

Autoreferat
w postępowaniu habilitacyjnym

1. Imię i nazwisko: Krzysztof Mroczka

2. Dyplomy, stopnie naukowe

- Stopień naukowy Doktora nauk technicznych, dyscyplina: *Inżynieria materiałowa*, specjalność: *Inżynieria spajania* – Wydział Metalurgii i Inżynierii Materiałowej, Akademia Górniczo – Hutnicza w Krakowie, 2002 r. Tytuł dysertacji doktorskiej: „Struktura i właściwości strefy wpływu ciepła w stalach o dużej wytrzymałości poddanych cykлом cieplnym” (praca wyróżniona). Studia doktoranckie, Wydział Metalurgii i Inżynierii Materiałowej, Akademia Górniczo – Hutnicza w Krakowie, 1996 – 2001 r.
- Tytuł zawodowy Inżyniera – drugi fakultet, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki, Akademia Górniczo – Hutnicza w Krakowie, 2000 r.
- Tytuł zawodowy Magistra – Wydział Matematyczno-Fizyczno-Techniczny, Wyższa Szkoła Pedagogiczna w Krakowie, praca magisterska wyróżniona, 1996 r.

3. Zatrudnienie

- Od 2002 – adiunkt, Wydział Matematyczno-Fizyczno-Techniczny, Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie.
- 1996 – 2002 – asystent, Wydział Matematyczno-Fizyczno-Techniczny, Wyższa Szkoła Pedagogiczna, następnie Akademia Pedagogiczna, obecnie Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie.

4. Osiągnięcie 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. nr 65, poz. 595 ze zm.):

- Autor: Krzysztof Mroczka, monografia, pt: „Charakterystyka mikrostruktury i właściwości zgrzein FSW wybranych stopów aluminium”, wydano w 2014 r., Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Pedagogicznego w Krakowie. Praca zrealizowana w ramach grantu habilitacyjnego nr NN 508 618940.
- Omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania:

Moja działalność naukowo-badawcza, po doktoracie (od 2002 r.), pozostaje w obszarze specjalności *Inżynieria spajania* i koncentruje się głównie wokół różnych aspektów technologii Friction Stir Welding (FSW) – nowoczesnej, perspektywicznej i wciąż słabo rozpoznanej metody zgrzewania materiałów. Złożona mikrostruktura i właściwości zgrzein wybranych stopów aluminium, powstających w procesie FSW, stały się głównym przedmiotem działań badawczych zrealizowanego przeze mnie projektu habilitacyjnego, którego byłem kierownikiem ([P1] – załącznik). Rezultaty prac opublikowano w przedmiotowej monografii [A1], której kluczowe tezy scharakteryzowałem poniżej.

Aspekt technologiczny

Odmiennosc technologii FSW od znanych technik spawalniczych związana jest z wykorzystaniem odkształcenia plastycznego generowanego przez odpowiednio wyprofilowane narzędzie, jako przyczyny wytworzenia zgrzeiny w obszarze łączenia elementów. Metoda porównywana jest ze spawaniem, gdyż umożliwia wykonywanie takich samych typów złącz (doczołowe, nakładkowe, typu T itd.) długich elementów (nawet kilkanaście metrów), a jednocześnie posiada szereg dodatkowych zalet. Do podstawowych zalicza się niską temperaturę procesu spajania, który prowadzony jest w stanie stałym. Jedynym wymogiem stawianym materiałom łączonym tą metodą jest odpowiednio duża plastyczność przy temperaturze zgrzewania. W praktyce oznacza to możliwość spajania materiałów niespawalnych, a także łączenie ze sobą elementów znacznie różniących się składem chemicznym, mikrostrukturą oraz właściwościami fizykochemicznymi i mechanicznymi. Spajanie w technologii FSW ma więc duże znaczenie dla rozwoju różnych gałęzi przemysłu, co już znalazło odzwierciedlenie w zainteresowaniu się nową metodą zgrzewania przez potentatów w przemyśle lotniczym oraz samochodowym.

Przedmiot badań i eksperymentów

Przedmiotem badań były zgrzeiny wybranych stopów aluminium. Procesowi FSW poddano odlewniczy stop AlSi9Mg (silumin), mający formę odlanej płyty, który zgrzewano ze stopami aluminium 2017A oraz 6082 w postaci komercyjnie wytwarzanych blach. Zgrzewane materiały charakteryzuje znacząca odmiennosc składu chemicznego, fazowego, mikrostruktury oraz zróżnicowanie właściwości mechanicznych.

Eksperymenty zgrzewania wykonano stosując konwencjonalne narzędzie FSW oraz typu Dual-speed, które umożliwia uzyskanie innej prędkości obrotowej wieńca opory w stosunku do prędkości trzpienia.

Zastosowano szerokie spektrum parametrów zgrzewania, w szczególności koncentrując uwagę na dużej prędkości liniowej (powyżej 1000 mm/min).

W obszarze metodyki badań zastosowano podejście koncepcyjne do analizy złączy, w tym nowatorsko wykorzystano metodę PALS (Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy) – do oceny koncentracji wakansów i gęstości dyslokacji w wybranych obszarach zgrzein.

Uwarunkowania i cele

Podczas procesu FSW, w wyniku oddziaływania narzędzia, następuje odkształcenie plastyczne, które jest niejednorodne w obszarze zgrzewania oraz zmienne w trakcie procesu. Są to główne przyczyny znacznych ograniczeń w dokonaniu opisu warunków, w jakich tworzy się mikrostruktura zgrzeiny. Z tego powodu, jako podstawę charakterystyki przyjmuje się badania i analizy poszczególnych obszarów złącza.

Jakość zgrzeiny jest uwarunkowana przez kilka czynników, do których zalicza się m.in.: parametry procesu i warunki jego przeprowadzenia oraz rodzaj narzędzia FSW, w tym kształt i wymiary głównych składowych (trzcienia i wieńca opory). Większość czynników ma istotny wpływ na rezultat zgrzewania. Występuje również zależność między nimi, co często powoduje, że tzw. pole warunków zgrzewania (koincydencja parametrów, narzędzia itd.), zapewniające prawidłowość zgrzeiny, jest bardzo ograniczone, szczególnie w przypadku wykonywania zgrzein różnoimiennych materiałów o znacznie zróżnicowanych właściwościach. Powoduje to, że powstająca mikrostruktura może charakteryzować się różnymi cechami i znaczną niejednorodnością, a także istnieć zagrożenie powstania wad oraz ukrytych niedoskonałości.

Mając na uwadze powyższe uwarunkowania, wyznaczyłem następujące cele:

- określenie budowy makroskopowej zgrzein na przekrojach poprzecznych oraz wzdłużnych, szczególnie w odniesieniu do złączy wykonanych innowacyjnym narzędziem typu Dual-speed,
- ustalenie wpływu ruchu narzędzia na budowę makro i mikrostruktury,
- scharakteryzowanie mikrostruktury w wybranych obszarach zgrzein (strona natarcia, spływu oraz strefy przy licu i na wysokości jądra zgrzeiny) i wykazanie zakresu niejednorodności,
- zbadanie wpływu odkształcenia plastycznego na fragmentację cząstek faz (pierwotnych) – eutektycznego Si oraz fazy żelazowej, w stopie AlSi9Mg, w wybranych strefach zgrzein,

- ustalenie wielkości ziarna osnowy w wytypowanych strefach,
- określenie niejednorodności w mikroobszarach na podstawie map rozkładu orientacji ziaren na przekrojach wzdłużnych,
- dokonanie opisu stanu mikrostruktury wybranych obszarów złącz ze zwróceniem uwagi na struktury dyslokacyjne i wydzielenia umacniające,
- wykazanie zmian stopnia zdefektowania mikrostruktury na przekrojach wzdłużnych, na podstawie badań metodą PALS,
- określenie prawdopodobnego mechanizmu transformacji mikrostruktury wywołanego odkształceniem plastycznym w wybranych obszarach zgrzeiny,
- scharakteryzowanie przykładowych granic na styku stopów w środkowej i górnej części zgrzein,
- wskazanie właściwości mechanicznych złącz, wyznaczenie rozkładów twardości oraz wytrzymałości na rozciąganie,
- ujawnienie stref o mniejszej wytrzymałości ze szczególnym uwzględnieniem miejsc newralgicznych,
- zbadanie wpływu procesów starzenia, w tym obróbki cieplnej, na właściwości złącz,
- ustalenie oddziaływania parametrów zgrzewania na jakość zgrzein,
- opracowanie parametrów i warunków zgrzewania zapewniających dużą wydajność (powyżej 500 mm/min),
- porównanie efektywności narzędzi: typu Dual-speed i konwencjonalnego narzędzia FSW,
- weryfikacja metodyki badań zgrzein FSW,
- ocena przydatności metody PALS do analiz złącz FSW,
- opracowanie modelu kierunków płynięcia materiału w ostatniej fazie tworzenia się zgrzeiny wykonanej narzędziem typu Dual-speed.

Wyniki

Ogólna budowa zgrzein FSW wykazuje asymetrię wynikającą z wypadkowego, jednokierunkowego ruchu (obrotowego i liniowego) narzędzia. Pozostałe cechy mikrostruktury, tj. budowa makro i mikroskopowa, są zmienne. W badanym złączu, wykonanym konwencjonalnym narzędziem, stwierdzono obecność tzw. jądra zgrzeiny w całości zbudowanego z materiału znajdującego się po stronie natarcia. Istotne zwiększenie prędkości obrotowej trzpienia (względem wieńca) wywołuje zmianę budowy zgrzeiny – jądro zanika, zwiększa się natomiast udział obszarów całkowitego wymieszania stopów

(o wypadkowym składzie chemicznym zgrzewanych materiałów). Zmiana układu makroskopowego jest związana ze zwiększonym wpływem wieńca opory na końcowy układ mikrostruktury nawet w niżej położonych strefach, w których po stronie natarcia obserwuje się niekorzystne kierunki przemieszczającego się materiału (podczas procesu). Jest to przyczyną tworzenia się wad w zgrzeinie konwencjonalnej. W zgrzeinie wykonanej narzędziem zmodyfikowanym (Dual-speed) w newralgicznym obszarze nie występują wady, ale zaobserwowano ograniczoną wytrzymałość. Wyniki dotyczące badań makroskopowych ujawniają ponadto jeszcze inne istotne cechy zgrzein: niejednorodność w wymiarze 3D oraz cykliczność układu mikrostruktury na kierunku liniowego ruchu narzędzia, przy czym periodyczność układu jest w korelacji z pojedynczym obrotem narzędzia. W przypadku stosowania rozwiązania Dual-speed stwierdzono, że ta zależność dotyczy ruchu wieńca opory, co również potwierdziło wcześniejsze spostrzeżenia o dużym wpływie tej części narzędzia na procesy zachodzące w niższych partiach tworzącej się zgrzeiny.

Wykazana w badanych zgrzeinach niejednorodność makroskopowa jest powiązana z budową mikroskopową. Odształcenie plastyczne, generowane podczas procesu, jest przyczyną rozdrobnienia mikrostruktury – osnowy oraz cząstek znajdujących się w materiale. Stopień rozdrobnienia nie jest jednakowy w objętości zgrzeiny. Z tego powodu szczegółowej analizie poddano obszary położone przy licu oraz w środkowej części zgrzeiny, wytypowane na podstawie wcześniejszych badań i analizy literatury. Obszary te znajdowały się na drodze ruchu narzędzia, co oznacza uformowanie mikrostruktury poprzedzone transportem materiału(ów) wokół narzędzia. Warunki odształcenia spowodowały większe rozdrobnienie ziaren w środkowej części zgrzeiny niż pod licem. Najmniejsze ziarna (średnia wielkość 2,2 μm) stwierdzono w jądrze zgrzeiny konwencjonalnej. Dla pozostałych obszarów średnie wielkości nie przekroczyły 4,3 μm , co świadczy o występowaniu struktury drobnoziarnistej. Stan osnowy, jaki został stwierdzony w badaniach, wskazuje na niejednoznaczny mechanizm transformacji mikrostruktury (pod wpływem procesu zgrzewania). W górnych warstwach obu typów zgrzein osnowa w większości ulegała zdrowieniu podczas ostatniego etapu tworzenia się połączenia. W środkowej części zgrzein, szczególnie w jądrze złącza konwencjonalnego, przeważa rekrytalizacja (dynamiczna). Istnieje duże prawdopodobieństwo, że transformacja mikrostruktury wielu obszarów następowała w więcej niż jednym etapie. To znaczy: na zrekrystalizowane dynamicznie ziarna mogło nałożyć się kolejne (mniejsze) odształcenie plastyczne. Wywołało to następstwa w postaci podwyższonej gęstości dyslokacji oraz zainicjowanie kolejnej transformacji, efektem której są zbliżone orientacje krystalograficzne niektórych sąsiadujących ziaren i częściowa zmiana ich kształtu przy zachowaniu ogólnie

drobnoziarnistej mikrostruktury. Badania metodą PALS potwierdzają zróżnicowane ilości defektów na przekroju (wzdłużnym) zgrzeiny, choć największą gęstość dyslokacji stwierdzano w strefie odkształcenia pośredniego, tj. poza obszarem bezpośredniego działania narzędzia, ale przed granicą ze strefą wpływu ciepła. Nie dochodzi tam do rozdrobnienia mikrostruktury.

Oprócz podwyższonych gęstości dyslokacji w środkowej części zgrzein (głównie w stopie 2017A), badania TEM wykazały obecność nanometrycznych wydzielen tworzących się na dyslokacjach. Oznacza to, że podczas procesu FSW doszło do przynajmniej częściowego przesycenia osnowy. Konsekwencją tego jest istotna konkluzja, że złącze FSW może być w stanie metastabilnym bezpośrednio po zgrzewaniu, pomimo wystąpienia podczas procesu relatywnie niskich wartości temperatury (lokalnie do ok. 520 °C) w bardzo krótkim czasie (ok. 0,5 do 1 sekundy).

Elektronową mikroskopię transmisyjną wykorzystano także do scharakteryzowania granicy między stopami w dolnej części złącz stopów AlSi9Mg/2017A oraz AlSi9Mg/6082 wykonanych narzędziem Dual-speed. Na granicy (widocznej makro i mikroskopowo) zachowana jest ciągłość metalurgiczna. W wyniku odkształcenia plastycznego i następstw odnowy struktury powstały nowe ziarna, likwidując powierzchnię styku obu płynących strumieni (stopów). Ten typ (optymalnego) połączenia nie występuje jednak na wszystkich granicach między stopami, również w zgrzeinach wykonanych narzędziem konwencjonalnym.

Innym istotnym wynikiem badań (SEM) mikrostruktury jest stwierdzenie obecności mikro-pustek na granicach cząstek Si z osnowy (w stopie AlSi9Mg). Mikrowady występują tylko w określonych miejscach w zgrzeinach. W złączach konwencjonalnych są to pasma w pobliżu lica zgrzeiny. Natomiast w zgrzeinach wykonanych narzędziem Dual-speed obszary te rozpoznano w środkowej części złącza. Jest to szczególnie istotna obserwacja, gdyż tym obszarom towarzyszą inne cechy mikrostruktury, świadczące o braku intensywnego mieszania materiału przez narzędzie FSW. W strefach poddanych ograniczonemu płynięciu materiału mikropustki występują (lokalnie) także w miejscach niezwiązanych z obecnością drugich faz. Są one pozostałością po tzw. rzadziznach (wadach odlewniczych), występujących w materiale rodzimym, które nie zostały całkowicie zamknięte przez odkształcenie plastyczne.

Procesowi odkształcenia plastycznego osnowy towarzyszy również fragmentacja kruchych cząstek. Analizie poddano eutektyczne wydzielenia Si oraz fazę żelazową zidentyfikowaną jako $Al_{17}(Fe_{3,2}Mn_{0,8})Si_2$, które występują w odlewniczym stopie AlSi9Mg.

Zależnie od miejsca w zgrzeinie rozdrobnienie cząstek jest różne, co również świadczy o niejednorodnych warunkach płynięcia materiału podczas procesu. Fragmentacja cząstek w zgrzeinie konwencjonalnej w pobliżu lica jest mniejsza niż w analogicznych miejscach w zgrzeinie wykonanej narzędziem zmodyfikowanym. Z kolei podczas tworzenia zgrzeiny narzędziem Dual-speed, relatywnie większe cząstki powstały w środkowej części strony spływu. Biorąc pod uwagę wyniki analiz obu typów zgrzein, stwierdzono, że średnia wielkość cząstek nie przekracza 3,6 μm .

Wspomniana wcześniej metastabilność mikrostruktury została potwierdzona również w badaniach właściwości mechanicznych. Rozkłady twardości wyznaczone na przekrojach poprzecznych w różnej odległości od lica, wykazały zmniejszenie twardości, szczególnie stopu 2017A (w obu rodzajach zgrzein) w wyniku procesu zgrzewania. Starzenie naturalne niejednoznacznie wpływa na zmiany twardości obu stopów – wyraźne utwardzenie zaobserwowano jedynie dla stopu AlSi9Mg w dolnych obszarach zgrzeiny wykonanej narzędziem zmodyfikowanym. Z kolei obróbka cieplna (starzenie sztuczne) obu rodzajów złączy wywołuje wyraźny przyrost twardości stopów do poziomów nawet przewyższających twardość materiałów rodzimych.

Wytrzymałość na rozciąganie analizowano, poddając próbki złączy rozciąganiu zarówno na kierunku prostopadłym, jak również równoległym do kierunku zgrzewania. Wyniki wykazały, że wytrzymałość zgrzeiny w każdym przypadku jest większa od wytrzymałości materiału rodzimego stopu AlSi9Mg. Na podstawie analiz (SEM) przełomów próbek rozciąganych wzdłużnie stwierdzono obecność powierzchni granicznych między obszarami (stopami), na których występuje ograniczona wytrzymałość. Takie miejsca stwierdzono po stronie natarcia w górnych strefach zgrzein wykonanych narzędziem Dual-speed oraz w zgrzeinach konwencjonalnych w dolnym obszarze działania trzpienia, również po stronie natarcia. Niezależnie od obecności miejsc słabszych większą wytrzymałość wykazują złącza wykonane narzędziem zmodyfikowanym. Wytrzymałość na rozciąganie R_m osiąga wartość 236 MPa.

Wynikiem przeprowadzonych badań są także wnioski technologiczne. Pole parametrów zgrzewania stopów aluminium AlSi9Mg i 2017A jest bardzo zawężone w przypadku dużej prędkości zgrzewania i stosowania narzędzia konwencjonalnego. Akceptowalne rezultaty uzyskuje się przy prędkości obrotowej 560 obr./min, liniowej 1120 mm/min, pochyleniu narzędzia $1,5^\circ$, z przesunięciem linii zgrzewania w kierunku strony natarcia, gdzie znajduje się stop 2017A. Narzędzie Dual-speed jest wyraźnie skuteczniejsze i umożliwia uzyskanie dobrej jakości zgrzein bez względu na ustawienie zgrzewanych stopów

względem ruchu narzędzia. Sugerowane parametry zgrzewania: prędkość obrotowa trzpienia 1400 obr./min, wieńca 350 obr./min, prędkość liniowa 1120 mm/min, pochylenie narzędzia 1,5°. Ten typ narzędzia sprawdza się również przy zgrzewaniu stopów AlSi9Mg/6082. Ponadto, zadowalającą jakość złączy można uzyskać przy parametrach zgrzewania o współczynniku x/y (prędkości obrotowej do liniowej) mniejszym od 1, przy jednocześnie dużej wydajności zgrzewania (powyżej 1000 mm/min.)

Zakres wykonanych badań upoważnia również do sformułowania zaleceń z zakresu metodyki prowadzenia badań zgrzein FSW. Pełna charakterystyka mikrostruktury zgrzeiny powinna być wykonana nie tylko w oparciu o analizę przekrojów poprzecznych prostopadłych do lica, ale również wzdłużnych (równoległych do lica złącza). Dla ujawnienia wszystkich cech mikrostruktury, a także miejsc z ukrytymi niedoskonałościami (niewidocznymi w standardowych obserwacjach mikroskopowych), wykonać należy zerwanie próbki złącza w statycznej próbie rozciągania na kierunku liniowego ruchu narzędzia oraz dokonać analizy przełomu. Ponadto stwierdzono, że metoda PALS może być stosowana do analizy zmian koncentracji defektów w złączach FSW w poszczególnych obszarach, a uzyskane wyniki mogą posłużyć, jako dane cząstkowe o mikrostrukturze poszczególnych obszarów zgrzein, do obliczeń i stworzenia mapy rozkładu wytrzymałości. Analiza układu wydzielen, rozkładu stopów oraz charakteru przełomów pozwala określić główne wektory płynięcia materiału dla danego przekroju zgrzeiny, decydujące o finalnym układzie i budowie złącza.

Znaczenie i wykorzystanie wyników

Przeprowadzone eksperymenty, badania i analizy, pozwoliły osiągnąć zakładane cele i na tej podstawie sformułować szereg wniosków, istotnych pod względem naukowym, ale również technologicznym, dla poszerzenia wiedzy o budowie, powstawaniu i właściwościach zgrzein FSW oraz przydatności wciąż nie w pełni rozpoznanej technologii zgrzewania, również do wykonywania złączy różnomiennych stopów aluminium. Skuteczne wytwarzanie tego typu zgrzein otwiera nowe możliwości projektowania konstrukcji, elementów maszyn oraz podzespołów, dostosowanych do współczesnych potrzeb, przy jednocześnie relatywnie niskich nakładach. Przykładem bezpośredniego wykorzystania wyników omawianych badań może być zastosowanie wskazanych zaleceń i parametrów zgrzewania do wykonania zespolenia (w formie zgrzeiny) dolnej części zbiornika wykonanego metoda odlewania, z pokrywą wyciętą z blachy. Gniazdo posadowienia pokrywy jest tak uformowane, że przy zgrzewaniu wytwarzane będzie złącze doczołowe. W ten sposób powstaje podzespół

(zbiornik) o rozbudowanym wnętrzu, szczelnie zamknięty relatywnie cienkim, ale wytrzymałym materiałem.

Innym przykładem wykorzystania wyników jest jednoznaczne wskazanie na narzędzie typu Dual-speed jako znacznie skuteczniejsze od konwencjonalnego i perspektywiczne do wykonywania zgrzein między materiałami o znacznie zróżnicowanych właściwościach.

W obszarze popularyzacji wiedzy oraz dydaktycznym rezultaty badań mogą być wykorzystane do prezentacji cech zgrzein FSW również wykonanych z zastosowaniem nietypowego (prototypowego) narzędzia. Ponadto w monografii omówiono genezę i cechy technologii FSW oraz zaprezentowano specjalistyczne urządzenia do jej stosowania.

Wyniki częściowe badań prezentowane były na konferencjach międzynarodowych [K2], również o wysokim prestiżu naukowym: *Materials Science and Technology* w USA [R3] oraz *International Friction Stir Welding Symposium* w USA [K1], a następnie w Chinach [R1], a także na cenionych seminariach naukowych w kraju, w tym na otwartych zebraniach członków Komisji Metalurgiczno-Odlewniczej Polskiej Akademii Nauk w Instytucie Metali Nieżelaznych w Gliwicach [R4] oraz na Wydziale Odlewnictwa Akademii Górniczo Hutniczej w Krakowie ([R7] prezentowano badania wstępne).

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

5.1. Praca eksperymentalno-badawcza

Technologia FSW

Realizacja projektu badawczego-habilitacyjnego, którego założenia i rezultaty omówiłem powyżej, jest jedynie częścią moich prac związanych z analizą zgrzein FSW stopów aluminium AlSi9Mg i 2017A. Badania prowadziłem również w odniesieniu do złącz wykonywanych przy znacznej modyfikacji procesu zgrzewania, polegającej na zastosowaniu podgrzewania obszaru spajania od strony grani złącza [A2]. Mojego autorstwa jest projekt układu i dobór elementów grzewczych umożliwiających realizację procesu w takich warunkach. W tych badaniach koncentrowałem uwagę nie tylko na aspektach makro i mikrostruktury złącz, ale rozważaniom poddałem również wpływ odkształcenia plastycznego na fragmentację cząstek eutektycznego Si i fazy żelazowej w stopie odlewniczym, który poddano odkształceniu plastycznemu z zastosowaniem narzędzia FSW. Wyniki tych prac omówiłem szczegółowo w artykule [B1] oraz prezentowałem na międzynarodowej konferencji *Advanced Materials & Technologies* [R2].

Problem fragmentacji cząstek oraz tworzenia się mikro-pustek na granicach cząstka/osnowa badany był przeze mnie również w odniesieniu do innych zgrzein FSW

z udziałem stopu AlSi9Mg [A3] w ramach współpracy z zespołem badawczym Zakładu Technologii Zgrzewania i Inżynierii Środowiska Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach. Wyrazem tych wieloletnich wspólnych działań są również prace dotyczące zgrzein FSW odlewniczych stopów magnezu [A9], gdzie przedmiotem zainteresowania był również problem wpływu parametrów zgrzewania na budowę zgrzein.

Wraz ze wspomnianym zespołem wykonywałem także badania w ramach grantów: *Wytwarzanie bimetalicznych komponentów z zastosowaniem zaawansowanej techniki zgrzewania tarcowego* [P3] oraz *Development of an in-process quality assurance system for friction stir welding* [P4] oraz szeregu niesformalizowanych prac, dotyczących zgrzein FSW stopów aluminium serii 5xxx i 6xxx.

Na mój wkład w rozwój wiedzy na temat zgrzein wykonanych technologią FSW składają się również działania podjęte w ramach projektu badawczego: *Korelacja mikrostruktury i właściwości połączeń wykonanych metodą Friction Stir Welding wybranych stopów aluminium* [P2], którego byłem kierownikiem. Przedmiotem badań były złącza stopów aluminium 2017A, 7075, 6013 oraz 6082. W tym postępowaniu oprócz szczegółowych charakterystyk mikrostruktury, wykonanych z zastosowaniem różnych metod analizy, także metody PALS [B3], zwrócono uwagę na problem stabilności mikrostruktury, szczególnie stopów aluminium umacnianych wydzieleniowo, które podczas procesu FSW uległy częściowemu przesyceniu pomimo relatywnie niskiej temperatury i bardzo krótkiego czasu jej oddziaływania (o czym wspominałem już wcześniej). Zaobserwowano w części zgrzein w obszarze największego odkształcenia (jądrze zgrzeiny) podwyższone gęstości dyslokacji, pomimo innych cech mikrostruktury wskazujących na zaistnienie rekrytalizacji dynamicznej. Istotnym było także określenie wpływu obróbki cieplnej na właściwości zgrzein również w odniesieniu do poszczególnych stref złącza. Badania prowadziłem w odniesieniu do zgrzein stopów 2017A [A8, B5, B14, B16, B24, B25], 6013 i 6013/2017A [B6, B11], 6082 [B8], 7075 [B22], 2017A/7075 [A8].

Zagadnienia dotyczące wymienionych badań prezentowane były na prestiżowych międzynarodowych konferencjach m.in.: *International Friction Stir Welding Symposium* w Niemczech [R6, R22], *Materials Science Conference Advanced Materials & Technologies* [K3], *International Conference on Electron Microscopy* [K6] oraz *Technology* na Słowacji [R5, R8], *International Congress on Welding and Joining Technologies* w Hiszpanii [R9], *International Conference Aluminium 2005* [R13] a także na konferencji krajowej *XIV Konferencja Sprawozdawcza „Metalurgia 2006”* [R11] i *International Conference Engineering and Education* [K5, K7]. Wyniki prezentowane były również na seminariach,

w tym *otwartym seminarium w Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie* [R10].

Brałem także udział w badaniach nad zastosowaniem technologii FSW do przetwarzania materiałów metalicznych. Proces ten określany jest akronimem FSP (friction stir processing). Badania dotyczyły stopów odlewniczych, w tym kompozytu na osnowie siluminu z udziałem cząstek SiC, którego mikrostrukturę, po procesie FSP, dodatkowo badano z zastosowaniem mikrotomografii komputerowej [A4].

Friction Extrusion

Zdobyte doświadczenie w pracach naukowo-badawczych oraz wnioski wynikające z badań płynięcia materiału pod wpływem wieńca opory narzędzia FSW doprowadziły do podjęcia przeze mnie zupełnie odrębnej tematyki, związanej częściowo ze słabo znaną technologią Friction Extrusion (wyciskania tarcowego), stosowaną do przetwarzania wiórów aluminiowych. Rozwinięcie tych badań zaowocowało opracowaniem nowej metody wytwarzania drutu aluminiowego z rdzeniem miedzianym. Efektem prac jest zgłoszenie patentowe: *Sposób wytwarzania materiału makroskopowo dwufazowego, zwłaszcza drutu ze stopu aluminium z rdzeniem miedzianym, urządzenia do tego sposobu oraz materiał makroskopowo dwufazowy otrzymany tym sposobem* [E1]. Prowadzone są obecnie dalsze prace.

Stale

Tematyką wpływu spawania na mikrostrukturę stali bainitycznych zajmowałem się podczas prac eksperymentalno-badawczych związanych z dysertacją doktorską, pt.: *Struktura i właściwości strefy wpływu ciepła w stalach o dużej wytrzymałości poddanych cykлом cieplnym* oraz w okresie bezpośrednio po uzyskaniu stopnia doktora (2002 – 2006) pod kierunkiem Prof. dr. hab. inż. Edmunda Tasaka na Wydziale Metalurgii i Inżynierii Materiałowej (obecnie Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej) Akademii Górniczo Hutniczej w Krakowie w ramach niesformalizowanej współpracy [B17-B20, R12, R14-R21, R23-R27]. Badania ukierunkowane były na analizę zmian mikrostruktury wywołanych cyklami cieplnymi podczas procesu spawania. Stale o strukturze bainitycznej podatne są na niekorzystne zmiany mikrostruktury, szczególnie w obszarach strefy wpływu ciepła, gdzie przekroczona została temperatura A_{c3} . Nawet średnia prędkość chłodzenia od tego zakresu temperatur może powodować formowanie się wysp martenzytyczno-austenitycznych odpowiedzialnych za istotny spadek udarności [B17-B20]. Kwestie te były przedmiotem

prezentacji na konferencjach naukowych i publikowane w materiałach konferencyjnych [R20, R21, R26].

Drugim nurtem dociekań związanym z tą grupą stali, były badania pęknięć zimnych, w tym relaksacyjnych [R14, R15, R17]. Wiedzę i doświadczenie zdobyte w powyższej tematyce badawczej wykorzystałem również podczas prac realizowanych w ramach projektu celowego: *Opracowanie i wdrożenie technologii spawania nowej stali bainitycznej TP24 (7CrMoVTiB10-10) przeznaczonej na elementy kotłów* [P6].

Inne badania, jakie wykonywałem w odniesieniu do materiałów na osnowie żelaza dotyczyły wpływu odkształcenia blach grubych, wykonanych z żelaza Armco, na ich właściwości mechaniczne [R18] (w kontekście stosowania tego materiału na wanny cynkownicze). Analizowałem także mikrostruktury i mechaniczne cechy zgrzein w siatkach zbrojeniowych [R16] oraz prowadziłem badania stali niskowęglowych, z zastosowaniem kontrastu interferencyjno-różniczkowego Nomarskiego [R12].

Materiały ceramiczne

Badania związane z grupą materiałów ceramicznych dotyczyły głównie związków tlenkowych (z których część wykazuje właściwości ferroelektryczne) i obejmowały ich mikrostruktury po procesie konsolidacji. W badaniach stosowałem skaningową mikroskopię elektronową (SEM) [A5, A6, B9, B10, B12]. Prace te wynikały z mojej współpracy z Instytutem Fizyki Uniwersytetu Pedagogicznego w Krakowie.

Brałem również udział w badaniach finansowanych przez EU: *Spiekane materiały ceramiczne przeznaczone na ostrza narzędzi do obróbki z wysokimi prędkościami skrawania* [P5]. Moja aktywność dotyczyła analizy technologicznej metod łączenia ceramiki ze stalą.

Inne prace eksperymentalno-badawcze

Byłem zaangażowany w badania nad innowacyjną metodą wytwarzania kompozytów na osnowie metalicznej, które zostały zwieńczone zgłoszeniem patentowym pt: *Metoda wytwarzania kompozytu o osnowie faz międzymetalicznych* [E2]. Zakres prac przeze mnie wykonywanych dotyczył m.in. analizy mikrostruktury.

Z zastosowaniem SEM wykonywałem badania mikrostruktury stopów magnezu z Tb, Sm poddanych odkształceniu plastycznemu w procesie ECAP [A7].

Prowadziłem badania stopu aluminium 2017A w celu ustalenia optymalnych parametrów obróbki cieplnej zapewniających duże umocnienie [B2, K4].

Zajmowałem się również zagadnieniem specyficznych cech mikrostruktury powstałej w wyniku krystalizacji stopu 2017A po przetopieniu wiązką lasera. W obszarze przetopionym rozpoznano obecność struktur bliźniaczych [B23, K8].

Do swoich osiągnięć zaliczam także badania z zastosowaniem SEM włókien stosowanych w przemyśle włókienniczym [B7] oraz materiałów termoizolacyjnych, w tym wełny szklane i mineralne [R19].

Metodyka badań

W obszarze metodyki badań prowadziłem prace nad ustaleniem optymalnych parametrów polerowania elektrochemicznego stopu 2017A [B4]. W ramach współpracy z Instytutem Biologii Uniwersytetu Pedagogicznego w Krakowie zajmowałem się opracowaniem preparatyki przygotowania preparatów biologicznych (pyłków roślin wodnych) do obserwacji SEM, a także ustaleniem optymalnych warunków obserwacji.

5.2. Rodzaj i ilość publikacji

Mój dorobek publikacyjny obejmuje **58** pozycji, w tym **6** to monografia [A1] i rozdziały w monografiach [B21-B25], **28** prac opublikowano w specjalistycznych czasopismach [A2-A9, B1-B20], **24** w materiałach konferencyjnych krajowych i zagranicznych [R1, R3, R5, R6, R8, R9, R11-R27, K1]. Indeks Hirscha (liczony od 2009 r.) wynosi, wg.: Google Scholar 4 (52 cytowania), Scopus 2 (21 cytowań), Web of Science 1 (9 cytowań (w tym 1 autocytywanie)). Sumaryczny Impact Factor (IF) czasopism z listy JCR (zgodnie z rokiem wydania, przy tym dla publikacji z roku 2014 podano IF za rok 2013) wynosi 5,504.

5.3. Staże, szkolenia, udział w seminariach i konferencjach naukowych oraz inne formy podnoszenia kwalifikacji

Po uzyskaniu stopnia doktora brałem udział w 12 przedsięwzięciach, których celem było podniesienie moich kwalifikacji zawodowych. Do głównych zaliczam staż w Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie dotyczący stosowania skaningowej mikroskopii elektronowej i systemu EBSD w badaniach materiałowych. Odbyłem również cykl szkoleń realizowanych przez firmę JEOL, ukierunkowanych na obsługę mikroskopu SEM-JEOL6610LV i systemu EDS Firmy Oxford kompatybilny z oprogramowaniem AZtec.

Istotną formą aktywności o charakterze długoterminowego stażu są czynności eksperymentalno-badawcze, jakie wykonywałem w okresie czterech lat (od 2002 r.) pod

kierunkiem Prof. dr hab. inż. Edmunda Tasaka na Wydziale Metalurgii i Inżynierii Materiałowej (obecnie Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej) Akademii Górniczo Hutniczej w Krakowie.

Pełny wykaz mojej aktywności w omawianym zakresie zamieszczony jest w załączniku.

Brałem udział w ponad 30 konferencjach krajowych i zagranicznych oraz sympozjach naukowych, na których w większości prezentowałem referaty w formie wystąpień (w języku angielskim). Do głównych zaliczam konferencje: Materials Science and Technology (USA 2012), International Symposium on Friction Stir Welding (China 2014, USA 2012, Germany 2010), Physical Metallurgy and Materials Science Conference Advanced Materials and Technologies (Polska 2013, 2010) i International Conference on Electron Microscopy (Polska 2008). Łączna liczba osobiście wygłoszonych referatów i odczytów wynosi 21 oraz 8 prezentacji na sesjach posterowych.

5.4. Współpraca z przemysłem

Moja działalność z przemysłem obejmuje czynności badawcze, wdrożeniowe i doradcze. We współpracy z Firmą ELBIT z Tarnowa (woj. małopolskie):

- Brałem udziału we wdrożeniu, pt.: *Wysokotemperaturowa komora z rdzeniem metalowo-ceramicznym do badań tribologicznych* [E3].
- Wykonywałem badania strukturalne z uwzględnieniem analizy składu chemicznego (mikroskopia SEM, SEM-EDS) spiekanych głowic na potrzeby przemysłu górniczego (2012/13).
- Realizowałem prace zlecone finansowane z Polskiej Agencji Rozwoju Przedsiębiorczości, pt.: *Analiza właściwości mechanicznych stempli korundowych* (2008).

Z kolei współpraca z Firmą Electris z Makowa Podhalańskiego (woj. małopolskie) dotyczyła badań właściwości mechanicznych powlekanych elementów miedzianych (2014), konsultacji w zakresie technologii FSW (2014) oraz zaplanowane są także badania zgrzein FSW elementów miedzianych (wdrażanych do produkcji przez Firmę) na potrzeby przemysłu energetycznego.

5.5. Działalność dydaktyczna i organizacyjna związana z nauką

Moje zatrudnienie w jednostce akademickiej wiąże się ze znacznymi osiągnięciami i jednocześnie obciążeniami dydaktycznymi. Byłem promotorem ponad 40 prac dyplomowych (inżynierskich i magisterskich). W ostatnich czterech latach prowadziłem

zajęcia dydaktyczne w wymiarze 420 do ponad 500 godzin rocznie w zakresie następujących przedmiotów: Nauka o materiałach, Kształtowanie i badanie struktury i własności materiałów, Projektowanie i dobór materiałów do zastosowań inżynierskich, Inżynieria wytwarzania.

Opracowałem i realizowałem zajęcia laboratoryjne na kursie Fizyka z podstawami inżynierii materiałowej, przedmioty: Nauka o materiałach oraz Technologie spajania (kurs finansowany przez UE, Uniwersytet Pedagogiczny w Krakowie 2008–2010).

Jestem także autorem programu dla przedmiotów (ćwiczenia): Technologie spajania materiałów, Projektowanie i dobór materiałów, Nowoczesne materiały metaliczne oraz Nauka o materiałach 3, które realizowałem dla potrzeb indywidualnego toku studiów w latach 2010–2012.

Brałem czynny udział w opracowaniu programu nauczania dla specjalności Inżynieria materiałowa i komputerowe wspomaganie procesów produkcji, na kierunku Edukacja techniczno-informatyczna, studiów prowadzonych przez Instytut Techniki UP (2013/14).

Do ważniejszych inicjatyw dotyczących mojej samodzielnej działalności organizacyjnej lub w charakterze współorganizatora zaliczam:

- cykl pięciu seminariów naukowych pod patronatem Komisji Metalurgiczno-Odlewniczej PAN (2012 – 2014, działalność kontynuowana),
- międzynarodową konferencję, pn.: „Engineering, Computer Science and Education”, Białka Tatrzańska, listopad 2014, organizator: Komisja Metalurgiczno-Odlewnicza PAN i Instytut Techniki Uniwersytetu Pedagogicznego w Krakowie,
- coroczną międzynarodową konferencję naukową, pn.: „Engineering and Education, organizowaną przez Instytut Techniki UP w Białce Tatrzańskiej, w latach: 2006 – 2010,
- współredakcję monografii, pt. “Problems of moderns techniques in aspects of engineering and education”, Wyd. Instytut Techniki Uniwersytetu Pedagogicznego w Krakowie (2005, 2006),
- autorstwo i współautorstwo publikacji poświęconych: technologii Friction Stir Welding [B15], zastosowaniu kontrastu interferencyjno różniczkowego Nomarskiego [B13] oraz wizualizacji próby Jominy’ego [B21].

5.6. Recenzje na zlecenie czasopism naukowych

Wykonałem recenzje prac związanych z technologią Friction Stir Welding dla czasopism naukowych International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2013 Impact Factor 1.779) – 1 recenzja, Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach (2014) – 1

recenzja oraz Journal of Materials Engineering and Performance (2011 Impact Factor 0.855) – 1 recenzja.

5.7. Członkostwo w organizacjach naukowych

Uznanie mojej pozycji w środowisku naukowym znajduje również potwierdzenie w przynależności do stowarzyszeń naukowych: Komisji Metalurgiczno-Odlewniczej Polskiej Akademii Nauk, od 9.02.2012 na kadencję kończącą się w 2014/15 oraz Polskiego Towarzystwa Materiałoznawczego, od 2009 r. Zostałem również wybrany na stanowisko Zastępcy Dyrektora ds. Nauki w Instytucie Techniki Uniwersytetu Pedagogicznego w Krakowie (gdzie jestem zatrudniony), kadencja 2013 – 2017.

5.8. Nagrody i wyróżnienia

Moja dotychczasowa działalność została wyróżniona odznaczeniem Brązowym Krzyżem Zasługi (2006) oraz wnioskiem Rektora Uniwersytetu Pedagogicznego o nadanie mi Medalu Komisji Edukacji Narodowej, złożonym w bieżącym roku.

5.9. Podsumowanie osiągnięć badawczo-naukowych

W Tabeli 1 zestawiono liczbowo podsumowanie dorobku naukowego i innych osiągnięć z podziałem na czas przed i po uzyskaniu stopnia doktora.

Tabela 1. Podsumowanie osiągnięć naukowych

Rodzaj osiągnięcia	Przed doktoratem	Po doktoracie	Razem
Publikacje ogółem	4	58	62
- w tym publikacji w czasopismach z listy JCR	-	9	9
Cytowania w bazie Web of Science	-	9	9
Udział i kierowanie projektami badawczymi	1	6	7
- w tym kierowanie projektami badawczymi	-	2	2
Referaty i postery na konferencjach naukowych	4	35	39
- w tym referaty wygłoszone	4	21	25
Stáže naukowe	1	1	2
Recenzje na zlecenie redakcji czasopism z listy JCR	-	2	2

Kraków, dn. 31 października 2014 r.