

Dr inż. Krzysztof Radwański
Instytut Metalurgii Żelaza

3A.

ZAŁĄCZNIK do WNIOSKU

AUTOREFERAT

przedstawiający opis osiągnięć naukowych, w szczególności
określonych w art. 16 ust. 2 ustawy, w formie papierowej
w języku polskim

Gliwice 25.04.2017

SPIS TREŚCI

Wyszczególnienie	Strona
1. Imię i Nazwisko	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	3
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego 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 z późn. zm.)	4
5. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze	15
5.1 Działalność prowadzona przed uzyskaniem stopnia doktora nauk technicznych	15
5.2 Działalność prowadzona po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych	16
6. Działalność organizacyjno-dydaktyczna i inna	24
7. Osiągnięcia zgodnie z wymogami Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1 września 2011 roku w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego (Dz.U. Nr 196, poz. 1165)	27

1. Imię i Nazwisko

Krzysztof Radwański

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

2006– doktor nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Politechnika Śląska.

Temat rozprawy doktorskiej: „Analiza struktury i właściwości wysokostopowej stali typu duplex ($\alpha+\gamma$) odkształcanej na gorąco”

Promotor: dr hab. inż. Grzegorz Niewielski - Politechnika Śląska

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Jan Sieniawski - Politechnika Rzeszowska

prof. dr hab. inż. Marek Hetmańczyk - Politechnika Śląska

Praca wyróżniona na wniosek Recenzentów przez Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Politechnika Śląska - rok 2006

2001– magister inżynier o specjalności „Zarządzanie Przedsiębiorstwem i Marketing Przemysłowy”, Wydział Organizacji i Zarządzania, Kierunek – Zarządzanie i Marketing, Politechnika Śląska

2001– magister inżynier o specjalności „Materiały Metaliczne”, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Kierunek Inżynieria Materiałowa, Politechnika Śląska

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- Od 1 października 2001 r. student studiów doktoranckich na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Metalurgii (dawniej Wydziale Inżynierii Materiałowej, Metalurgii i Transportu), Politechniki Śląskiej, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice
- Od 1 lipca 2006 r. do nadal zatrudniony w Instytucie Metalurgii Żelaza, ul. K. Miarki 12-14, 44-100 Gliwice, w tym:
 - do 30.09.2007 na stanowisku inżynierjno-technicznym w Laboratorium Badań Właściwości i Struktury Materiałów,
 - od 01.10.2007 do nadal na stanowisku adiunkta w Zakładzie Badań Właściwości i Struktury Materiałów:
 - od 17.10.2010 - 31.10.2016 pełniąc obowiązki Zastępcy Kierownika Zakładu,
 - od 01.11.2016 do nadal pełniąc funkcję Kierownika Zakładu.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego 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 z późn. zm.)

Jako osiągnięcie naukowe, uzyskane po uzyskaniu stopnia doktora, stanowiące znaczący wkład w rozwój dyscypliny Inżynieria Materiałowa, określone w Ustawie o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku z późniejszymi zmianami **wskazują autorską monografię pt.:**

„Zastosowanie mikroskopii skaningowej i dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych w badaniach struktury blach ze stali wielofazowych na różnych etapach procesu ciągłego wyżarzania”

Gliwice 2016

ISBN 978-83-938130-8-7

Wyniki badań przedstawione w ramach monografii wniosły istotny wkład w realizację projektu europejskiego **RFSR-CT-2011-00014** pt.: **„Property oriented design of hard constituent hardness and morphology in continuously annealed/galvanised DP sheets”** współfinansowanego przez Fundusz Badawczy Węgla i Stali. Projekt był realizowany w ramach konsorcjum, w skład którego wchodziły: Instytut Metalurgii Żelaza (Polska), ArcelorMittal Maizières Research SA (Francja), Centre de Recherches Metallurgiques (Belgia), Salzgitter Mannesmann Forschung GMBH (Niemcy) i Akademia Górniczo-Hutnicza (Polska). Koordynatorem całości projektu był prof. dr hab. Roman Kuziak.

Istotny wkład pracy habilitacyjnej do nauki w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa dotyczy zarówno rozwoju metodyki badawczej, jak i wiedzy poznawczej w zakresie stali wielofazowych, na przykładzie stali o składzie chemicznym odpowiadającym stali Dual-Phase (DP), a w szczególności:

- **zaproprowania automatycznej metody, w oparciu o wyniki analizy EBSD w powiązaniu z wysokorozdzielczą skaningową mikroskopią elektronową FEG SEM, pozwalającej na ilościowy opis przebiegu procesu odbudowy struktury stali w procesie ciągłego wyżarzania blach cienkich, której istotą jest rozróżnienie obszarów podlegających zdrowieniu od obszarów zrekrystalizowanych,**
- **uzyskania syntetycznych wyników analizy struktury stali wielofazowej po walcowaniu na zimno i następnym symulacjach procesu ciągłego wyżarzania blach, pozwalających na określenie wpływu wartości całkowitego gniotu względnego i szybkości nagrzewania na zmiany struktury wywołane nagrzewaniem do temperatury wyżarzania międzykrytycznego oraz następnego chłodzenia. Uzyskane wyniki charakteryzują wybrany materiał w trakcie walcowania na zimno i w procesie ciągłego wyżarzania blach.**

Za innowacyjne można uznać również kompleksowe przedstawienie aplikacji metody EBSD w połączeniu z FEG SEM w badaniach stali wielofazowych.

Badania nad rozwojem stali typu AHSS (ang. Advanced High Strength Steel) przeznaczonych dla przemysłu motoryzacyjnego są prowadzone od dawna. Pierwsza ich generacja obejmuje scharakteryzowane w ramach monografii stale:

- dwufazową (DP – ang. Dual-Phase),
- umacnianą przez przemiany fazowe (TRIP – ang. Transformation Induced Plasticity),

- o złożonym składzie fazowym (CP – ang. Complex Phase),
- ferrytyczno-bainityczną (FB – ang. Ferritic-Bainitic),
- martenzytyczną (MS – ang. Martensitic Steel),
- do tłoczenia na gorąco (HF – ang. Hot Formed).

Stale te są najczęściej stosowane na blachy karoseryjne, których **końcowe właściwości mechaniczne i struktura są kształtowane w liniach do ciągłego wyżarzania najczęściej połączonych z cynkowaniem ogniowym**. Materiałem wsadowym do procesu wyżarzania jest najczęściej blacha o strukturze ferrytyczno-perlitycznej po walcowaniu na zimno o grubości stanowiącej grubość wyrobu finalnego. Profile temperaturowe w procesie ciągłego wyżarzania są zróżnicowane w zależności od grupy stali, a sam proces jest „zamknięty”, co uniemożliwia analizę zmian struktury wyrobów podczas obróbki cieplnej w liniach przemysłowych. Projektowanie procesu ciągłego wyżarzania może zatem odbywać się w oparciu o symulację fizyczną z zastosowaniem planowanych doświadczeń, a także poprzez zastosowanie symulacji numerycznej. Symulacja numeryczna opiera się na metodach matematycznego modelowania i modelach materiałowych, używanych do analizy zmian struktury wyrobu, mających na celu projektowanie lub poprawę procesu. Modele te pozwalają m.in. przewidzieć średnie wartości parametrów struktury, rozmieszczenie węgla i pierwiastków stopowych oraz dobrać parametry cykli temperaturowych, zapewniające uzyskanie zakładanego udziału objętościowego składników struktury. W oparciu o dane wejściowe modelowana jest końcowa struktura w mezoskali w przestrzeni 2D i 3D w formie cyfrowej reprezentacji materiału, pozwalająca na generowanie obrazu struktury na każdym etapie procesu technologicznego wytwarzania. Opracowanie modeli materiałowych wymaga znajomości danych wejściowych opisujących zmiany struktury wyznaczone w badaniach laboratoryjnych. Dane wejściowe opisują wpływ parametrów cyklu temperaturowego na zmiany jakościowe i ilościowe struktury. W związku z tym, że modele są tworzone w oparciu o wyniki badań struktury próbek poddanych symulacjom fizycznym poszczególnych etapów ciągłego wyżarzania blach, symulacje te powinny być wykonywane dla materiału o takim samym stopniu przerobu, jak w procesie technologicznym i obejmować zróżnicowanie parametrów nagrzewania, wygrzewania oraz chłodzenia. Opisanie stanu materiału w poszczególnych etapach procesu jest możliwe dzięki intensywnemu chłodzeniu struktury po danym etapie procesu odwzorowującego proces technologiczny.

Dokładność modelu zależy od wielkości utworzonej bazy danych, natomiast poprawność przewidywania odwzorowania procesu z jego wykorzystaniem głównie od prawidłowej identyfikacji mechanizmów zmian struktury i dokładności scharakteryzowania ich kinetyki na poszczególnych etapach cyklu cieplnego. **Mechanizmy procesów odbudowy struktury i przemian fazowych są zwykle analizowane na podstawie badań za pomocą mikroskopii transmisyjnej, natomiast zmiany struktury zależne od kinetyki ich przebiegu za pomocą mikroskopii świetlnej**. Głównymi ograniczeniami mikroskopii transmisyjnej jest niewielki obszar analizy i wysoka pracochłonność, podczas gdy głównym ograniczeniem metody mikroskopii świetlnej jest jej niska rozdzielczość. Druga z metod nie pozwala na wyznaczenie wartości kątów dezorientacji w strukturze, co wpływa często na złą interpretację wyników badań, spowodowaną brakiem możliwości rozróżnienia ziarn od podziarn, a tym samym brakiem możliwości ilościowego rozróżnienia udziału powierzchniowego struktury po zdrowieniu i rekrytalizacji statycznej. **Rozdzielczość metody ogranicza również możliwości badania struktury wielofazowej uzyskanej po cyklach cieplnych związanych z przemianami podczas nagrzewania i chłodzenia**. W zależności od składu chemicznego i zastosowanego profilu temperaturowego, blachy posiadają strukturę wielofazową, która może być złożona np. z ferrytu, bainitu, martenzytu, austenitu szcążkowego i cementytu, o różnym ich udziale. **Mikroskopia świetlna nie pozwala na ujawnienie morfologii niektórych składników struktury, a tym samym rozróżnienie np. występujących w stali różnych typów bainitu**. W metalografii świetlnej stosuje się kilka odczynników, z których najczęściej wykorzystywane są odczynniki Klemm'a i Le Pera, pozwalające na rozróżnianie składników struktury poprzez różnice ich zabarwienia po

wytrawieniu. Należy podkreślić, że metoda ta nie pozwala na pełne scharakteryzowanie występujących w danym materiale składników struktury, np. na rozróżnienie typu bainitu czy martenzytu.

Scharakteryzowane główne ograniczenia mikroskopii świetlnej i elektronowej transmisyjnej w badaniach struktur stali wielofazowych są przesłanką do rozwoju i adaptacji metod opartych o wysokorozdzielczą elektronową mikroskopię skaningową FEG SEM (ang. Field Emission Gun Electron Scanning Microscope) z szerokim wykorzystaniem metody dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych – EBSD (ang. Electron Backscatter Diffraction). W badaniach własnych wykazano, że w oparciu o wyniki uzyskiwane tymi metodami, możliwe jest właściwe zrozumienie procesów zachodzących w trakcie ciągłego wyżarzania blach. W tym zakresie istotną rolę odegrać może metoda EBSD, przy założeniu że w odpowiedni sposób zostaną użyte dotychczas dostępne w tej metodzie lub nowo opracowane parametry, pozwalające na selektywną detekcję składników struktury, występujących po poszczególnych etapach ciągłego wyżarzania. Według wiedzy autora brak jest publikacji opisujących w sposób kompleksowy to zagadnienie.

W oparciu o dotychczasowe doświadczenia badawcze z wykorzystaniem metody FEG SEM, można stwierdzić że w stalach wielofazowych występuje duże zróżnicowanie struktur. Wiedza ta wymaga usystematyzowania. Dlatego jednym z głównych celów pracy było opracowanie systematyki struktur występujących w stalach wielofazowych.

W oparciu o przeprowadzone rozeznanie literaturowe można stwierdzić, że **brak jest automatycznej metody pozwalającej na ilościowy opis przebiegu procesu odbudowy struktury, umożliwiającej rozróżnienie obszarów podlegających zdrowieniu od obszarów zrekrystalizowanych. Można przypuszczać, że właściwa analiza wyników EBSD pozwoli na wyznaczenie udziału powierzchniowego składników struktury w stalach wielofazowych.** Zatem, kolejnym z celów pracy było doskonalenie narzędzi do analizy struktury w oparciu o parametry wyznaczone za pomocą metody EBSD.

Do celów metodycznych i aplikacyjnych pracy zaliczam:

- powiązanie zagadnień teoretycznych dotyczących metody EBSD z wynikami uzyskanymi przeze mnie w czasie wieloletnich doświadczeń i obserwacji związanych z badaniami stali wielofazowych. W pracy w sposób szczegółowy scharakteryzowano znaczenie i wpływ różnych zmiennych w metodzie EBSD na jakość uzyskiwanych wyników,
- opracowanie metody pozwalającej na selektywną detekcję obszarów po zdrowieniu i rekrytalizacji, a tym samym umożliwiającej wyznaczenie ich udziału w odbudowanej strukturze,
- adaptację metody EBSD do badań stali wielofazowych, w tym do wyznaczenia udziału powierzchniowego ich składników,
- generowanie danych do budowy matematycznych modeli (dyskretnych i globalnych) do przewidywania zmian zachodzących w strukturze stali wielofazowych w procesie ciągłego wyżarzania. W tym obszarze prowadzona była współpraca z Wydziałem Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej Akademii Górniczo-Hutniczej.

Na podstawie wykonanego rozeznania literaturowego stwierdzono również, że **brak jest usystematyzowanych danych dotyczących wpływu wartości całkowitego gniotu względnego po walcowaniu na zimno na zmiany struktury wywołane nagrzewaniem do temperatury wyżarzania międzykrytycznego oraz następnego chłodzenia.**

Dlatego za **podstawowe cele poznawcze monografii w obszarze inżynieria materiałowa** uznałem:

- opisanie wpływu całkowitego gniotu względnego po walcowaniu na zimno, szybkości i temperatury nagrzewania na mechanizmy oraz kinetykę przemiany wyjściowej struktury ferrytu z perlitem w austenit,
- opisanie wpływu całkowitego gniotu względnego po walcowaniu na zimno, szybkości i temperatury nagrzewania na kinetykę przemian fazowych podczas chłodzenia z temperatury 750 i 800°C.

Osiągnięcie celów poznawczych pracy wymagało:

- scharakteryzowania zmian struktury i mechanizmów odkształcania blach o strukturze ferrytu z perlitem ze wzrostem odkształcenia w procesie walcowania na zimno,
- scharakteryzowania mechanizmów odbudowy struktury blach o wyjściowej strukturze odkształconego ferrytu z perlitem,
- opisanie wpływu całkowitego gniotu względnego po walcowaniu na zimno, szybkości i temperatury nagrzewania na kinetykę procesu odbudowy struktury.

Dla realizacji postawionych celów w monografii, przygotowano **materiał do badań**, który stanowiła **typowa stal wielofazowa** wytopiona w piecu próżniowym we wlewek o masie 70 kg i **składzie chemicznym odpowiadającym stali DP, zawierająca: 0,09% C, 1,42% Mn, 0,1% Si oraz 0,35% Cr**. Wlewek przekuto na pręty o przekroju 45 x 45 mm, które poddano walcowaniu na gorąco na grubość 2,5 mm za pomocą walcarki laboratoryjnej. Temperatura powierzchni blachy po ostatnim przepuszczeniu wynosiła około 870°C. Po walcowaniu blachę przeniesiono do pieca o temperaturze 650°C i wolno chłodzono z szybkością około 40°C/h, co symulowało chłodzenie blachy w kręgu. W efekcie blacha charakteryzowała się strukturą złożoną z ferrytu i perlitu. Blachę tę poddano walcowaniu na zimno w kolejnych przepustach w zakresie całkowitego gniotu względnego ε_{hc} wynoszącego od 0,11 do 0,75. Następnie wykonano symulacje procesu nagrzewania za pomocą dylatometru DIL 805A/D do temperatury w zakresie 600-800°C z szybkościami w przedziale 1-10°C/s. Temperatury dobrano w taki sposób, aby wyżarzanie było prowadzone bez przemiany (do 700°C) oraz z przemianą austenityczną (750 i 800°C). W celu „zamrożenia” uzyskanej struktury próbki po nagrzaniu do temperatury docelowej chłodzono helem. W ramach pracy wykonano również symulacje obróbki cieplnej, które umożliwiły uzyskanie różnych składników struktury stali wielofazowych. Na podstawie tych próbek scharakteryzowano i usystematyzowano występujące w stalach wielofazowych składniki struktury.

Badania struktury na przekrojach wzdłużnych do kierunku walcowania przeprowadzono zarówno po walcowaniu na zimno, jak i po symulacjach procesów obróbki cieplnej. Obserwacje struktury wykonano za pomocą wysokorozdzielczego mikroskopu skaningowego INSPECT F firmy FEI[®] wyposażonego w detektor EBSD firmy EDAX[®]. Zastosowano napięcie przyspieszające w zakresie 5-15kV. Badania EBSD przeprowadzono przy napięciu przyspieszającym wiązki elektronów 20 kV i kącie nachylenia powierzchni próbki 20° w stosunku do kierunku padania wiązki elektronowej. Ziarno definiowano przyjmując kątową tolerancję ziarna (kątową różnicę orientacji) wynoszącą 5° oraz minimalną ilość pikseli składających się na ziarno wynoszącą 2. Analizę ilościową zmian struktury próbek po przemianach fazowych przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania Met-Ilo.

Osiągnięcia w zakresie metodycznym

W monografii szczegółowo opisano zagadnienia teoretyczne i praktyczne metody EBSD ze względu na szerokie jej wykorzystanie w badaniach. Na przykładach przedstawiono wpływ różnych czynników (np. warunki prądowo-napięciowe, dryft, preparatyka czy skład chemiczny badanego materiału) na jakość uzyskiwanych wyników badań. W tym zakresie praca stanowi wartościowy materiał dydaktyczny dla użytkowników metody EBSD.

W monografii scharakteryzowano wyznaczane parametry metodą EBSD, opisując ich znaczenie i praktyczne wykorzystanie w analizie struktury. Dla tego celu posłużono się wynikami uzyskanymi dla stali w gatunkach DP 350/600 (0,10% C, 1,57% Mn, 0,45% Cr) i TRIP 400/700 (0,22% C, 1,50% Mn, 1,7% Al) wytworzonych w przemysłowym procesie ciągłego wyżarzania.

Wykazano, że metoda EBSD w połączeniu z FEG SEM jest bardzo dobrym narzędziem w analizie mechanizmów i kinetyki odbudowy struktury stali o złożonym składzie i morfologii składników fazowych. Możliwość wyznaczania wartości kątów dezorientacji w strukturze pozwala na odróżnienie ziarn od podziarn, co jest przydatne w określaniu udziału powierzchniowego struktury po zdrowieniu i rekrytalizacji statycznej. W monografii scharakteryzowano dostępne parametry w metodzie EBSD w aspekcie ich przydatności do oceny jakościowej i ilościowej struktury stali po częściowej rekrytalizacji. Do tych parametrów zalicza się: Image Quality (IQ), Kernel Average Misorientation (KAM), Grain Average Misorientation (GAM) i Grain Orientation Spread (GOS). Dotychczas parametry te były stosowane m.in. do wyznaczenia udziału powierzchniowego struktury po rekrytalizacji. **Wykazano, że parametr KAM wyrażający średnią arytmetyczną dezorientację pomiędzy danym pikselem i pozostałymi pikselami kernela zdefiniowanego przez użytkownika, dla ziarn i podziarn przyjmuje wartości $\leq 0,5^\circ$. Stwierdzono również, że parametr GAM wyrażający średnią dezorientację pomiędzy punktami wewnątrz jednego ziarna, przyjmuje wartości $\leq 1,0^\circ$ dla ziarn zrekrystalizowanych. Zatem równoczesna analiza struktury w oparciu o wartości $KAM \leq 0,5^\circ$ i $GAM \leq 1,0^\circ$ pozwala wyznaczyć zarówno udział struktury po zdrowieniu, jak i po rekrytalizacji.**

W monografii wykazano również przydatność metody EBSD w analizie struktury stali wielofazowej. Metoda ta pozwala na jednoznaczne rozróżnienie faz o odmiennych strukturach krystalicznych, np. ferrytu od austenitu. **Pokazano, że parametry wyznaczane w metodzie EBSD takie jak: IQ, KAM, CI oraz FIT mogą być wykorzystywane do rozróżnienia składników o tej samej strukturze krystalicznej, różniących się stopniem odkształcenia sieci.** W oparciu o te parametry możliwe jest rozróżnienie ferrytu, bainitu czy martenzytu. **Wykazano występowanie charakterystycznych - dominujących - wartości kątów dezorientacji dla danych składników struktury.** Wyniki badań pozwoliły na opisanie i usystematyzowanie poszczególnych składników struktury stali wielofazowych. Najbardziej złożonym składnikiem strukturalnym jest bainit, w którego skład wchodzi ferryt bainityczny i cementyt lub produkty niekompletnej przemiany austenitu. W stalach niskowęglowych wyróżnia się następujące typy bainitu: ziarnisty, górny, dolny, zdegenerowany górny i zdegenerowany dolny. W oparciu o uzyskane wyniki badań autor zdefiniował charakterystyki morfologii różnych typów bainitu. Zweryfikował również poprawność metody dekonwolucji rozkładu parametru IQ w oparciu o wyniki pomiaru udziału powierzchniowego martenzytu wygenerowanego za pomocą programu Met-Ilo. Wartości uzyskane obiema metodami nie różnią się istotnie, co potwierdza przydatność pierwszej z nich w wyznaczaniu udziału powierzchniowego martenzytu.

W strukturze próbek po cyklach cieplnych nagrzewania do temperatury powyżej A_{C1} i następnym chłodzeniu helem, stwierdzono występowanie wysp martenzytu z bainitem, nazywanych w pracy również twardymi składnikami struktury. **W przypadku badań prowadzonych przy niewielkich powiększeniach (tj. większych obszarach) odróżnienie tych składników od siebie jest praktycznie niemożliwe. Wewnątrz wysp martenzytu i bainitu występują granice szerokokątowe. Obecność tych granic powoduje, że system analizy wyników rozpoznaje obszary ograniczone tymi granicami jako oddzielne ziarna, co prowadzi do istotnego obniżenia wartości średniej średnicy, a tym samym uzyskania błędnych wyników.** Z tego też powodu nie należy wykonywać analiz ilościowych wielkości i kształtu ziarna metodą EBSD w przypadku występowania w strukturze martenzytu i bainitu. Najefektywniejszą metodą analizy struktury pozostaje w takich przypadkach ilościowa analiza obrazu struktur FEG SEM prowadzona z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania. **Metoda EBSD posiada również ograniczenia wynikające z rozdzielczości, która w niektórych przypadkach nie jest wystarczająca do identyfikacji fazowej składników struktury. Wiarygodność wyników badań jest również uzależniona od rozmiarów obszaru analizy. Rozmiar obszaru pojedynczego skanowania maleje ze wzrostem powiększenia, co sprawia, że może on nie być reprezentatywny dla całości materiału. Kolejne ograniczenie stosowania metody może wynikać z długotrwałego procesu analizy próbki.** Pomimo tych ograniczeń, przedstawione w monografii wyniki badań wykazały, że w większości przypadków metoda EBSD jest właściwym narzędziem w badaniach struktur. Stąd też metodę tę w połączeniu z FEG SEM wykorzystano do opisu zmian struktury blach ze wzrostem odkształcenia na zimno oraz po następnym cyklach cieplnych.

Osiągnięcia w zakresie poznawczym

W monografii scharakteryzowano zmiany struktury ferrytyczno-perlitycznej ze wzrostem odkształcenia na zimno w zakresie $\varepsilon_{nc}=0,11-0,75$. Wykazano, że odkształcenie na zimno prowadzi do tworzenia się pasm odkształcenia wewnątrz ziarn ferrytu, których udział w strukturze rośnie ze wzrostem odkształcenia. Zmianom tym towarzyszy wydłużanie się ziarn ferrytu i obszarów perlitu w kierunku walcowania. **Dla największych wartości gniotu kumulacja odkształcenia w ferrycie widoczna jest w postaci przecinających się pasm odkształcenia, różniących się orientacją i przedzielonych dominującymi w strukturze granicami szerokokątowymi. W perlicie wykazano występowanie dużej ilości granic szerokokątowych. Granice te oraz pasma odkształcenia uniemożliwiają wyznaczenie wartości średniej średnicy i kształtu ziarna pierwotnego w oparciu o metodę EBSD, gdyż wyniki byłyby obciążone zbyt dużym błędem.**

Pierwszym zabiegiem procesu ciągłego wyżarzania blach po walcowaniu na zimno jest ich nagrzewanie. Blacha podczas nagrzewania do temperatury 600-700°C podlega procesom zdrowienia i rekrytalizacji, w trakcie których zachodzi przebudowa zarówno ziarn ferrytu, jak i obszarów perlitu. **W monografii wykazano, że w początkowych stadiach procesów odbudowy w obszarach pasm odkształcenia następuje proces poligonizacji. Obserwuje się przegrupowanie granic dyslokacyjnych i tworzenie podziarn. W wyniku nagrzewania do temperatury 650°C i wyższej, w obszarach byłego perlitu następuje fragmentacja płytek cementytu połączona z dyfuzją węgla, prowadzącą do koagulacji cząstek cementytu.** Dyfuzja węgla odbywa się głównie wzdłuż granic, w wyniku czego skoagulowane węgliki występują głównie na granicach podziarn i nowo powstałych zrekrystalizowanych ziarn o granicach szerokokątowych. **Kinetyka tych procesów w trakcie ciągłego wyżarzania blach jest uzależniona od wartości wstępnego odkształcenia na zimno, szybkości i temperatury nagrzewania.** W ramach monografii nie analizowano wpływu czasu wyżarzania, gdyż w procesie ciągłego wyżarzania blacha ze względu na swą grubość nie jest poddawana

typowemu wygrzewaniu po uzyskaniu temperatury docelowej, zaś czas wytrzymania w maksymalnej temperaturze cyklu wynosi tylko 10 sekund. Wykazano, że zwiększenie wartości całkowitego gniotu względnego i temperatury nagrzewania oraz zmniejszenie szybkości nagrzewania powoduje zwiększenie udziału struktury po zdrowieniu i rekrytalizacji. Zależności te przeanalizowano z zastosowaniem zaproponowanej metody wyznaczania udziału składników struktury po zdrowieniu i rekrytalizacji. Wpływ tych parametrów analizowano również w odniesieniu do zmian średnicy oraz kształtu ziarna. **Uzyskane w monografii wyniki stanowią nie tylko uzupełnienie wiedzy w tym zakresie, ale przede wszystkim posłużyły do wytłumaczenia zjawisk zachodzących w strukturze blach po walcowaniu na zimno i nagrzewaniu do temperatury docelowej, tj. powyżej A_{C1} . Zjawiska te są znacznie mniej rozpoznane i bardziej skomplikowane. Wynika to z faktu, że w trakcie nagrzewania blach wstępnie odkształconych plastycznie na zimno nakłada się kilka zjawisk, wpływających na końcową strukturę. Należą do nich omówione procesy odbudowy struktury, rozpuszczanie węglików i przemiana austenityczna.** To, które z tych zjawisk będzie decydowało o strukturze zależy od parametrów zarówno wstępnego odkształcenia plastycznego na zimno, jak i warunków nagrzewania. Jak wiadomo, rozpuszczalność węgla w ferrycie jest niewielka w porównaniu do jego rozpuszczalności w austenicie, co powoduje, że zarodkowanie i wzrost austenitu jest związany z rozpuszczaniem i ewentualnie koagulacją węglików. Austenit powstaje głównie w miejscach występowania węglików, znajdujących się na granicy ferryt-ferryt i w punktach potrójnych ziarn. **W monografii przyjęto, że na kinetykę przemiany austenitycznej wpływa wartość odkształcenia na zimno, temperatura austenitacji oraz szybkość nagrzewania do tej temperatury. Wpływ wartości odkształcenia na zimno na zmiany struktury blach nagrzewanych do temperatury powyżej A_{C1} nie był praktycznie omawiany w literaturze technicznej. W ograniczonym zakresie znane są wyniki badań wpływu różnicowania wyjściowej struktury oraz szybkości nagrzewania do temperatury powyżej A_{C1} na zmiany strukturalne. W tych obszarach uzyskane wyniki można traktować jako oryginalny wkład autora w dziedzinie inżynierii materiałowej.**

Głównym celem badań wpływu wartości odkształcenia na zimno i szybkości nagrzewania blach do temperatury powyżej A_{C1} było określenie udziału i morfologii austenitu, jaki w tych warunkach powstaje. Nagrzewanie próbek odkształconych na zimno w zakresie $\epsilon_{hc}=0,11-0,75$ prowadzono z szybkością 1, 3 i 10°C/s do temperatury 750 i 800°C. Próbki po nagraniu do temperatury chłodzono w helu celem zamrożenia struktury powstałej w trakcie nagrzewania. Obecność w próbkach po chłodzeniu martenzytu i/lub bainitu świadczy o występowaniu w nich austenitu w wysokiej temperaturze.

Przeprowadzone badania, przedstawione w monografii, wykazały istotny wpływ wartości wstępnego odkształcenia na strukturę blach po nagraniu do 750 i 800°C. W strukturze blach po niewielkich odkształceniach poddanych nagrzewaniu do 750°C i chłodzeniu helem stwierdzono występowanie w obszarach byłego perlitu oprócz powstałych z austenitu wysp martenzytu z bainitem, również pozostałości nierozpuszczonego perlitu ze skoagulowanymi węglnikami. Wykazano, że zwiększanie odkształcenia prowadzi do zanikania struktury podziarnowej i tworzenia się ziarn zrekrystalizowanych przy takiej samej temperaturze końcowej i szybkości nagrzewania. Wiadomo, że proces rekrytalizacji oraz migracji granic ziarn ferrytu hamuje zarodkowanie austenitu w tych obszarach. Stąd też, austenit podczas nagrzewania do zakresu międzykrytycznego powstaje głównie w obszarach byłego perlitu. Badania wykazały, że ze wzrostem odkształcenia na zimno i po następnej obróbce cieplnej zwiększa się również udział powierzchniowy martenzytu z bainitem, co świadczy jednocześnie o zwiększaniu udziału austenitu w strukturze blach po nagraniu do 750°C. Dowodzi to, że odkształcenie powoduje zwiększenie siły napędowej przemiany austenitycznej. W monografii pokazano, że stwierdzenie to jest prawdziwe jedynie do pewnej wartości odkształcenia (w analizowanym zakresie do

$\varepsilon_{hc}=0,50$), po przekroczeniu którego następuje zmniejszanie udziału martenzytu z bainitem ($\varepsilon_{hc}=0,63$), prowadzące do ich zaniku w strukturze blach po największych odkształceniach ($\varepsilon_{hc}=0,75$). **Wyniki te wskazują, że podczas nagrzewania blach odkształconych z $\varepsilon_{hc}=0,63$ prawie całą energię skumulowaną w strukturze w wyniku odkształcenia na zimno pochłania proces rekrytalizacji, spowalniając początkowo przemianę austenityczną. Można zauważyć również, że istotną rolę w spowolnieniu procesu austenitizacji odgrywa fragmentacja płytek cementytu i odległości między nimi w obszarach perlitu. Dla największych odkształceń stopień fragmentacji zwiększa się, zmniejszając odległości pomiędzy cząstkami cementytu. Powoduje to ograniczenie dyfuzji węgla do powierzchni rozdziału ferryt/cementyt, w wyniku pokrywania się pól dyfuzji cząstek będących w bezpośrednim sąsiedztwie.**

Jak wiadomo przemiana austenityczna jest procesem kontrolowanym dyfuzją i zachodzi łatwiej w wyższych temperaturach. Stąd też, każdorazowo w strukturze blach odkształconych na zimno i poddanych cykлом nagrzewania do 800°C i chłodzeniu helem uzyskano wyższe udziały powierzchniowe martenzytu z bainitem, w porównaniu do blach odkształconych z tymi samymi gniotami i chłodzonych z temperatury 750°C. **Badania wpływu wartości całkowitego gniotu względnego na strukturę blach po nagrzewaniu do 800°C i chłodzeniu helem wykazały, że za wyjątkiem najmniejszego odkształcenia ($\varepsilon_{hc}=0,11$), uzyskano taki sam charakter zmian udziału powierzchniowego martenzytu z bainitem, jak w przypadku blach po nagrzewaniu do 750°C i chłodzeniu helem.** Po najmniejszym odkształceniu udział martenzytu z bainitem jest zbliżony do udziału uzyskanego po chłodzeniu z 750°C. Stwierdzono, że zwiększanie odkształcenia do pewnej wartości ($\varepsilon_{hc}=0,50$) powoduje zwiększanie udziału powierzchniowego martenzytu z bainitem po chłodzeniu z temperatury 800°C. Wykazano, że ze wzrostem odkształcenia w tym zakresie w strukturze blach po cyklach cieplnych w wyspach dominuje bainit. Dalsze zwiększanie odkształcenia powoduje natomiast zmniejszenie udziału powierzchniowego wysp martenzytu z bainitem. **W monografii wykazano, że zjawisko to jest związane ze zmianą temperatury początku przemiany martenzytycznej M_s , co potwierdzono wykonując badania dylatometryczne w trakcie chłodzenia helem z temperatury 800°C próbek odkształconych wstępnie na zimno z różnym gniotem całkowitym. Temperatura M_s zależy bezpośrednio od zawartości węgla w austenicie i zmniejsza się ze wzrostem wartości odkształcenia do $\varepsilon_{hc}=0,50$, co powoduje również spadek udziału powierzchniowego martenzytu.** Zestawienie tych wyników z wynikami badań mikroskopowych, wskazujących na zwiększanie się udziału powierzchniowego wysp martenzytu z bainitem, potwierdziło, że w wyspach dominuje bainit. Jest to charakterystyczne dla materiału, w którym nie nastąpiła dostateczna dyfuzja węgla, niezbędna dla ujednorodnienia składu chemicznego w objętości ziarn austenitu podczas nagrzewania. Występujące zróżnicowanie zawartości węgla sprzyjało przemianie bainitycznej. **W analizie wyników przedstawionej w monografii wykazano, że zwiększanie odkształcenia powyżej wspomnianej wartości powoduje wzrost wartości temperatury M_s , czego efektem jest zwiększenie się udziału martenzytu w strukturze.** Wykazano, że sumaryczny udział powierzchniowy martenzytu z bainitem maleje ze zwiększaniem odkształcenia powyżej pewnej wartości (w analizowanym przypadku $\varepsilon_{hc}=0,50$), co świadczy o malejącym udziale bainitu w strukturze blach w porównaniu do niewielkich odkształceń. Wyspy martenzytu z bainitem ulokowane są głównie na granicach zrekrystalizowanych ziarn ferrytu, co świadczy o koagulacji węglików i ich dyfuzji do granic ziarn podczas procesu rekrytalizacji. W miejscach występowania węglików zarodkowały i rosły ziarna austenitu charakteryzujące się większą jednorodnością węgla w porównaniu do obserwowanych w blachach mniej odkształconych.

W ramach monografii omówiono również badania wpływu szybkości nagrzewania do temperatury 750 i 800°C na zmiany struktury blach odkształconych uprzednio na zimno

z gniotem $\varepsilon_{hc}=0,63$. Jest to wartość odkształcenia blach zbliżona do stosowanych w warunkach przemysłowych. Wykazano, że w strukturze blach po nagrzewaniu z najmniejszą szybkością do temperatury 750°C i chłodzeniu helem występują zrekrytalizowane ziarna ferrytu, obszary perlitu, skoagulowane cząstki cementytu oraz drobne ziarna martenzytu. Po nagrzewaniu z największą szybkością uzyskano natomiast ziarna ferrytu zrekrytalizowane, jak i niezrekrytalizowane zawierające podziarna oraz perlit. **Nie stwierdzono obecności martenzytu, co dowodzi, że istnieje graniczna wartość szybkości nagrzewania dla zajścia pełnej rekrystalizacji oraz wystąpienia przemiany austenicznej przy ustalonych wartościach maksymalnej temperatury cyklu.** Niezależnie od szybkości nagrzewania do temperatury 800°C po chłodzeniu helem w blachach występuje ferryt oraz wyspy martenzytu z bainitem. **Wykazano, że zwiększanie szybkości nagrzewania blach do temperatury 800°C prowadzi do zwiększenia udziału powierzchniowego martenzytu z bainitem.** Dla wytłumaczenia takiego charakteru zmian wykonano badania dylatometryczne. Po zastosowaniu reguły dźwigni do krzywych dylatacyjnych, wyznaczono udziały objętościowe austenitu w temperaturze 800°C, które potwierdziły, że zwiększenie szybkości nagrzewania powoduje zwiększenie udziału austenitu. **Wyższy udział austenitu w temperaturze 800°C uzyskany dla blachy nagrzewanej z większą szybkością powiązано z procesami odbudowy struktury.** Wiadomo, że kinetyka przemiany austenicznej jest zależna od obecności granic ferryt/węgliki, będących miejscami zarodkowania austenitu. Podczas szybkiego nagrzewania koagulacja cząstek cementytu w strukturze ferrytyczno-perlitycznej po walcowaniu jest hamowana, a zatem powierzchnia międzyfazowa węgiel-ferryt jest większa w przypadku węglików nieskoagulowanych. **Dla dużych szybkości nagrzewania proces rekrystalizacji zachodzi równocześnie z przemianą austeniczną. Cementyt zawarty w perlicie nie będzie miał dostatecznie wystarczająco czasu, aby dyfundować równomiernie w strukturze. Dyfuzja będzie zachodziła głównie w obszarach byłego perlitu, w których utworzą się duże, zwarte obszary austenitu o zróżnicowanej zawartości węgla.** Podczas wyżarzania w zakresie międzykrytycznym, ze wzrostem udziału austenitu maleje zawartość węgla w tej fazie. Węgiel w austenicie istotnie oddziałuje na temperaturę początku przemiany martenzytycznej, która rośnie ze zmniejszaniem jego zawartości, wpływając na wzrost udziału martenzytu w blachach po chłodzeniu helem. **Badania omówione w monografii wykazały, że większe średnice wysp martenzytu z bainitem uzyskano dla większych szybkości nagrzewania, co jest efektem zbyt krótkiego czasu dyfuzji węgla z obszarów byłego perlitu. Dla blach nagrzewanych z najmniejszymi szybkościami czas dla zajścia procesów rekrystalizacji i koagulacji węglików był wystarczający i został ukończony przed przemianą austeniczną.** Podczas takiego nagrzewania węgiel zawarty w perlicie dyfunduje w większych ilościach do granic ferrytu. **Skoagulowane węgliki na granicach zrekrytalizowanych ziarn ferrytu są miejscami zarodkowania i wzrostu austenitu. Tłumaczy to również większą jednorodność średnic równoważnych wysp dla mniejszych szybkości nagrzewania.** Przeprowadzone w monografii badania wykazały również, że dla analizowanych szybkości nagrzewania udział powierzchniowy martenzytu z bainitem po chłodzeniu z temperatury 800°C jest niższy niż wyznaczona zawartość austenitu po nagrzaniu do tej temperatury. Świadczy to o zajściu przemiany ferrytycznej podczas chłodzenia z temperatury 800°C i utworzeniu się „nowego ferrytu”, nazywanego również epitaksjalnym.

Podsumowując, zależności pomiędzy parametrami obróbki cieplnej a uzyskaną strukturą są wykorzystywane w projektowaniu przebiegów cykli cieplnych w procesie ciągłego wyżarzania blach, stanowiąc dane wejściowe do budowy dyskretnych i globalnych modeli służących przewidywaniu zmian zachodzących w strukturze stali wielofazowych w trakcie tego procesu. Wykorzystanie wyników badań w tworzeniu modeli zmian struktury, jak również właściwości mechanicznych zostało przedstawione w licznych publikacjach z udziałem autora monografii.

Wnioski sformułowane na podstawie badań własnych, o **charakterze metodycznym**:

1. Wyznaczanie wartości kątów dezorientacji w metodzie EBSD pozwala na rozróżnianie ziarn od podziarn.
2. Pokazano, że równoczesna analiza wartości parametrów $KAM \leq 0,5^\circ$ i $GAM \leq 1,0^\circ$, wyznaczających odpowiednio sumaryczny udział struktury po zdrowieniu i rekrytalizacji oraz po samej rekrytalizacji, pozwala na ilościowy opis procesów odbudowy struktury. Metoda FEG SEM+EBSDBD pozwala zatem opisywać procesy odbudowy struktury zarówno w sposób jakościowy, jak i ilościowy.
3. Za pomocą programu Met-Ilo zweryfikowano wyznaczanie udziału powierzchniowego składników struktury stali wielofazowych z użyciem dekonwolucji rozkładu IQ . Wykazano zgodność uzyskanych wyników obiema metodami.
4. Metoda EBSD pozwala na rozróżnianie twardych składników struktury na podstawie dominujących, charakterystycznych dla nich kątów dezorientacji. Wyjątkiem jest rozróżnienie bainitu dolnego od martenzytu ze względu na pokrywające się wartości charakterystycznych dla tych składników kątów w zakresie $55 \div 60^\circ$. W tym przypadku niezbędna jest analiza morfologii składników struktury.
5. Występowanie w strukturze martenzytu z bainitem charakteryzujących się dużym udziałem kątów dezorientacji w przedziale $50 \div 60^\circ$, uniemożliwia wyznaczenie średniej średnicy równoważnej ziarna za pomocą metody EBSD, gdyż system analityczny identyfikuje granice wewnątrz martenzytu z bainitem jako granice ziarn, co wpływa na zaniżanie wyznaczanych wartości. Stąd też analizę ilościową przeprowadzono z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania do ilościowej analizy obrazu.

Do najważniejszych wniosków o **charakterze poznawczym** zaliczyć można:

6. W stalach wielofazowych można wyróżnić pięć typów bainitu nazwanych umownie: bainit ziarnisty, bainit górny, zdegenerowany bainit górny, bainit dolny oraz zdegenerowany bainit dolny. Typy te różnią się rodzajem, morfologią i zależnościami krystalograficznymi występującego w nich składnika towarzyszącego ferrytowi bainitycznemu. Opracowane charakterystyki morfologii oraz warunki tworzenia poszczególnych typów bainitu stanowią ważną wartość poznawczą w interpretacji struktur stali wielofazowych.
7. Zwiększenie wartości odkształcenia w procesie walcowania na zimno prowadzi do tworzenia się pasm odkształcenia, oddzielonych od siebie początkowo granicami wąskokątowymi, które stopniowo wraz ze stopniem odkształcenia zastępowane są granicami szerokokątowymi. Po największych odkształceniach struktura złożona jest z przecinających się pasm odkształcenia o zróżnicowanych orientacjach i dużym nasyceniu granicami szerokokątowymi, co nie pozwala na przeprowadzenie ilościowej oceny ziarn pierwotnych.
8. Podczas nagrzewania próbek uprzednio odkształconych na zimno, w obszarach ferrytu następuje przebudowa struktury związana z tworzeniem się podziarn o granicach wąskokątowych (zdrowienie), które następnie przekształcają się w szerokokątowe granice ziarn (rekrytalizacja). W obszarach występowania perlitu zachodzi proces dyfuzji węgla do granic podziarn/ziarn i koagulacja węglików na tych granicach. Pomędzy skoagulowanymi cząstkami powstają nowe, drobne, zrekrystalizowane ziarna o granicach szerokokątowych. Wyznaczono wpływ wartości odkształcenia po walcowaniu na zimno, szybkości oraz temperatury nagrzewania na kinetykę procesów odbudowy struktury.

9. Podczas nagrzewania próbek powyżej temperatury A_{C1} następuje zarodkowanie austenitu głównie na skoagulowanych cząstkach cementytu i jego wzrost w granicach ziarn ferrytu. Wyniki badań pozwoliły na schematyczne opisanie przebiegu procesu zarodkowania i wzrostu austenitu.
10. Utworzony w wyniku nagrzewania austenit ulega podczas chłodzenia przemianie w martenzyt i bainit. Wykazano tworzenie się wysp martenzytu z bainitem, będących efektem zróżnicowania zawartości węgla w austenicie. Po chłodzeniu z temperatury 750°C w strukturze oprócz ferrytu stwierdzono niewielkie ilości martenzytu z bainitem, występujące w obszarach perlitu i/lub byłego perlitu. Po chłodzeniu z temperatury 800°C powstała struktura złożona jest z ferrytu i wysp martenzytu z bainitem.
11. Wzrost wstępnego odkształcenia na zimno próbek w zakresie $\varepsilon_{hc}=0,25\div 0,50$ prowadzi po ich nagrzewaniu do temperatury 750°C i następnym chłodzeniu w helu do wzrostu udziału martenzytu z bainitem z 2,6 do 8,0%, co związane jest z zwiększeniem siły napędowej przemiany austenitycznej wywołanym rosnącym odkształceniem. Dalsze zwiększanie gniotu powoduje początkowo spadek udziału tych składników, a następnie całkowity ich brak w strukturze. Można to powiązać z pochłanianiem prawie całej skumulowanej w strukturze energii pochodzącej z odkształcenia przez proces rekrytalizacji oraz fragmentacją płytek cementytu i zmniejszaniem się odległości między nimi w obszarach perlitu w wyniku wzrostu wartości odkształcenia. Oba zjawiska spowalniają proces austenityzacji.
12. Podobny jest charakter zmian zachodzących w strukturze próbek wstępnie odkształconych z gniotem w zakresie $\varepsilon_{hc}=0,25\div 0,50$, a następnie nagrzanych do temperatury 800°C i chłodzonych w helu. Sumaryczny udział martenzytu i bainitu jest jednak większy niż w próbkach nagrzewanych do temperatury 750°C . Stwierdzono, że w tym zakresie odkształceń rośnie udział bainitu a maleje martenzytu, na co wskazują również wyznaczone w oparciu o wyniki badań dylatometrycznych temperatury M_s dla próbek o różnych wartościach odkształceń. Zwiększenie wartości gniotu powyżej $\varepsilon_{hc}=0,50$ powoduje zmniejszenie udziału powierzchniowego wysp martenzytu z bainitem. Wyspy te występują głównie na granicach zrekrystalizowanych ziarn ferrytu, co wskazuje na dyfuzję węgla i koagulację węglików na granicach tych ziarn. Przypuszczalnie utworzony austenit charakteryzował się większą jednorodnością węgla, co spowodowało utworzenie się po chłodzeniu głównie martenzytu.
13. Wykazano, że zwiększenie szybkości nagrzewania z 1 do 10°C/s do temperatury 800°C powoduje zwiększenie udziału martenzytu z bainitem w próbkach po ich chłodzeniu helem z 14,4 do 21,9%. W oparciu o badania dylatometryczne wykazano również, że zwiększenie szybkości nagrzewania do 800°C powoduje zwiększenie udziału austenitu. Przy większym udziale austenitu zmniejsza się w nim średnia zawartość węgla, co wpływa na wzrost temperatury M_s i zwiększenie udziału martenzytu po chłodzeniu. Stwierdzono, że w przypadku większych szybkości nagrzewania powstały austenit tworzy się głównie w obszarach byłego perlitu, ograniczając czas dla zachodzenia procesów dyfuzyjnych. Dla wolnych szybkości nagrzewania proces rekrytalizacji, dyfuzji węgla i koagulacji na granicach nowych ziarn został zakończony przed przemianą austenityczną.

Wyniki badań, na podstawie których sformułowano wnioski 2, 11, 12 i 13, stanowią oryginalny wkład autora w dziedzinie inżynierii materiałowej.

5. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze

5.1. Działalność prowadzona przed uzyskaniem stopnia doktora nauk technicznych

Studia na Wydziale Organizacji i Zarządzania Politechniki Śląskiej na kierunku Zarządzanie i Marketing rozpocząłem w roku 1996. Po trzecim roku studiów, tj. w roku 1999 rozpocząłem równoległe studia w ramach II fakultetu na Wydziale Inżynierii Materiałowej, Metalurgii i Transportu na kierunku Inżynieria Materiałowa. W czasie trwania studiów pobierałem stypendium naukowe. Studia magisterskie na Wydziale Organizacji i Zarządzania ukończyłem 8 czerwca 2001 roku z wynikiem bardzo dobrym, uzyskując tytuł magistra inżyniera o specjalności Zarządzanie Przedsiębiorstwem i Marketing Przemysłowy, zdając egzamin absolutoryjny i broniąc pracę magisterską pod tytułem „Analiza procesu strategicznego w restrukturyzowanym przedsiębiorstwie metalurgicznym” pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Jana Stachowicza. W tym czasie kontynuując studia na II fakultecie ówczesny Kierownik Katedry Nauki o Materiałach prof. dr hab. inż. Marek Hetmańczyk zaproponował mi kontynuację pracy naukowej na studiach doktoranckich, które rozpocząłem 1 października 2001 roku na Wydziale Inżynierii Materiałowej, Metalurgii i Transportu, pracując w zespole dra hab. inż. Grzegorza Niewielskiego. Początki mojej pracy były związane z zaangażowaniem w realizację projektu celowego Nr 7 T08C 062 2000 C/4834 pt. Wdrożenie obróbki cieplnej rur z zastosowaniem atmosfer ochronnych wytwarzanych metodą Variogan-kat”. 18 grudnia 2001 roku, będąc uczestnikiem studiów doktoranckich, ukończyłem studia na II fakultecie z wynikiem bardzo dobrym, zdając egzamin absolutoryjny i broniąc pracę magisterską, zrealizowaną w ramach ww. projektu pt. „Oddziaływanie składu chemicznego atmosfery ochronnej na strukturę i właściwości rur ciągnionych”, pod kierunkiem dra inż. Dariusza Kuca. Uzyskałem tytuł magistra inżyniera inżynierii materiałowej o specjalności Materiały Metaliczne.

W trakcie studiów doktoranckich rozwijałem i doskonaliłem znajomość technik badawczych charakteryzujących właściwości mechaniczne i strukturę materiałów. Poszerzałem swoją wiedzę w zakresie **technologii wytwarzania materiałów inżynierskich** oraz **badania plastometrycznych, mikroskopii świetlnej wraz z ilościową analizą obrazu, transmisyjnej mikroskopii elektronowej a także dylatometrii**. W tym zakresie brałem udział jako wykonawca w następujących projektach badawczych realizowanych w Politechnice Śląskiej: „Technologie wytwarzania wyrobów z metali i stopów o strukturze nanometrycznej” Projekt badawczy PBZ-KBN 096/T08/2003, 2004-2006, „Modelowanie zjawisk strukturalnych zachodzących w stalach odkształcanych na gorąco” Projekt badawczy KBN nr 4 T08A 029 22, 2002-2004. Realizacja drugiego projektu pozwoliła na powiązanie właściwości mechanicznych wyznaczanych w próbach plastometrycznych ze zmianami struktury stali o strukturze ferrytycznej, austenitycznej i ferrytyczno-austenitycznej. Opracowano modele zmian ich struktury. Corocznie brałem udział w pracach badawczych prowadzonych w Katedrze Nauki o Materiałach w ramach badań własnych i badań statutowych. Opublikowałem 12 artykułów w materiałach konferencyjnych oraz czasopismach branżowych i wygłosiłem 1 referat na konferencji krajowej i 3 na konferencjach międzynarodowych. W okresie trwania studiów doktoranckich prowadziłem zajęcia dydaktyczne ze studentami Wydziału Inżynierii Materiałowej, Metalurgii i Transportu, m.in. z zakresu nauki o materiałach, metod badawczych, charakterystyki poszczególnych grup stali czy obróbki cieplnej wykonanych z nich wyrobów.

W roku 2005 odbyłem **staż naukowy** na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, pod kierownictwem prof. dra hab. inż. Jana Sieniawskiego. Opiekunem mojego stażu był dr inż. Maciej Motyka (obecnie dr hab. inż., prof. nzw.). W trakcie tego pobytu pogłębiałem wiedzę z zakresu metod badawczych, a także aktywnie uczestniczyłem

w realizacji badań, m.in. prób rozciągania w podwyższonej temperaturze, prowadzonych w szerokim zakresie prędkości oraz temperatury odkształcania.

Możliwości jakie stwarzała mi Politechnika Śląska w zakresie doskonalenia eksperymentalnych technik badawczych, konsultacje naukowe z opiekunem i ówczesnym kierownikiem Katedry oraz udział w projektach badawczych ugruntowały moje zainteresowania w dziedzinie inżynierii materiałowej i przeróbki plastycznej materiałów.

Nabyte doświadczenie naukowe wykorzystałem do stworzenia zarysu i tematyki mojej pracy doktorskiej w obszarze wysokostopowych stali odpornych na korozję, prowadząc badania z zakresu przemian fazowych i ich wpływu na ich plastyczność. Ta tematyka stała się przez kolejne trzy lata przewodnią w mojej pracy naukowej. Za nowatorskie można uznać wykazanie, że efekt nadplastycznego płynięcia stali duplex ($\alpha+\gamma$) w gatunku X2CrNiMoN22-5-3 powiązany jest z zachodzeniem w trakcie odkształcania w zakresie temperatury 800-950°C przemiany $\alpha\rightarrow\gamma+\sigma$. Wykazano, że nadplastyczność stali rośnie ze wzrostem udziału metastabilnego ferrytu w strukturze tej stali po przesycaeniu oraz ze wzrostem odkształcenia na zimno przed procesem rozciągania na gorąco. Udowodniono, że wraz ze wzrostem odkształcenia na zimno rośnie liczba potencjalnych miejsc zarodkowania nowych ziarn austenitu i wydzieleni fazy σ podczas odkształcania na gorąco, co hamuje rozrost ziarn i powoduje uzyskanie większych wydłużeń do rozerwania.

W oparciu o ww. wnioski wynikające z prowadzonych badań powstała praca pt. **Analiza struktury i właściwości wysokostopowej stali typu duplex ($\alpha+\gamma$) odkształcanej na gorąco**, którą po złożeniu wszystkich wymaganych dokumentów i zdaniu egzaminów doktorskich w kwietniu roku 2006 na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Metalurgii obroniłem z wyróżnieniem. Wyróżnienie przez Radę Wydziału stanowi nagrodę za moją działalność naukową.

5.2. Działalność prowadzona po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych

Po uzyskaniu stopnia doktora **odbyłem dwumiesięczny staż**, w ramach umowy o pracę, w **zakładzie przemysłowym**, tj. firmie Kalmet S.A. w Gliwicach. W trakcie tego okresu zaznajomiłem się z technologiami wytwarzania wyrobów stalowych, głównie dla przemysłu wydobywczego, oraz zajmowałem się opracowywaniem dokumentacji techniczno-ruchowych stojaków do obudów górniczych. Staż był okazją do zapoznania się z przemysłowymi technologiami, co z punktu widzenia obecnego miejsca pracy stanowi bardzo wartościowe doświadczenie. W lipcu 2006 roku rozpocząłem pracę w Instytucie Metalurgii Żelaza (IMŻ) w Gliwicach w Laboratorium Badań Właściwości i Struktury Materiałów. Początkowo pracowałem na stanowisku inżynierjno-technicznym, a we wrześniu 2007 roku awansowałem na stanowisko adiunkta, pełniąc od 2010 roku obowiązki zastępcy, a od 2016 roku funkcję Kierownika Zakładu Badań Właściwości i Struktury Materiałów.

Moją działalność badawczą realizowaną w okresie pracy w IMŻ można ująć w trzy obszary:

- **prace w zakresie rozwoju metod badań materiałów,**
- **badania podstawowe, przemysłowe i prace rozwojowe realizowane:**
 - w ramach projektów międzynarodowych,
 - w ramach projektów krajowych,
- **pozostałe prace naukowo-badawcze, w tym ekspertyzy.**

Prace w zakresie rozwoju metod badań materiałów

Początki mojej pracy w IMŻ były związane z zakupem i uruchomieniem wysokorozdzielczego elektronowego mikroskopu skaningowego INSPECT F, wyposażonego w detektory analityczne EDS, WDS i EBSD. Był to wówczas (2007r.) jeden z najnowocześniejszych elektronowych mikroskopów skaningowych na świecie. Przedsięwzięcie to, za które byłem bezpośrednio odpowiedzialny, wiązało się z istotnym rozszerzeniem możliwości badawczych Instytutu. Instalacja mikroskopu wymagała opracowania i wdrożenia metod badawczych. W tym zakresie uczestniczyłem w **specjalistycznych szkoleniach krajowych i zagranicznych**, podczas których zdobywałem i podnosiłem swoje kwalifikacje i kompetencje. Uczestniczyłem m.in. w następujących specjalistycznych szkoleniach zagranicznych:

- Szkolenie z zakresu metody EBSD, Ametek Materials Analysis Division – EDAX, Tilburg, Holandia, 2009
- Szkolenie z zakresu metody WDS, Ametek Materials Analysis Division – EDAX, Tilburg, Holandia, 2009.

Opanowanie nowych możliwości badawczych było czasochłonne i wymagało dużego zaangażowania. Prace te były realizowane głównie w latach 2007-2010. W zakresie rozwoju metod badawczych materiałów metalicznych uczestniczyłem m.in. w pracach badawczych finansowanych ze środków statutowych oraz na bezpośrednie zlecenie jednostek naukowo-badawczych. Do najważniejszych z tych prac można zaliczyć:

- „Opracowanie metodyki badań wzajemnej orientacji krystalograficznej ziarn metali i stopów za pomocą analizatora EBSD”, praca statutowa nr S0 0624 (numer pracy nadany w IMŻ), 2007;
- „Opracowanie metodyki badań wydzielen i wtrąceń niemetalicznych za pomocą mikroskopu skaningowego Inspect F wyposażonego w detektory EDS, WDS i EBSD”, praca statutowa nr S0 0638, 2007;
- „Badania porównawcze tekstury materiałów polikrystalicznych z wykorzystaniem detektora EBSD i klasycznej metody rentgenowskiej”, praca statutowa nr S0 0660, 2008;
- „Opracowanie metodyki badań nano- i mikrostruktury silnie odkształconych stali wysokostopowych oraz metali i stopów lekkich z wykorzystaniem analizatora EBSD”, praca statutowa nr S0 0700, 2009;
- „Opracowanie metodyki badań struktury stali wielofazowej z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego z detektorem EBSD”, praca statutowa nr S0 0741, 2010;
- „Opracowanie metodyki badań powłok aluminiowych osadzanych metodą PVD na stali martenzytycznej”, praca zlecona przez Politechnikę Śląską o nr B0 1291, 2010;
- „Opracowanie metodyki oraz wykonanie badań mikroanalizy powłok na stopach niklu, praca zlecona przez Politechnikę Śląską o nr B0 1301, 2010.

Realizacja tych prac pozwoliła na opracowanie nowych metod badawczych, które obecnie są szeroko stosowane i wykorzystywane w realizacji prac naukowo-badawczych. Szczególnie ważna i przydatna w badaniach jest stosunkowo młoda metoda dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych (EBSD), którą rozwijam głównie w zakresie jej aplikacji od około dziesięciu lat. Jakość wyników uzyskiwanych przy użyciu tej metody jest ściśle powiązana z preparatyką próbek, co również było przedmiotem moich prac. **Do najważniejszych moich osiągnięć w tym zakresie można zaliczyć wdrożenie tej metody do badań procesów zdrowienia i rekrytalizacji, struktur stali wielofazowych, badań silnie rozdrobionych metali i stopów, często o nanometrycznych rozmiarach oraz badań powłok.** Zagadnienia dwóch pierwszych ww. tematów zostały szeroko opisane w monografii, stanowiącej wskazane główne osiągnięcie naukowe. Efektem wdrożenia opracowanych metod badawczych w zakresie wszystkich wspomnianych zagadnień są również liczne wysoko punktowane publikacje w czasopiśmie z listy filadelfijskiej.

Aktywnie uczestniczyłem również w pracach przygotowawczych i procedurach zakupowych ultrawysokorozdzielczego skaningowo-transmisyjnego (S/TEM) mikroskopu elektronowego TITAN 80-300 oraz mikroskopu optyczno-cyfrowego OLYMPUS DSX500i, które zostały zakupione przez Instytut odpowiednio w 2010 i 2012 roku.

Jak już podkreśliłem, opracowane metodyki badań były wykorzystywane oraz dalej rozwijane w trakcie realizacji projektów naukowo-badawczych. Moje główne zainteresowania zostały ukierunkowane na **rozwój stali wielofazowych dla zastosowań w różnych gałęziach przemysłu**. Do najważniejszych projektów, które ugruntowały mój obszar zainteresowań należy zaliczyć udział w realizacji krajowego projektu rozwojowego oraz międzynarodowego. Pierwszy z nich, nr **NR07-0053-10/2011**, był realizowany w latach 2010-2013 pt.: **„Technologiczne aspekty zastosowania nowej generacji stali (AHSS) na elementy nadwozi samochodowych”** przez konsorcjum w skład którego wchodziły: Politechnika Wrocławska (lider konsorcjum), IMŻ, Akademia Górniczo-Hutnicza (AGH) i firma Kirchoff Polska Sp. z o.o. W ramach projektu opracowano założenia dla technologii wytwarzania i przerobu stali AHSS na wyrób finalny z uwzględnieniem optymalnych składów chemicznych oraz parametrów technologicznych. Badania dotyczyły stali DP, TRIP, CP i MS. W projekcie byłem zaangażowany w opracowanie parametrów cykli cieplno-plastycznych pozwalających na uzyskiwanie pożądanej struktury i właściwościami mechanicznymi poszczególnych grup stali.

Tematykę tę kontynuowałem na arenie międzynarodowej w latach 2011-2014 w ramach projektu **RFSR-CT-2011-00014 „Property oriented design of hard constituent hardness and morphology in continuously annealed/galvanised DP sheets”** dofinansowanego z Funduszu Badawczego Węgla i Stali, którego koordynatorem był prof. dr hab. Roman Kuziak. Projekt był realizowany we współpracy z zagranicznymi jednostkami badawczymi i przemysłowymi. W skład konsorcjum, oprócz IMŻ, wchodziły: ArcelorMittal Maizières Research SA (Francja), Centre de Recherches Metallurgiques - CRM (Belgia), Salzgitter Mannesmann Forschung GMBH – SZMF (Niemcy) i Akademia Górniczo-Hutnicza –AGH (Polska). Najważniejszym rezultatem projektu było opracowanie i walidacja programów komputerowych do symulacji numerycznych procesu wytwarzania blach cienkich dla przemysłu motoryzacyjnego w procesie ciągłym. W ramach prac badawczych opracowano dwa programy, mianowicie, oparty na klasycznym modelu przemian fazowych Johnson-Mehl-Avrami-Kolomogorov (JMAK) oraz model dyskretny z wykorzystaniem metody Automatów Komórkowych. Pierwszy model przewiduje udział składników strukturalnych blach w zależności od składu chemicznego i zastosowanego profilu temperaturowego w linii ciągłego wyżarzania. Drugi natomiast umożliwia przewidywanie dwuwymiarowego stanu struktury blachy z wykorzystaniem metody cyfrowej reprezentacji struktury oraz rozkładu węgla w składnikach struktury. Opracowanie tych modeli wymagało przeprowadzenia szeregu symulacji i badań wpływu szybkości i temperatury nagrzewania, czasu wygrzewania oraz sposobu i szybkości chłodzenia na uzyskiwaną strukturę i właściwości mechaniczne blach ze stali typu DP. W tym zakresie prac byłem głównym wykonawcą w projekcie. Symulacje były prowadzone z szerokim wykorzystaniem badań dylatometrycznych i symulatora Gleeble 3800, natomiast badania struktury z wykorzystaniem mikroskopii skaningowej FEG SEM i EBSD. Wyniki tych badań stanowiły dane wejściowe do opracowania ww. modeli, przekształconych w programy komputerowe wykorzystane do technologii wytwarzania blach karoseryjnych o wysokiej wytrzymałości, np. DP600, DP780 i DP980. **Realizacja projektu doprowadziła do uzyskania szeregu praktycznych efektów oraz do ich wdrożenia w praktyce przemysłowej firm biorących udział w projekcie.**

Badania ArcelorMittal przyczyniły się do zidentyfikowania tzw. mechanizmu „necklece” tworzenia się struktury stali DP. Struktura stali DP powstała w wyniku oddziaływania tego mechanizmu charakteryzuje się jednorodnym rozkładem martenzytu, a w efekcie poprawieniu ulega parametr HE (hole expansion) charakteryzujący podatność stali do wywijania kołnierza.

SZMF przeprowadził wnikliwe badania nowych stali (opracowanych w ramach projektu) zawierających kombinację molibdenu i boru oraz wpływu różnych technologii nagrzewania na właściwości mechaniczne blach. Wyniki tych badań będą wdrożone w kontekście uruchamiania produkcji blach DP o najwyższej wytrzymałości (DP780).

CRM opracował nowe cykle temperaturowe dla procesu ciągłego wyżarzania, z temperaturą piku w zakresie stabilności austenitu, umożliwiające uzyskanie bardzo wysokiej wytrzymałości w połączeniu z doskonałą ciągliwością. Właściwości mechaniczne blach DP po zastosowaniu opracowanych cykli temperaturowych były zbliżone do właściwości mechanicznych stali AHSS trzeciej generacji, nawet po zastosowaniu nieskomplikowanych składów chemicznych.

Zaangażowanie w realizację prac w obydwu ww. projektach przyczyniło się bezpośrednio do powstania mojej autorskiej monografii oraz licznych publikacji.

Badania podstawowe, przemysłowe, prace rozwojowe oraz pozostałe

Brałem udział w realizacji **20 projektów badawczych oraz 43 dużych** (powyżej 10 000 zł) **prac badawczych na bezpośrednie zlecenie jednostek naukowo-przemysłowych**. Wykaz przedstawiający kierowanie oraz uczestnictwo w projektach i ważniejszych pracach badawczych przedstawiono w **Załącznikach 4.1 i 4.2**.

- **Udział w realizacji (innych niż wymienione w pkt. a) ważniejszych projektów międzynarodowych**

Poza wyżej scharakteryzowanym projektem uczestniczyłem w realizacji innych projektów o zasięgu międzynarodowym.

Brałem udział w realizacji projektu nr **RFSR-CT-2007-00023** pt.: „Bainitic Hardenability - effective use of expensive and strategically sensitive alloying elements in high strength steel”, finansowanego przez Fundusz Badawczy Węgla i Stali. W projekcie uczestniczyły: Swerea Kimab AB (Szwecja) jako lider oraz IMŻ, Arcelor Research SA (Francja), Centre de Recherches Metallurgiques ASBL (Belgia), Corus UK Limited (Wielka Brytania), Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH (Niemcy), Sidenor Investigacion Y Desarrollo SA (Hiszpania). W ramach projektu wykonano badania wpływu dodatków stopowych na przemianę bainityczną podczas ciągłego chłodzenia, określono wpływ obróbki cieplno-plastycznej na kinetykę przemiany bainitycznej, opracowano wskaźnik hartowności bainitycznej, uwzględniający synergiczne oddziaływanie pierwiastków i obróbki cieplno-plastycznej oraz model komputerowy przewidujący hartowność bainityczną, który wdrożono w warunkach przemysłowych. W projekcie byłem zaangażowany głównie w zagadnienia związane z określeniem wpływu obróbki cieplno-plastycznej na kinetykę przemiany bainitycznej.

Uczestniczyłem w realizacji dwóch dużych projektów badawczych realizowanych na bezpośrednie zlecenie szwajcarskiej firmy SWISS STEEL AG. Celem pierwszego projektu nr B0 1267 (nr pracy w IMŻ), pt.: „Development of the new concept of the bainitic steel chemical composition, design of the steel chemical composition”, realizowanego w latach 2009-2010, było opracowanie składu chemicznego stali bainitycznej, umożliwiającej uzyskanie dla średnicy śrub w zakresie 5.5 do 22.0 mm w końcowej fazie produkcji wytwarzania na zimno, bez obróbki cieplnej, właściwości dla klasy 8.8, 9.8 i 10.9 zgodnych z wymaganiami normy ISO EN 898. Realizacja pracy wymagała wykonania wielu wytopów o zróżnicowanych składach chemicznych, które poddawano symulacjom przeróbki plastycznej na zimno oraz następnie badaniom właściwości mechanicznych i struktury. W pracy byłem zaangażowany w badania struktury z zastosowaniem mikroskopii elektronowej i badania właściwości mechanicznych. Praca zakończyła się opracowaniem składu chemicznego stali bainitycznej, spełniającego założone właściwości wyrobów. **Wyniki tej pracy zostały wdrożone**, czego efektem jest obecna produkcja wyrobów z tej stali. Drugi projekt, nr B0 1393, pt. „Development of new high-strength complex-phases steel” był realizowany w latach 2013-2016. Jego celem było

opracowanie nowej stali bainitycznej z efektem TRIP do produkcji prętów o średnicach 16-64 mm, charakteryzującej się wytrzymałością na rozciąganie około 1300 MPa, i wydłużeniem całkowitym około 16%. W szczególności efekt TRIP będący następstwem występowania austenitu resztkowego w strukturze stali wykorzystany został do podwyższenia odporności zmęczeniowej. W pracy byłem zaangażowany w określenie wpływu wielkości ziarna austenitu oraz składu chemicznego stali na postęp przemiany bainitycznej. W ramach projektu opracowano modele pozwalające projektować skład chemiczny stali pod kątem optymalizacji udziału austenitu resztkowego oraz kształtowania odpowiedniego poziomu wytrzymałości i ciągliwości prętów. Obecnie firma Swiss Steel AG jest na etapie wdrażania stali do swojej produkcji.

W latach 2013-2016 brałem udział w realizacji projektu **RFSR-CT-2013-00007**, pt. „Virtual strip rolling mill”, realizowanym przez następujące konsorcjum: ACC Cyfronet AGH (lider), IMŻ, VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH (Niemcy), ArcelorMittal Maizières Research SA (Francja), Centro de Estudios E Investigaciones Tecnicas (Hiszpania), Metatech (Niemcy). W wyniku projektu stworzono system komputerowy FlexRoll, wspomagający elastyczne projektowanie technologii walcowania wyrobów płaskich na podstawie wyników obliczeń dedykowanych modułów do symulacji numerycznych. System oprócz modelowania numerycznego łączy w sobie modele i metamodele materiałowe, analizę wrażliwości i procedury optymalizacji, które są wykorzystane do minimalizacji kosztów związanych z projektowaniem procesu produkcyjnego oraz do poprawy własności wytwarzanych produktów i półproduktów. W projekcie byłem odpowiedzialny za dostarczanie danych w postaci wyników badań struktury próbek po symulacjach cieplno-plastycznych do stworzenia modelu.

Obecnie, 2015-2018, biorę udział w realizacji projektu **RFSR-CT-2015-00012** pt. Optimal residual stress control. Projekt jest realizowany w konsorcjum w składzie: Swerea MEFOS AB (Szwecja), VDEH-Betriebsforschungsinstitut GmbH (Niemcy), Fraunhofer-Gesellschaft zur Foerderung der Angewandten Forschung e.v. (Niemcy), Voestalpine Precision Strip AB (Szwecja), Hugo Vogelsang GmbH & Co. KG (Niemcy).

- **Udział w realizacji ważniejszych projektów krajowych**

Jestem również współautorem oryginalnych osiągnięć projektowych na terenie kraju, do których zaliczyć można wdrożenia prac badawczych zrealizowanych w obszarze projektów celowych. W ramach badań przemysłowych i prac rozwojowych byłem głównym wykonawcą z ramienia Instytutu w projekcie celowym **Nr 6 ZR7 2007C/06869**, pt.: „**Opracowanie i wdrożenie technologii wytwarzania taśm stalowych ze stali konstrukcyjnych, sprężynowych i narzędziowych walcowanych na zimno z narożami kształtowymi**” realizowanym w latach 2007÷2010 przez firmę Przeróbka Plastyczna na Zimno – Baildon Sp. z o.o. Realizacja tej pracy pozwoliła na **opracowanie i wdrożenie unikalnej technologii** umożliwiającej wytwarzanie taśm ze stali konstrukcyjnych, sprężynowych i narzędziowych z narożami kształtowymi. Współuczestniczyłem w opracowaniu m. in. technologii walcowania na zimno taśm, technologii międzyoperacyjnej i końcowej obróbki cieplnej oraz technologii wytwarzania naroży kształtowych metodą skrawania i walcowania. Taśmy z narożami kształtowymi stosowane są głównie jako półfabrykat do wytwarzania noży do kosiarek rotacyjnych, noży do rozdrabniaczy drewna, na listwy nożowe do maszyn rolniczych i wykrojników nożowych dla producentów wyrobów ze skóry. Taśmy z wyoblonymi krawędziami wykorzystywane są na elementy wnętrza autobusów, elementy mocowań plandek samochodów ciężarowych, itp.

Byłem kierownikiem badań przemysłowych i prac rozwojowych z ramienia IMŻ w projekcie celowym nr **ROW-III-101/2010** pt.: „**Uruchomienie produkcji super cienkich taśm ze stali odpornych na korozję przeznaczonych na wkładki do taśm stosowanych w podziemnej infrastrukturze przesyłowej**” realizowanym przez firmę Przeróbka Plastyczna na Zimno - Baildon Sp. z o.o. w latach 2011-2012. W wyniku realizacji projektu **opracowano i wdrożono** nowoczesną technologię wytwarzania wąskich taśm o szerokości poniżej 10 mm i grubości poniżej 0,1 mm ze stali odpornych na korozję walcowanych na zimno, przeznaczonych między

innymi na wkładki wzmacniające do kompozytowych taśm z tworzyw sztucznych stosowanych do oznakowania podziemnej infrastruktury przesyłowej, takich jak m. in.: kable światłowodowe, sieci gazowe i wodociągowe.

Równolegle w latach 2010-2012 byłem również głównym wykonawcą zadań badawczych w projekcie celowym nr **6 ZR7 2009C/07342 pt.: „Opracowanie i wdrożenie technologii wytwarzania taśm ze stali niestopowych wysokowęglowych oraz niskostopowych o wysokiej wytrzymałości walcowanych na zimno i obrabianych cieplnie spełniających wymagania na pily taśmowe do cięcia drewna”**. Projekt zakończył się wdrożeniem technologii wytwarzania taśm **spełniających wymagania na pily taśmowe do cięcia drewna** w firmie Przeróbka Plastyczna na Zimno - Baildon Sp. z o.o.. Opracowana technologia jest również przydatna do produkcji pił do cięcia innych materiałów, jak na przykład tworzywa sztuczne, skóry, itp., o niższych wymaganych parametrach użytkowych.

Brałem również udział jako główny wykonawca w badaniach przemysłowych i pracach rozwojowych realizowanych w ramach projektu celowego nr **ROW-III-255/2012 „Opracowanie technologii i uruchomienie produkcji kształownika otwartego o ściance 0,6 mm z odpadów poprodukcyjnych walcowni blach cienkich”** w latach 2012-2013. Wyniki badań przemysłowych i rozwojowych w połączeniu z licznymi pracami wdrożeniowo-inwestycyjnymi pozwoliły na **opracowanie i wdrożenie** technologii wytwarzania kształownika otwartego o ściance 0,6 mm z odpadów poprodukcyjnych walcowni blach cienkich. W wyniku realizacji projektu uruchomiono w spółce DAR STAL DARIUSZ ZAŁAWA produkcję:

- Kształowników otwartych o dotychczas niewytwarzanej na rynku grubości ścianki 0,6 mm. Przed realizacją pracy na rynku dostępne były kształowniki o grubości ścianki powyżej 0,7mm.
- Kształowników otwartych o wytrzymałości na rozciąganie $R_m > 550$ MPa. Przed realizacją pracy na rynku dostępne były kształowniki o wytrzymałości na rozciąganie poniżej 550 MPa.
- Dotychczas nieprodukowanego kątownika 27 x 27 x 1,1 mm.

W oparciu o uzyskane wyniki badań w roku 2016 dokonano zgłoszenia patentowego nr P.415524, pt. „Sposób wytwarzania taśmy z odpadowej blachy stalowej”, którego jestem współtwórcą.

Pozostałe prace naukowo-badawcze, w tym ekspertyzy

Podjęmowana przeze mnie działalność naukowo-badawcza jest wieloaspektowa. Obejmuje działania związane ze stalami wielofazowymi, opracowywaniem nowych gatunków stali, rozwojem powłok metalicznych, badań stopów metali nieżelaznych, technologii obróbki cieplnej i przeróbki plastycznej. Zagadnienia te są przedmiotem badań nie tylko w ramach projektów. Corocznie od 2006 roku uczestniczę jako kierownik lub współwykonawca w pracach finansowanych ze środków statutowych (S0) i własnych Instytutu (SW). Wykaz tych prac zestawiono w **Załączniku 4.3**. Jestem również **autorem i współautorem 126 ekspertyz** materiałowych i prac rozjemczych, jak również licznych drobniejszych analiz technicznych. Ekspertyzy, których byłem kierownikiem zestawiono w **Załączniku 4.4**. Realizacja tych prac pozwoliła na zdobycie wartościowego doświadczenia w rozwiązywaniu problemów doboru materiałów i technologii wytwarzania oraz przyczyn powstawania różnego rodzaju uszkodzeń wyrobów.

Patenty i zgłoszenia patentowe

Jestem współautorem dwóch zgłoszeń patentowych będących w trakcie procesu ewaluacji:

- „Sposób wytwarzania taśmy z odpadowej blachy stalowej”, nr P.415524, Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej,
- „Stal wielofazowa zwłaszcza do produkcji szyn normalnotorowych”, nr P.417742 – zgłoszenie do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej oraz nr PCT/2016/000155 – zgłoszenie międzynarodowe.

Publikacje

W okresie po uzyskaniu stopnia doktora mój dorobek publikacyjny obejmuje **101 publikacji** w czasopiśmie, monografiach i materiałach konferencyjnych o zasięgu krajowym i międzynarodowym. Zestawienie publikacji w czasopiśmie i materiałach konferencyjnych wraz z liczbą punktów MNiSzW oraz wskaźnikiem Impact Factor przedstawiono w **załączniku 5**.

Opracowane publikacje naukowe ukazały się między innymi w czasopiśmie wymienionych w Tabeli 1, tj. w czasopiśmie indeksowanych w bazie Journal Citation Reports, wpływających na sumaryczny Impact Factor.

Tabela 1. Sumaryczny Impact Factor według Journal Citation Reports

Czasopismo według JCR	Impact Factor wg roku publikacji (ilość publikacji)
Materials and Design	3,997 (1)
Materials Chemistry and Physics	2,101 (1)
Archives of Civil and Mechanical Engineering	2,194 (1)
Materials Science and Engineering A	2,647 (1)
Archives of Metallurgy and Materials	1,783 (3)
Steel Research International	2,139 (2)
Materiali in Tehnologije	0,548 (1)
Journal of Solid State Electrochemistry	2,446 (1)
Computational Materials Science	1,879 (1)
Surface & Coatings Technology	2,199 (1)
Przemysł Chemiczny 2011	0,414 (1)
Kovove Materialy-Metallic Materials 2010	0,471 (1)
Electrochimica Acta 2009	3,325 (1)
Acta Physica Polonica A	0,525 (1)
Sumaryczny Impact Factor	26,668 (17)

Dane wg:

<http://www.scijournal.org/index.html>

<http://punktacjczasopism.pl/>

Zestawienie liczbowe publikacji, udziału w projektach i innych pracach naukowo-badawczych oraz wskaźniki dorobku naukowego przedstawiono w Tabeli 2.

Łączna ilość punktów obliczonych według MNiSW za dorobek naukowy po otrzymaniu stopnia doktora wynosi **882**.

Tabela 2. Zestawienie liczbowe publikacji i najważniejsze osiągnięcia naukowo-badawcze.

Wyszczególnienie		Liczba		
Rodzaj publikacji		Punkty MNiSW	Liczba publikacji	
Publikacje	a.	autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR) posiadających współczynnik Impact Factor	459	17
	b.	autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych w czasopismach znajdujących się w bazie Web of Science z pominięciem publikacji z punktu a	60	4
	c.	autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych indeksowanych w bazie SCOPUS z pominięciem publikacji z punktu a i b	13	1
	d.	autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych w czasopismach punktowanych MNiSW (lista B)	325	57
	e.	autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych w materiałach konferencyjnych (z pominięciem publikacji z punktu d)	0	21
	f.	autorstwo lub współautorstwo monografii lub podręczników akademickich	25	1
Patenty		0	0	
Zgłoszenia patentowe		0	2	
Razem publikacje i patenty		882	103	
Udział w projektach badawczych		ilość (kierownik)		
Projekty	KBN/MNiSW/NOT/NCN/NCBiR		16 (1)	
	Finansowane z UE		4 (0)	
	S0 - środki statutowe / SW - środki własne IMŻ		48 (12) / 11 (3)	
	Finansowane na bezpośrednie zlecenie z przemysłu: - duże zadania badawcze zlecone przez przedsiębiorstwa (>100 000 zł) - prace badawcze (o wartości 10.000-100 000 zł) - ekspertyzy		4 (0) 39 (24) 126 (70)	
Wskaźniki oceny dorobku naukowego				
Źródło		Web of Science	Scopus	
Liczba cytowań ogółem		126	148	
Liczba cytowań bez autocytowań		115	136	
Indeks Hirscha H		6	7	
Liczba publikacji w bazie		21	23	

Byłem recenzentem 7 manuskryptów, w tym 6 z bazy JCR, przedstawionych w Tabeli 3.

Tabela 3. Recenzowane manuskrypty.

Czasopismo	Numer manuskryptu	Tytuł recenzowanego manuskryptu, Impact Factor, rok wykonania recenzji
Archives of Civil and Mechanical Engineering	ACME-D-15-00664R1	Fabrication and properties of ZrO ₂ /AZ31 nanocomposite fillers of gas tungsten arc welding by accumulative roll bonding, IF 2.194, 2015
Materials and Design	JMAD-D-15-05790	Non-isothermal phase-transformation kinetics model for evaluating the austenization of 55CrMo steel based on Johnson-Mehl-Avrami equation, IF 3.997, 2015
Metallurgical and Materials Transactions A	E-TP-16-846-A	Static recrystallization kinetics and crystallographic texture of Nb-stabilized ferritic stainless steel based on orientation imaging microscopy, IF 1.749, 2016
Archives of Civil and Mechanical Engineering	ACME-D-16-00217R1	Fabrication and characterization of carbon nanotubes/AZ31 magnesium composite gas tungsten arc welding filler rods, IF 2.194, 2016
Archives of Civil and Mechanical Engineering	ACME-D-16-00347R1	Application of the nanocrystallisation method by tempering as the treatment preceding the plastic working process of pearlitic steels, IF 2.194, 2016
Archives of Civil and Mechanical Engineering	ACME-D-16-00682R1	The influence of austenite grain size on mechanical properties of low-alloy steel, IF 2.194, 2016
The Open Cybernetics and Systemics Journal	BSP-TOCSJ-2017-141	Research on the Influencing Factors of Leapfrogging Development of Low-carbon Technology in China's Manufacturing under Late-mover Advantages, 2017

W 2013 roku zostałem zaproszony do wygłoszenia referatu na Seminarium Instytutu Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN, pt.: „Wykorzystanie zaawansowanych metod badań strukturalnych do rozwoju nowoczesnych dyskretnych modeli mikrostruktury bazujących na idei cyfrowej reprezentacji materiału”.

Również w roku 2013 wygłosiłem referat pt.: „Możliwości mikroskopii elektronowej do wieloskalowego scharakteryzowania struktury materiałów” na zaproszenie na Seminarium AGH na Wydziale Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej.

W roku 2012 ukończyłem szkolenie dla audytorów wewnętrznych systemu zarządzania laboratorium wg wymagań normy PN-EN ISO/IEC 17025:2005 + Ap.1:2007, Gliwice.

Moje plany naukowo badawcze na przyszłość to:

1. Badania nad rozwojem wysokochromowych stali martenzytycznych do zastosowań w energetyce konwencjonalnej do pracy w warunkach nadkrytycznych oraz nad technologią wytwarzania z nich rur kotłowych
2. Badania mechanizmów i odporności na zużycie stali wielofazowych przeznaczonych na szyny kolejowe po próbach zbliżonych do warunków eksploatacyjnych
3. Badania nad rozwojem powłok Zn-Mg-Al do produkcji blach poddawanych ciągłemu cynkowaniu ogniowemu
4. Badania procesów wydzieleniowych na właściwości mechaniczne prętów wytwarzanych z niskowęglowej stali manganowej wzbogaconej o mikrododatki stopowe na drodze obróbki termomechanicznej i cieplnej
5. Analiza stopów niklu oraz TiAl z innowacyjnymi powłokami żaroodpornymi zarówno przed, jak i po testach cyklicznego utleniania oraz badaniach mechanicznych
6. Realizacja ekspertyz materiałowych i technologicznych oraz innych prac naukowo-badawczych

6. Działalność organizacyjno-dydaktyczna i inna

Jestem pracownikiem Instytutu Metalurgii Żelaza od 1 lipca 2006 r. W latach 2010-2016 pełniłem **funkcję zastępcy**, a od 01.11.2016 **pełnię funkcję Kierownika Zakładu Badań Właściwości i Struktury Materiałów**. Obecnie do moich obowiązków należą m.in.:

- organizowanie pracy w Zakładzie,
- organizowanie współpracy Zakładu z zewnętrznymi jednostkami przemysłowymi, naukowymi i badawczymi,
- organizowanie współpracy z innymi komórkami organizacyjnymi Instytutu,
- nadzorowanie wykonawstwa prac badawczych, wdrożeniowych, analitycznych prowadzonych w Zakładzie, szczególnie w odniesieniu do ich jakości i terminowości realizacji,
- nadzorowanie pracy pracowników Zakładu, udzielanie im instrukcji i fachowej pomocy,
- dbałość o rozwój kadry Zakładu.

Aktywnie **uczestniczyłem w zakupie i adaptacji urządzeń badawczych** pod potrzeby Instytutu, w tym głównie: elektronowego mikroskopu skaningowego Inspect F, ultrawysokorozdzielczego skaningowo-transmisyjnego mikroskopu elektronowego TITAN 80-300, dyfraktometru rentgenowskiego Empyrean czy mikroskopu optyczno-cyfrowego Olympus.

W latach 2002-2005 byłem **członkiem Rady Wydziału Inżynierii Materiałowej, Metalurgii i Transportu**, a od 2011 do chwili obecnej **członkiem Rady Naukowej Instytutu Metalurgii Żelaza**. Jestem **sekretarzem Komisji Doktorskiej w Instytucie** oraz **członkiem Zespołu**

Kwalifikacyjnego w Instytucie, zajmującego się merytoryczną oceną wniosków składanych w konkursach na prace badawcze, realizowane w ramach dotacji na działalność statutową oraz z Funduszu Badań Własnych. **Należę również do Kolegium Instytutu**, będącego ciałem doradczym powołanym przez Dyrektora Instytutu. W 2016 r. byłem **sekretarzem Zespołu ds. Rozwoju Kadry w zakresie okresowej oceny pracowników Instytutu**. Jestem **członkiem Zespołu Redakcyjnego w czasopiśmie Prace Instytutu Metalurgii Żelaza (ISSN 0137-9941)**.

Byłem **współorganizatorem I i III (międzynarodowego) Seminarium Instytutu Metalurgii Żelaza im. Stanisława Staszica**, pt.: „**Stal dla nowoczesnego społeczeństwa – technologie i wyroby**” (2010) oraz „**Instytut Metalurgii Żelaza w europejskiej przestrzeni badawczej**” (2015).

Od 2010 r. jestem **reprezentantem Polski w European Steel Technology Platform (ESTEP) WG6 Energy Market**. Grupa ta zajmuje się problemami związanymi z przemysłem energetycznym i ustala politykę rozwoju przemysłu stalowego pod jego potrzeby. W spotkaniach roboczych grupy uczestniczą przedstawiciele jednostek naukowych oraz największych europejskich koncernów przemysłowych, zajmujących się wytwarzaniem wyrobów stosowanych w energetyce. Członkostwo w tej organizacji sprawia, że współuczestniczę w ustalaniu priorytetowych kierunków badań z zastosowaniem wyrobów stalowych dla przemysłu energetycznego, które są następnie obowiązujące w konkursach RFCS ogłaszanych przez Komisję Europejską. W ramach grupy przygotowywane są ramowe wytyczne projektów, które mogą być finansowane z funduszy europejskich.

W okresie studiów doktoranckich prowadziłem zajęcia dydaktyczne ze studentami Wydziału Inżynierii Materiałowej, Metalurgii i Transportu w zakresie specjalistycznych przedmiotów zawodowych z obszaru inżynierii materiałowej. Zajęcia te realizowałem na studiach stacjonarnych I i II stopnia oraz na studiach wieczorowych (w latach 2001 – 2004), ze studentami kierunków: Inżynieria Materiałowa, Metalurgia oraz Zarządzanie i Inżynieria Produkcji. Prowadzone zajęcia obejmowały laboratoria i seminaria z następujących przedmiotów: „*Metody i Techniki Badań Materiałów*”, „*Metody Doboru Materiałów i Technologii*”, „*Podstawy Nauki o Materiałach*”, „*Materiały Inżynierskie*”, „*Tworzywa Metaliczne*”.

W latach 2004-2006 prowadziłem również zajęcia dydaktyczne w Wyższej Szkole Zarządzania Ochroną Pracy.

Jestem **promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim pani mgr inż. Zofii Kania** w Instytucie Metalurgii Żelaza. Rozprawa doktorska pt.: „*Design of chemical composition and thermomechanical processing of advanced bainitic steels with TRIP effect*” jest realizowana w ramach projektu z firmą Swiss Steel A.G.

Opracowałem następujące **autorskie materiały dydaktyczne**:

- „*Aplikacja metody EBSD w badaniach struktur wyrobów stalowych*”,
- „*Skaningowa mikroskopia elektronowa jako narzędzie badawcze*”,
- „*Składniki struktury stali wielofazowych*”.

Materiały te wykorzystałem podczas **szkoleń pracowników** w Zakładzie Badań Właściwości i Struktury Materiałów. Opracowałem również materiały dydaktyczne w oparciu, o które przeprowadziłem na zlecenie firm:

- Szkolenie w zakresie metod analizy wyrobów metalowych w kontroli jakości oraz zagadnień związanych z obróbką cieplną elementów stalowych, Zleceniodawca: Magneti Marelli Suspension Systems Bielsko, N0 8060 (nr IMŻ), 2010,
- Szkolenie w zakresie badań materiałoznawczych staliw i żeliw, Zleceniodawca: Hydro-Vacuum S.A., N0 8255, 2010.

Szkolenia pozwoliły na nabycie wiedzy zarówno teoretycznej, jak i praktycznej.

Obecnie jako kierownik Zakładu sprawuję dodatkową **opiekę nad młodymi pracownikami**, panią mgr inż. Zofią Kania oraz mgr inż. Radosławem Rozmusem, służąc im pomocą w rozwiązywaniu problemów naukowo-badawczych oraz organizacyjnych.

Byłem **opiekunem stażu naukowego** następujących studentów studiów doktoranckich Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej:

- mgr inż. Agaty Brzezińskiej,
- mgr inż. Doroty Pasek.

Opiekowałem się również studentami ww. Wydziału, tj. Radosławem Swadźbą i Damianem Nowakiem podczas ich praktyk dyplomowych.

Stażyci i praktykanci zapoznali się z możliwościami badawczymi Zakładu, a także nabyli dodatkowe umiejętności wynikające z praktycznego wykorzystania tych metod w badaniach. Wielokrotnie aktywnie uczestniczyłem w prezentacjach możliwości badawczych Zakładu organizowanych dla studentów na prośbę Jednostek Naukowych.

Moje potwierdzone osiągnięcie naukowe oraz nabyte w drodze szkoleń certyfikaty przedstawiono w Tabeli 4.

Tabela 4. Zestawienie nagrody i posiadanych certyfikatów

Rodzaj osiągnięcia	Liczba
Wyróżnienie pracy doktorskiej przez RW Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej (2006)	1
Inne	
Certyfikat uczestnictwa z szkoleniu z zakresu metody EBSD, (Tilburg, Holandia 2009)	1
Certyfikat uczestnictwa z szkoleniu z zakresu metody WDS, (Tilburg, Holandia 2009)	1
Certyfikat uczestnictwa w szkoleniu dla audytorów wewnętrznych systemu zarządzania laboratorium wg wymagań normy PN-EN ISO/IEC 17025:2005 + Ap.1:2007	1

7. Osiągnięcia zgodnie z wymogami Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1 września 2011 roku w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego (Dz.U. Nr 196, poz. 1165)

Publikacje naukowe w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citation Reports (JCR)	TAK	17
Zrealizowane oryginalne osiągnięcie projektowe, konstrukcyjne i technologiczne	TAK	6
Udzielone patenty, zgłoszenia patentowe międzynarodowe i krajowe	TAK	2
Monografie, publikacje naukowe w czasopismach międzynarodowych lub krajowych	TAK	1
Opracowania zbiorowe, katalogi zbiorów, dokumentacja prac badawczych, ekspertyz, utworów i dzieł artystycznych	TAK	439
Sumaryczny impact factor według listy Journal Citation Reports (JCR)	26,668	
Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS)	126	
Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS)	6	
Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach	TAK	20
Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową lub artystyczną	TAK	1
Wygłoszenie referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach	TAK	8
Udział w międzynarodowych lub krajowych konferencjach naukowych lub udział w komitetach organizacyjnych tych konferencji	TAK	12
Otrzymane nagrody i wyróżnienia inne niż wymienione wyżej	NIE	0
Udział w konsorcjach i sieciach badawczych	TAK	7
Kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z naukowcami z innych ośrodków polskich i zagranicznych oraz we współpracy z przedsiębiorcami	TAK	1
Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism	TAK	1
Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych	TAK	1
Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki lub sztuki Przygotowanie materiałów dydaktycznych	TAK	3
Opieka naukowa nad studentami i lekarzami w toku specjalizacji	TAK	6
Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego	TAK	1
Staże w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych, akademickich i przemysłowych	TAK	2
Wykonanie ekspertyzy lub innego opracowania na zamówienie	TAK	316
Udział w zespołach eksperckich i konkursowych	TAK	2
Recenzowanie projektów międzynarodowych lub krajowych oraz publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych	TAK	7