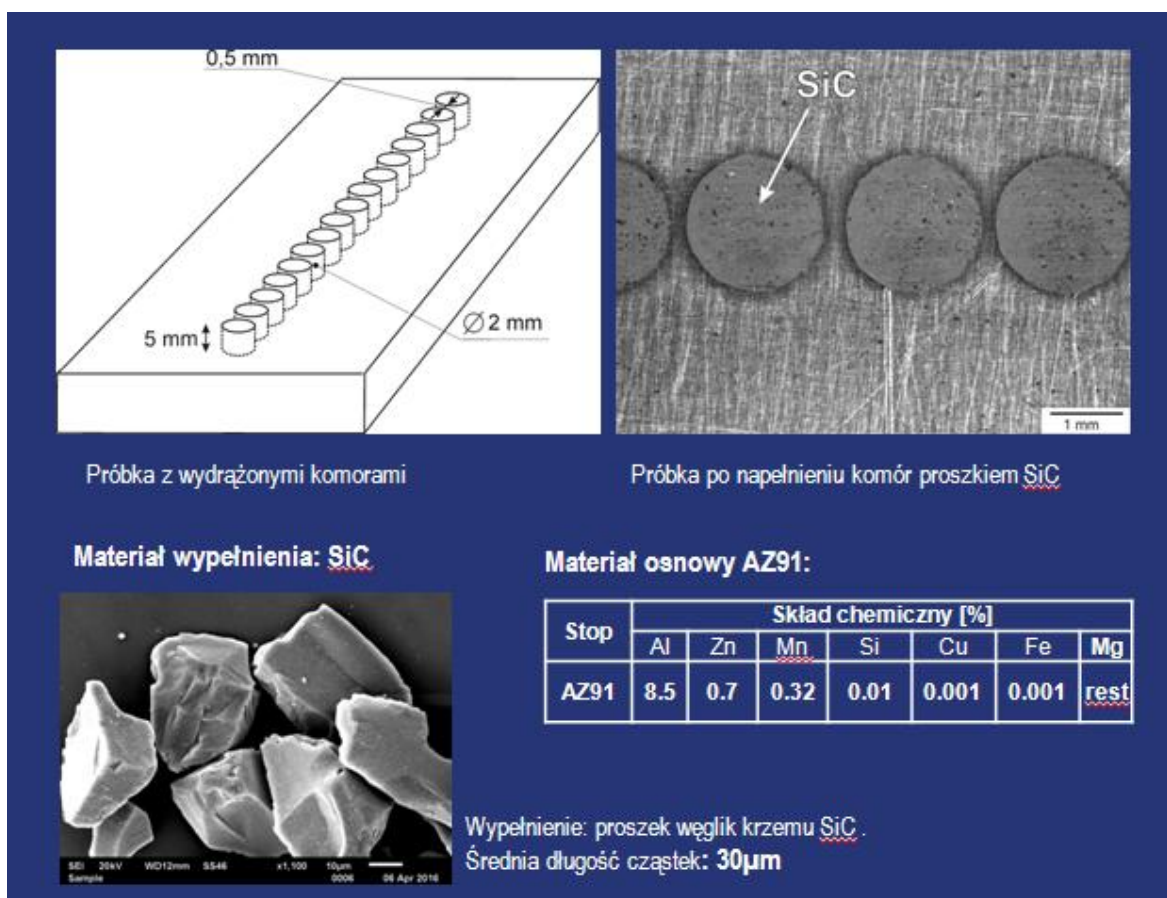
Modyfikacja wielokomorowa MChS-FSP

Niski stopień wymieszania fazy wzmacniającej z materiałem osnowy, brak możliwości sterowania kompozycją uzyskiwanych struktur związane z niekontrolowanym ilościowym udziałem fazy wzmacniającej w materiale osnowy stanowiły podstawę do opracowania nowego sposobu wytwarzania warstw kompozytowych w materiałach wykazujących silne powinowactwo do tlenu.

W celu swobodniejszego konstytuowania właściwości powierzchni opracowałem nowatorskie rozwiązanie, zadaniem którego było równomierne wymieszanie metalu osnowy z wprowadzanymi cząstkami fazy wzmacniającej w trakcie pojedynczej operacji technologicznej z zastosowaniem jednego narzędzia mieszającego. Rozwiązanie to uzyskało patent na wynalazek [A16]. Opiera się ono o autorską wielokomorową technologię MChS-FSP (rys.5). W materiale modyfikowanym wykonuje się szereg komór (odseparowanych od siebie przez materiał osnowy), które napełnia się fazą wzmacniającą (rys.6). Komory po napełnieniu pełnią rolę zasobników, dostarczających proszek do uplastycznionego w trakcie obróbki tarciovej materiału. W odróżnieniu od klasycznych rozwiązań, w metodzie MChS-FSP proszek uwalniany jest z komory do metalowej matrycy w sposób równomierny i cykliczny tj. komora za komorą, przez co ryzyko "ucieczki" proszku ze strefy modyfikowanej zostaje zminimalizowane i ograniczone w danym cyklu tylko do jednej komory. Jednocześnie poprzez odpowiednio dobrany stosunek rozmiaru komór i przegród oddzielających je od siebie możliwe jest sterowanie objętościowym udziałem fazy wzmacniającej w metalicznej osnowie, w zależności od założonego celu.



Rys.5. Schemat modyfikacji tarcowej MChS-FSP (Pat. PL 228010 B1)

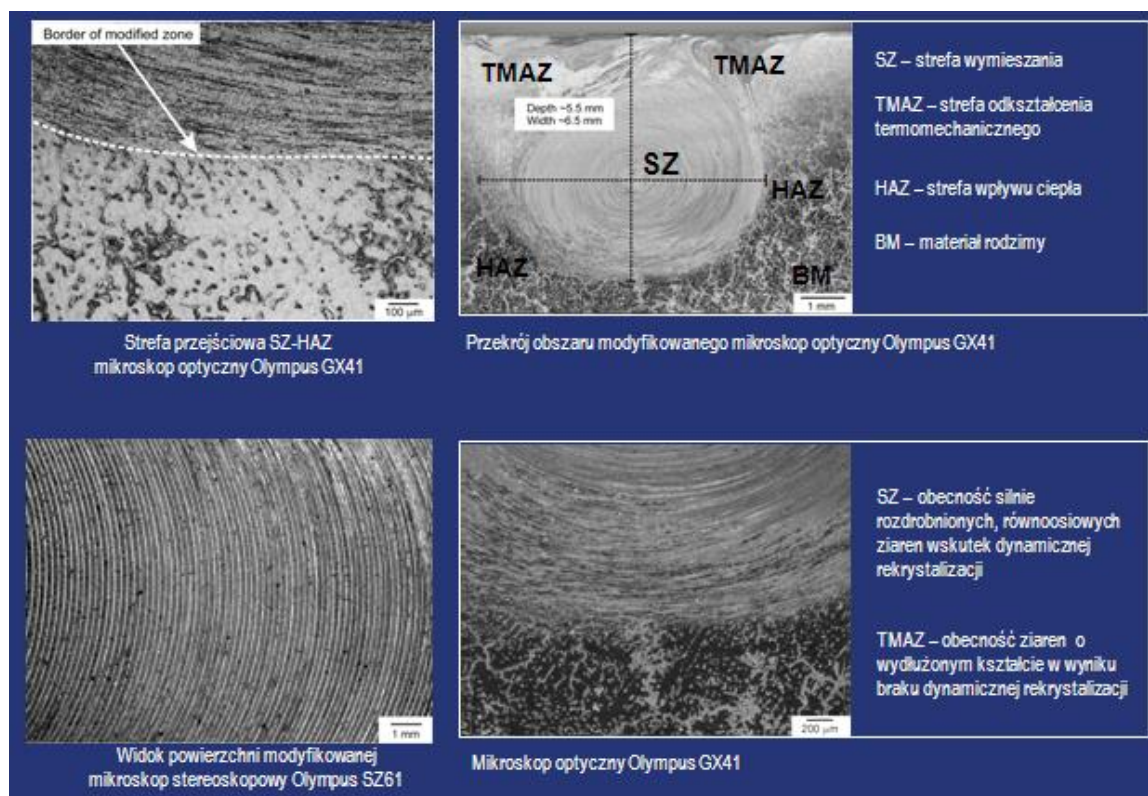


Rys. 6. Próbka po napełnieniu komór proszkiem SiC.

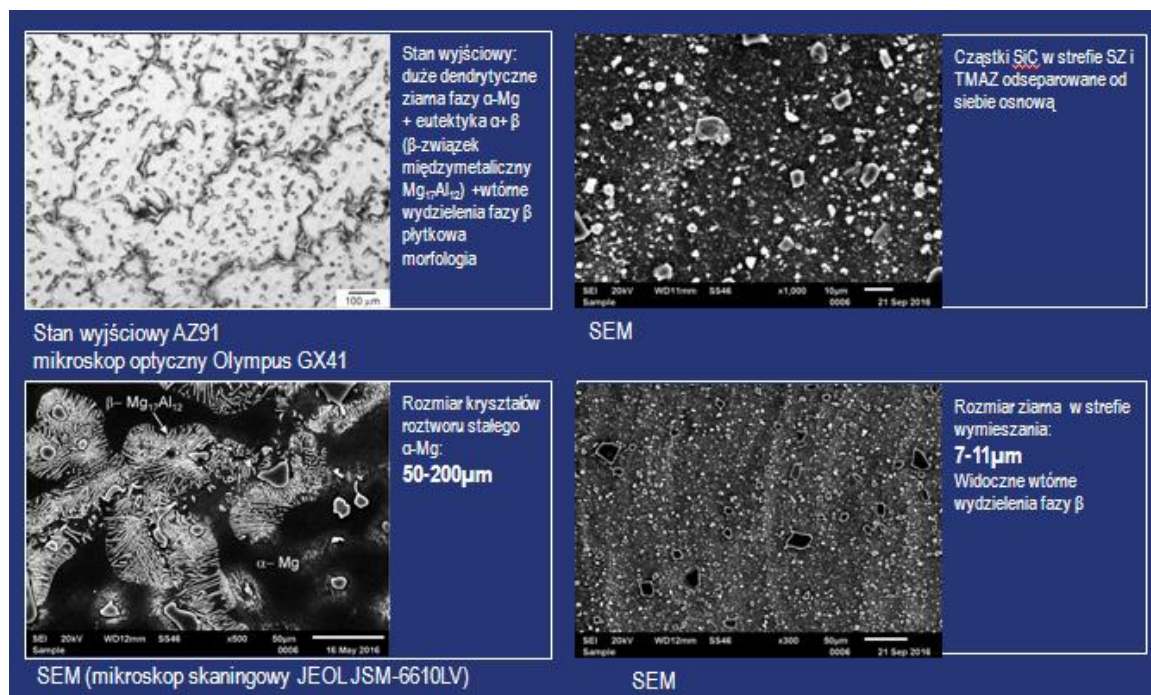
Rezultaty badań wynikające z zastosowania nowatorskiego rozwiązania przedstawiłem w pracach [A8, A11, A15]. Materiałami modyfikowanymi były stopy magnezu [A8] oraz stopy aluminium [A11, A15] natomiast fazę wzmacniającą stanowiły cząstki SiC. Ocenę efektów obróbki powierzchniowej wykonano za pomocą mikroskopii świetlnej i skaningowej mikroskopii elektronowej. Przeprowadzono również analizę EDS oraz porównawczy pomiar twardości.

Cechą charakterystyczną strefy wymieszania była (podobnie jak w przypadku konwencjonalnej obróbki FSP z fazami wzmacniającymi) obecność silnie rozdrobnionych ziaren, w większości równoosiowych oraz występowanie miejsc, charakteryzujących się całkowitym rozpuszczeniem fazy β w roztworze α -Mg. Wielkość ziarna α -Mg po modyfikacji tarciowej była wyraźnie mniejsza w stosunku do wielkości ziarna występującego w materiale przed obróbką. W warstwie wierzchniej nie stwierdzono nieciągłości materiałowych, których obecność mogłaby być spowodowana np. różnicami w rozszerzalności cieplnej osnowy i cząstek SiC, naprężeniami cieplnymi itp. **Zastosowanie technologii MChS-FSP skutkowało równomiernym rozproszeniem oraz wyraźnym odseparowaniem cząstek SiC od osnowy, nawet w miejscach występowania dużego ich zagęszczenia zarówno w strefie SZ jak i TMAZ.**

W pracy [A11] przedstawiłem przykładowe efekty makroskopowe obróbki tarciowej, obrazujące charakter zmian w geometrii struktury powierzchni stopu aluminium Al7075, podobnie jak w przypadku obróbki tarciowej stopów magnezu AZ91 (rys. 7). Charakterystyczną cechą geometrii struktury powierzchni modyfikowanej tarciowo była obecność wzajemnie równoległych rowków odwzorowujących kierunek i sposób przemieszczania się materiału uplastycznionego pod oporą narzędzia mieszającego.



Rys.7. Mikrostruktura stopu AZ91 po modyfikacji MChS-FSP (N=500 rpm).



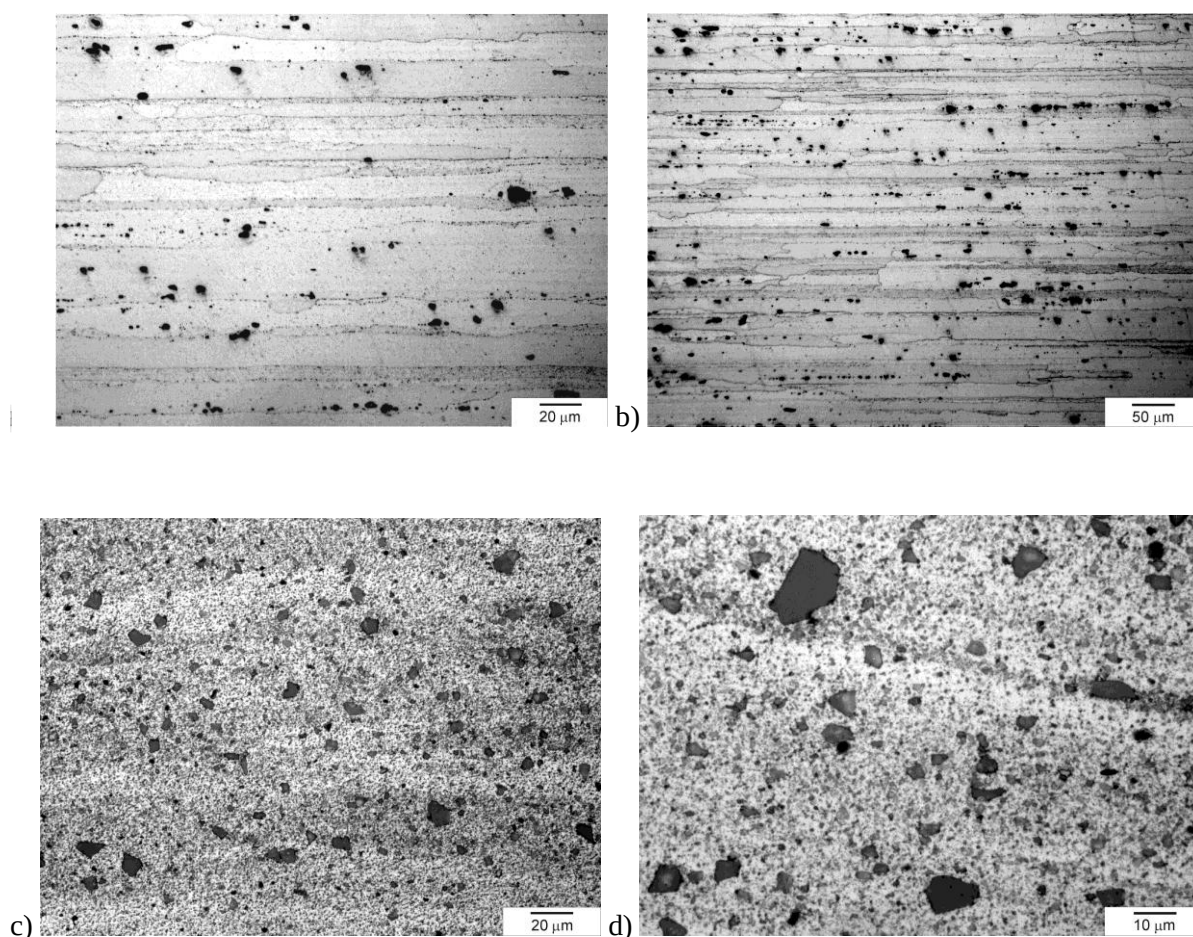
Rys.8. Stopień rozproszenia cząstek SiC oraz wielkość ziarna przed i po modyfikacji tarcowej MChS-FSP

Badania z zakresu mikroskopii optycznej ujawniły istotne zmiany w mikrostrukturze warstwy wierzchniej materiału modyfikowanego w stosunku do stanu sprzed obróbki. Zmiany te wynikały nie tylko z wprowadzenia do uplastycznionej osnowy cząstek ceramicznych SiC, ale także z zaniku innych cech obserwowanych w mikrostrukturze materiału wyjściowego. Przykładową mikrostrukturę stopu aluminium Al7075 w stanie wyjściowym przedstawiają rys.9a i 9b, natomiast po modyfikacji tarcowej rys.9c i 9d. Jak można zauważyć, stop aluminium posiadał w stanie wyjściowym typową mikrostrukturę po walcowaniu z wyraźnie wydłużonymi ziarnami i licznymi wydzieleniami faz międzymetalicznych usytuowanymi równolegle do kierunku walcowania i nadającymi materiałowi cechy pasmowości. Pasmowość wydzieleni faz międzymetalicznych na tle ziaren widoczna jest zwłaszcza na rys.9a. Jak można również zauważyć umiejscowienie faz międzymetalicznych nie wynikało z lokalizacji granic ziaren [A11].

W wyniku modyfikacji tarcowej efekt pasmowości i struktura walcownicza obecne w materiale w stanie dostawy zostały całkowicie usunięte.

Podobnie jak w przypadku stopów magnezu [A7, A8] również w modyfikowanych stopach aluminium w strefie odkształcenia termomechanicznego dominowały ziarna o wydłużonym kształcie, w przeciwieństwie do strefy wymieszania, w której dominowały bardzo drobne i w zdecydowanej większości ziarna równoosiowe. Nie stwierdzono obecności miejsc charakteryzujących się nadprzeciętnym udziałem cząstek SiC, co świadczyłoby o niewystarczającym wymieszaniu poszczególnych komponentów kompozytu, ponadto tylko w nielicznych miejscach stwierdzono niekorzystny efekt stykania się sąsiadujących ze sobą cząstek SiC. W trakcie badań mikrostrukturalnych stwierdzono, że średni udział cząstek SiC w strefie TMAZ jest blisko dwukrotnie niższy niż w strefie wymieszania, a lokalizacja cząstek SiC w strefie TMAZ odzwierciedla kierunek przemieszczania się uplastycznionego materiału w trakcie

obróbki. Średni udział fazy wzmacniającej wynosił: w przypadku SZ $\sim 8,5$ %, a w przypadku TMAZ 4,6 %, natomiast średnia wielkość ziarna w strefie wymieszania wynosiła ~ 4 μm . Wielkość ziarna jest oczywiście konsekwencją ilości ciepła wprowadzonego, powstającego w wyniku tarcia narzędzia mieszającego. Im większy jest ten efekt tym szybsze jest uplastycznienie materiału, ale konsekwencją jest mniejszy stopień rozdrobnienia mikrostruktury materiału. Analiza EDS wydzieleni obecnych w stopie aluminium wykazała występowanie kilku rodzajów faz międzymetalicznych, tj. bogatych w aluminium, żelazo, miedź i cynk, wydzieleni bogatych w aluminium, krzem, cynk i miedź, oraz wydzieleni bogatych w aluminium, miedź i cynk. Warto nadmienić, że skład tych wydzieleni nie uległ zmianom po modyfikacji tarciowej, natomiast inne były sposób i miejsce ich rozmieszczenia. O ile bowiem usytuowanie wydzieleni w materiale wyjściowym było typowe dla materiałów walcowanych, to ich usytuowanie w materiale poddanym obróbce MChS-FSP było bardziej równomierne – bez wyraźnego ukierunkowania i efektu pasmowości [A11].



Rys. 9. Mikrostruktura stopu aluminium Al 7075 w stanie wyjściowym (a, b) oraz po modyfikacji tarciowej MChS-FSP (c, d), zgląd metalograficzny, trawiony [A11].

Zmiany w mikrostrukturze warstwy wierzchniej wywołane modyfikacją tarciową i wprowadzeniem materiału dodatkowego do osnowy aluminiowej pozwalały oczekiwać wystąpienia znaczących zmian we własnościach materiału. Pomiary twardości przedstawione w

pracach [A11, A15] te oczekiwania potwierdziły. Średnia twardość materiału wyjściowego wynosiła 84 HV_{0.1}, natomiast średnia twardość materiału modyfikowanego mierzona w strefie wymieszania wynosiła 136 HV_{0.1}, a zatem była wyższa o 65% [A11]. Większą twardość uzyskano wraz ze zmniejszeniem prędkości obrotowej narzędzia [A15]. Zanotowano około 100% przyrost twardości (169 HV_{0.1}, N=250 obr./min), który wynikał z większego stopnia rozdrobnienia mikrostruktury materiału spowodowanego mniejszą ilością ciepła wprowadzonego zależnego od prędkości obrotowej narzędzia.

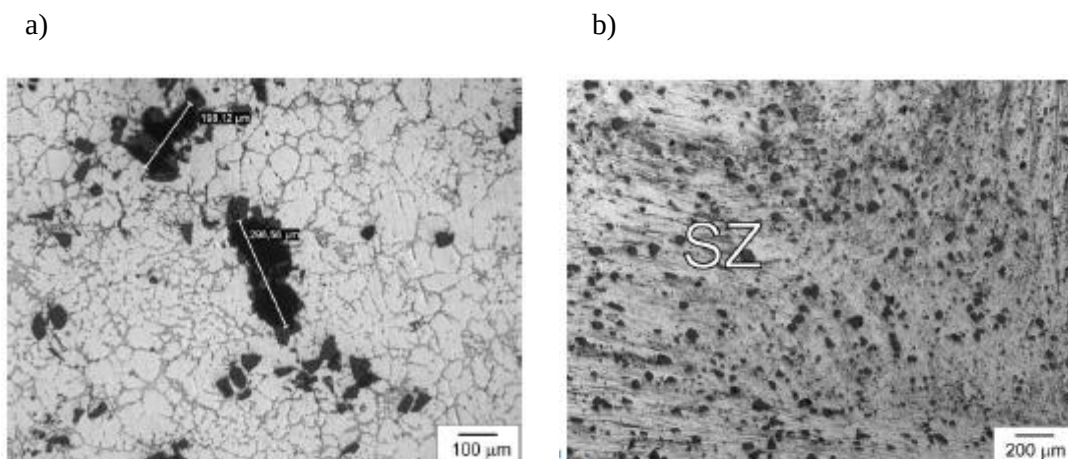
Przeprowadzone badania wykazały silne rozdrobnienie mikrostruktury badanych stopów oraz intensywne rozproszenie cząstek SiC w warstwie wierzchniej materiału, skutkujące powstaniem mikrostruktury kompozytowej o polepszonych właściwościach względem materiału wyjściowego.

Istotnym problemem modyfikacji tarcowej z użyciem twardych faz wzmacniających jest zwiększone zużycie narzędzia a szczególnie jego trzpienia. Dlatego aby zwiększyć żywotność narzędzia oraz uniknąć występowania niepożądanych wtrąceń w kompozycie dokonałem modyfikacji metody MChS-FSP. Zastosowano przesunięcie strefy pracy narzędzia w stosunku do osi komór wypełnionych fazą wzmacniającą. Dzięki ograniczeniu bezpośredniego kontaktu trzpienia mieszającego z twardą fazą wzmacniającą przez uplastyczniony metal zmniejszyło się zużycie trzpienia oraz uzyskano bardziej równomierne rozmieszczenie cząstek w osnowie stopu. Przeprowadzone badania [A15] potwierdziły, że najbardziej optymalnym rozwiązaniem łączącym zmniejszenie zużycia narzędzia i znaczne rozproszenie cząstek ceramicznych w osnowie metalu jest zastosowaniem offsetu narzędzia.

Modyfikacja tarcowa kompozytów odlewanych

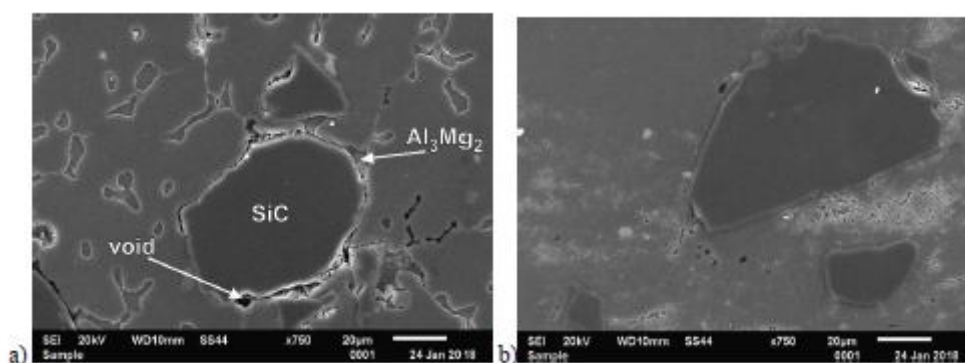
Aby porównać skuteczność autorskiego rozwiązania MChS-FSP w wytwarzaniu kompozytowych warstw wierzchnich metali z powłokami tlenkowymi przeprowadziłem modyfikację tarcową materiałów kompozytowych wytwarzanych technologią mechanicznego mieszania komponentów połączoną z odlewaniem grawitacyjnym stopu aluminium AlMg10 wzmacnianego cząstkami SiC.

Uzyskane wyniki badań ujawniły problem właściwego połączenia cząstek z osnową związany z nierównomiernym rozmieszczeniem fazy wzmacniającej w osnowie stopu AlMg10 oraz obecnością miejsc, w których cząstki SiC nie były odseparowane od siebie osnową. W efekcie występował między nimi bezpośredni kontakt (rys.10a). Cząstki takie w mniejszym też stopniu uczestniczą w przenoszeniu obciążeń przez kompozyt. W mikrostrukturze odlanego kompozytu stwierdzono nie tylko występowanie nieciągłości materiałowych zlokalizowanych z reguły w miejscach występowania aglomeratów cząstek SiC, ale także na granicy rozdziału faz SiC/Al₃Mg₂ powstałej w wyniku wypychania cząstek SiC przez front krystalizacji powstały w trakcie stygnięcia odlewane kompozytu. Nieciągłości materiałowe stanowią oczywiste zagrożenie dla trwałości wyrobu i jego własności użytkowych. W trakcie badań mikrostrukturalnych stwierdzono ponadto obecność licznych obszarów wykazujących znikomy udział (znacznie poniżej średniej dla materiału) fazy wzmacniającej w osnowie stopu [A18].



Rys.10. Mikrostruktura kompozytu AlMg10/SiC (a) w stanie odlanym (b) po modyfikacji tarciowej 1mm poniżej powierzchni tarcia, mikroskopia optyczna, trawione [A18].

Celem usunięcia powstałych nieciągłości, większego stopnia rozdrobnienia i wymieszania poszczególnych faz zastosowano modyfikację tarciową. Badania mikroskopowe wykazały znaczące zmiany w mikrostrukturze materiałów w stosunku do stanu sprzed modyfikacji FSP. Odnotowano przede wszystkim wyraźne rozdrobnienie ziarna osnowy, częściowe rozpuszczenie się wydzieleni fazy β w roztworze stałym α i bardziej równomierne rozmieszczenia cząstek SiC w osnowie stopu aluminium połączone z jednoczesnym zanikiem aglomeratów cząstek SiC. Znamioną cechą materiału poddanego modyfikacji tarciowej było także silne rozdrobnienie cząstek SiC oraz zmiana ich kształtu. W kompozycie wyjściowym dominowały bowiem cząstki o wymiarach od 30 do 60 μm i wielościennym kształcie ostrokrawędziowym, natomiast w materiale poddanym obróbce tarciowej dominowały cząstki o wymiarach od 20 do 40 μm i bardziej równoosiowym kształcie. W materiale wyjściowym nie stwierdzano obecności cząstek o wymiarach liniowych poniżej 10 μm , natomiast w materiale poddanym obróbce tarciowej cząstek takich było bardzo wiele, a najmniejsze z ujawnionych cząstek miały wymiar liniowy rzędu 1-2 μm [A18]. Przeprowadzone badania wykazały, że ilość cząstek przypadających na jednostkę powierzchni w przypadku materiału modyfikowanego tarciowo była ponad dwukrotnie większa niż w kompozycie uzyskanym na drodze mieszania mechanicznego i odlewania grawitacyjnego. Stwierdzono ponadto, że w wyniku obróbki tarciowej nastąpiła eliminacja wad materiałowych powstałych w trakcie wytwarzania odlewu tj. pustek i innych nieciągłości materiałowych (rys. 11).

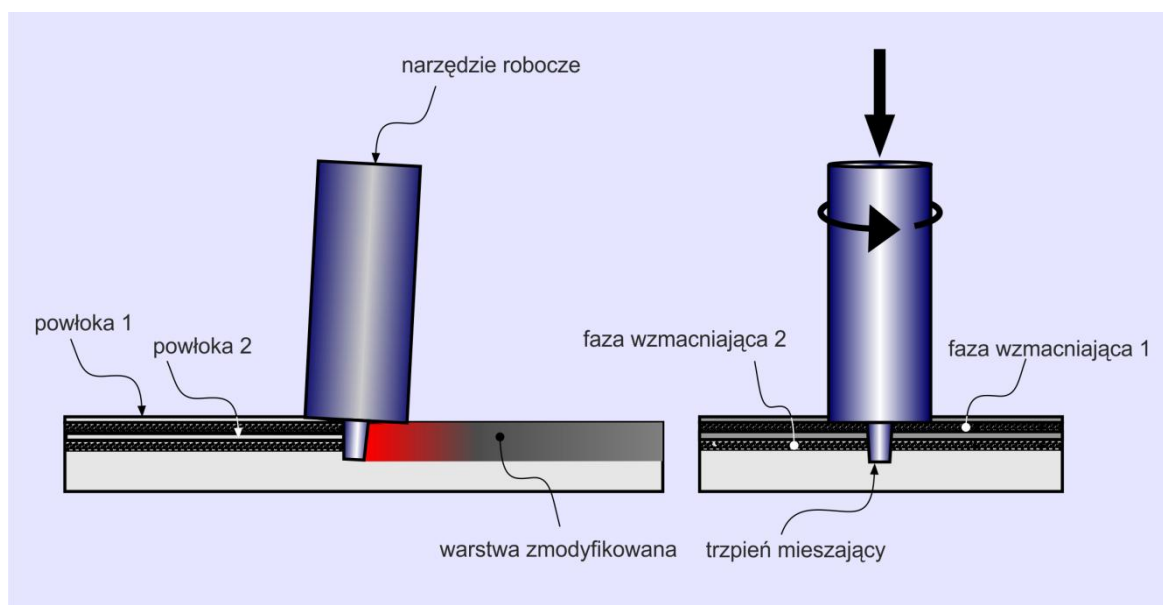


Rys.11. Mikrostruktura kompozytu AlMg10/SiC przed (a) i po modyfikacji tarciowej, SEM [A18].

Zastosowana metodyka polepszania własności struktur kompozytowych za pomocą modyfikacji tarciowej kompozytów odlewanych nie spowodowała znaczącego przyrostu twardości, który oszacowano na poziomie około 35%, podobnie jak w przypadku klasycznych metod modyfikacji FSP z użyciem faz wzmacniających, prezentowanych w publikacji [A7]. **Tym samym została potwierdzona przewaga wytwarzania kompozytów stopów metali lekkich na drodze autorskiej modyfikacji MChS-FSP w stosunku do dotychczasowych metod obróbki tarciowej FSP, często wymagających wieloetapowej obróbki.**

Gradientowe struktury wielopłaszczyznowe

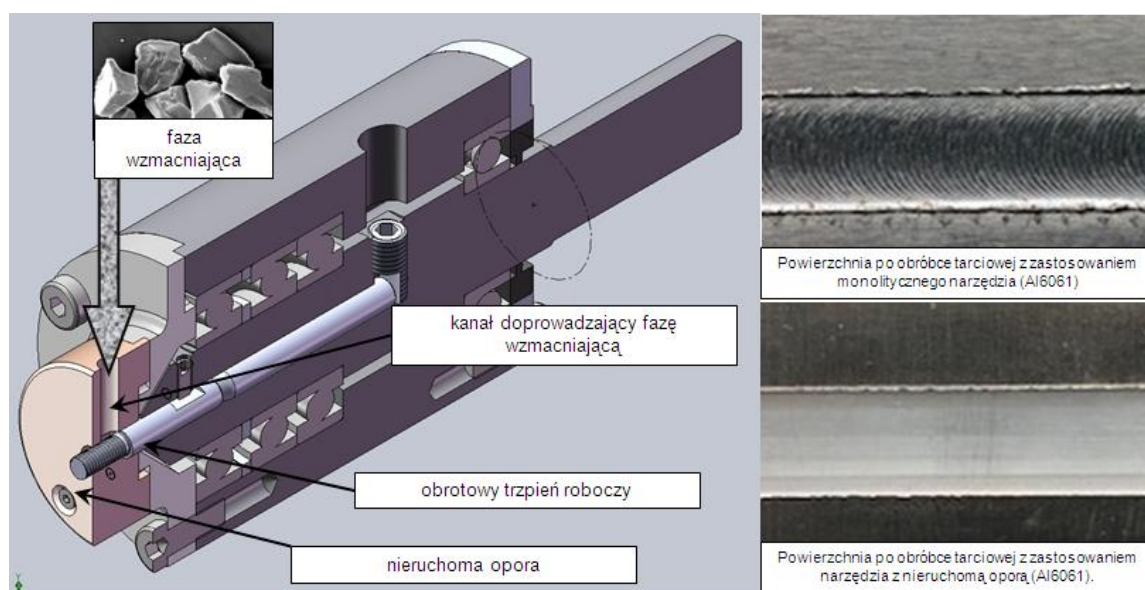
Kontynuacją badań nad modyfikacją warstw wierzchnich było rozwiązanie problemu ograniczonej efektywnej głębokości strefy zmian mikrostrukturalnych w modyfikowanym materiale. Cel jaki w tym przypadku został postawiony to zwiększenie objętości zmian mikrostrukturalnych, bez znacznej utraty twardości w głębszych warstwach modyfikowanego materiału. Cel ten zamierza się osiągnąć poprzez wytworzenie funkcjonalnych gradientowych powłok ceramicznych o zmiennych w kierunku normalnym do powierzchni chemicznych, mechanicznych i elektrycznych właściwościach. Aby spełnić ww. warunki zostało opracowane nowatorskie, opatentowane rozwiązanie polegające na wytwarzaniu struktur wielopłaszczyznowych za pomocą obróbki tarciowej, w którym mieszanie fazy wzmacniającej z materiałem osnowy odbywa się głównie w kierunku prostopadłym do powierzchni modyfikowanej. W opracowanej technologii wykorzystuje się układ wielowarstwowy typu „sandwich”, składający się z naprzemiennych warstw osnowy i materiału stanowiącego fazę wzmacniającą w docelowym kompozycie. Patent na rozwiązanie został przyznany w roku 2018 [A17].



Rys. 12. Schemat wytwarzania kompozytowych struktur gradientowych (Pat. PL 230589 B1)

Plany naukowo-badawcze na przyszłość w zakresie modyfikacji powierzchni

Moje dalsze plany badawcze oprócz implementacji autorskich technologii w inżynierii powierzchni obejmują również wykorzystanie nowych konstrukcji narzędzi do modyfikacji warstwy wierzchniej materiałów inżynierskich. W tym celu opracowałem narzędzie, w którym nieruchoma opora kształtuje przez docisk uplastyczniony metal a ciepło tarcia wytwarzane jest jedynie przez obrotowy trzpień, który automatycznie pobiera i miesza wprowadzaną do narzędzia fazę wzmacniającą. Wstępne próby zastosowania opracowanego rozwiązania wykazały możliwość uzyskania wysokiej jakości powierzchni pozbawionej powierzchniowych karbów geometrycznych charakterystycznych dla modyfikacji tarcowej FSP z użyciem monolitycznych narzędzi (rys. 13). Oczekiwanym efektem zastosowania nowego typu narzędzia do modyfikacji FSP jest znaczne zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej materiałów modyfikowanych.



Rys. 13. Budowa narzędzia do wytwarzania kompozytowych warstw wierzchnich z udziałem faz wzmacniających wprowadzanych .

Podsumowanie

Opracowane rozwiązania oraz prezentowany cykl publikacji stanowią spójne, własne osiągnięcie naukowe, wyznaczające nowe kierunki badań, jednocześnie wpisując się w aktualne międzynarodowe trendy badawcze. Do najważniejszych wniosków wynikających z tych badań i analiz składających się na przedstawione osiągnięcie zaliczam:

1. Opracowane oryginalne rozwiązanie konstrukcyjne i metodyczne umożliwiające realizację obróbki przetopieniowej powłok tlenkowych natryskiwanych plazmowo za pomocą zespołu spawalniczego ze „swobodnym łukiem niezależnym” stanowi przykład rozwiązania interdyscyplinarnego łączącego w sobie problematykę inżynierii powierzchni oraz spawalnictwa.
2. Badania powłok przetopionych ujawniły znaczące zmiany w budowie powłok tlenkowych, wyrażające się ich ujednorodnieniem oraz zanikiem warstwowości. Stwierdzono ponadto

redukcję porowatości powiazaną z wyraźną sferoidyzacją pozostałych w przetopionej warstwie porów. W warstwach przetopionych odnotowano silne rozdrobnienie struktury i równomierne rozmieszczenie poszczególnych faz.

3. Przetopienie warstwy wierzchniej metali wykazujących silne powinowactwo do tlenu wiąże się z koniecznością pokonania trudności wynikających z istnienia na powierzchni materiału warstwy tlenkowej o zmiennej grubości. Przetopieniu tej powłoki z zastosowaniem konwencjonalnych metod oddziaływania łukowego towarzyszą niekorzystne zmiany w geometrii struktury warstwy wierzchniej. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie nowatorskiego rozwiązania opartego o „dwułukowe przetapianie w układzie tandem”. Dzięki zintegrowaniu procesu przetapiania z operacją intensywnego oczyszczania powierzchni z tlenków wyeliminowana została konieczność mechanicznego bądź chemicznego ich usuwania z powierzchni materiału.

4. Charakter zmian obserwowanych w przetapianych stopach odpowiada tym, jakie stwierdza się w materiałach poddanych analogicznej obróbce, ale z użyciem wiązki lasera. Z tego powodu opracowane nowatorskie rozwiązania mogą stanowić cenną alternatywę dla dominujących obecnie w inżynierii powierzchni technik laserowych.

5. Zastosowanie intensywnego chłodzenia materiału przetapianego w kąpeli z niskotemperaturowego ciekłego gazu intensyfikuje proces odprowadzania ciepła ze strefy przetapiania, ograniczając rozrost ziaren, szczególnie podczas przetapiania wielopasmowego.

6. Biorąc pod uwagę aspekty ekonomiczne zaproponowanych nowatorskich rozwiązań w modyfikacji łukowej warstwy powierzchniowej metali z powłokami tlenkowymi należy stwierdzić, że są one obecnie bezkonkurencyjne. Metody te są narzędziem bardzo wygodnym, niewymagającym specjalnego przygotowania powierzchni materiału przetapianego. Dostępność aparatury spawalniczej oraz łatwość jej obsługi przemawiają również na jej korzyść.

7. Wykorzystanie nowatorskiej wielokomorowej technologii MChS-FSP w procesie wzbogacania warstwy wierzchniej stopów metali za pomocą cząstek ceramicznych jest obiecującym rozwiązaniem, o dużym potencjale aplikacyjnym. Opracowany sposób stanowi może alternatywne rozwiązanie w stosunku do innych aplikacji wykorzystywanych w technologii FSP, zwłaszcza w przypadku, gdy ze względu na niekorzystne interakcje między komponentami nie jest możliwe zastosowanie technologii z fazą ciekłą. Ponadto zastosowanie MChS-FSP pozwala przeprowadzić modyfikację warstwy wierzchniej w trakcie jednego etapu z zastosowaniem jednego narzędzia mieszającego.

8. Zastosowanie proponowanego sposobu modyfikowania warstw wierzchnich materiałów wykazujących silne powinowactwo do składników atmosfery podwyższa efektywność oraz znacznie zmniejsza koszty procesów konstituowania powierzchni w porównaniu z sposobami stosowanymi dotychczas. Uzyskane zmiany w strukturze warstw wierzchnich pozwalają osiągnąć wyższe w stosunku do materiału niepoddanego takiej obróbce twardości materiałów a zatem wyższą odporność na zużycie cierne i ścierne, co w przypadku np. stopów magnezu czy aluminium jest problemem szczególnie ważnym, a dotychczas trudnym lub efektywnie nierozwiązalnym.

9. Badania mikrostrukturalne wykazały w strefie wymieszania dominację bardzo drobnych i równoosiowych ziaren, a w strefie odkształcenia termomechanicznego przewagę ziaren o wyraźnie wydłużonym kształcie. Mikrostruktura strefy wymieszania dowodzi, że wystąpiła

dynamiczna rekryształizacja materiału, tj. proces będący konsekwencją silnego odkształcenia plastycznego materiału i oddziaływania wysokiej temperatury. Cząstki fazy wzmacniającej zostały intensywnie i równomiernie rozproszone w osnowie stopu.

10. Modyfikacja tarciowa powierzchni z wykorzystaniem fazy wzmacniającej prowadzi do powstania struktury kompozytowej w warstwie wierzchniej materiału. Obróbce towarzyszy silne rozdrobnienie struktury stopu połączone z równomiernym rozproszeniem i rozdrobnieniem fazy wzmacniającej w strefie wymieszania warstwy wierzchniej materiału. Konsekwencją zmian strukturalnych, a w szczególności wprowadzenie cząstek ceramicznych jest nawet dwukrotne zwiększenie średniej twardości materiału.

11. Badania materiału modyfikowanego z wykorzystaniem mikroskopii optycznej wykazały, że w zakresie przyjętych parametrów obróbki nastąpiło jego uplastycznienie oraz znaczące zmiany w mikrostrukturze w stosunku do stanu materiału sprzed obróbki. Zmiany te wynikały nie tylko z wprowadzenia do uplastycznionego stopu fazy wzmacniającej i wytworzenia mikrostruktury kompozytowej typu metal-ceramika, ale także z zaniku cech charakterystycznych dla materiały wyjściowego, w tym pasmowości wydzieleni faz międzymetalicznych.

12. Efekt silniejszego rozdrobnienia struktury jest obserwowany przy zastosowaniu cząstek o nanometrycznych wymiarach i jest spowodowany blokowaniem rozrostu ziaren przez cząstki usytuowane na granicach tych ziaren.

13. Uzyskane wyniki potwierdziły przewagę proponowanego rozwiązania MCh-FSP w modyfikacji warstwy wierzchniej powiązanej z wytwarzaniem struktur kompozytowych nad innymi metodami obróbki powierzchni stopów metali, co wykazano w zaprezentowanych publikacjach.

14. Pozytywne rezultaty proponowanych nowatorskich rozwiązań stwarzają nowe możliwości ich wykorzystania w wytwarzaniu warstw wierzchnich stopów metali o własnościach wymaganych przez przemysł kosmiczny, lotniczy oraz transportu naziemnego i innych wymagających zaawansowanych technologii konstituowania powierzchni.

15. Przedstawione opatentowane technologie i wynalazki, obejmują nie tylko nowatorską pracę koncepcyjną, potencjalne szerokie aplikacje przemysłowe opracowanych rozwiązań ale także popularyzację polskiej myśli technicznej na arenie międzynarodowej.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych wnioskodawcy

5.1. Działalność prowadzona przed doktoratem

Od 1985 roku uczęszczałem do Techniku Górniczego w Jastrzębiu Zdroju, później do Technicznych Zakładów Naukowych w Częstochowie, które ukończyłem w 1990 roku na kierunku Budowa Maszyn. W tym samym roku po zdaniu egzaminów wstępnych rozpocząłem studia na Politechnice Częstochowskiej na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn o specjalności Obrabiarki i Urządzenia Technologiczne i specjalizacji Maszyny i Urządzenia Spawalnicze. W trakcie studiów ukończyłem 3-letni fakultet pedagogiczny. W tym czasie pełniłem funkcję przewodniczącego Samorządu Studentów Wydziału Budowy Maszyn, byłem również członkiem

Senatu Politechniki Częstochowskiej, a także członkiem i założycielem I Parlamentu Studentów RP w Warszawie.

Obroniłem pracę dyplomową magisterską pt.: „*Projekt rezystora symulującego elektryczny łuk spawalniczy*” pod kierunkiem dr. hab. inż. Romana Kensika, a studia ukończyłem z wynikiem bardzo dobrym w 1995 r.

W 1996 roku zostałem zatrudniony na stanowisku asystenta w Samodzielnym Zakładzie Spawalnictwa Politechniki Częstochowskiej. Byłem autorem rozdziału w materiałach konferencyjnych „Spawalnictwo. Kontrola jakości. Badania nieniszczące.” (Częstochowa 1997) pod tytułem „*Metoda prądów wirowych w kontroli złączy spawanych*”. W tym czasie angażowałem się w działalność naukowo-badawczą szczególnie w zakresie analizy i badań mocy wydzielanej w łuku i sposobów szacowania energii liniowej spawania, której wyniki prezentowałem m.in. na Sympozjum Katedr i Zakładów Spawalnictwa, Rudy 1997. Efekty realizowanych badań zostały opublikowane w czasopiśmie Przegląd Spawalnictwa pt.: „*Zasady sterowania łukiem spawalniczym*” (6/1998) oraz „*Moc impulsowego łuku spawalniczego*” (7-8/2000) a także zostały zaprezentowane na V. Krajowej Naukowo-Technicznej Konferencji Spawalniczej pt.: Czynniki zwiększające wydajność wytwarzania konstrukcji spawanych. Międzyzdroje 1999. Następnym obszarem moich zainteresowań i kierunków badań było monitorowanie procesów spawania oraz tworzenie systemów rejestracji zjawisk zachodzących w procesach spajania, przedstawione m.in. w publikacji „*Możliwości zastosowania skanującej kamery termograficznej w procesach spawalniczych*” (Przegląd Spawalnictwa 7/2002).

W 1998 roku otrzymałem nagrodę zespołową II stopnia Rektora Politechniki Częstochowskiej za współorganizowanie konferencji pt.: „*Spawalnictwo-kontrola jakości-badania nieniszczące*”.

Równocześnie uczestniczyłem w realizacji grantów zleconych przez przemysł i finansowanych ze środków MNiSW m.in. projekt celowy 8T10A05297C/3328 pt. „*Modułowy system zasilania stanowisk spawalniczych z monitorowaniem parametrów spawania*” PC-06-501/97/R dla Stoczni Szczecińskiej, oraz „*Projekt synergicznie sterowanego półautomatu spawalniczego*” dla producenta urządzeń spawalniczych OZAS Opole (obecnie ESAB) pod kierunkiem dr. hab. inż. Romana Kensika, którego efektem było wyprodukowanie pierwszego w kraju synergicznie sterowanego inwertorowego źródła spawalniczego dla realizacji procesów spawania w osłonie gazów ochronnych elektrodą topliwą. Byłem autorem wniosku o finansowanie projektu badawczego (nr 3TC08C03126) związanego z modelowaniem procesu spawania za pomocą sztucznych sieci neuronowych.

W 1999 roku objąłem funkcję zastępcy Kierownika Kontroli Technicznej w Laboratorium Kontroli Technicznej (LKT) Zakładu Spawalnictwa (świadcstwo uznania UDT nr L-II-16/04). Brałem udział w tworzeniu Księgi Jakości przedstawiającej politykę jakości, system jakości i praktyczny sposób uzyskania jakości (ISO/JEC 25) w LKT. W tym samym roku uzyskałem tytuł Europejskiego Inżyniera Spawalnika (EWE) wraz z certyfikatem kompetencji (EOTC) nadanym przez Europejską Federację Spawalniczą (EWF).

W 2002 roku otworzyłem przewód doktorski, a na promotora został wyznaczony dr hab. inż. Roman Kensik. Pracę doktorską pod tytułem „*Określenie relacji między wielkościami opisowymi spawania impulsowego elektrodą topliwą w osłonie gazów ochronnych*” obroniłem z wyróżnieniem w czerwcu 2003 roku, za którą otrzymałem Nagrodę Rektora Politechniki Częstochowskiej w 2004 roku.

W pracy określiłem zasady wyznaczania mocy łuku spawalniczego z uwzględnieniem współczynnika mocy, które stanowią podstawę do właściwej oceny energii liniowej spawania. Opracowałem algorytm doboru optymalnych parametrów opisowych procesu spawania impulsowego. Zbadałem zjawisko samoregulacji łuku i wpływ tego zjawiska na stabilność jego palenia. Do oceny ilościowego wpływu intensywności samoregulacji łuku zaproponowałem odpowiedni wskaźnik. Ustaliłem charakterystykę prędkości stapiania drutu elektrodowego, oceniłem wydajność stapiania drutu i porównałem te wielkości z występującymi w procesie MIG/MAG STANDARD, które wraz z badaniami geometrii kropli stopionego metalu i ich rozprysku pozwoliły ustalić kryterialne warunki przenoszenia materiału w łuku i dobór właściwego zakresu częstotliwości impulsowania. Wyznażyłem równanie charakterystyki napięcia roboczego w procesie MIG/MAG PULS celem jej standaryzacji, której znajomość pozwala na właściwe testowanie i wymiarowanie elementów mocowych nowoczesnych przemiennikowych zasilaczy impulsowych. W tym okresie opiniowałem projekty norm europejskich dla PKN w zakresie urządzeń spawalniczych i nowoczesnych procesów spajania.

Zakres prac naukowo-badawczych będących przedmiotem moich zainteresowań związany był głównie z eksploatacją urządzeń spawalniczych, monitoringiem procesów spawania, jak również ich analizą i doskonaleniem. Byłem wykonawcą w 12 projektach Wydziału Budowy Maszyn (badania własne i statutowe) w obszarze zjawisk zachodzących w przestrzeni międzyelektrodowej podczas spawania łukowego, oceny ciepła wydzielanego w łuku spawalniczym i energii liniowej spawania oraz analizy mechanizmów i parametrów wpływających na stapianie elektrod i geometrię wtopienia. Celem realizacji wymienionych badań **pozyskałem środki finansowe z KBN i stworzyłem unikatowe na skalę europejską „Laboratorium monitorowania procesów spajania”, oparte o nowatorski system rejestrujący szybkozmienne procesy zachodzące podczas łączenia metali obejmujący zsynchronizowaną rejestrację 16 wielkości fizycznych z poklatkowym obrazowaniem zjawisk z szybkością do 100 tysięcy klatek/s i termowizyjnym pomiarem temperatury badanych obiektów w czasie rzeczywistym.**

Przed uzyskaniem stopnia doktora prowadzone przeze mnie zajęcia dydaktyczne dotyczyły głównie zajęć laboratoryjnych w tematyce technologii spawania, maszyn i urządzeń spawalniczych, systemów zasilania stanowisk spawalniczych z monitorowaniem parametrów spawania oraz wykorzystania zintegrowanych systemów CAD/CAM w spawalnictwie. Opracowałem programy nauczania w dziedzinie urządzeń spawalniczych oraz komputerowego wspomaganie prac inżynierskich i procesów spawalniczych. Byłem również opiekunem studentów realizujących prace dyplomowe pod kierunkiem dr hab. inż. Romana Kensika.

5.2. Działalność prowadzona po doktoracie

Po uzyskaniu stopnia doktora zostałem zatrudniony na stanowisku adiunkta w Samodzielnym Zakładzie Spawalnictwa (obecnie Zakład Spawalnictwa Instytutu Technologii Mechanicznych) Politechniki Częstochowskiej, w którym obecnie pracuję.

Moja działalność naukowa poza tematyką obróbki powierzchniowej za pomocą autorskich rozwiązań w modyfikacji warstwy wierzchniej metali z powłokami tlenkowymi, obejmuje również zagadnienia zgrzewania tarcowego stopów metali lekkich stosowanych w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym oraz spajania termicznego materiałów różnoimiennych. Równolegle prowadzę badania i analizy dotyczące oceny ciepła wydzielanego w procesach spawania łukowego, badania zjawisk związanych z transportem metalu w łuku i wpływem zmiennych procesowych na stabilność procesu spawania. Tworzę podstawy do opracowywania wytycznych w

konstruowaniu nowoczesnych przemiennikowych zasilaczy spawalniczych dla realizacji niskoenergetycznych i wysokowydajnych procesów spawania.

Dużą część mojego zaangażowania badawczego stanowią aspekty praktycznego wykorzystania technologii spawalniczych przez wprowadzanie nowych rozwiązań do realizacji procesów łączenia metali mających wpływ na ekonomikę spawania przez właściwe konstruowanie złączy spawanych i projektowanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych wykorzystywanych m.in. na potrzeby przemysłu energetycznego, motoryzacyjnego i lotniczego. Jednym z ważniejszych osiągnięć w tym zakresie jest opracowanie nowatorskiego rozwiązania w zakresie konstruowania nowoczesnych wysokowydajnych bloków energetycznych poprzez modernizację ścian szczelnych (patent: „*Sposób wytwarzania ściany wymiennika ciepła*” - PAT.224942) skutkujące zwiększeniem sprawności i zmniejszeniem emisji gazów cieplarnianych emitowanych przez elektrownie wyposażone w bloki energetyczne pracujące w zakresie parametrów nadkrytycznych i ultrasupernadkrytycznych. Rozwiązanie te spotkało się z dużym zainteresowaniem ze strony krajowych oraz zagranicznych przedsiębiorstw i instytutów z branży energetycznej (m.in.: PGE Bełchatów, Elektrownia Jaworzno, SBB Gliwice, Instytut Odlewnictwa Kraków, Energoinstal Sosnowiec, KTH Royal Institute of Technology Stockholm Szwecja) które zauważyły, że wdrożenie przedmiotowego rozwiązania wiąże się z wymiernymi korzyściami ekonomicznymi i ekologicznymi oraz możliwością finansowania budowy nowoczesnych elektrowni węglowych ze środków publicznych w ramach nowych wytycznych Komisji Europejskiej (Pakiet Zimowy). Elementy wynalazku zarejestrowano również w Urzędzie Harmonizacji Rynku Wewnętrznego (OHIM) jako **Wzór Wspólnotowy Nr 002348813-0001**.

W ramach działalności naukowo wynalazczej opracowałem oryginalne rozwiązania konstrukcyjno-technologiczne umożliwiające realizację termicznej modyfikacji powierzchniowej metali i ich stopów. Wynalazki zostały pięciokrotnie (2009, 2011, 2012(2), 2013) docenione przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za nowe rozwiązania aparaturowe i metodyczne w modyfikowaniu warstwy wierzchniej materiałów przewodzących i nieprzewodzących. Nagrodzone rozwiązania uzyskały ochronę patentową oraz 10 medali i 5 specjalnych nagród i wyróżnień (tab.1-2). Za oryginalne i twórcze osiągnięcia naukowe byłem trzykrotnie nagradzany przez Rektora Politechniki Częstochowskiej nagrodą zespołową III stopnia oraz pięciokrotnie przez Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego (tab.2).

W okresie po uzyskaniu stopnia doktora mój dorobek poza publikacjami wchodzącymi w skład prezentowanego osiągnięcia obejmuje 76 publikacji (zał. 6):

- 2 publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (B1, B2),
- 1 patent oraz 1 wzór użytkowy (B3, B4),
- 26 artykułów z listy B MNiSW (B5-B31) w tym 2 przetłumaczone w renomowanym czasopiśmie *Welding International* (Woodhead Publishing Ltd, Wielka Brytania) indeksowanym m.in. w bazie Scopus (B15, B30),
- 3 publikacje stanowiące fragmenty w monografii (B32-B34),
- 14 artykułów opublikowanych w czasopismach spoza listy MNiSW oraz w cyklicznych materiałach konferencyjnych (B35-B48),
- 17 sprawozdań w ramach badań własnych BW (B49-B56) i badań statutowych BS (B57-B65),
- 12 opracowań badawczych wykonanych w ramach projektów B+R (B66-B77).

Tabela 1. Zestawienie zagranicznych nagród za działalność na polu wynalazczym (zał.7)

Rodzaj osiągnięcia	Miejsce rok
Srebrny Medal 6 th <i>International Exhibition (SuZhou) of Inventions</i> , 2008, China Association of Inventions za wynalazek: "Welding unit with a free, independent arc for modifying the external layer of materials".	Chiny 2008
Brązowy medal <i>Seoul International Invention Fair SIIF</i> , 2010, President Korea Invention Promotion Association, za wynalazek „Welding unit with a free, independent arc for modifying the surface layer of non-conductive materials”.	Korea 2010
Wyróżnienie <i>Association Russian House for International Scientific and Technological Cooperation SIIF 2010</i> , 2010, First Deputy general Director, za wynalazek “Welding unit with a free, independent arc for modifying the surface layer of non-conductive materials”	Korea 2010
Złoty medal <i>IX Salonul International de Inventica PRO INVENT</i> , 2011, Director General Executiv EXPO TRANSILVANIA, za wynalazek ""Modified GTAW for Surface Remelting Treatment of Plasma Sprayed Oxide Coatings”.	Rumunia 2011
Srebrny medal <i>XV. Międzynarodowego Salonu Wynalazków i Innowacyjnych Technologii "Archimedes 2012"</i> , Moskwa, 2012, za wynalazek „Nowe rozwiązania aparaturowe i metodyczne w powierzchniowej obróbce przetopieniowej stopów magnezu.	Rosja 2012
Brązowy medal <i>Taipei Int'l Invention Show&Technomart Invention Contest, 2012, Award Committee Chair</i> , za wynalazek “Surface Remelting Treatment of Magnesium Alloys by Means of The Modified GTAW Method”.	Tajwan 2012
Wyróżnienie 9 th <i>Taipei International Invention Show&Technomart (Taipei INST)</i> , 2012, President of TIIAWA (Taiwan International Invention Award Winners Association), for excellent efforts in creating innovations.	Tajwan 2012
Wyróżnienie <i>International Trade Ideas – Inventions – New Products (iENA 2017)</i> , President Malaysian Research & Innovation Society, za wynalazek: ”Welding unit for modifying surface layer of materials”.	Malezja 2017
Wyróżnienie <i>International Exhibition of Technology and Innovation IPITEX 2018</i> , Toronto International Society of Innovation (TISIAS) & Advanced Skills/International Invention Innovation Competition in Canada (ICAN-TORONTO, CANADA), za wynalazek “Welding unit for modifying surface layer of materials”.	Tajlandia 2018
Brązowy Medal <i>Bangkok International Intellectual Property, Invention, Innovation and Technology Exposition</i> ”, 2018, National Research Council of Thailand, za wynalazek “Welding unit for modifying surface layer of materials”.	Tajlandia 2018
Srebrny medal <i>International Exhibition of Technical Innovations, Patents and Inventions</i> , 2018, Chairman of The INVENT ARENA Organizing Committee, za wynalazek “Welding Unit for Modifying Surface Layer of Materials”.	Czechy 2018
Srebrny medal <i>International Trade Fair-Ideas Inventions-New Products iENA2018</i> , za wynalazek “Welding unit for modifying surface layer of materials”. Norymberga.	Niemcy 2018

Tabela 2. Zestawienie międzynarodowych i krajowych nagród za działalność naukową (zał.7).

Rodzaj osiągnięcia	Rok
Dyplom Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za projekt pod nazwą „Zestaw spawalniczy ze swobodnym łukiem niezależnym do modyfikowania warstwy wierzchniej materiałów, w tym materiałów elektroizolacyjnych”.	2009
Dyplom Mistrz Ekologii VIII. Międzynarodowego konkursu na rozwiązania w dziedzinie ochrony środowiska – EKO 2009. Nagroda III stopnia za pracę „Zespół spawalniczy ze swobodnym łukiem niezależnym do modyfikowania warstwy wierzchniej materiałów”.	2009
Dyplom Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za projekt pod nazwą „Układ spawalniczy ze swobodnym łukiem niezależnym do modyfikowania warstwy wierzchniej materiałów nieprzewodzących”.	2011
Srebrny medal V. Międzynarodowej Warszawskiej Wystawy Wynalazków IWIS 2011. Prezes Stowarzyszenia Polskich Wynalazców i Racjonalizatorów, za rozwiązanie „Modyfikacja warstwy wierzchniej stopów magnezu za pomocą zmodyfikowanej metody GTAW”.	2011
Srebrny medal V. Międzynarodowej Warszawskiej Wystawy Wynalazków IWIS 2011. Prezes Stowarzyszenia Polskich Wynalazców i Racjonalizatorów, za rozwiązanie „Modyfikacja warstwy wierzchniej nieprzewodzących powłok tlenkowych metodą GTAW ze swobodnym łukiem niezależnym”.	2011
Nagroda zespołowa stopnia III Rektora Politechniki Częstochowskiej za „Oryginalne rozwiązanie technologiczno-konstrukcyjne umożliwiające realizację obróbki przetopieniowej nieprzewodzących powłok tlenkowych natryskiwanych termicznie za pomocą zmodyfikowanej metody spawania TIG”.	2011
Dyplom Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za projekt pod nazwą „Modyfikacja warstwy wierzchniej nieprzewodzących powłok tlenkowych metodą GTAW ze swobodnym łukiem niezależnym”.	2012
Dyplom Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za projekt pod nazwą „Powierzchniowa obróbka przetopieniowa powłok tlenkowych natryskiwanych plazmowo za pomocą zmodyfikowanej metody GTAW”.	2012
Nagroda zespołowa stopnia III Rektora Politechniki Częstochowskiej za „Oryginalne i twórcze osiągnięcia naukowe”.	2013
Dyplom Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za projekt pod nazwą: „Nowe rozwiązanie aparaturowe i metodyczne w powierzchniowej obróbce przetopieniowej stopów magnezu”.	2013
Nagroda zespołowa stopnia III Rektora Politechniki Częstochowskiej za „Osiągnięcia publikacyjne i patenty”.	2018

Udział w projektach badawczych

Uczestniczyłem jako główny wykonawca w okresie od stycznia 2011 do grudnia 2015 w Indywidualnym Projekcie Kluczowym „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym” Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka (POIG.01.01.02-00-015/08-00). Projekt współfinansowany przez UE ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego. Centrum Zaawansowanych Technologii AERONET „Dolina Lotnicza”. Prowadzone przez mnie badania [B66-B74] dotyczyły wdrożenia nowoczesnych procesów spajania termicznego w tym zgrzewania tarcowego z przemieszaniem FSW i FSSW, mikrospawania laserowego do łączenia trudnospawalnych stopów metali lekkich, stali wysokostopowych oraz stopów tytanu stosowanych w przemyśle lotniczym.

W okresie od 2013-2015 byłem wykonawcą w Projekcie Sektorowym INNOLOT (wartość projektu 500 milionów złotych) –Innowacyjne lotnictwo pt.: „Zaawansowane techniki wytwarzania elementów struktury płatowca przy wykorzystaniu innowacyjnej technologii FSW”. Projekt FAST_FSW nr INNOLOT/I/4/NCBR/2013, dofinansowany przez NCBiR. W ramach projektu zajmowałem się aplikacją zgrzewania tarcowego z przemieszaniem FSW do punktowego i liniowego łączenia cienkościennych, lotniczych stopów metali lekkich [B75-B76].

Byłem wykonawcą w Projekcie „Przeprowadzenie prac badawczo-rozwojowych w zakresie opracowania samoobsługowych maszyn recyklingowych i inteligentnego systemu zbiórki odpadów” finansowany z funduszy UE. Regionalny Program Operacyjny Województwa Lubelskiego (RPLU.01.02.00-06-0050/16) na lata 2014-2020. Realizowane zadanie: „Analiza rozwiązania i walidacja systemu pod kątem uzyskania certyfikatu bezpieczeństwa urządzeń do skupu, sortowania i wstępnego przetwarzania wybranych surowców wtórnych” obejmowało okres od czerwca 2018 do stycznia 2019. Praca BZ604-07/2018.

Pracowałem jako wykonawca w grantie MNiSW 4T08C03823: „Wykorzystanie powierzchniowej obróbki przetopieniowej w procesie kształtowania struktury i budowy powłok tlenkowych natryskiwanych plazmowo”. W ramach projektu zajmowałem się wdrożeniem opracowanego autorskiego przetapiania powłok nieprzewodzących za pomocą „niezależnego łuku swobodnego”.

W latach 2007-2015 pełniłem funkcję Kierownika Badań Statutowych w Zakładzie Spawalnictwa Politechniki Częstochowskiej, których główną tematyką były badania nowoczesnych procesów spajania metali w tym m.in. spawania impulsowego w osłonie gazów ochronnych metodą MIG/MAG, zgrzewania tarcowego z przemieszaniem FSW oraz procesu modyfikacji tarcowej powierzchni metodą FSP. Kierowałem 17 projektami uczelnianymi obejmującymi badania własne BW [B49-B56] i badania statutowe BS [B57-B65]. W ramach badań statutowych kierowałem zespołem w skład którego wchodziłi wszyscy pracownicy naukowo-dydaktyczni Zakładu Spawalnictwa Politechniki Częstochowskiej.

Kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z przedsiębiorcami

Jestem głównym koordynatorem badań prowadzonych w ramach umowy zawartej między Politechniką Częstochowską a firmą Borkomet z siedzibą w Szczekocinach pt.: „Wdrożenie innowacyjnej technologii obróbki tarcowej MChS-FSP do modyfikacji warstwy wierzchniej stopów metali lekkich wykorzystywanych w przemyśle motoryzacyjnym” (termin zawarcia umowy styczeń 2017r.).

Byłem przedstawicielem naukowym reprezentującym Politechnikę Częstochowską w sprawie przygotowania wniosku o dofinansowanie przez NCBiR realizacji projektu dla firmy Zugil S.A. Wieluń w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój (wniosek o dofinansowanie nr POIR.01.01.01-00-0779/18)) na lata 2014-2020, Konkurs 5/1.1.1/2018 „Szybka ścieżka” dla dużych przedsiębiorców i konsorcjów pt.: „*Zintegrowany system zmniejszania naprężeń i odkształceń w konstrukcjach metalowych poddanych procesom cięcia i łączenia termicznego*”. **Od 30 listopada 2018 jestem Kierownikiem Zespołu Wykonawcy Politechniki Częstochowskiej w ww. projekcie w ramach umowy warunkowej dotyczącej podzadania w ramach badań przemysłowych pt.: „Badanie technologii spawania głębokowtapiającego i nagniatania wibracyjnego elementów konstrukcji spawanych powstających w wyniku zastosowania ww. technologii”.**

Podczas realizacji prac naukowo-badawczych współpracowałem również z innymi firmami m.in.: DINSE GmbH Niemcy, Harms & Wende GmbH & Co. KG Niemcy, WSK Rzeszów, PZL Mielec, Pratt & Whitney Kalisz, PZL Świdnik, ESAB Polska Sp. z o.o., Lincoln Electric Bester Sp. z o.o., Cloos Polska, Rywal RHC Sp. z o.o., Roboprojekt i in.

Działalność konferencyjna

Brałem aktywny udział w 31 cyklicznych krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych oraz w 6 cyklicznych naukowo-technicznych międzynarodowych seminariach w trakcie których wygłosiłem 21 referatów, które prezentowane były również na międzynarodowych i krajowych konferencjach w sesjach plakatowych. W obszarze organizacji konferencji **pełniłem funkcję przewodniczącego Komitetu Organizacyjnego Konferencji 48. Krajowej Naukowo-Technicznej Konferencji Spawalniczej „Innowacje w spawalnictwie”, Poraj-Częstochowa 2006**, za co otrzymałem Nagrodę Zespołową stopnia III Rektora Politechniki Częstochowskiej w 2004 roku. Współorganizowałem pięć międzynarodowych seminariów Regionu Europy Środkowej i Wschodniej nt.:

1. Praktyka Spawalnicza w Przemysle Energetycznym w latach 2009-2010:

- Central&Eastern European Seminar. Welding Practice in Power Engineering Industry
- IInd Central&Eastern European Seminar. Welding Practice: Power Engineering and Maintenance&Repair.

2. Spawanie konstrukcji stalowych w latach 2009-2011:

- IInd Central&Eastern European Seminar: Steel Construction Welding,
- IIIrd Central&Eastern European Seminar on Steel Construction Welding,
- IVth Central&Eastern European Seminar: Steel Constructing Welding.

Prowadziłem sesje referatowe podczas spawalniczych konferencji naukowo-technicznych (XVII. Naukowo-Techniczna Krajowa Konferencja Spawalnicza „Postęp, Innowacje i Wymagania Jakościowe Procesów Spajania”. 2011. Międzyzdroje, XIX. Naukowo-Techniczna Krajowa Konferencja Spawalnicza „Postęp, Innowacje i Wymagania Jakościowe Procesów Spajania”. 2013. Międzyzdroje., XX. Jubileuszowa Naukowo-Techniczna Krajowa Konferencja Spawalnicza "Postęp, innowacje i wymagania jakościowe procesów spajania". 2014. Międzyzdroje).

Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych

Od października 2003 roku pełnię funkcję **Sekretarza Zarządu Sekcji Spawalniczej SIMP** oddział Częstochowa. Od 27 lipca 2010 roku jestem **członkiem Stowarzyszenia Polskich Wynalazców i Racjonalizatorów** w Warszawie oddział Częstochowa. Prowadzę również stałą współpracę z Polskim Towarzystwem Spawalniczym.

Osiągnięcia dydaktyczne w zakresie popularyzacji nauki

Po zatrudnieniu na stanowisku adiunkta prowadziłem wykłady, zajęcia laboratoryjne, projekty oraz seminaria z następujących przedmiotów:

1. **Maszyny i urządzenia spawalnicze** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne i niestacjonarne),
2. **Procesy spajania technologia i urządzenia** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne i niestacjonarne),
3. **Podstawy technik wytwarzania** –Spawalnictwo II (Mechanika i Budowa Maszyn; studia niestacjonarne),
4. **Technologia spajania i procesów pokrewnych** ((Mechanika i Budowa Maszyn; magisterskie studia uzupełniające),
5. **CAD w spawalnictwie** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne),
6. **Spawalnictwo II** ((Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne i niestacjonarne),
7. **Procesy pokrewne spawaniu** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne);
8. **Nowoczesne zagadnienia w spawalnictwie** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne i niestacjonarne);
9. **Podstawy technologii budowy maszyn i montażu** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne i niestacjonarne);
10. **Wstęp do komputerowego wspomagania projektowania** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne);
11. **Komputerowe wspomaganie wytwarzania w spawalnictwie** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne);
12. **Procesy i techniki produkcyjne** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne);
13. **Automatyzacja procesów spawalniczych** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne i niestacjonarne);
14. **Organizacja prac spawalniczych** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne),
15. **Budowa i eksploatacja urządzeń spawalniczych** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne i niestacjonarne),
16. **Przepisy i dokumentacja prac spawalniczych** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne);
17. **Normy, przepisy oraz spawalnicze materiały dodatkowe w spawalnictwie** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia niestacjonarne);
18. **Organizacja prac spawalniczych** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne);
19. **Projektowanie robotów i manipulatorów** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne),
20. **Inżynieria wytwarzania III** – Spawalnictwo (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne, niestacjonarne);
21. **Urządzenia i osprzęt spawalniczy** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne);

22. **Sterowanie i monitorowanie urządzeń i procesów produkcyjnych** (Mechatronika, studia stacjonarne);
23. **Eksploatacja systemów wytwarzania** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne);
24. **Projektowanie systemów technicznych** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne);
25. **Projekt inżynierski** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne);
26. **Obróbka cieplna w spawalnictwie** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia niestacjonarne);
27. **Maszyny i urządzenia technologiczne II** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne);
28. **Materiały metalowe** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne);
29. **Metaloznawstwo i obróbka cieplna** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne);
30. **Technologia spawania stali i metali nieżelaznych** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia niestacjonarne);
31. **Monitorowanie procesów spawalniczych** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne);
32. **Technologia wytwarzania III – spawalnictwo** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne);
33. **Materialoznawstwo** (Mechanika i Budowa Maszyn, Mechatronika, Inżynieria Biomedyczna, Energetyka; studia stacjonarne);
34. **Technologie wytwarzania** (Mechanika i Budowa Maszyn, Mechatronika, Inżynieria Biomedyczna, Energetyka; studia stacjonarne);
35. **Komputerowe projektowanie i wspomaganie procesów spawalniczych** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne);
36. **Praca przejściowa** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne);
37. **Spawalnicze materiały dodatkowe** (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne)

Opracowałem od podstaw wykłady, zajęcia laboratoryjne oraz seminaria: CAD w spawalnictwie (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne), Maszyny i Urządzenia w spawalnictwie (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne i niestacjonarne), Sterowanie i monitorowanie urządzeń i procesów produkcyjnych (Mechatronika, studia stacjonarne), Monitorowanie procesów spawalniczych (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne), Eksploatacja urządzeń spawalniczych (Mechanika i Budowa Maszyn; studia stacjonarne i niestacjonarne).

Będąc członkiem Rady Programowej dla kierunku **Mechatronika** opracowałem od podstaw program zajęć laboratoryjnych oraz wykładów dla specjalności Systemy Sterowania studiów stacjonarnych I stopnia kierunku Mechatronika w przedmiocie Systemy sterowania i monitorowania procesu produkcyjnego.

Ponadto prowadziłem zgodnie z wytycznymi Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa wykłady i zajęcia laboratoryjne dla uczestników Studium Podyplomowego International Welding Engineer (IWE) w Autoryzowanym Ośrodku Szkoleniowym Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa przy Politechnice Częstochowskiej w tematyce: Urządzenia spawalnicze, Nowoczesne procesy spajania (spawanie elektronowe, laserowe, plazmowe i in.), Naprężenia i

odkształcenia spawalnicze, Spawalnicze oprzyrządowanie w zakładach przemysłowych, Projektowanie konstrukcji z aluminium i jego stopów.

W latach 2004-2017 organizowałem spawalnicze pokazy laboratoryjne i warsztaty podczas Dni Otwartych i Festiwalu Politechniki Częstochowskiej dla uczniów szkół średnich. Za tę działalność otrzymałem nagrodę Rektora Politechniki Częstochowskiej (zespołowa stopnia III) w 2009 roku. Współorganizowałem wspólnie z firmą Ulamex Tomaszów Mazowiecki cykliczne coroczne (w latach 2013-2017) tygodniowe szkolenia mające na celu popularyzację nauk technicznych wśród uczniów szkół ponadgimnazjalnych z regionu łódzkiego.

Byłem inicjatorem i współorganizatorem 14 otwartych seminariów naukowo-technicznych dla studentów i personelu spawalniczego organizowanych w Zakładzie Spawalnictwa Politechniki Częstochowskiej wspólnie z producentami urządzeń i materiałów spawalniczych m.in.:

1. „Zastosowanie techniki inwertorowej w nowoczesnych zasilaczach spawalniczych i modułowych systemów Pro Evolution oraz urządzeń do cięcia plazmą wysokiej dokładności firmy HYPERTHERM” (ZS PCz-Kemppi 04.06.2004r.).
2. „Zastosowanie nowoczesnych zasilaczy spawalniczych w spawaniu stali odpornych na korozję” (ZS PCz -Kemppi 3.12.2005r.).
3. „Nowoczesne urządzenia i materiały spawalnicze” (ZS PCz -Roboprojekt 10.05.2007r.).
4. „Eksploracja uchwytów do spawania ręcznego i zrobotyzowanego” (ZS PCz-BINZEL 25.10.2007r.)
5. „Nowoczesne inwenty spawalnicze” (ZS PCz-KEMPPPI 07.06.2008r.).
6. „Zastosowanie nowoczesnych systemów zrobotyzowanych i zasilaczy łuku do spawania rurociągów” (wyjazd szkoleniowy studentów do Centrum Technologicznego Spawalnictwa Weldtech firmy Lincoln Electric Bester 11-12.06.2008r.)
7. „Technologie kontrolowanych przebiegów falowych” (ZS PCz-Lincoln Electric Bester 23.05.2009r.)
8. „Jakościowe i wydajne spawanie aluminium” (ZS PCz-KEMPPPI 6.06.2009r.)
9. „Wytwarzanie nowoczesnych urządzeń i materiałów spawalniczych” (wyjazd szkoleniowy studentów do Centrum Technologicznego Spawalnictwa Weldtech firmy Lincoln Electric Bester 12-13.05.2010r.)
10. „Symulacja procesu spawania z zastosowaniem symulatora VRTEX 360”. (ZS-PCz-Lincoln 18.11.2010 r.)
11. „Obsługa nowoczesnych inwertorowych źródeł zasilania firmy MIGATRONIC oraz zapoznanie z systemem IGCTM” (Intelligent Gas Control). (ZS PCz-Migatronik 15.12.2010 r.)
12. „Nowoczesne gazy osłonowe stosowane w spawalnictwie” (ZS PCz.-LINDE 02.12.2010 r.)
13. „Badanie ciepła wprowadzonego w nowoczesnych procesach spawania łukowego STT, Power Mode, DC Puls” (wyjazd szkoleniowy studentów do Centrum Technologicznego Spawalnictwa Weldtech firmy Lincoln Electric Bester 18-19.09.2011r.)
14. „Spawanie wysokowydajne dwuelektrodowe MAG. Rapid TIG Technology” (ZS PCz-DINSE ESS 05.2018r.)

W latach 2005-2006 byłem członkiem Komisji Rekrutacyjnej Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki. W 2011 roku uczestniczyłem w pracach Komisji ds. Nauki Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki.

Opieka naukowa nad studentami i doktorantami

W latach 2004-2018 w ramach działalności dydaktycznej pełniłem funkcję promotora 88 prac dyplomowych inżynierskich i magisterskich, w tym **43 prace magisterskie i 45 prac inżynierskich (15 IWE)** na studiach dziennych i zaocznych o specjalności Spawalnictwo Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki kierunku Mechanika i Budowa Maszyn oraz na studiach podyplomowych „Wymagania i kompetencje Międzynarodowego Inżyniera Spawalnika (IWE)” przy Politechnice Częstochowskiej. Od 2011 roku jestem **Opiekunem Koła Naukowego Spawalników (KNS)** Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Informatyki. Liczba studentów należących do Koła Naukowego w tym okresie wynosiła 82, a efektem działalności było 10 publikacji i 4 referaty prezentowane na cyklicznych krajowych konferencjach naukowo-technicznych przez członków KNS. Decyzją Rady Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Częstochowskiej zostałem powołany na funkcję **promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim mgr. inż. Krzysztofa Maklesa** (praca pt.: „Analiza wpływu kontrolowanej pulsacji łuku na transport ciekłego metalu elektrod rdzeniowych przeznaczonych do napawania utwardzającego”), nr 638/2017/2018, otwarty 27.08.2018r., przewidywany termin obrony czerwiec 2019 r.

Zagraniczne i krajowe staże przemysłowe

W 2009 roku odbyłem **3 miesięczny zagraniczny staż przemysłowy** na stanowisku inżyniera spawalnika w przedsiębiorstwie METAL-MONT Sp. z o.o. Częstochowa, w trakcie którego oddelegowany zostałem do prowadzenia nadzoru spawalniczego **w projekcie Energetyki Wiatrowej w Niemczech („Bard Offshore 1”. European Energy Programme for Recovery EEPR) w zakresie spawania podstaw morskich wież wiatrowych 5MW typu triple offshore (400t) w przedsiębiorstwie Cuxhaven Steel Construction GmbH, Cuxhaven, Niemcy.** Projekt dotyczył budowy pierwszej komercyjnej farmy wiatrowej na Morzu Północnym o mocy 400MW. Okres stażu zagranicznego obejmował zatrudnienie w dwóch kontraktach w terminach od 17.03.2009r. do 30.04.2009 r. oraz od 06.07.2009 r. do 31.07.2009 r. na stanowisku inżyniera spawalnika (EWE).

Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie

Opiniowałem również projekty o innowacyjności realizowane w ramach Programu Regionalnego Narodowa Strategia Spójności, Europejskiego Funduszu Rozwoju dla przedsiębiorstw z branży spawalniczej m.in. projekt pt.: „*Spawanie metodą SAW prądem przemiennym wraz z wykorzystaniem monitoringu parametrów spawalniczych w procesach produkcyjnych, jakościowych oraz całkowitej optymalizacji produkcji spawalniczej z wykorzystaniem urządzenia PowerWave AC/DC 1000 SD. 2012*” dla Cermar Industry Sp. z o.o. oraz projekt pt.: „*Spawanie metodą MIG/MAG zaawansowanymi trybami wraz z wykorzystaniem monitoringu parametrów spawalniczych w procesach produkcyjnych, jakościowych oraz całkowitej optymalizacji produkcji spawalniczej z wykorzystaniem urządzenia PowerWave S700*” dla HYDRO-NAVAL Adkonis, Michałek, Sobków Spółka Jawna. W trakcie swojej działalności naukowej recenzowałem również 3 publikacje naukowe w specjalistycznym czasopiśmie - Przegląd Spawalnictwa.

Udział w zespołach eksperckich i konkursowych

W 2011 roku byłem członkiem Zespołu Ekspertów opiniującego Projekt Wdrożenia pt.: „Rozbudowa i modyfikacja informatycznego systemu informacji i komunikacji Instytutu

Spawalnictwa w celu utworzenia informatycznej platformy spawalniczej” dotyczącego rozbudowy i modyfikacji systemu informacji i komunikacji Instytutu Spawalnictwa. **Projekt nr POIG 02.03.00-00-003/10** finansowanego z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego, Innowacyjna Gospodarka Narodowa Strategia Spójności.

Tabela 3. Zestawienie najważniejszych osiągnięć naukowych i dydaktycznych po uzyskaniu stopnia doktora.

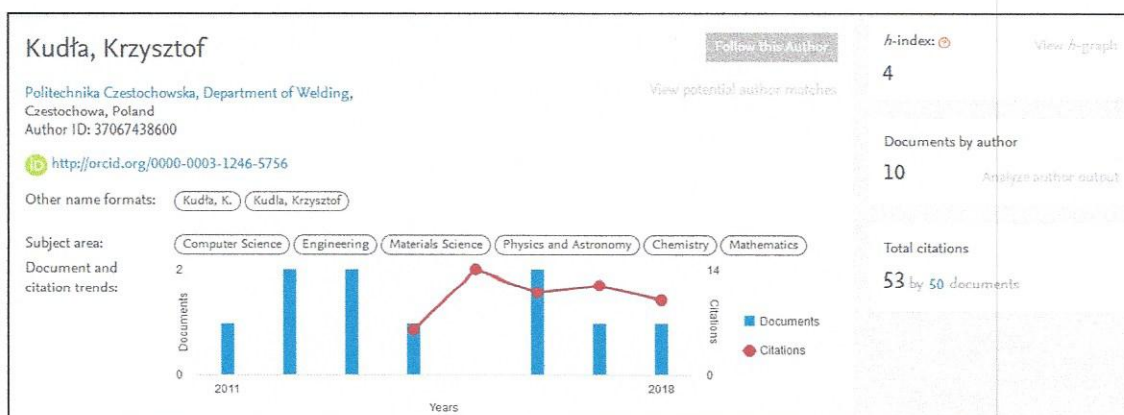
Rodzaj publikacji				Liczba	
				Punkty MNiSW	Liczba publikacji
Publikacje	publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports posiadające współczynnik wpływu IF	230 (30*)	9 (1*)		
	udzielone patenty międzynarodowe i krajowe	200	7		
	udzielone prawa ochronne na wzory użytkowe i przemysłowe	15	1		
	wynalazki oraz wzory użytkowe i przemysłowe, które uzyskały ochronę i zostały wystawione na międzynarodowych lub krajowych wystawach	0	3		
	publikacje w czasopismach nie posiadających współczynnika wpływu (IF) wykaz B MNiSW w tym indeksowane w bazie Scopus	204	30		
	autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych w rozdziałach lub fragmentach monografii krajowych	0	3		
	publikacje w czasopiśmie krajowym albo zagranicznym oraz w materiałach konferencyjnych spoza wykazu MNiSW	0	14		
	publikacje prac badawczych wykonanych w ramach projektów B+R oraz opracowania w ramach działalności statutowej i badań własnych	0	28		
Razem publikacje i patenty		649	95		
Udział w projektach badawczych					
Projekty	MNiSW/NCN/NCBiR – główny wykonawca		4		
	BW/BS – kierownik projektów		17		
	Kierownik projektów realizowanych we współpracy z przedsiębiorcami		2		
	Udział w zespołach eksperckich i konkursowych		1		
Organizacja oraz udział w konferencjach naukowych					
Konferencje	Wygłoszenie referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych		21		
	Udział w komitetach organizacyjnych międzynarodowych i krajowych konferencji i seminariów		6		
	Udział w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych		37		
Nagrody i wyróżnienia					
Osiągnięcia	Zagraniczne nagrody za działalność naukową		12		
	Międzynarodowe nagrody za działalność naukową		3		
	Krajowe nagrody za działalność naukową		9		
	Otrzymane nagrody i wyróżnienia poza naukowymi		3		
Staże w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich			0		
Staże przemysłowe krajowe i zagraniczne			2 (11 tyg. Niemcy)		
Działalność dydaktyczna					
Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze promotora pomocniczego			1		
Opieka naukowa nad studentami kół naukowych i promotorstwo prac dyplomowych			170		
Wskaźniki oceny dorobku naukowego (dane bibliometryczne PCz)					
Źródło	Web of Science	Scopus	Google Scholar	Impact Factor	
Liczba cytowań ogółem	36 (34)	53 (51)	160 (147)	10,719	
Indeks Hirscha H	3 (3)	4 (4)	7 (6)		

* - publikacja [A18] pozytywnie zrecenzowana i oczekująca na druk (potw. zał.7)

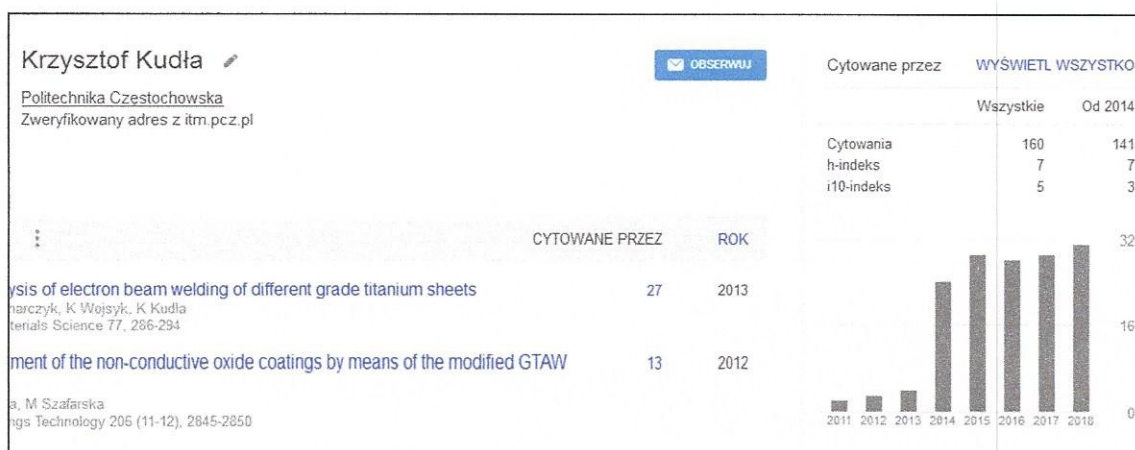
Tabela 4. Zestawienie osiągnięć naukowych i dydaktycznych przed i po uzyskaniu stopnia doktora

Wykaz osiągnięć	Przed doktoratem	Po doktoracie	Suma
Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports	0	9	9
Udzielone patenty międzynarodowe i krajowe	0	7	7
Udzielone prawa ochronne na wzory użytkowe i przemysłowe	0	1	1
Wynalazki oraz wzory użytkowe i przemysłowe, które uzyskały ochronę i zostały wystawione na międzynarodowych lub krajowych wystawach	0	3	3
Publikacje w czasopiśmie nie posiadającym współczynnika wpływu (IF) wykaz B MNiSW	3	26	29
Publikacje w czasopiśmie krajowym albo zagranicznym oraz w materiałach konferencyjnych spoza wykazu MNiSW	1	14	15
Autorstwo monografii lub fragmenty w monografiach	0	3	3
Opracowania w ramach działalności statutowej i badań własnych	6	17	23
Wykonanie ekspertyz i innych opracowań na zamówienie przedsiębiorców i innych podmiotów realizujących zadania publiczne	0	28	28
Udział w projektach badawczych (KBN/MNiSW/NCN/NCBiR)	2	4	6
Międzynarodowe (M) i krajowe (K) nagrody za działalność naukową	0	15M 9K	24
Wygłoszenie referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych	1	22	23
Udział w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych	1	31	32
Udział w komitetach organizacyjnych międzynarodowych i krajowych konferencji i seminariów	0	6	6
Otrzymane nagrody i wyróżnienia poza naukowymi	1	3	4
Kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z przedsiębiorcami	0	2	2
Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism	0	0	0
Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych	0	2	2
Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze promotora pomocniczego	0	1	1
Opieka naukowa nad studentami kół naukowych (KN) i promotorstwo prac dyplomowych (PD)	8 PD	82KN 88PD	178
Recenzje publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych	0	3	3
Stáže w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich	0	0	0
Zagraniczne staże przemysłowe	0	2 (11 tyg.)	2
Udział w zespołach eksperckich i konkursowych	0	1	1

Wydruk z bazy Scopus



Wydruk z bazy Google Scholar



Sumaryczna liczba punktów wg wykazu MNiSW wynosi 649, w tym liczba punktów publikacji wchodzących w skład cyklu powiązanego tematycznie: 399 (z uwzględnieniem udziału autorskiego: 212,35). Sumaryczny IF= 10,719 (w tym IF publikacji wchodzących w skład cyklu powiązanego tematycznie: 8,24).

Kudła K *Kudła*