

Rada Naukowa Dyscypliny Inżynieria Materiałowa
Politechnika Warszawska
Pl. Politechniki 1, 00-661 Warszawa
za pośrednictwem:
Rady Doskonałości Naukowej
pl. Defilad 1
00-901 Warszawa
(Pałac Kultury i Nauki, p. XXIV, pok. 2401)

Witold Chromiński
(imię i nazwisko wnioskodawcy)

Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Materiałowej
ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa
(miejsce pracy/jednostka naukowa)

Wniosek

z dnia 12.05.2025

o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego
w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa

Wnoszę – na podstawie art. 221 ust. 10 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce – aby komisja habilitacyjna podejmowała uchwałę w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w głosowaniu ~~tajnym~~/jawnym^{*1}

Zostałem poinformowany, że:

Administratorem w odniesieniu do danych osobowych pozyskanych w ramach postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego jest Przewodniczący Rady Doskonałości Naukowej z siedzibą w Warszawie (pl. Defilad 1, XXIV piętro, 00-901 Warszawa).

Kontakt za pośrednictwem e-mail: kancelaria@rdn.gov.pl, tel. 22 656 60 98 lub w siedzibie organu. Dane osobowe będą przetwarzane w oparciu o przesłankę wskazaną w art. 6 ust. 1 lit. c) Rozporządzenia UE 2016/679 z dnia 27 kwietnia 2016 r. w związku z art. 220 - 221 oraz art. 232 – 240 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, w celu przeprowadzenia postępowania o nadanie stopnia doktora habilitowanego oraz realizacji praw i obowiązków oraz środków odwoławczych przewidzianych w tym postępowaniu.

Szczegółowa informacja na temat przetwarzania danych osobowych w postępowaniu dostępna jest na stronie www.rdn.gov.pl/klauzula-informacyjna-rodo.html

.....
(podpis wnioskodawcy)

Załączniki:

- Załącznik 1 – Dane wnioskodawcy
- Załącznik 2 – Kopia dokumentu potwierdzającego uzyskanie stopnia doktora
- Załącznik 3 – Autoreferat
- Załącznik 4 – Wykaz osiągnięć naukowych
- Załącznik 5 – Oświadczenia dotyczące merytorycznego wkładu w powstanie publikacji

¹ * Niepotrzebne skreślić.

Załącznik 6 – Publikacje zawarte w cyklu

Załącznik 7 – Potwierdzenia odbytych staży

Dane wnioskodawcy

1. Imię i Nazwisko: Witold Chromiński
2. Miejsce pracy: Politechnika Warszawska Wydział Inżynierii Materiałowej
Narodowe Centrum Badań Jądrowych Centrum Doskonałości NOMATEN
3. Adres korespondencyjny: [REDACTED]
4. Nr telefonu: [REDACTED]
5. Adres e-mail: witold.chrominski@pw.edu.pl
6. Numer PESEL: [REDACTED]
7. Numer i seria dokumentu tożsamości w przypadku braku nadania numeru PESEL:

.....

.....
(podpis wnioskodawcy)



DYPLOM

WYDANY W RZECZYPOSPOLITEJ POLSKIEJ

ODPIS

mgr inż. Witold Jerzy Chromiński

urodzony dnia

na podstawie przedstawionej rozprawy doktorskiej „*Microstructural heterogeneities and their influence on precipitation phenomena in a severely deformed 6082 aluminium alloy*”

oraz po złożeniu wymaganych egzaminów uzyskał stopień naukowy

DOKTORA

w dziedzinie *nauk technicznych*

w dyscyplinie *inżynieria materiałowa*

nadany uchwałą Rady Wydziału Inżynierii Materiałowej

z dnia *24 lutego 2017 roku*

Promotor w przewodzie doktorskim:

prof. dr hab. inż. Małgorzata Lewandowska

Recenzenci w przewodzie doktorskim:

prof. dr hab. inż. Maria Richert

prof. dr hab. inż. Jan Sieniawski

Warszawa, dnia *31 maja 2017 roku*

Nr *8046/2017*

Małgorzata Lewandowska

PROMOTOR

DZIEKAN
WYDZIAŁU INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ

Jarostaw Mizera
Prof. dr hab. inż. Jarostaw Mizera

DZIEKAN

REKTOR
Politechniki Warszawskiej

prof. dr hab. inż. Jan Szmidt

REKTOR

Załącznik nr 3 do postępowania habilitacyjnego

Dr inż. Witold Chromiński

Autoreferat

SPIS TREŚCI

1. Imię i nazwisko	4
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.....	4
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych	5
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).....	5
4.1 Cykl publikacji pt. <i>Projektowanie niejednorodności i jednorodności mikrostrukturalnych w stopach aluminium</i>	5
4.2 Omówienie cyklu publikacji	11
4.2.1 Wprowadzenie.....	11
4.2.2 Przemiany mikrostruktury w czasie odkształcenia plastycznego promującego ujednorodnianie mikrostruktury	14
4.2.3 Wpływ lokalnej konfiguracji granic ziaren i struktur dyslokacyjnych na mechanizmy odkształcenia plastycznego	22
4.2.4 Procesy wydzieleniowe w stopach aluminium o niejednorodnej mikrostrukturze .	30
4.2.5 Oryginalne osiągnięcia naukowe stanowiące wkład w rozwój dyscypliny inżynieria materiałowa zawarte w cyklu publikacji.....	41
4.3 Pozostałe osiągnięcia niewchodzące w skład cyklu publikacji.....	43
4.3.1 Powiązanie mikrostruktury metali lekkich poddanych dużemu odkształceniu plastycznemu z właściwościami mechanicznymi	43
4.3.2 Opisanie mechanizmów powstawania warstw tlenkowych w czasie korozji stopów Ti	44
4.3.3 Analiza zniszczeń radiacyjnych w materiałach dla energetyki	45
4.3.4 Zastosowanie metod mikroskopii elektronowej do analizy ilościowej jako danych wsadowych do modelowania zjawisk fizycznych.....	46
Literatura	47

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.....	51
5.1 Staż w Trondheim – maj 2015	51
5.2 Praca w Narodowym Centrum Badań Jądrowych – 2021 - obecnie.....	51
5.3 Staż w Trondheim – sierpień-listopad 2021.....	52
5.4 Staż w Chimie Paris Tech - luty 2024.....	52
5.5 Staż w Chimie Paris Tech – kwiecień 2024.....	53
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.....	54
6.1 Dydaktyka	54
6.2 Osiągnięcia organizacyjne.....	55
6.2.1 Projekty	55
6.2.2 Organizacja konferencji naukowych.....	57
6.2.3 Utworzenie nowych laboratoriów	57
6.2.4 Członkostwo w towarzystwach naukowych	58
6.3 Popularyzacja nauki	58
6.4 Recenzowanie artykułów	58
7. Informacje dodatkowe.....	58

1. Imię i nazwisko

Witold Chromiński

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

2017	Dr inż.	Politechnika Warszawska Wydział Inżynierii Materiałowej Tytuł rozprawy: <i>Microstructural heterogeneities and their influence on precipitation phenomena in a severely deformed 6082 aluminium alloy</i> Promotor: Prof. dr hab. inż. Małgorzata Lewandowska
2011	Mgr inż.	Politechnika Warszawska Wydział Inżynierii Materiałowej Tytuł rozprawy: <i>Kształtowanie mikrostruktury i właściwości stopu 6063 w aspekcie zastosowania na elementy nośne foteli</i> Promotor: Prof. nzw. dr hab. inż. Małgorzata Lewandowska
	Inż.	Politechnika Warszawska Wydział Inżynierii Materiałowej Tytuł pracy dyplomowej: <i>Właściwości mechaniczne nanokrystalicznych stopów aluminium</i> Promotor: Prof. nzw. dr hab. inż. Małgorzata Lewandowska

Pozostałe dyplomy

2019	PRINCE2 Foundation in Project Management	PeopleCert AXELOS
------	--	-------------------

2017 Master of Business Administration Woodbury School of Business at Utah Valley University
Polska Akademia Nauk

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

2021-obecnie	Specjalista badawczo-techniczny	Narodowe Centrum Badań Jądrowych Centrum Doskonałości NOMATEN
2020 - obecnie	adiunkt	Politechnika Warszawska Wydział Inżynierii Materiałowej
2017-2020	technolog	Politechnika Warszawska Wydział Inżynierii Materiałowej

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).

4.1 Cykl publikacji pt. *Projektowanie niejednorodności i jednorodności mikrostrukturalnych w stopach aluminium*

Cykl składa się z 10 artykułów opublikowanych w czasopismach z bazy JCR:

[C1] W. Chrominski, L. Olejnik, A. Rosochowski, M. Lewandowska, *Grain refinement in technically pure aluminium plates using incremental ECAP processing*, Mater. Sci. Eng. A. 636 (2015) 172–180. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.03.098>.

Tematyka niniejszej pracy dotyczy przemian mikrostrukturalnych w trakcie odkształcenia plastycznego z wykorzystaniem nowej techniki przyrostowego przeciskania przez kanał kątowy pozwalającej na zastosowanie obrotów obrabianych płytek względem normalnej do ich powierzchni. Metoda ta została opracowana na Wydziale Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej przez Prof. Olejnika we współpracy z Prof. Rosochowskim. Prace zostały wykonane w ramach projektu NANOMET (finansowanego w ramach POIG) kierowanego przez Prof. M. Lewandowską. Jestem autorem wiodącym artykułu, mój wkład w jego powstanie polegał na:

- opracowaniu koncepcji artykułu;
- opracowaniu metodyki badawczej;
- wykonaniu badań strukturalnych metodą EBSD wraz z analizą danych;
- wykonaniu obserwacji mikroskopowych metodą TEM wraz z analizą wyników;
- wykonaniu badań twardości;
- interpretacji wyników;
- przygotowaniu publikacji.

[C2] M. Ciemiorek, W. Chrominski, L. Olejnik, M. Lewandowska, *Evaluation of mechanical properties and anisotropy of ultra-fine grained 1050 aluminum sheets produced by incremental ECAP*, Mater. Des. 130 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.05.069>.

Niniejszy artykuł stanowi kontynuację badań opisanych w artykule [C1]. Głównym wątkiem badawczym było określenie anizotropii właściwości mechanicznych płytek z aluminium otrzymanych metodą przyrostowego przeciskania przez kanał kątowy. Pomysłodawczynią badań była dr inż. Ciemiorek. Moja rola w powstaniu niemniejszej pracy polegała na opracowaniu metodyki i przeprowadzeniu badań mikrostruktury, które posłużyły interpretacji wyników otrzymanych w testach właściwości mechanicznych. W ramach pracy nad artykułem wykonałem poniższe zadania:

- współudział w opracowaniu metodyki badawczej (badania mikrostrukturalne);
- wykonanie badań strukturalnych metodą EBSD wraz z analizą danych;
- zredagowanie części dotyczącej analizy tekstury krystalograficznej i przemian strukturalnych oraz korekta manuskryptu.

[C3] W. Chrominski, M. Lewandowska, *Effect of Fiber Orientation on Microstructure and Texture Evolution During the Cold-Rolling of Al–Mg–Si Alloy*, Adv. Eng. Mater. 24 (2022) 1–11. <https://doi.org/10.1002/adem.202101610>.

Artykuł powstał w trakcie realizacji projektu NCN Sonatina 1 pt. *Optymalizacja mikrostruktury stopów aluminium pod kątem efektywności umocnienia wydzieleniowego*, którego byłem kierownikiem. Celem badań było znalezienie metody odkształcenia plastycznego opartej na konwencjonalnych metodzie odkształcenia – walcowaniu płaskim, pozwalającej na eliminację

włóknistej struktury, która jest typowa dla walcowanego aluminium. Po serii prób zdecydowałem się na zastosowanie obrotów o 90° wokół osi normalnej do płaszczyzny blachy po każdym przepuszczeniu przez walce. Jako autor wiodący publikacji byłem odpowiedzialny za przeprowadzenie poniższych zadań:

- opracowanie koncepcji artykułu;
- opracowanie metodyki badawczej;
- przeprowadzenie obróbki cieplno-plastycznej;
- wykonanie badań strukturalnych metodą EBSD wraz z analizą danych;
- przeprowadzenie interpretacji uzyskanych wyników;
- przygotowanie publikacji;
- zdobycie funduszy na badania, kierowanie projektem w ramach, którego powstała publikacja.

[C4] W. Chrominski, M. Lewandowska, *Mechanisms of plastic deformation in ultrafine-grained aluminium – In-situ and ex-post studies*, Mater. Sci. Eng. A. 715 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.083>.

Artykuł powstał w trakcie realizacji projektu NCN Preludium 8 pt. *Badania in-situ mechanizmów odkształcenia plastycznego aluminium o silnie rozdrobnionej strukturze w transmisyjnym mikroskopie elektronowym*, którego byłem kierownikiem i głównym wykonawcą. Materiał badawczy stanowił aluminiowy pręt poddany procesowi wyciskania hydrostatycznego, techniki prowadzącej do powstania znacznych niejednorodności mikrostrukturalnych. Zastosowanie eksperymentu rozciągania w kolumnie mikroskopu pozwoliło na szczegółowe badanie ewolucji struktur dyslokacyjnych w zależności od lokalnej konfiguracji granic ziaren. Jako autor wiodący artykułu byłem odpowiedzialny za:

- opracowanie koncepcji artykułu;
- opracowanie metodyki badawczej;
- wykonanie badań strukturalnych metodą EBSD wraz z analizą danych;
- przeprowadzenie obserwacji TEM wraz z wykonaniem eksperymentu rozciągania w mikroskopie, analiza otrzymanych wyników;
- przeprowadzenie interpretacji uzyskanych wyników;
- przygotowanie publikacji;
- zdobycie funduszy na badania, kierowanie projektem w ramach, którego powstała publikacja.

- [C5]** W. Chrominski, M. Lewandowska, *The importance of microstructural heterogeneities in the work hardening of ultra fine-grained aluminum, studied by in-situ TEM straining and mechanical tests*, Mater. Sci. Eng. A. 764 (2019) 138200. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138200>.

Artykuł powstał w trakcie realizacji projektu NCN Preludium 8 pt. *Badania in-situ mechanizmów odkształcenia plastycznego aluminium o silnie rozdrobnionej strukturze w transmisyjnym mikroskopie elektronowym*, którego byłem kierownikiem i głównym wykonawcą. Badania w nim zawarte stanowią porównanie mechanizmów odkształcenia plastycznego zaobserwowanych w materiale o silnie niejednorodnej mikrostrukturze (po procesie wyciskania hydrostatycznego) oraz jednorodnej mikrostrukturze (po procesie przyrostowego przeciskania przez kanał kątowy) oraz odniesienie ich do parametrów mechanicznych wyznaczonych w próbie rozciągania. Jak autor wiodący artykułu byłem odpowiedzialny za:

- opracowanie koncepcji artykułu;
- opracowanie metodyki badawczej;
- wykonanie badań strukturalnych metodami EBSD i TKD wraz z analizą danych;
- przeprowadzenie obserwacji TEM wraz z wykonaniem eksperymentu rozciągania w mikroskopie, analiza otrzymanych wyników;
- przeprowadzenie interpretacji uzyskanych wyników;
- przygotowanie publikacji;
- zdobycie funduszy na badania, kierowanie projektem w ramach, którego powstała publikacja.

- [C6]** W. Chrominski, K. Majchrowicz, M. Lewandowska, *Microstructural response to compression deformation of ultrafine-grained aluminum with various microstructures*, Mater. Sci. Eng. A. 763 (2019) 138184. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138184>.

Artykuł powstał w trakcie realizacji projektu NCN Preludium 8 pt. *Badania in-situ mechanizmów odkształcenia plastycznego aluminium o silnie rozdrobnionej strukturze w transmisyjnym mikroskopie elektronowym*, którego byłem kierownikiem i głównym wykonawcą. W pracy przeprowadzono szczegółową analizę mikrostruktury czystego aluminium po odkształceniu plastycznym w zależności od wyjściowej mikrostruktury. Badane próbki różniły się pod względem tekstury, współczynnika kształtu ziaren oraz charakterystyki granic ziaren. Jako autor wiodący artykułu byłem odpowiedzialny za:

- opracowanie koncepcji artykułu;
- opracowanie metodyki badawczej;
- wykonanie badań strukturalnych metodą EBSD wraz z analizą danych;
- przeprowadzenie obserwacji STEM wraz z analizą otrzymanych wyników;
- przeprowadzenie interpretacji uzyskanych wyników;
- przygotowanie publikacji;
- zdobycie funduszy na badania; kierowanie projektem w ramach, którego powstała publikacja.

[C7] K. Majchrowicz, Z. Pakieła, W. Chrominski, M. Kulczyk, *Enhanced strength and electrical conductivity of ultrafine-grained Al-Mg-Si alloy processed by hydrostatic extrusion*, Mater. Charact. (2018). <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.11.023>.

Pomysłodawcą badań i autorem wiodącym niniejszego artykułu był dr inż. Kamil Majchrowicz. Z jego inicjatywy badania przewodności elektrycznej i właściwości mechanicznych zostały uzupełnione o analizę mikrostrukturalną z użyciem technik EBSD i TEM, za które byłem odpowiedzialny. Mój wkład w powstanie artykułu polegał na:

- przeprowadzeniu obserwacji TEM wraz z analizą otrzymanych wyników;
- wykonaniu badań strukturalnych metodą EBSD wraz z analizą danych;
- zredagowaniu części artykułu dotyczącej analizy mikrostruktury.

[C8] W. Chrominski, M. Lewandowska, *Influence of dislocation structures on precipitation phenomena in rolled Al-Mg-Si alloy*, Mater. Sci. Eng. A. 793 (2020) 139903. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139903>.

Artykuł powstał w trakcie realizacji projektu NCN Sonatina 1 pt. *Optymalizacja mikrostruktury stopów aluminium pod kątem efektywności umocnienia wydzieleniowego*, którego byłem kierownikiem i głównym wykonawcą. Praca dotyczy określeniu wpływu struktur dyslokacyjnych powstałych w wyniku odkształcenia plastycznego na procesy wydzieleniowe z przesyconego roztworu stałego oraz możliwości umocnienia wydzieleniowego takiego materiału. Jako wiodący autor publikacji byłem odpowiedzialny za:

- opracowanie koncepcji artykułu;
- opracowanie metodyki badawczej;
- przygotowanie materiału do badań poprzez przeprowadzenie obróbki cieplno-plastycznej;

- wykonanie badań mikrostrukturalnych metodą EBSD wraz z analizą danych;
- przeprowadzenie obserwacji TEM wraz z wykonaniem eksperymentu grzania w mikroskopie, analizą otrzymanych wyników;
- przeprowadzenie interpretacji uzyskanych wyników;
- przygotowanie publikacji;
- zdobycie funduszy na badania, kierowanie projektem w ramach, którego powstała publikacja.

[C9] W. Chrominski, M. Lewandowska, *Precipitation strengthening of Al-Mg-Si alloy subjected to multiple accumulative roll bonding combined with a heat treatment*, Mater. Des. 219 (2022) 110813. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110813>.

Artykuł powstał w trakcie realizacji projektu NCN Sonatina 1 pt. *Optymalizacja mikrostruktury stopów aluminium pod kątem efektywności umocnienia wydzieleniowego*, którego byłem kierownikiem i głównym wykonawcą. Praca dotyczy badań nad procedurą obróbki cieplno-plastycznej, której celem jest efektywne połączenie umocnienia odkształceniowego i wydzieleniowego. Praca ta jest bezpośrednią kontynuacją wątków opisywanych w artykule [C8] a zaproponowana obróbka została opracowana dzięki odkryciom opisanym w tej pracy. Jako wiodący autor publikacji byłem odpowiedzialny za:

- opracowanie koncepcji artykułu;
- opracowanie metodyki badawczej;
- przygotowanie materiału do badań poprzez przeprowadzenie obróbki cieplno-plastycznej;
- wykonanie badań strukturalnych metodą EBSD wraz z analizą danych;
- przeprowadzenie obserwacji TEM, analiza otrzymanych wyników;
- przeprowadzenie pomiarów twardości;
- przeprowadzenie interpretacji uzyskanych wyników;
- przygotowanie publikacji;
- zdobycie funduszy na badania, kierowanie projektem w ramach, którego powstała publikacja.

[C10] W. Chrominski, E. Christiansen, E. Choinska, R. Holmestad, M. Lewandowska, *Enhancing homogenous precipitation and strengthening effectiveness in AlCuMg alloy*, J. Mater. Res. Technol. 33 (2024) 6722–6731

Artykuł powstał w trakcie realizacji projektu NCN Sonata 16 pt *Opracowanie składu chemicznego i obróbki cieplnej nowego, umacnianego wydzieleniowo stopu Al o zwiększonej wytrzymałości mechanicznej*, którego byłem kierownikiem i głównym wykonawcą. Praca dotyczy zastosowania przeróbki cieplno-plastycznej mającej na celu przyspieszenie zarodkowania faz umacniających na drodze aktywacji dyfuzji. Nadmiarowa gęstość wakansów wytworzona w czasie przeróbki prowadzi do niejednorodności rozkładu pierwiastków stopowych i ułatwienia zarodkowania pierwszych wydzieleni. Jako wiodący autor publikacji byłem odpowiedzialny za:

- opracowanie koncepcji artykułu;
- opracowanie metodyki badawczej;
- przygotowanie materiału do badań poprzez przeprowadzenie obróbki cieplno-plastycznej;
- wykonanie badań strukturalnych metodą EBSD wraz z analizą danych;
- przeprowadzenie części obserwacji TEM oraz obserwacji STEM,
- analizę otrzymanych wyników;
- przeprowadzenie pomiarów twardości;
- przeprowadzenie interpretacji uzyskanych wyników;
- przygotowanie publikacji;
- zdobycie funduszy na badania, kierowanie projektem w ramach, którego powstała publikacja.

4.2 Omówienie cyklu publikacji

4.2.1 Wprowadzenie

Założenie dotyczące bezpośredniej korelacji pomiędzy mikrostrukturą materiałów metalicznych a ich właściwościami jest podstawą inżynierii materiałowej jako nauki zajmującej się zrozumieniem właściwości użytkowych materiałów. Zatem, dysponując narzędziami pozwalającymi na kształtowanie mikrostruktury powinniśmy być w stanie nadawać materiałom żądane właściwości. Proste zależności pozwalające łączyć różne cechy struktury z wytrzymałością mechaniczną (np. równanie Halla-Petcha czy prawo Schmidta) oraz innymi cechami jak np. przewodnością elektryczną zdają się potwierdzać to stwierdzenie. Istnieją także bardziej zaawansowane modele matematyczne pozwalające łączyć składowe tekstury lub cechy różnych faz w materiałach wielofazowych, które są z powodzeniem stosowane w przemyśle do określania parametrów procesów technologicznych, np. obróbki cieplnej stali czy przeróbki plastycznej.

Mikrostruktura metali często traktowana jest jako jednorodna. Prace naukowe z zakresu inżynierii materiałowej często skupiają się na finalnych właściwościach, nie poświęcając wystarczającej uwagi niuansom mikrostrukturalnym, które często są zależne od miejsca obserwacji i mogą się między sobą różnić. W takim przypadku omówienie mikrostruktury materiału jest pewnego rodzaju uśrednieniem pozwalającym na proste wytłumaczenie opisywanych zjawisk. Jest to oczywiście w pełni uzasadnione, ponieważ autorzy każdej pracy skupiają się na wybranych aspektach stanowiących główne źródło zainteresowania.

W swojej pracy w Laboratorium Mikroskopii Elektronowej WIM PW skupiam się na ujawnianiu cech mikrostrukturalnych pozwalających na wyjaśnienie różnic pomiędzy materiałami przygotowanymi z wykorzystaniem różnych technik, parametrów technologicznych lub składu chemicznego. Prowadzone przeze mnie badania własne dotyczą przede wszystkim przemian mikrostruktury stopów aluminium. Przez wiele lat w centrum moich zainteresowań znajdowały się procesy odkształcenia plastycznego i ich wpływ na rozdrobnienie ziaren oraz powstawanie struktur dyslokacyjnych. Dodatkowo prowadziłem badania dotyczące wpływu tych zjawisk na procesy wydzieleniowe w stopach aluminium. Na pewnym etapie badań moją uwagę zwróciły różnice w obrazowanych zjawiskach w mikroskali, ale obserwowane w obrębie tego samego preparatu. Doprowadziło mnie to do wniosku, że muszą istnieć lokalne uwarunkowania mikrostrukturalne, które bezpośrednio wpływają na sposób zachodzenia badanych zjawisk w zależności od lokalnego zestawu cech materiałów.

Literatura dotycząca odkształcenia plastycznego, którą studiowałem w tamtym czasie, wyraźnie wskazała, że koncept ten nie jest nowy. Doris Kuhlmann-Wilsdorf, Grethe Winther i Niels Hansen wraz ze swoimi współpracownikami przez wielu lat badali zależność pomiędzy orientacją krystalograficzną, a powstającymi strukturami dyslokacyjnymi tworzonymi w czasie odkształcenia plastycznego. Cechą materiałową, która ma bezpośredni wpływ na badane zjawiska jest orientacja grupy ziaren względem kierunku odkształcenia w procesie walcowania. W zależności od sposobu odkształcenia i orientacji ziarna różny zestaw systemów poślizgu zostaje aktywowany. Wzajemne zależności pomiędzy aktywnymi systemami prowadzą do różnego rodzaju interakcji pomiędzy mobilnymi dyslokacjami ostatecznie prowadząc do utworzenia różnego rodzaju struktur dyslokacyjnych powszechnie traktowanych jako granice o małym kącie dezorientacji. Podsumowanie wieloletnich prac zostało opublikowane w Philosophical Magazine w dwóch częściach [1,2].

Badania te zainspirowały mnie do poszukania innych zależności tego typu. Cykl publikacji składających się na osiągnięcie będące przedmiotem postępowania habilitacyjnego jest

podsumowaniem moich poszukiwań jak niejednorodności mikrostruktury mogą wpływać na lokalne mechanizmy umocnienia i przemiany mikrostruktury. Niejednorodności mikrostruktury rozumiem jako pewien zestaw charakterystycznych cech (parametrów) mikrostruktury pozwalający wyodrębnić obszar spośród innych. Moje badania pokazują, że w zależności od dominującej cechy proces odkształcenia plastycznego lub zarodkowania faz umacniających może zachodzić inaczej, w sposób szczególny dla danego obszaru, często wedle innego mechanizmu. Swoje publikacje podzieliłem na trzy wątki:

- Przemiany mikrostruktury w czasie odkształcenia plastycznego promującego ujednolicanie mikrostruktury – C1-C3
- Wpływ lokalnej konfiguracji granic ziaren i struktur dyslokacyjnych na mechanizmy odkształcenia plastycznego – C4 – C6
- Procesy wydzieleniowe w stopach aluminium o niejednorodnej mikrostrukturze – C7-C10

Pierwszy wątek jest bezpośrednio powiązany wcześniejszymi pracami prowadzonymi na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej dotyczącymi materiałów o strukturze ultradrobnoziarnistej. Koncepcja tych badań była związana z pracami nad metodami dużego odkształcenia plastycznego. Obserwacje mikrostrukturalne prowadzone przez wiele lat na WIM PW wyraźnie wskazywały, że pomimo zastosowania ekstremalnie dużych poziomów odkształcenia nigdy nie udawało się uzyskać w pełni jednorodnego materiału. Obserwacje mikroskopowe, które sam prowadziłem w ramach takich badań, a także prace moich kolegów i koleżanek w ramach realizacji projektu NANOMET *“Nowe materiały metaliczne o strukturze nanometrycznej do zastosowań w innowacyjnych gałęziach gospodarki”* (finansowanego w ramach POIG), zawsze wskazywały na powstawanie charakterystycznych obszarów, które różniły się między sobą [3–8]. Wraz z opracowaniem przez Prof. Lecha Olejnika urządzenia do przyrostowego przeciskania przez kanał kątowy (IECAP) pojawiła się możliwość przeprowadzenia odkształcenia płytek w sposób pozwalający na eliminację niejednorodności. Dwa z przedstawionych artykułów dotyczą tego wątku. Trzeci opisuje podjęcie próby zastosowania podobnego podejścia z wykorzystaniem procesu walcowania.

Niejednorodnością mikrostruktury w drugim wątku jest charakter granic ziaren, w pobliżu których dochodzi do emisji, ruchu i interakcji pomiędzy dyslokacjami w czasie odkształcenia plastycznego. Badania opisane w tym wątku zostały prowadzone w dużej mierze z wykorzystaniem eksperymentu odkształcenia plastycznego w transmisyjnym mikroskopie

elektronowym, które pozwala na bezpośrednią obserwację aktywności dyslokacji. Dodatkowo, w celach porównawczych przeprowadziłem obserwacje mikroskopowe na materiale odkształconym objętościowo.

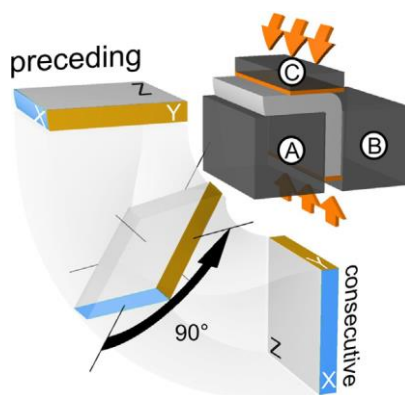
Ostatni wątek przedstawiony w cyklu publikacji dotyczy metod wpływania na procesy wydzieleniowe na drodze obróbki cieplno-plastycznej. Niejednorodnością mikrostrukturalną w przypadku tych badań są różnego rodzaju granice ziaren oraz struktury dyslokacyjne, które mają bezpośredni wpływ na proces zarodkowania i wzrostu wydzieleń w stopach aluminium. Umocnienie wydzieleniowe wymaga dyfuzji pierwiastków rozpuszczonych w osnowie aluminium w celu dostarczania ‘budulca’ nowych faz. W przypadku obecności defektów takich jak granice ziaren czy dyslokacje dochodzi do zarodkowania heterogenicznego ze względu na ułatwienie dyfuzji wzdłuż defektów. Trzy artykuły przedstawiają zjawiska związane z tym zagadnieniem. Czwarty artykuł dotyczy nowego wątku badawczego, który podjąłem w ostatnich latach – manipulacji procesami wydzieleniowymi poprzez kontrolę dyfuzji na drodze oddziaływań wakansów z pierwiastkami stopowymi. Ze względu na różną dyfuzyjność pierwiastków może dochodzić do lokalnego tworzenia niejednorodności rozkładu pierwiastków stopowych w osnowie, które mogą wpływać na zarodkowanie wydzieleń. Artykuł ten dotyczy metod przyspieszania procesu zarodkowania wydzieleń na drodze obróbki cieplno-plastycznej.

4.2.2 Przemiany mikrostruktury w czasie odkształcenia plastycznego promującego ujednoludnianie mikrostruktury

Techniki przyrostowego odkształcenia plastycznego polegają na zmianie kształtu obrabianego elementu poprzez zadanie serii niewielkich odkształceń. W konsekwencji, każdy kolejny etap przyrostowego odkształcenia przybliża obrabiany element do ostatecznego kształtu. Jako przykład może posłużyć rzemieślnicze wytwarzanie noży. Kowal za pomocą kolejnych uderzeń młota zmienia kształt blachy w ostrze. Zastosowanie takiego podejścia do dużego odkształcenia plastycznego (SPD – *severe plastic deformation*) niesie ze sobą korzyść wynikającą z ograniczenia nagrzewania się wsadu, będącego nieodłączną cechą ciągłego odkształcenia plastycznego. W procesie przeciskania przez kanał kątowy (ECAP – *equal channel angular pressing*) przeprowadzonym w konwencjonalny sposób przy kącie 90° pomiędzy kanałami jedno przejście odpowiada odkształceniu skumulowanemu $\epsilon \sim 1.15$ [9]. Znaczna część pracy odkształcenia plastycznego jest zmieniana w ciepło i nagrzewa wsad. Wiele prac (szczególnie

we wczesnym okresie badań nad SPD) podkreśla tendencję materiału do nagrzewania się i zdrowienia, a czasem nawet rekrytalizacji w czasie przeróbki. Jest to zjawisko niekorzystne, ponieważ prowadzi do anihilacji defektów, które są odpowiedzialne za fragmentację mikrostruktury – główny cel stosowania metod SPD [10–12].

Przyrostowe przeciskanie przez kanał kątowy (IECAP – *incremental equal channel angular pressing*) jest techniką opracowaną przez Prof. Lecha Olejnika na Wydziale Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej (aktualnie Wydział Mechaniczny-Technologiczny). Specjalnie skonstruowane urządzenie pozwala na uzyskanie odkształcenia materiału poprzez proste ścinanie, tak samo jak w konwencjonalnej metodzie ECAP. Różnica jednak polega na tym, że proces podzielony jest na cykle. Popychacz przesuwa obrabiany wsad o zadaną (możliwą do kontrolowania) odległość. Następnie narzędzie naciska na kawałek materiału powodując jego odkształcenie. Cykl jest powtarzany aż do przerobienia całego wkładu. Unikalna konstrukcja narzędzi pozwala na odkształcenie materiału w formie płytek, a nie prętów jak w przypadku techniki ECAP. Dzięki temu możliwe jest zastosowanie przeróbki kwadratowej płytki, która jest obracana o 90° względem normalnej do swojej płaszczyzny po odkształceniu wzdłuż swojej długości. Proces jest schematycznie przedstawiony na Rysunku 1.



Rysunek 1 Schemat procesu przyrostowego przeciskania przez kanał kątowy (IECAP)[C1]

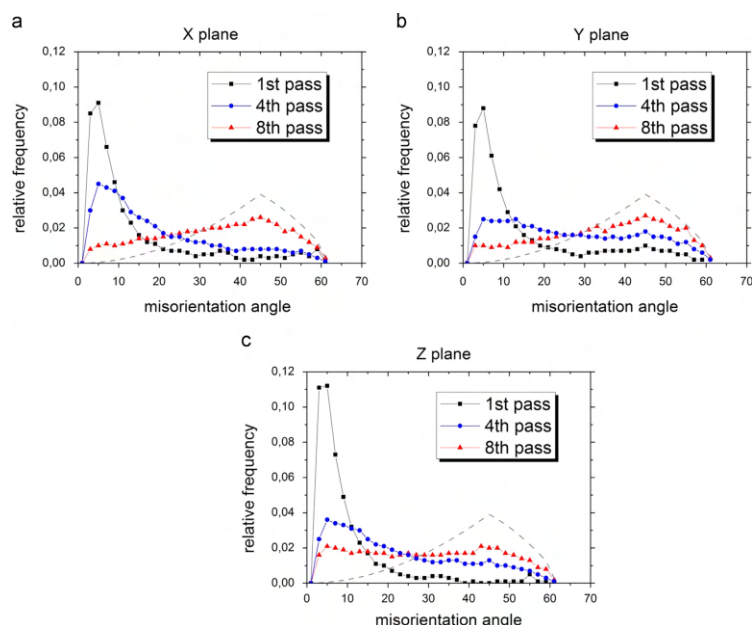
Pod względem ujednolicania mikrostruktury materiału proces IECAP wydaje się być bardzo korzystny. Po pierwsze, odkształcenie zadane w cyklach ogranicza tendencję wsadu do nagrzewania się. Po drugie zastosowanie nowej drogi odkształcenia, w której płaszczyzny ścinania krzyżują się pomiędzy obrotami wsadu sprzyja aktywacji różnych systemów poślizgu dyslokacji i fragmentacji mikrostruktury. Badania dotyczące przemian mikrostruktury w trakcie odkształcenia metodą IECAP przeprowadziłem na czystym technicznie aluminium o symbolu 1050. Zastosowano nową drogę odkształcenia, której nadano symbol A+B.

Niezależnie od wybranego schematu odkształcenia w procesie IECAP pierwsze przejście zawsze skutkuje takimi samymi efektami w mikrostrukturze materiału. Granice o dużym kącie dezorientacji są wydłużone zgodnie z kierunkiem odkształcenia. Obserwacje przeprowadzone na płaszczyźnie Y (zawierającej kierunek odkształcenia i normalną do płaszczyzny blachy) ujawniają obecność granic o małym kącie dezorientacji nachylonych zgodnie z kierunkiem działania siły ścinającej. Zastosowanie kolejnego przejścia (kierunek odkształcenia pod kątem 90° względem kierunku pierwszego przepustu) skutkuje ustawieniem wydłużonych ziaren prostopadłe do kierunku odkształcenia. Obserwacje przeprowadzone na płaszczyźnie Z (płaszczyzna blachy) wyraźnie wskazują na wydłużenie ziaren w dwóch prostopadłych kierunkach. Układ ten wymusza w materiale intensywne przemiany mikrostrukturalne ze względu na 'niekorzystne' ułożenie wydłużonych ziaren intensyfikując w ten sposób rozdrobnienie mikrostruktury. Zastosowanie takiego obrotu pozwala na uzyskanie ok. 10% udziału granic ziaren o dużym kącie dezorientacji i rozmiarach poniżej 1000 nm. Pod względem morfologicznym obserwacje z wykorzystaniem metody EBSD ujawniły efekty wskazujące na wydłużenie ziaren w dwóch prostopadłych kierunkach odpowiadających kierunkom odkształcenia. Układ ziaren tego typu jest nowym zjawiskiem w materiałach poddanych dużemu odkształceniu plastycznemu. W większości prac z tego zakresu wielokrotne przejście z zastosowaniem różnych dróg odkształcenia zawiera wspólny kierunek odkształcenia. W związku z tym każdy kolejny przepust potęguje efekt wydłużenia ziaren wzdłuż kierunku odkształcenia. Widoczne jest to nawet w przypadku, gdy następuje fragmentacja mikrostruktury do poziomu ultradrobnoziarnistego [13,14].

Badania z wykorzystaniem transmisyjnej mikroskopii elektronowej wykazały obecność komórek dyslokacyjnych powstałych w wyniku intensywnego przecinania się dyslokacji w czasie odkształcenia. Zmiana kierunku w czasie drugiego obrotu poskutkowała aktywacją innego zestawu systemów poślizgu. W związku z tym dyslokacyjne struktury utworzone na pierwszym etapie odkształcenia mogły posłużyć do intensyfikacji procesu fragmentacji ziarna, dzięki czemu już po dwóch przejściach w procesie IECAP mikrostruktura może zostać uznana za rozdrobnioną do poziomu submikrometrycznego.

Kolejne dwa przepusty (pełen obrót wsadu wokół normalnej do płaszczyzny blachy) doprowadziły do aktywacji kolejnych systemów poślizgu i dalszej fragmentacji mikrostruktury. Wielość ziarna, wyrażona jako średnia średnica ekwiwalentna, wyraźnie wskazuje, że pierwsze cztery przepusty prowadzą do obniżenia wielkości ziarna z 700 nm (po pierwszym przepuszczeniu) do poziomu poniżej 500 nm. Dodatkowa obserwacja związana jest ze zmianą rozkładu kątów

dezorientacji granic ziaren. Po pierwszym przejściu wyraźnie dominowały granice o małym kącie dezorientacji związane z początkowymi etapami rozdrobnienia ziarna – tworzeniem komórek dyslokacyjnych. Następnie w wyniku aktywowania nowych systemów poślizgu i przemian wcześniej utworzonych struktur następuje stopniowy wzrost udziału granic o dużym kącie dezorientacji. W momencie, gdy komórki dyslokacyjne osiągnęły krytyczny rozmiar i dalsze odkształcenie nie prowadziło do ich dalszego zmniejszania, nowy mechanizm odkształcenia prowadzący do wzrostu kąta dezorientacji pomiędzy nowoutworzonymi granicami został aktywowany. W konsekwencji tych przemian znacząco wzrósł udział ziaren ultradroboziarnistych do 33%. Obserwacje z wykorzystaniem transmisyjnej mikroskopii elektronowej wyraźnie wskazały, że ziarna o rozmiarach ok. 1000 nm są przedzielone poprzecznymi granicami o małym kącie dezorientacji sugerując, że dalsze rozdrobnienie ziarna jest możliwe.

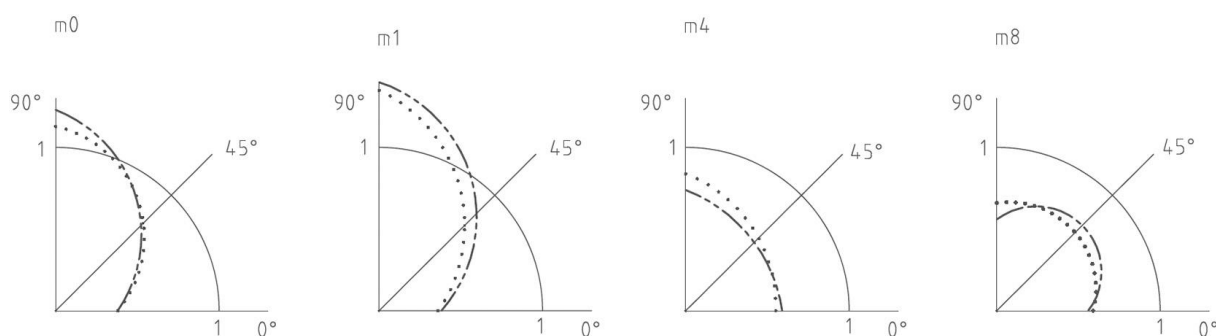


Rysunek 2 Rozkład kątów dezorientacji granic ziaren w czasie odkształcenia czystego aluminium metodą IECAP na różnych płaszczyznach blachy po 1, 4 i 8 przepustach [C1]

Mikrostruktura po 8 przepustach drogą A+B (dwa pełne obroty wokół normalnej do płaszczyzny blachy) nie różniła się znacząco pod względem wielkości ziarna od materiału po 4 przepustach. Analiza map orientacji otrzymanych metodą EBSD wskazała, że wielkość ziarna pozostała bez większych zmian, w zależności od płaszczyzny badania wyniki dla 4 i 8 przejść oscylowały ok. 450 nm. Należy jednak zaznaczyć, że obliczenia uwzględniały zarówno granice o małym kącie dezorientacji jak i granice o dużym kącie. Jest to szczególnie istotne, ponieważ wyraźnie wskazuje, że w pierwszej kolejności dochodzi do fragmentacji ziaren pierwotnych siatką granic o małym kącie dezorientacji, a następnie w wyniku odkształcenia dochodzi do

rotacji komórek zwiększając kąty pomiędzy nimi. Jest to szczególnie widoczne zestawiając rozkłady kątów dezorientacji dla przepustów 4 i 8. Rysunek 2 wyraźnie wskazuje, że po 8 przepustach wyraźnie dominują granice o dużym kącie dezorientacji. Udział granic ziaren o strukturze ultradroboziarnistej został oszacowany na ok. 75%.

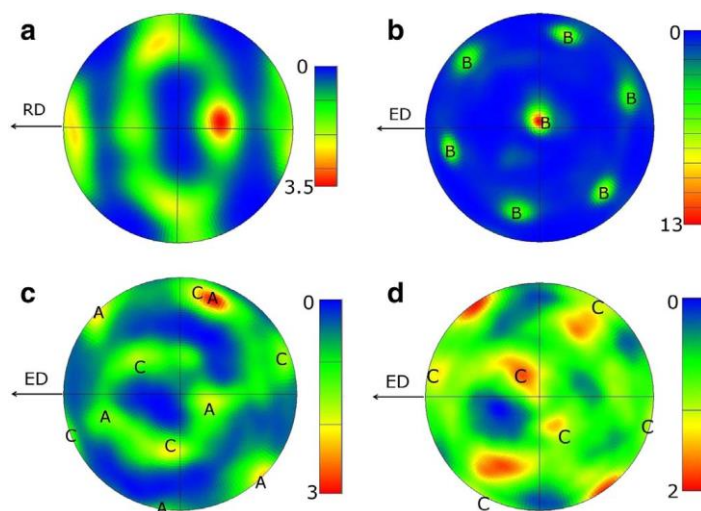
Przeciskanie przez kanał kątowny jako kierunkowa metoda odkształcenia plastycznego prowadzi do wytworzenia wydłużonych ziaren względem kierunku deformacji. W przeprowadzonych badaniach wyznaczono również zmianę współczynnika kształtu ziaren definiowanego jako stosunek długości cięciw elipsy opisującej ziarno. Wartość ta wynosiła 1.8 po pierwszym przejściu wyraźnie wskazując na wydłużenia ziaren. Wraz z kolejnymi przepustami współczynnik kształtu malał do wartości 1.55 po ósmym przepuszczeniu. Wartość ta jest bliska poziomowi 1.3 przypisywanemu strukturom równoosiowym. Systematyczne obniżanie współczynnika kształtu jest konsekwencją zastosowania niestandardowych obrotów przy kolejnych przepustach procesu IECAP. Każdy kolejny przepust odbywał się w kierunku poprzecznym do poprzedniego wymuszając zmianę płaszczyzny ścinającej. Wynikiem takiego zabiegu jest promowanie mechanizmu odkształcenia opartego na rotacji ziaren a nie ewolucji mikrostruktury poprzez intensyfikację procesów zachodzących na tym samym kierunku, co ma miejsce w przypadku standardowych dróg odkształcenia w procesie ECAP. W związku z tym rozdrobnienie ziarna zachodziło intensywniej, prowadząc do wytworzenia mikrostruktury ultradroboziarnistej bliskiej równoosiowej. Należy się spodziewać, że materiał o takiej mikrostrukturze będzie wykazywał izotropię właściwości mechanicznych badaną w próbie jednoosiowego rozciągania. Badania tego typu zostały zainicjowane przez dr inż. Martę Ciemiorek. Byłem odpowiedzialny za badania mikrostrukturalne wspierające tezy postawione w artykule [C2]. Wyniki testów mechanicznych podkreślających anizotropię właściwości mechanicznych po kolejnych przepustach procesu IECAP przedstawiono na Rysunku 3 pochodzącym z publikacji [C2].



Rysunek 3 Anizotropia normalna właściwości mechanicznych w materiale wyjściowym oraz po 1, 4 i 8 przepustach czystego aluminium metodą IECAP [C2]

Wykresy te przedstawiają zmianę wartości normalnej anizotropii uwzględniającej pomiary odkształceń na różnych kierunkach. Próbka oznaczona m0 odpowiada materiałowi wyjściowemu, m1, m4, m8 pierwszemu, czwartemu i ósmemu przepustowi w procesie IECAP. Linia ciągła reprezentuje modelowy wynik dla materiału doskonale anizotropowego, linie przerywane to dane eksperymentalne. Materiał po pierwszym przepuszczeniu charakteryzuje wyraźna izotropia właściwości, podobna do materiału wyjściowego (walcowanej blaszce). Po czwartym i ósmym przepuszczeniu zachowanie materiału ulega radykalnej zmianie i zbliża się do materiału anizotropowego. Wynik ten odpowiada wcześniej opisanym przemianom mikrostruktury, gdzie kolejne przepusty prowadziły do eliminacji niejednorodności mikrostrukturalnych.

Pojęcie anizotropii właściwości mechanicznych często powiązane jest z teksturą krystalograficzną po procesie odkształcenia. Badania tego typu prowadzone dla próbek wytworzonych metodą IECAP były okazją do przeprowadzenia takiej analizy. Materiał charakteryzujący się właściwościami izotropowymi cechuje silna tekstura. W przypadku materiału wyjściowego wykazano obecność tekstury typu $\{112\}<111>$ typowej dla walcowanej blachy wykonanej ze stopu aluminium. Po pierwszym przepuszczeniu (Rysunek 4(b)) zaobserwowano silną teksturę typu B $\{hkl\}<111>$, obserwowaną zazwyczaj w materiałach o strukturze przestrzennej ściennie centrowanej poddanych odkształceniu poprzez proste ścinanie. Jest to stan odkształcenia panujący w procesie IECAP. Silna tekstura koresponduje z anizotropią właściwości mechanicznych przedstawioną na Rysunku 3(b).



Rysunek 4 Odwrotne figury biegunowe otrzymane metodą EBSD dla materiału po walcowaniu (a) oraz odkształceniu metodą IECAP po (b) 1 (c) 4 (d) 8 przepustach [C2]

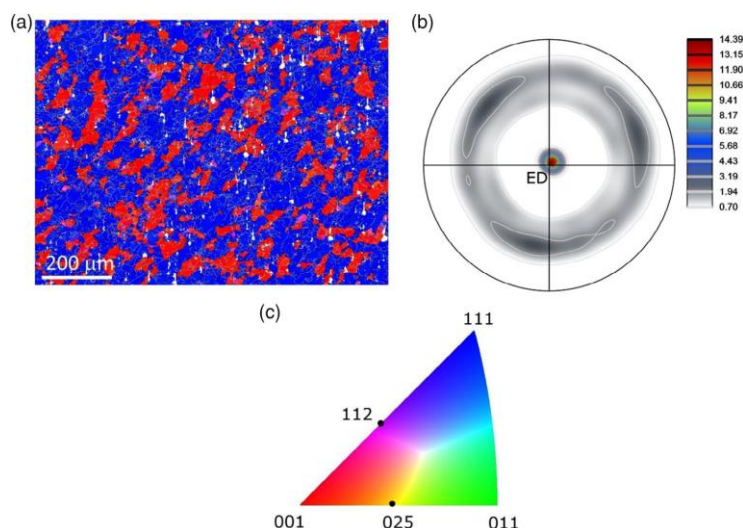
Po czwartym (Rysunek 4(c)) i ósmym (Rysunek 4(d)) przepuszczeniu ciągle widoczne są składowe tekstury, które mogą być powiązane z prostym ścinaniem, są to komponenty $A \{111\} \langle uvw \rangle$ i $C \{100\} \langle 110 \rangle$ jednak ich intensywność (wyrażona jednostkami mud) jest bardzo niska. Poza wyraźnymi skupiskami punktów pomiarowych widoczna jest obecność punktów o przypadkowej orientacji w tle. Jest to związane ze zmianą płaszczyzny ścinanej po każdym kolejnym przepuszczeniu, w konsekwencji czego proces rotacji ziaren odbywa się w różnych kierunkach uniemożliwiając wytworzenie silnej składowej tekstury. Pomimo tego ostatni przepust zawsze pozostawia słabe składowe tekstury związane ze sposobem odkształcenia.

Przytoczone badania wyraźnie wskazują, że zmiana kierunku odkształcenia w procesie IECAP pozwala na wytworzenie mikrostruktury o dużym stopniu jednorodności wielkości ziarna, tekstury a także właściwości mechanicznych. Jest to związane z jednoczesnym występowaniem trzech zjawisk korzystnie wpływających na rozdrobnienie ziarna w procesie odkształcenia plastycznego:

- aktywacją różnego zestawu systemów poślizgu dyslokacji w każdym przejściu, zjawisko sprzyja utworzeniu komórek dyslokacyjnych
- zmianie kierunku odkształcenia, która ogranicza proces wydłużania ziaren w konwencjonalnym procesie przeciskania przez kanał kątowy
- ograniczeniu wpływu reszkowych naprężeń (*redundant strains*) w kolejnych przejściach

W ramach swoich badań przeprowadziłem także próby zastosowania procesu walcowania w celu ujednoludnienia mikrostruktury. Konwencjonalny proces walcowania wieloetapowego prowadzi się w taki sposób, aby zachować kierunek odkształcenia w następujących po sobie przepustach, a kierunek walcowania jest związany z osią włókien tekstury krystalograficznej powstającej w czasie procesu. Korzystając z wniosków wyciągniętych z wątku rozdrobnienia ziaren w procesie IECAP postanowiłem zaprojektować proces walcowania w taki sposób, aby nie sprzyjał on wzmocnieniu kierunkowości odkształcenia oraz utworzeniu konwencjonalnej tekstury. Jako materiał wsadowy zastosowałem pręt ze stopu aluminium serii 6xxx (AlMgSi) wytworzony metodą wyciskania. Proces ten prowadzi do powstania silnej podwójnej tekstury włóknistej $\langle 001 \rangle + \langle 111 \rangle$. Jest to związane z osiowo symetrycznym stanem naprężeń w czasie odkształcenia. Dodatkowo ziarna w materiale wydłużone są zgodnie z kierunkiem prowadzenia procesu. Mapa orientacji uzyskana metodą EBSD przedstawiająca opisywany materiał zostały umieszczone na Rysunku 5. Walcowanie przeprowadzono dwójako, ustawiając kierunek

początkowy włókna równoległe oraz prostopadłe do kierunku walcowania. Dodatkowo przy prostopadłym ułożeniu włókien zastosowano dwa schematy odkształcenia. Pierwszy z zachowaniem stałego kierunku odkształcenia, drugi z zastosowaniem obrotu o 90° wokół normalnej do płaszczyzny płytek, podobnie jak miało to miejsce w przypadku nowej drogi A+B w procesie IECAP. Celem tych zabiegów było wymuszenie stanu odkształcenia sprzyjającego rozbiciu początkowej struktury włóknistej poprzez aktywację systemów poślizgu oraz rotacji ziaren niezgodnych z ułożeniem włókien.



Rysunek 5 Mapa orientacji (a) figura oraz figura biegunowa (b) dla stopu AlMgSi poddanego wyciskaniu. (c) legenda orientacji krystalograficznych w mapach typu IPF uzyskanych metodą EBSD [C3]

Równoległe ułożenie włókien w stosunku do kierunku walcowania doprowadziło do zachowania początkowej włóknistej morfologii. Kolejne przepusty odkształcenia doprowadziły do fragmentacji początkowych włókien siatką granic o małym kącie dezorientacji, związanych z płaszczyznami typu $\langle 111 \rangle$. Jest to wynik spodziewany i zgodny z literaturą.

Ustawienie początkowego włókna prostopadłe do kierunku odkształcenia doprowadziło do zaburzenia tej struktury. Zachowanie niezmiennego kierunku odkształcenia w kolejnych przejściach miało na celu wymuszenie rotacji ziaren do stabilnych orientacji, jednak niezwiązanych z początkowym ułożeniem struktury włóknistej oraz orientacji krystalograficznej ($\langle 001 \rangle$ i $\langle 111 \rangle$ równoległe do ND). Postępujące odkształcenie plastyczne faktycznie prowadziło do rotacji ziaren w stronę stabilizacji składowej miedzi ustawiając płaszczyzny typu $\{112\}$ //ND. Przemianom tym towarzyszyła postępująca fragmentacja początkowej morfologii włóknistej, aż do jej całkowitego zaburzenia po 70% redukcji przekroju w procesie walcowania.

Zastosowanie obrotów wokół normalnej do płaszczyzny blach po każdym przejściu zainicjowało szereg nieobserwowanych dotąd przemian strukturalnych. Ze względu na intensywne warunki odkształcenia oraz niekorzystne ułożenie początkowe włókien względem kierunku odkształcenia, dość szybko dochodzi do rozpadu początkowej morfologii ziaren. Częste zmiany kierunku odkształcenia ostatecznie doprowadzają do ustabilizowania płaszczyzn $\{110\}$ //ND jednak finalna tekstura nie jest typowa dla walcowanego materiału ponieważ, jednocześnie następuje ustawienie kierunków najbliższych czterokrotnej symetrii związanej z obrotami wsadu pomiędzy kolejnymi etapami walcowania. Ze względu na aktywację innego zestawu systemów poślizgu w każdym kolejnym przejściu nastąpiło znaczne rozdrobnienie mikrostruktury poprzez utworzenie gęstej siatki granic o małym kącie dezorientacji.

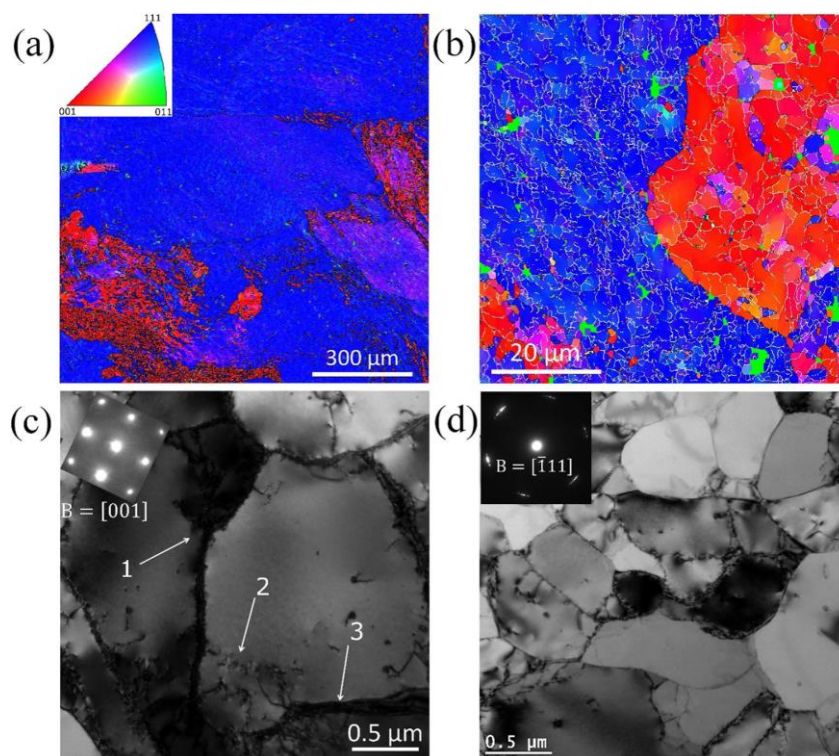
Badania te dowiodły, że zastosowanie warunków niesprzyjających pogłębianiu początkowej mikrostruktury (osi włókna czy tekstury krystalograficznej) może być z powodzeniem stosowane do intensyfikacji procesu rozdrobnienia ziaren oraz umocnienia odkształceniowego.

4.2.3 Wpływ lokalnej konfiguracji granic ziaren i struktur dyslokacyjnych na mechanizmy odkształcenia plastycznego

Studia literaturowe oraz badania własne wyraźnie wskazują, że metale wytwarzane metodami odkształcenia plastycznego cechuje tekstura krystalograficzna typowa dla danego typu odkształcenia. Związane jest to ze stanem naprężeń działającym na obrabiany materiał oraz aktywnymi systemami poślizgu dyslokacji, które na poziomie mikrostrukturalnym są bezpośrednio związane z kompensacją zmiany kształtu. W zależności od orientacji ziarna mogą powstawać różne typy struktur dyslokacyjnych, które wraz z zaawansowaniem odkształcenia przemieniają się granice ziarna o małym kącie dezorientacji (jak wykazano w paragrafie 4.2.2). Część swojej pracy badawczej poświęciłem na studiowanie lokalnych mechanizmów odkształcenia plastycznego materiałów wytworzonych metodami SPD, a więc cechujących się już pewnego rodzaju substrukturami dyslokacyjnymi. Na tym etapie swojej kariery zajmowałem się przede wszystkim dwiema metodami odkształcenia. Pierwsza, IECAP, została już omówiona w niniejszym autoreferacie. Druga metoda odkształcenia, wyciskanie hydrostatyczne (WH), stanowiła główną metodę kształtowania stopów AlMgSi w mojej rozprawie doktorskiej. Równolegle do tego wątku prowadziłem obserwacje mikroskopowe m.in. z wykorzystaniem eksperymentu odkształcenia in-situ w transmisyjnym mikroskopie

elektronowym czystego aluminium poddanego wyciskaniu hydrostatycznemu oraz przetworzonych metodą IECAP. Obie techniki prowadzą do wytworzenia odmiennych struktur dyslokacyjnych i granic ziaren. Przypadek IECAP został już omówiony. Wyciskanie hydrostatyczne prowadzi do wytworzenia podwójnej tekstury włóknistej z dominującymi kierunkami $\langle 001 \rangle$ i $\langle 111 \rangle$ ułożonymi równolegle do kierunku wyciskania. Ziarna o odmiennych orientacjach cechują charakterystyczne struktury dyslokacyjne. Z tego względu materiał ten musi zostać uznany za niejednorodny. Trzy artykuły będące częścią osiągnięcia opisywanego w niniejszym autoreferacie dotyczą szczegółowej analizy lokalnych mechanizmów odkształcenia plastycznego w zależności od konfiguracji defektów w najbliższym otoczeniu.

Materiał badawczy w pierwszym eksperymencie stanowiło aluminium o czystości technicznej odkształcone metodą wyciskania hydrostatycznego z redukcją przekroju z 50 do 20 mm oraz do 3 mm. Zdecydowaną większość ziaren stanowią ziarna o orientacji $\langle 111 \rangle$ w kierunku odkształcenia. Obszary te cechuje rozdrobnienie ziarna do poziomu 700 nm, jednak ze względu na stosunkowo nieduże odkształcenia dominują granice o małym kącie dezorientacji. Ziarna o orientacji $\langle 001 \rangle$ cechuje obecność różnych typów struktur dyslokacyjnych, które dzielą ziarna pierwotne na mniejsze obszary o wielkości ok. 950 nm, Rysunek 6.



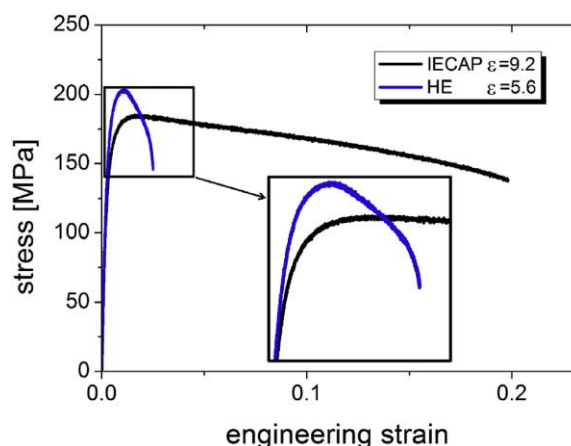
Rysunek 6 Przedstawienie najważniejszych cech czystego aluminium poddanego odkształceniu metodą wyciskania hydrostatycznego (a) mapa orientacji przedstawiająca podwójną teksturę (b) mapa orientacji oraz granic ziaren (c) typowe struktury dyslokacyjne w ziarnach o orientacji $\langle 001 \rangle$ (d) granice ziaren w ziarnach o orientacji $\langle 111 \rangle$ [C4]

Dalsze badania skupiły się na obserwacjach mechanizmów odkształcenia plastycznego. W ziarnach o orientacji $\langle 111 \rangle$ dyslokacje zarodkowały na granicach, najczęściej w punktach potrójnych. Następnie aktywowany był ruch dyslokacji zakończony absorpcją w granicy leżącej po przeciwnej stronie ziarna. W związku z tym efektywna długość drogi dyslokacji jest związana z wielkością ziarna. Ze względu na małą ilość źródeł emisji dyslokacji tworzenie zaawansowanych struktur wynikających z przecinania się dyslokacji jest mało prawdopodobne w ziarnach o rozmiarach poniżej 700 nm. Potwierdził to też przegląd próbki po zakończeniu eksperymentu rozciągania. Dyslokacje, które zostały zaabsorbowane do granic mogły brać dalej udział w odkształceniu plastycznym poprzez ruch po powierzchni granicy. W przypadku odkształcenia cienkich folii ostatecznie prowadziło to do utworzenia pęknięć granic ziaren, jednak w przypadku odkształcenia objętościowego mechanizm ten może być zawiązany ze zmianą kształtu ziaren o bardzo małych rozmiarach.

Odształcenia większych ziaren o orientacji $\langle 001 \rangle$ w kierunku wyciskania odbywało się poprzez emisję i ruch dyslokacji w kilku działających jednocześnie systemach poślizgu. W przypadku ziaren tego typu ruchome dyslokacje napotykały na swojej drodze utworzone wcześniej struktury dyslokacyjne (zaznaczone na Rysunku 6(c)). Interakcje z tymi elementami mikrostruktury zależały od ich typu oraz stabilności. W przypadku wczesnych stadiów formowania granic o małym kącie dezorientacji może dochodzić do rozpadu struktur lub wbudowywania nowych dyslokacji prowadzących do ich stabilizacji. Przemiany tego typu pozwalają akomodować odkształcenie plastyczne poprzez intensywny poślizg dyslokacji oraz ich magazynowanie w nowopowstających ścianach dyslokacyjnych.

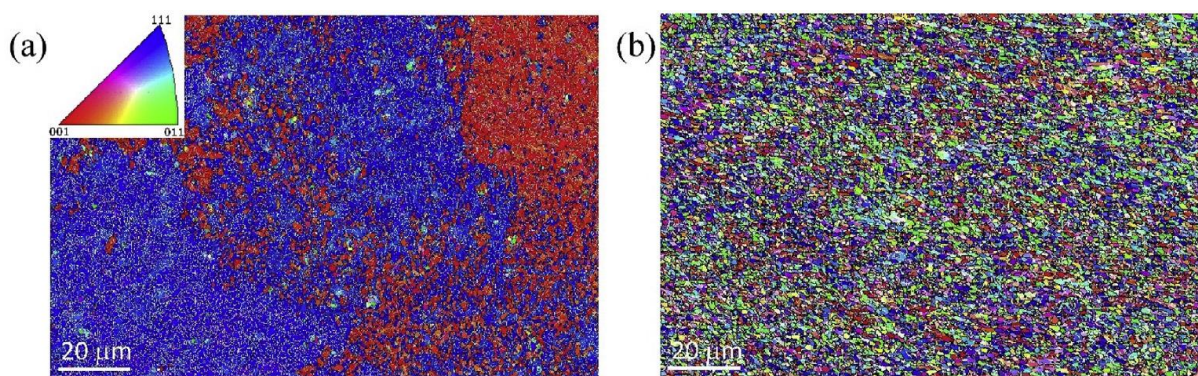
Zaobserwowanie dwóch różnych mechanizmów pozwoliły mi na określenie różnej roli ziaren o orientacji $\langle 111 \rangle$ i $\langle 001 \rangle$ w umocnieniu materiału. Pierwsze odpowiedzialne są za zwiększanie mechanicznej wytrzymałości poprzez aktywację mechanizmów poślizgu dyslokacji, które wymagają dużych naprężeń zewnętrznych. Ziarna drugiego typu odpowiedzialne są za akomodację zmiany kształtu w czasie odkształcenia plastycznego poprzez przebudowanie substruktury dyslokacyjnej.

Powiązanie niejednorodności strukturalnych z różnymi mechanizmami odkształcenia oraz ich rolą w odkształceniu plastycznym zainspirowały mnie do zaprojektowania nowego eksperymentu mającego na celu wyeliminowanie wpływu wielkości ziarna w ocenie mechanizmu umocnienia materiałów ultradrobnoziarnistych. Obserwacje lokalnych mechanizmów odkształcenia przeprowadziłem na dwóch materiałach o podobnej wielkości ziaren jednak różniących się charakterystyką granic ziaren.



Rysunek 7 Krzywe rozciągania czystego aluminium odkształconego metodą przyrostowego przeciskania przez kanał kątowy (IECAP) i wyciskania hydrostatycznego. Oba materiały cechowała podobna wielkość ziarna ale inna charakterystyka granic ziaren [C5]

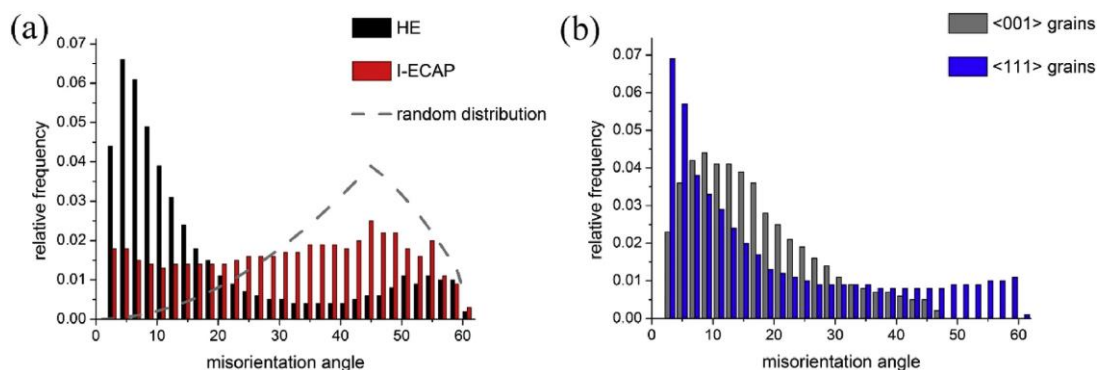
Materiały te cechuje podobna wartość granicy plastyczności jednak właściwości plastyczne są zupełnie różne (Rysunek 7). Aluminium odkształcone poprzez WH charakteryzuje możliwość umocnienia odkształceniowego, natomiast materiał o jednorodnej strukturze wytworzony w procesie IECAP nie ma takiej możliwości. Dodatkowo, w materiale tym różnica pomiędzy granicą plastyczności a wytrzymałością na zerwanie jest stosunkowo niewielka. Natomiast wartość wydłużenia równomiernego zmierzona dla obu próbek jest znacząco różna. Materiał cechujący się dużym udziałem granic o dużym kącie dezorientacji i wielkością ziarna na poziomie 550 nm po osiągnięciu wytrzymałości na rozciąganie doświadcza znacznego odkształcenia zlokalizowanego w szyjce. W celu wyjaśnienia tych różnic przeprowadziłem serię obserwacji mikroskopowych mających na celu zweryfikowanie różnic w mechanizmach odkształcenia na poziomie mikrostrukturalnym.



Rysunek 8 Mapy orientacji uzyskane dla czystego aluminium odkształconego metodą wyciskania hydrostatycznego (a) i przyrostowego przeciskania przez kanał kątowy (b)[C5]

Rysunek 8 przedstawia mapy orientacji badanych materiałów wykonane techniką EBSD. W przypadku materiału przygotowanego metodą WH dominują dwie składowe tekstury $\langle 001 \rangle$ i $\langle 111 \rangle$ (kolor czerwony i niebieski). Materiał odkształcony techniką IECAP cechuje jednorodna

struktura bez dominujących orientacji. Poza wykształceniem preferowanych orientacji krystalograficznych sposób odkształcenia bezpośrednio wpłynie na rozkład kątów dezorientacji granic ziaren. Porównanie tego parametru dla obu materiałów zostało przedstawione na Rysunku 9 (a). W przypadku materiału poddanego wyciskaniu dominują granice o małym kącie dezorientacji, które są obecne w ziarnach o obu składowych tekstury, jak wykazano na Rysunku 9 (b). Rozkład kątów dezorientacji zmierzony dla próbki poddanej procesowi IECAP jest zbliżony do teoretycznego rozkładu przypadkowego (przerywana szara linia na Rysunku 9 (a)).



Rysunek 9 Rozkłady kątów dezorientacji dla czystego aluminium odkształconego metodą wyciskania hydrostatycznego i przyrostowego przeciskania przez kanał kątowy (a) porównania obu materiałów (b) kąty dezorientacji w zależności od orientacji w aluminium po wyciskaniu hydrostatycznym [C5]

Badania odkształcenia plastycznego *in-situ* przeprowadzone w transmisyjnym mikroskopie elektronowym pozwoliły na bezpośrednią obserwację mechanizmów odkształcenia plastycznego w wybranych obszarach cechujących się specyficzną konfiguracją defektów wytworzonych w procesie odkształcenia plastycznego. Porównanie zaobserwowanych mechanizmów odkształcenia pozwala stwierdzić, że dla obu próbek można zastosować podział aktywności dyslokacji ze względu na wielkość ziarna. Należy zaznaczyć, że średnia wielkość ziarna zmierzona dla badanych próbek jest na zbliżonym poziomie, jednak lokalnie stwierdzono występowanie ziaren o różnej wielkości.

Przeprowadzone badania pozwoliły stwierdzić, że aktywność dyslokacji jest dużo większa w dużych ziarnach (o rozmiarach ok. 1000 nm). Obserwacje prowadzone przy małym powiększeniu wyraźnie pokazały, że dochodzi w nich do emisji nowych dyslokacji oraz do tworzenia lub ewolucji struktur dyslokacyjnych w wyniku interakcji pomiędzy dyslokacjami działającymi w różnych systemach poślizgu. Zjawiska te są typowymi zjawiskami zachodzącymi w czasie odkształcenia plastycznego i prowadzą do umocnienia materiału. W tym samym czasie sąsiednie ziarna o rozmiarach poniżej 500 nm nie wykazują żadnych zmian pod względem aktywności dyslokacji lub zjawiska te zachodziły z małą intensywnością. Źródłem emisji dyslokacji były granice ziaren, najczęściej w okolicach punktów potrójnych.

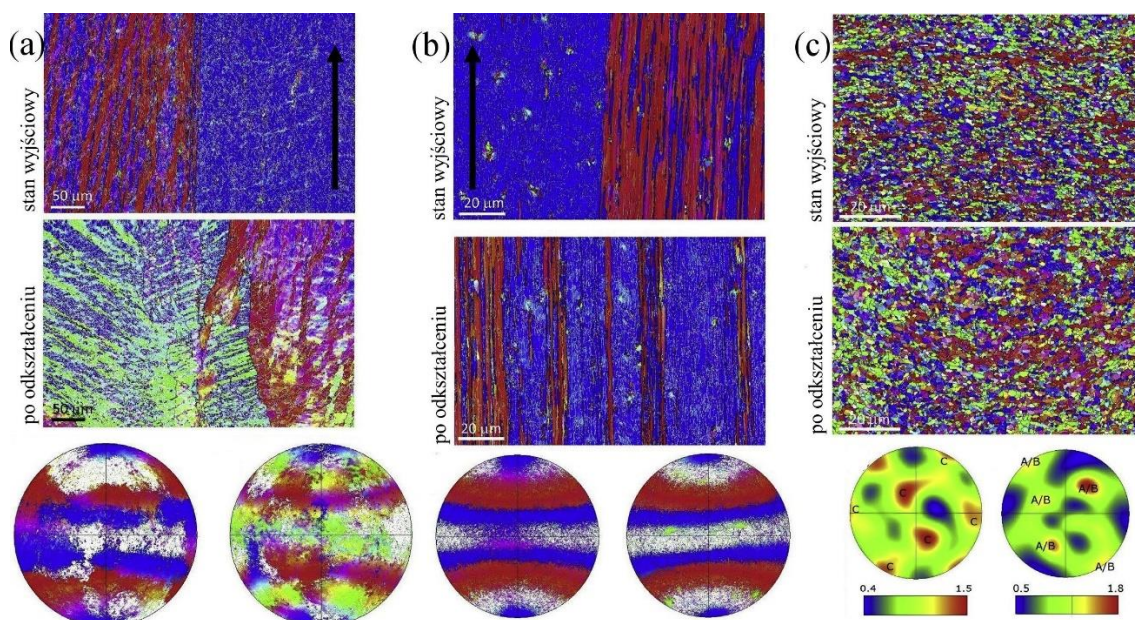
Nawet jeśli w pojedynczym ziarnie aktywne były różne źródła emitujące dyslokacje w różnych (przecinających się) systemach poślizgu nie dochodziło do tworzenia nowych struktur prowadzących do fragmentacji ziaren. Dyslokacje zostały absorbowane w granicach ziaren znajdujących się po przeciwnej stronie do działającego źródła.

Zjawiska tego typu zaobserwowałem w próbkach wytworzonych obiema technikami. Pozwala to powiązać mechanizm odkształcenia z lokalną konfiguracją defektów (obecność struktur dyslokacyjnych) oraz wielkością ziarna. Ze względu na zastosowaną technikę wytwarzania badane materiały różniły się intensywnością zachodzenia opisywanych zjawisk. Próbki wytworzone metodą wyciskania hydrostatycznego cechuje dominacja granic o małym kącie dezorientacji, natomiast proces IECAP prowadzi do intensywnych rotacji skutkujących wytworzeniem dużej gęstości granic o dużym kącie dezorientacji. Cechy te determinują, który z opisywanych mechanizmów odkształcenia plastycznego będzie miał charakter dominujący w materiale. Ewolucji istniejących struktur dyslokacyjnych należy spodziewać się w materiale poddanych WH. Materiał ten cechuje także zdolność do umocnienia odkształceniowego, Rysunek 7. Zatem należy wyciągnąć wniosek, że niejednorodna struktura związana z dwoma składowymi tekstury i odpowiednią konfiguracją defektów sprzyja umocnieniu odkształceniowemu. Współczynnik Schmid dla ziaren o orientacji $\langle 001 \rangle$ i $\langle 111 \rangle$ wynosi odpowiednio 2.4 i 3.6. Wynik ten sugeruje, że pierwsza orientacja powinna być bardziej podatna na odkształcenie plastyczne. Jednak analiza rozkładu kątów dezorientacji (Rysunek 9 (b)) pozwala stwierdzić, że obie orientacje cechuje dominacja granic o małym kącie dezorientacji sugerując, że umocnienie jest możliwe dla obu przypadków. Szczegółowa analiza mikrostruktury wykonana metodą Transmission Kikuchi Diffraction (TKD) pozwoliła wyróżnić trzeci typ obszaru będący mieszaniną ziaren o orientacji $\langle 001 \rangle$ i $\langle 111 \rangle$. W obszarze tym dominują granice o dużym kącie dezorientacji (ok. 55°), których obecność jest widoczna na rozkładzie przedstawionym na Rysunku 9(a) (czarne słupki). Obszar ten jest odpowiedzialny za umocnienie materiału. W czasie odkształcenia plastycznego zachodzi w nim do emisji i absorpcji dyslokacji w granicach. Zjawisko to jest dominujące w materiale wytworzonym metodą IECAP, który cechuje przewaga granic o dużym kącie dezorientacji i brak umocnienia odkształceniowego. Pozwala to połączyć mechanizm odkształcenia powiązany z emisją i absorpcją dyslokacji w granicach ziaren z dużym umocnieniem materiału.

Mikrostrukturę obu próbek poddałem także ocenie po odkształceniu objętościowym – jednoosiowe ściskanie do rzeczywistego odkształcenia 4%. Analiza mikrostrukturalna metodą EBSD pozwoliła na określenie ewolucji morfologicznej oraz zmian orientacji w obszarach, w

których zidentyfikowałem występowanie różnych mechanizmów odkształcenia. Dodatkowo analiza ta została uzupełniona o badania dla materiału wyciśniętego z mniejszą redukcją przekroju w celu sprawdzenia roli tekstury włóknistej i granic o małym kącie dezorientacji.

Aluminium wyciśnięte do mniejszego poziomu odkształcenia ($\varepsilon=1.8$) cechuje większy rozmiar ziarna oraz większy udział granic o małym kącie dezorientacji (na poziomie 70%) niż materiału wyciśniętego do $\varepsilon=5.6$. Mały udział granic o dużym kącie dezorientacji oraz analiza mikrostrukturalna pozwalają stwierdzić, że pomimo silnej tekstury krystalograficznej ($\langle 001 \rangle$ i $\langle 111 \rangle$ wzdłuż kierunku wyciskania) włóknista morfologia ziaren nie została jeszcze wykształcona (Rysunek 10 (a)), współczynnik kształtu 2.22.



Rysunek 10 Porównanie map orientacji i figur biegunowych w stanie wyjściowym i po próbie ściskania czystego aluminium wytworzonego różnymi metodami (a) wyciskanie hydrostatyczne $\varepsilon=1.8$, przekrój poprzeczny pręta, mapa prezentuje orientacje wzdłuż kierunku wyciskania (b) wyciskanie hydrostatyczne $\varepsilon=5.6$, przekrój poprzeczny pręta, mapa prezentuje orientacje wzdłuż kierunku wyciskania zaznaczonego strzałką (c) przyrostowe przeciskanie przez kanał kątowy [C6]

Porównanie materiałów wytworzonych metodą WH (Rysunki 10 (a) i (b)) pozwoliło mi na stwierdzenie silnej zależności pomiędzy konfiguracją defektów w wyjściowym materiale a mikrostrukturą zaobserwowaną po odkształceniu plastycznym. W przypadku materiału poddanego WH i średnią wielkością ziarna na poziomie 600 nm (Rysunek 10 (b)), nie zaobserwowałem zmian tekstury po ściskaniu. Odkształcenie, zgodnie z mechanizmem zasugerowanym na podstawie analizy TEM, było realizowane poprzez intensywny ruch dyslokacji prowadzący do utworzenia nowych granic ziaren o małym kącie dezorientacji. Identyfikacja granic tego typu metodą EBSD pozwoliła potwierdzić zwiększenie ich udziału w

rozkładzie kątów dezorientacji. Obserwacje przeprowadzone metodą STEM materiału po próbie ściskania wyraźnie wskazały na utworzenie nowych granic zorientowanych poprzecznie do kierunku włókna (a także ściskania) prowadząc jednocześnie do zmiany współczynnika kształtu ziaren opisującego ich wydłużenie z 3.4 na 2.82 na przekroju wzdłużnym. Wartości na przekroju wyznaczone na przekroju poprzecznym pozostały bez zmian.

W zależności od orientacji krystalograficznej względem kierunku ściskania, mającej wpływ zarówno na współczynnik Schmid'a oraz ilość aktywnych systemów poślizgu, stwierdziłem znaczne różnice w mikrostrukturze po procesie ściskania względem materiału wytworzonego metodą WH o innej charakterystyce defektów. Po pierwsze, w materiale odkształconym do $\epsilon=1.8$ w obu typach ziaren doszło do intensywnej rotacji ziaren prowadzącej do znacznych odchyleni względem początkowej orientacji. Po drugie, doszło do ujednorodnienia współczynnika kształtu ziaren na obu badanych płaszczyznach (poprzeczna i prostopadła do kierunku odkształcenia).

Zmiany orientacji ziaren mają inny charakter w zależności od pierwotnej orientacji. Ziarna o orientacji $\langle 001 \rangle$ doświadczyły intensywnego poślizgu dyslokacji na wielu jednocześnie działających systemach poślizgu (mała wartość współczynnika Schmid'a). Dodatkowo, pomimo stwierdzonych rotacji ziaren odchylenia od pierwotnego kierunku $\langle 001 \rangle$ nie były znaczące, a granice pomiędzy subziarnami mają mały kąt dezorientacji. Pozwala to stwierdzić, że są one wynikiem przemian struktury dyslokacyjnej wynikającej z intensywnego poślizgu. W przypadku ziaren o początkowej orientacji $\langle 111 \rangle$ stwierdzono utworzenie nowej składowej tekstury $\langle 110 \rangle$ względem kierunku ściskania (kolor zielony na mapach orientacji). Obszary o tej orientacji tworzą wydłużone pasma ułożone naprzemiennie z obszarami, które zachowały swoją pierwotną orientację $\langle 111 \rangle$. Dodatkowo, nowe granice o dużym kącie dezorientacji utworzone pomiędzy tymi obszarami są nachylone ok. 65° względem kierunku ściskania. Obserwacje te pozwalają wyciągnąć wniosek, że doszło do skoordynowanej rotacji ziaren w wyniku odkształcenia, która nie jest związana z aktywnością dyslokacji.

Różnice w mikrostrukturze materiału wytworzonego metodą WH po próbie ściskania wynikają ze stopnia zaawansowania utworzenia morfologii włóknistej w procesie wyciskania. W materiale, w którym doszło do wytworzenia silnej morfologii włóknistej odległość pomiędzy granicami o dużym kącie dezorientacji jest mniejsza. Dzięki temu materiał ma ograniczoną zdolność do tworzenia pasm ścinania odpowiedzialnych za utworzenie nowej orientacji $\langle 110 \rangle$ w procesie ściskania. Dodatkowo, nowe dyslokacje mogą być z łatwością absorbowane w

graniach o dużym kącie dezorientacji (jak wykazały badania *in-situ* w TEM) w związku z czym tworzenie nowych ścian dyslokacyjnych i zwiększanie ich kąta dezorientacji jest również ograniczone. Odkształcenie jest realizowane poprzez poślizg dyslokacji, jednak ze względu na obecność dobrze wykształconej morfologii włóknistej ziaren nie jest możliwa ewolucja typowych dla odkształcenia plastycznego struktury dyslokacyjnych. Może o tym świadczyć również większa wartość granicy plastyczności dla materiału o silnej morfologii włóknistej wyznaczona w próbie ściskania.

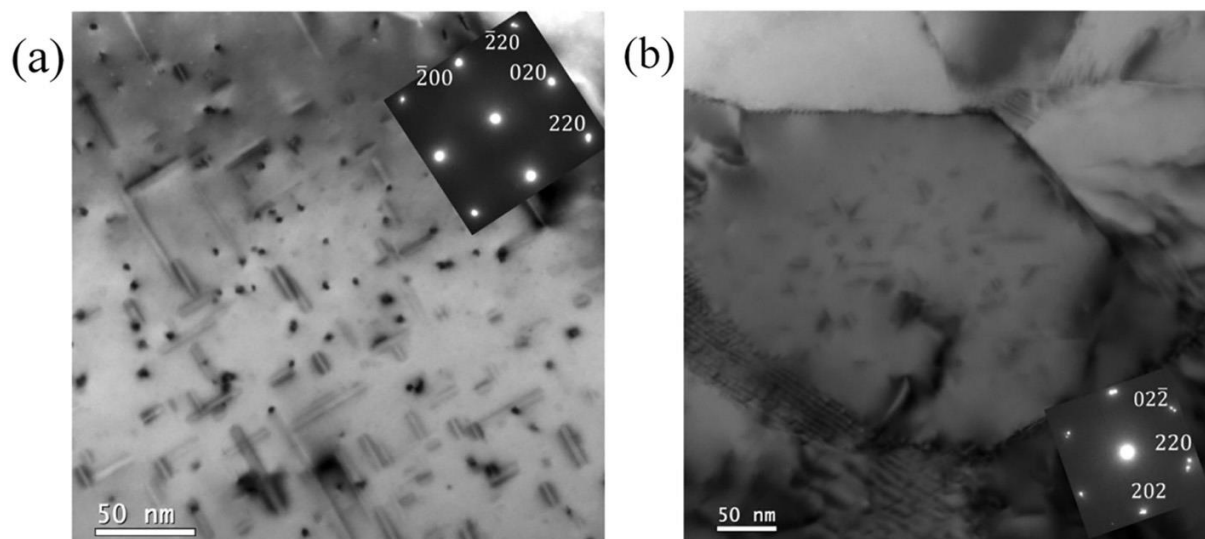
Materiał wytworzony metodą IECAP cechuje podobna średnia wielkość ziarna przy dominacji udziału granic o dużym kącie dezorientacji i brakiem silnych składowych tekstury (Rysunek 10(c)). Badania metodą EBSD wykazały jedynie niezbyt silną obecność składowej ścinającej, typowej dla procesu IECAP. Analiza mikrostruktury po próbie ściskania nie wykazała żadnych znacznych zmian parametrów mikrostrukturalnych, takich jak wielkość ziarna, udział granic o małym kącie dezorientacji czy współczynnik kształtu. Jedyną różnicą jaką zaobserwowałem na podstawie przeprowadzonych badań dotyczyła rozmycia składowych tekstury zaobserwowanych przed ściskaniem. Wynik ten może świadczyć o dominacji mechanizmu odkształcenia związanego z poślizgiem po granicach ziaren lub rotacjami ziaren pod wpływem działania siły zewnętrznej. Wynik ten jest zgodny wcześniej przeprowadzonymi badaniami aktywności dyslokacji pod wpływem odkształcenia plastycznego. Nawet jeśli dochodziło do emisji dyslokacji wewnątrz ziaren ich droga swobodna wynosiła znacznie poniżej 1000 nm (wielkość ziarna) i były absorbowane do granicy znajdującej się naprzeciwko źródła.

4.2.4 Procesy wydzieleniowe w stopach aluminium o niejednorodnej mikrostrukturze

Stopy aluminium o odpowiednim składzie chemicznym mogą być poddane obróbce cieplnej prowadzącej do umocnienia wydzieleniowego. Procesy te zależne są od dyfuzji objętościowej pierwiastków rozpuszczonych w osnowie. W związku z tym wszystkie procesy mające wpływ na zachodzenie dyfuzji objętościowej mogą mieć jednocześnie wpływ na zarodkowanie i wzrost faz umacniających. Tworzenie i przemiany struktur dyslokacyjnych oraz granic ziaren w trakcie obróbki plastycznej należą do tej grupy procesów. Zarówno dyslokacje jak i granice ziaren są uważane za ścieżki łatwej dyfuzji i mogą pełnić rolę 'korytarzy' przyspieszonego transportu pierwiastków, a także miejsc heterogenicznego zarodkowania nowych faz. W tej części swojej pracy staram się wykorzystać wiedzę zdobytą w czasie studiów doktorskich oraz późniejszych badań do zaprojektowania nowej obróbki cieplno-plastycznej stopów aluminium pozwalającej na uzyskanie zwiększonych właściwości mechanicznych.

Wykorzystanie procesów przeróbki plastycznej do wytworzenia niejednorodnych struktur pod względem gęstości dyslokacji a także odległości pomiędzy granicami ziaren stanowi znakomity sposób na weryfikację wpływu defektów sieci krystalicznej na procesy wydzieleniowe i umocnienie materiału przede wszystkim w stopach aluminium serii 6xxx (AlMgSi). Należy podkreślić, że wytworzenie niejednorodnych struktur pozwala na badanie wpływu różnej konfiguracji defektów w tej samej próbce, a więc z idealnym zachowaniem składu chemicznego badanego materiału oraz parametrów obróbki cieplnej.

WH jest procesem prowadzącym do powstania najsilniejszych niejednorodności (spośród technik użytych w omawianym cyklu publikacji, szczegółowy opis ewolucji mikrostruktury w procesie WH zawarłem w swojej rozprawie doktorskiej) ze względu na powstanie silnej podwójnej tekstury. W każdym z obszarów dochodzi do aktywacji odmiennego zestawu systemów poślizgu skutkiem czego w ziarnach o orientacji $\langle 111 \rangle$ dochodzi do silnej fragmentacji rozmiaru ziarna, natomiast ziarna o orientacji $\langle 001 \rangle$ doświadczają utworzenia komórek dyslokacyjnych o małym kącie dezorientacji. Jeśli WH stopu aluminium zostanie przeprowadzone w stanie przesyconym (pierwszy etap obróbki cieplnej prowadzącej do umocnienia wydzieleniowego) możliwe jest przeprowadzenie starzenia (drugi etap obróbki cieplnej) w materiale cechującym się niejednorodną mikrostrukturą.

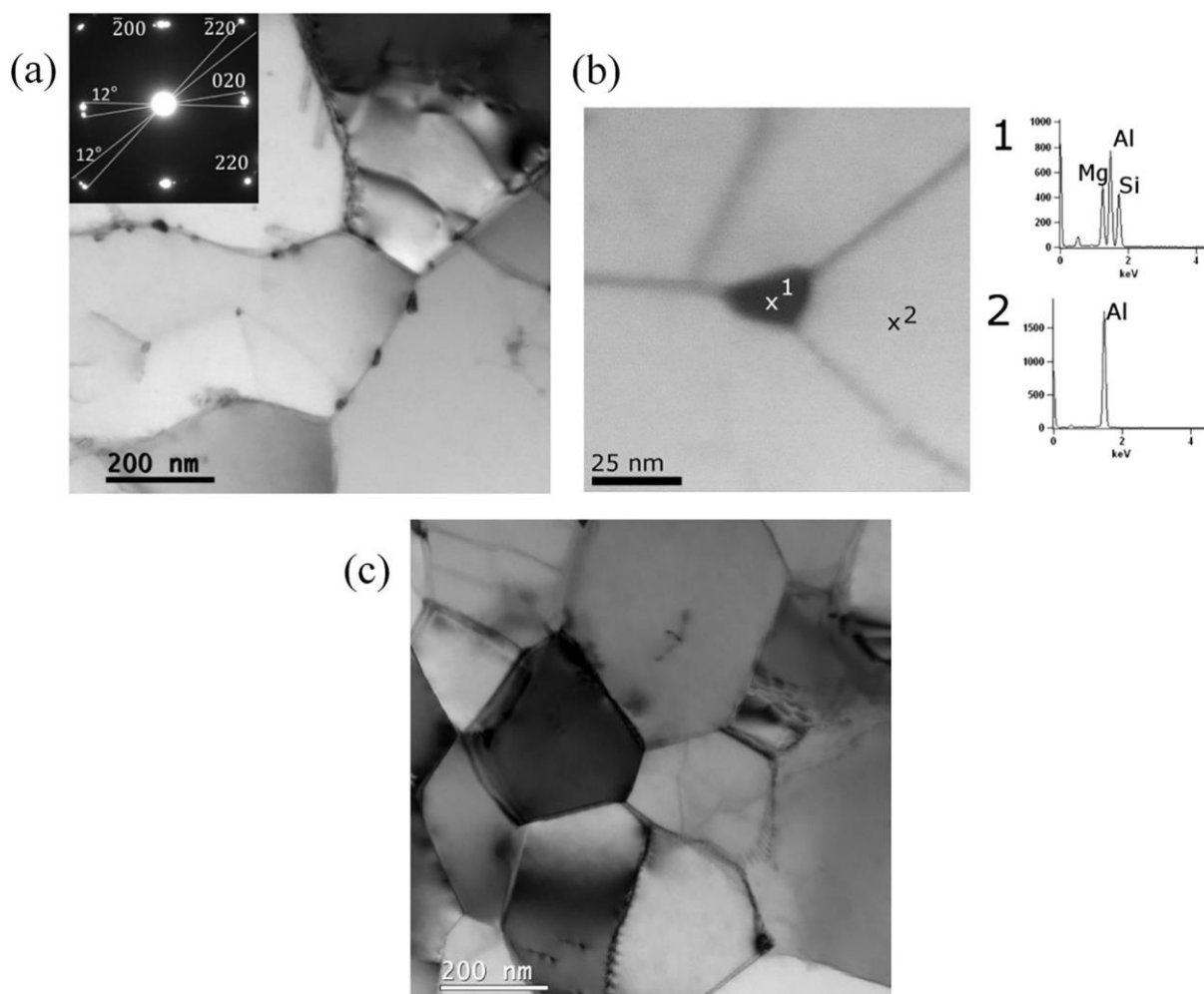


Rysunek 11 Wydzielenia fazy β'' w stopie 6101 w ziarnach o różnej orientacji po wyciskaniu hydrostatycznym (a) ziarno o orientacji $\langle 001 \rangle$ (b) ziarno o orientacji $\langle 111 \rangle$ [C7]

Badania mikrostrukturalne, które przeprowadziłem w ramach pracy [C7] wyraźnie wskazują, że lokalna konfiguracja defektów może mieć wpływ na procesy wydzieleniowe. Po pierwsze, granice ziaren (zarówno o dużym jak i małym kącie dezorientacji) cechuje zdolność do przyciągania pierwiastków rozpuszczonych w osnowie. Należy jednak zaznaczyć, że efekt ten

w pobliżu granic o małym kącie dezorientacji jest dużo słabszy. Umożliwia to zarodkowanie i wzrost wydzieleni faz umacniających wewnątrz obszarów podzielonych komórkami dyslokacyjnymi (Rysunek 11(a)) oraz wewnątrz drobnych ziaren, jednak z zachowaniem strefy wolnej od wydzieleni w pobliżu granic ziaren (Rysunek 11(b)).

W przypadku drobnych ziaren z dobrze wykształconymi granicami o dużym kącie dezorientacji, szerokość strefy z której następuje dyfuzja pierwiastków do granic może być na tyle duża, że będzie obejmowała całe ziarno. Pierwiastki znajdujące się w granicy ziaren mogą dyfundować do miejsc zarodkowania i wzrostu wydzieleni dekorując w ten sposób granice nowymi fazami (Rysunki 12 (a) i (b)). Wnętrze ziaren jest w takim przypadku zubożone i nie może w nim dojść do utworzenia wydzieleni faz umacniających (Rysunki 12 (a) i (c)).

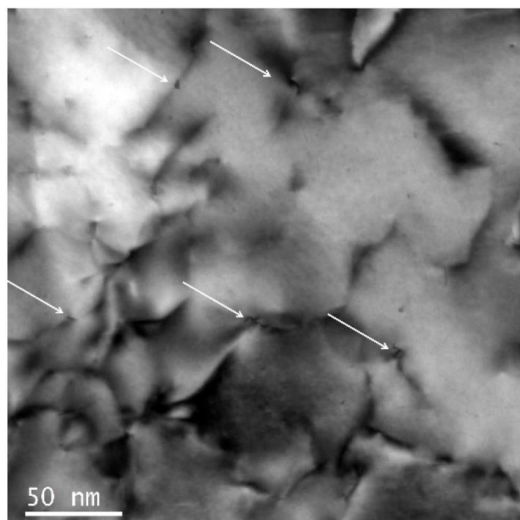


Rysunek 12 Procesy wydzieleniowe w stopie 6101 prowadzące do utworzenia wydzieleni na granicy ziaren (a) obraz TEM (b) analiza EDS jednego z wydzieleni (c) brak wydzieleni w drobnych ziarnach o orientacji $\langle 111 \rangle$ [C7]

Zastosowanie odkształcenia plastycznego na poziomie dużo niższym niż wymagany do rozdrobnienia ziarna prowadzi do wytworzenia dużej gęstości dyslokacji. Zjawisko to zostało potwierdzone w pracy [C3]. Wykazałem, że zastosowanie konwencjonalnego walcowania w

przypadku stopu AlMgSi prowadzi przede wszystkim do utworzenia dużej gęstości dyslokacji nawet jeśli schemat odkształcenia został zaplanowany tak, aby zintensyfikować skutki odkształcenia plastycznego. Wytworzenie dużej gęstości dyslokacji w przesyconym stopie nie może pozostać bez wpływu na procesy wydzieleniowe w czasie późniejszego starzenia. Wątek ten został przebadany w pracy [C8], w której porównałem możliwość umocnienia wydzieleniowego stopu AlMgSi poddanego walcowaniu do dużych poziomów odkształceń.

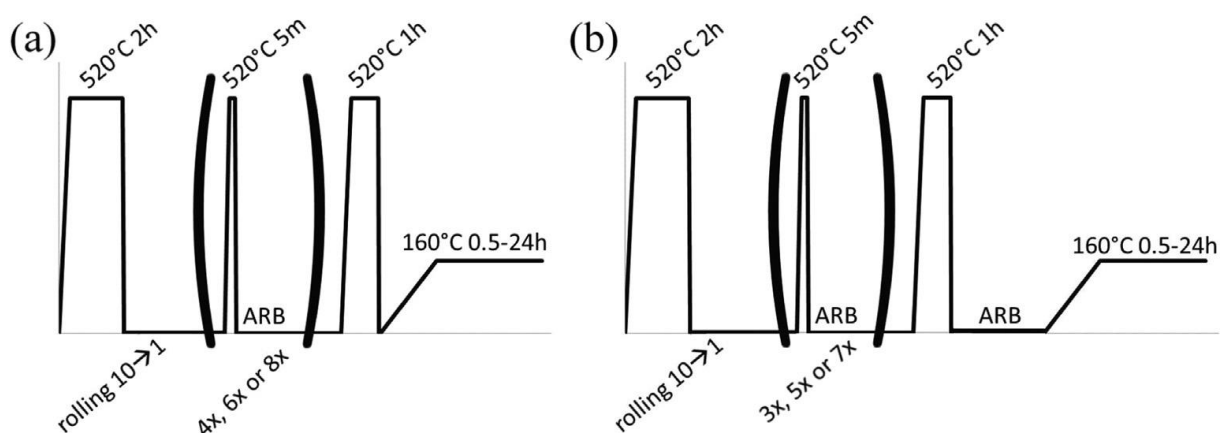
Wzrost twardości był obecny wyłącznie dla jednego badanego stanu o najmniejszym odkształceniu zadanym w czasie walcowania ($\varepsilon=2.3$). Był to też jedyny stan, dla którego badania wykonane metodą TEM wykazały obecność procesów wydzieleniowych. Wydzielenia w tym materiale znajdowały się przede wszystkim na dyslokacjach tworzących gęste sploty (Rysunek 13). Obszary wolne od dyslokacji również cechowała obecność drobnych wydzieleni, jednak ich ilość była stosunkowo niewielka w porównaniu do wydzieleni na dyslokacjach. Finalnie wzrost poziomu umocnienia był niski, poniżej 10%. Fakt ten można interpretować jako zatrzymanie równomiernie zachodzących procesów wydzieleniowych w objętości materiału poprzez dyfuzję pierwiastków stopowych do dyslokacji i następujące niejednorodne zarodkowanie wydzieleni. Interpretacja ta wydaje się właściwa również wobec faktu, że materiały poddane większemu odkształceniu, a więc o większej gęstości dyslokacji, nie wykazały umocnienia wydzieleniowego w ogóle. Zostało to potwierdzone badaniami wygrzewania *in-situ* w mikroskopie. Należy zatem wyciągnąć wniosek, że duża gęstość dyslokacji tworzących gęste sploty w materiale może doprowadzić do zubożenia przesyconego roztworu stałego do poziomu, w którym utworzenie zarodków faz umacniających nie będzie możliwe nawet na defektach obniżających barierę energetyczną zarodkowania. Oznacza to także, że istnieje pewna graniczna gęstość dyslokacji, która może korzystnie wpływać na proces umocnienia wydzieleniowego odkształconego przesyconego roztworu stałego.



Rysunek 13 Wydzielenia zarodkujące na dyslokacjach w odkształconym stopie 6082 [C8]

Bezpośrednią kontynuacją wątku synergicznego efektu umocnienia odkształceniowego i wydzieleniowego jest koncepcja nowej obróbki cieplno-plastycznej stopów AlMgSi opisana w artykule [C9]. Zastosowanie techniki odkształcenia *accumulative roll bonding* (ARB) pozwala na wytworzenie materiału składającego się z cienkich warstw materiału w walcowanej blasze [15]. Warstwy te są ze sobą silnie połączone tworząc lity materiał, jednak mechaniczne połączenie pomiędzy warstwami jest nowym elementem mikrostruktury, który może sprzyjać stabilności cieplnej w czasie wygrzewania w wysokiej temperaturze materiału wytworzonego tą techniką. Dzieje się tak, ponieważ granica pomiędzy poszczególnymi warstwami stanowi barierę dla rozrostu ziarna. Powyższe założenie oraz wnioski wyciągnięte w pracy [C8] pozwoliły mi na opracowanie dwóch procedur, których schemat znajduje się na Rysunku 14.

Obróbka przedstawiona na Rysunku 14 (a) jest typowym procesem ARB przeprowadzonym na przesyconym roztworze stałym. Jako finalny krok, bezpośrednio po ostatnim przepuszczeniu ARB, należy przeprowadzić pełną obróbkę przesycającą i sztucznego starzenia. Zabieg ten pozwoli na ponowne wytworzenie przesyconego roztworu stałego, jednak ze względu na opisaną wcześniej rolę granic pomiędzy warstwami wielkość ziarna zostaje utrzymana na poziomie ok. 6 μm , co może być dodatkowym źródłem umocnienia, zgodnie z zależnością Halla-Petcha. Ze względu na wysokotemperaturową obróbkę przeprowadzoną bezpośrednio po odkształceniu plastycznym, ziarna są wolne od defektów, ponieważ dochodzi do rekrytalizacji.



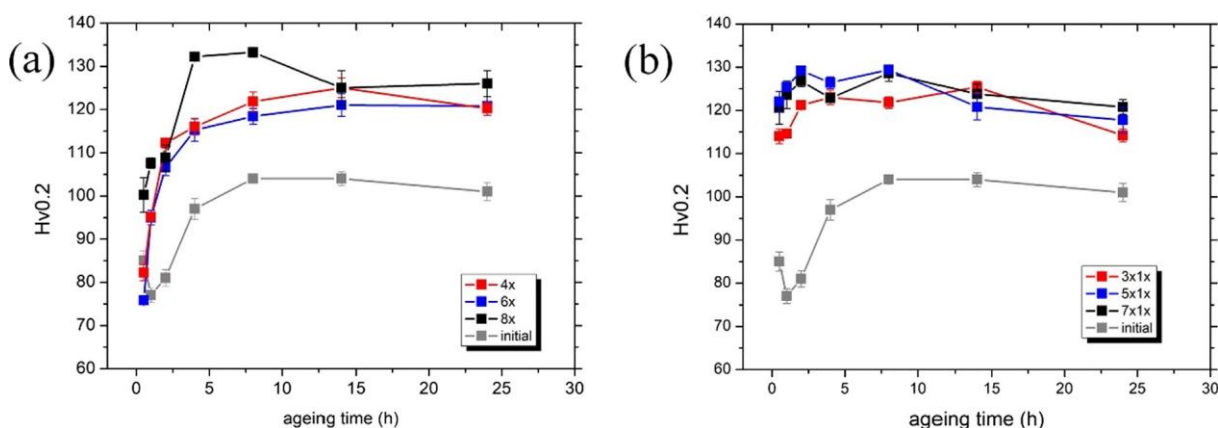
Rysunek 14 Schemat obróbki cieplno-plastycznej pozwalającej na uzyskanie synergicznego efektu umocnienia odkształceniowego i wydzieleniowego (a) przesycanie po ostatnim przepuszczeniu metodą ARB (b) przesycanie przed ostatnim przepustem metodą ARB [C9]

Jako alternatywne podejście wykorzystujące zjawisko niejednorodnego zarodkowania faz umacniających na defektach sieci krystalicznej zaproponowałem przeróbkę przedstawioną schematycznie na Rysunku 14 (b). Polega ona na przeprowadzeniu nieparzystej liczby przepustów techniką ARB na przesyconym roztworze stałym, ponowne wykonanie przesycania i dodatkowego przepustu oraz bezpośrednim starzeniu sztucznym. Liczba przepustów w pracy [C9] została dobrana w sposób umożliwiający porównanie materiałów odkształconych do takiej samej wartości odkształcenia skumulowanego. Zastosowanie tego podejścia prowadzi do uzyskania przesyconego roztworu stałego po nieparzystej liczbie przepustów i wytworzeniu w ostatnim przepuszczeniu struktur typowych dla odkształcenia plastycznego, jednak gęstość defektów nie jest na tyle duża, aby uniemożliwić proces zarodkowania i wzrostu wydzieleni faz umacniających. Stosując taką drogę odkształcenia ponownie wykorzystywany jest efekt ograniczenia rozrostu ziaren w czasie przesycania prowadzonego po odkształceniu metodą ARB. Dzięki temu wielkość ziaren po przeprowadzeniu pełnej obróbki wynosi ok. 2 μm , a ich wnętrza wypełnione są strukturami dyslokacyjnymi.

Zmiany umocnienia na podstawie krzywych starzenia zostały przedstawione na Rysunku 15. Materiał poddany przesycaniu po obróbce plastycznej (cechujący się brakiem struktur dyslokacyjnych wewnątrz ziaren, Rysunek 15 (a) wykazuje większą zdolność do umocnienia wydzieleniowego niż materiał poddany drugiej drodze przeróbki cieplno-plastycznej. W drugim przypadku wypadkowa twardość jest wynikiem jednoczesnego działania dwóch mechanizmów umocnienia: odkształceniowego i wydzieleniowego. Zmiana twardości

względem stanu przed starzeniem wynosi ok. 10% w każdej z trzech badanych próbek różniących się ilością przepustów ARB.

Należy jednak zauważyć, że w każdym przypadku nowa droga przeróbki (dla obu sposobów) zawsze prowadzi uzyskania twardości wyższej (nawet o 40%) niż dla materiału poddanego konwencjonalnej obróbce cieplnej – szara krzywa na Rysunkach 15 (a) i (b). W przypadku zastosowania pierwszej przeróbki wyjściowy poziom twardości jest podobny jak dla typowej obróbki, jednak wraz z wydłużeniem czasu starzenia następuje gwałtowny przyrost umocnienia.

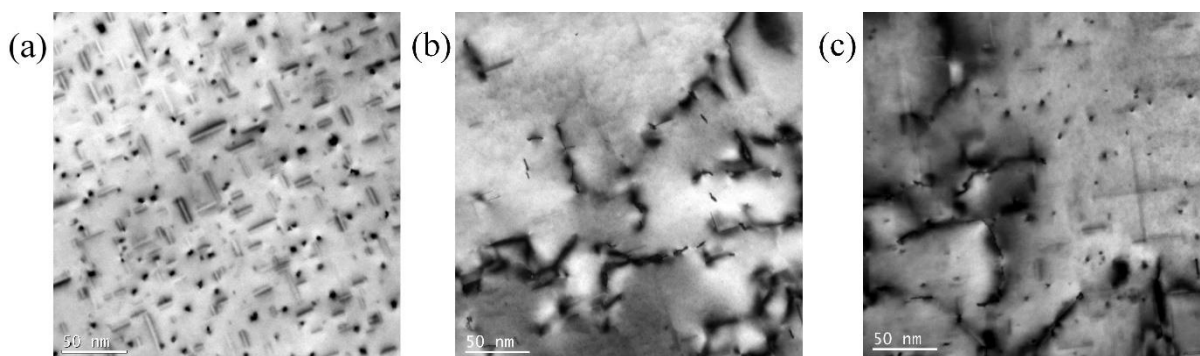


Rysunek 15 Krzywe umocnienia uzyskane dla stopu 6082 poddanego przeróbce cieplno-plastycznej przedstawionej na Rysunku 14 (a) przesycanie po ostatnim przepuszczeniu metodą ARB (b) przesycanie przed ostatnim przepustem metodą ARB [C9]

Ze względu na różną konfigurację defektów obecnych w mikrostrukturze po przeprowadzeniu obróbki cieplno-plastycznej proces sztucznego starzenia prowadzi do powstania różnej konfiguracji wydzielen. W przypadku pierwszej obróbki, proces przesycania skutkuje anihilacją struktur dyslokacyjnych powstałych w czasie odkształcenia plastycznego, zatem proces zarodkowania i wzrostu fazy umacniającej jest bardzo podobny do zachodzącego w trakcie konwencjonalnego starzenia. W następnym kroku starzenie sztuczne prowadzi do powstania wydzielen fazy β'' w postaci wzajemnie prostopadłych igieł o średniej długości 14 nm, Rysunek 16 (a). Sekwencja procesu wydzieleniowego (szerzej omówiona w publikacji [C9]) również była taka sama jak w przypadku zwykłej obróbki. Na tej podstawie wyciągnąłem wniosek, że finalne umocnienie, które znacznie przekracza wartości typowe dla stopu 6082, jest kombinacją wielkości ziarna, obecności granic pomiędzy warstwami oraz umocnienia wydzieleniowego.

Druga obróbka, w której ostatni cykl procesu ARB został poprzedzony przesycaniem, prowadzi do utworzenia zaawansowanych struktur dyslokacyjnych mogących służyć jako miejsca

zarodkowania heterogenicznego w czasie starzenia sztucznego. Rysunki 16 (b) i (c) przedstawiają relację pomiędzy utworzonymi wydzieleniami a dyslokacjami po 4 i 6 godzinach starzenia. Zgodnie z wcześniejszymi pracami i danymi literaturowymi [16,17] dyslokacje będące drogami szybkiej dyfuzji oraz miejscami migracji dodatków stopowych znajdujących się w przesyconym roztworze stałym, posłużyły jako miejsca zarodkowania wydzieleni faz umacniających. Rysunek 16 (b) przedstawia wydzielenia nanometrycznych rozmiarów w kształcie pałeczek. Brak wzajemnej relacji krystalograficznej (jak w przypadku wydzieleni β'') oraz inny kontrast względem osnowy sugerują, że jest to odmienna faza niż w przypadku konwencjonalnej obróbki cieplnej. Szczegółowe badania metodą wysokorozdzielczej mikroskopii elektronowej (zawarte w publikacji) pozwoliły zidentyfikować wydzielenia jako Q' . Wydłużenie czasu starzenia prowadzi do dalszej ewolucji procesów wydzieleniowych. Rysunek 16 (c) przedstawia typowy obraz faz powstałych po 6 godzinach starzenia. Wydzielenia znajdujące się przy dyslokacjach doświadczyły przemiany w nowe wydzielenia, które wzrastały wzdłuż linii dyslokacji. Dodatkowo, w miejscach wolnych od dyslokacji doszło do wzrostu iglastych wydzieleni dających w trybie jasnego pola ciemny kontrast na tle osnowy, inny niż w przypadku fazy β'' . Badania wysokorozdzielcze pozwoliły zidentyfikować te igły jako fazę L. Jest to niespodziewany wynik, ponieważ faza ta powstaje w stopach z dużym udziałem miedzi. Stop 6082 zawiera niewielkie ilości miedzi (poniżej 0.1% wagowego) jednak ilość ta jest niewystarczająca do zmiany typowej sekwencji wydzieleni prowadzących do powstania fazy β'' , Rysunek 16 (a).

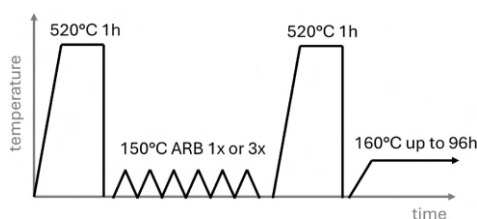


Rysunek 16 Wydzielenia w stopie 6082 po procesie przedstawionym na Rysunku 14 (a) przesycanie po ostatnim przepuszczeniu metodą ARB, czas starzenia 4h (b) przesycanie przed ostatnim przepustem metodą ARB, czas starzenia 4h (c) przesycanie przed ostatnim przepustem metodą ARB, czas starzenia 6h, orientacja ziaren 001 [C9]

Obserwacja ta pozwoliła mi na zaproponowanie nowego mechanizmu zarodkowania i wzrostu wydzieleni faz umacniających w stopach serii 6xxx działającego w przypadku obecności struktur dyslokacyjnych w przesyconym roztworze stałym. Dyfuzja pierwiastków stopowych do tego rodzaju defektów prowadzi do zubożenia osnowy o Mg i Si – pierwiastki

odpowiedzialne za wzrost fazy β'' . Ze względu na niski współczynnik dyfuzji w aluminium miedź nie bierze udziału w tym procesie. W związku z tym w obszarach wolnych od defektów dochodzi do lokalnej zmiany koncentracji pierwiastków stopowych w osnowie zwiększając stosunek Mg/Si do Cu do poziomu, w którym miedź może obrać aktywny udział w formowaniu nowych wydzielen. Ostatecznie zjawisko to prowadzi do utworzenia na defektach wydzielen bez wyraźnie zdefiniowanej struktury krystalicznej i wydzielen z układu Mg-Si-Cu w obszarach o lokalnie mniejszej gęstości dyslokacji. Oba te obszary są widoczne na Rysunku 16 (c).

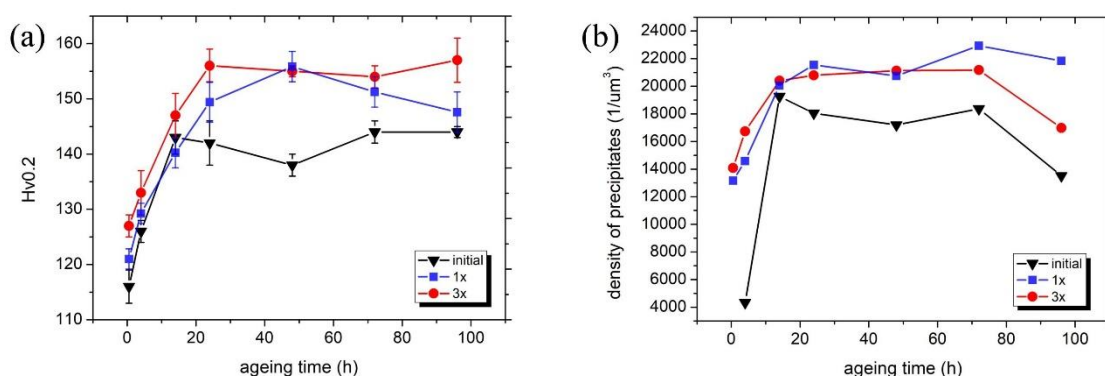
Głównym rezultatem opisanych badań jest powiązanie sekwencji procesów wydzieleniowych z lokalną mikrostrukturą, która ma bezpośredni wpływ na procesy dyfuzyjne kontrolujące zarodkowanie i wzrost nowych wydzielen. Dodatkowo, zauważyłem, że lokalne fluktuacje składu chemicznego mogą mieć znaczny wpływ na dyfuzyjność pierwiastków rozpuszczonych w osnowie. Jednym z narzędzi pozwalających na kontrolowanie tego typu zjawisk jest generowanie różnego rodzaju defektów struktury metodami odkształcenia plastycznego oraz wygrzewania. Potencjał takiego podejścia postanowiłem sprawdzić dla stopów aluminium serii 2xxx, którego głównymi dodatkami stopowymi są Cu i Mg. Dodatek Mg ma kluczowe znaczenie dla zachodzenia procesów wydzieleniowych ze względu na dużą tendencję tego pierwiastka do tworzenia par z wakansami. Eminentnym efektem wpływu Mg na procesy wydzieleniowe w tej serii stopów jest zjawisko *rapid ageing*, w czasie którego dochodzi do uzyskania ok. 70% maksymalnej twardości w ciągu bardzo krótkiego okresu starzenia sztucznego [18,19]. Oznacza to, że wpływając na dyfuzyjność Mg w osnowie możliwe jest kontrolowanie tworzenia zarodków, które w późniejszych etapach starzenia przemieniają się w wydzielenia dające umocnienie stopu.



Rysunek 17 Schemat obróbki cieplno-plastycznej zastosowanej do badań szybkości zarodkowania wydzielen w stopie AlCuMg [C10]

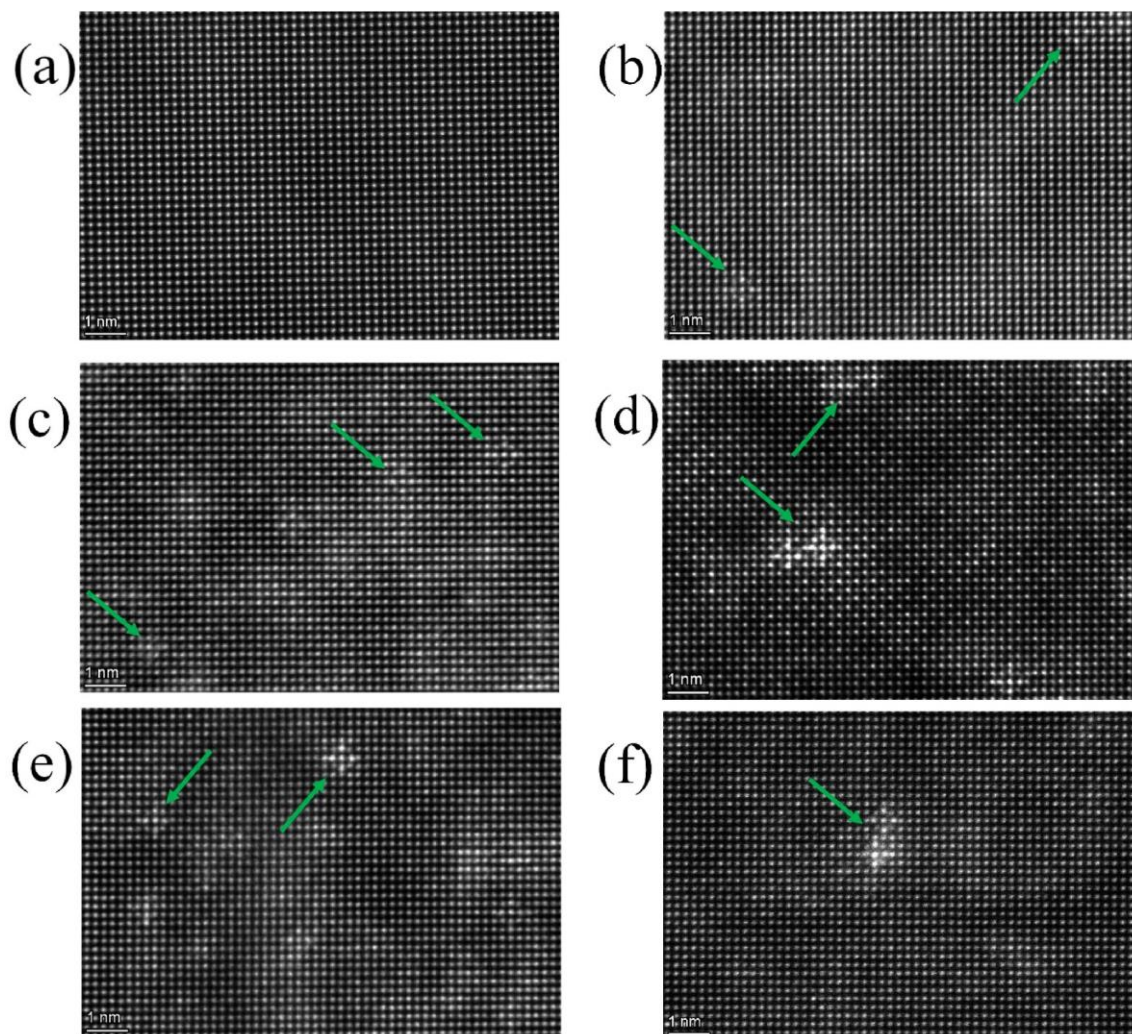
Eksperymentalnym materiałem był stop Al4%Cu1%Mg (w % wagowych). Obróbka cieplna była zbliżona do zastosowanej w poprzedniej publikacji (Rysunek 14), jednak nie stosowałem wysokotemperaturowego podgrzewania wsadu pomiędzy kolejnymi przepustami ARB. Doświadczenie to opiera się na założeniu, że odkształcenie plastyczne generuje nie tylko

struktury dyslokacyjne, ale także wakanse, które mogą tworzyć pary z atomami Mg rozpuszczonymi w osnowie. Materiał poddany jednemu oraz trzem przepustom metodą ARB został przesycony bezpośrednio po odkształceniu plastycznym w oraz sztucznie starzony w standardowych warunkach. Materiał porównawczy stanowił ten sam stop poddany rekrytalizacji i obróbce cieplnej w takich samych warunkach.



Rysunek 18 Krzywa starzenia (a) i pomiar gęstości wydzieli (b) dla stopu AlCuMg poddanego obróbce przedstawionej na Rysunku 17 [C10]

Krzywa starzenia oraz pomiar gęstości wydzieli dla eksperymentalnego stopu (Rysunki 18 (a) i (b)) wyraźnie wskazują, że wyższy poziom twardości jest związany z większą gęstością wydzieli, jednak ich rozmiary są mniejsze niż dla materiału referencyjnego. Aby było to możliwe na wczesnych etapach starzenia musi powstać większa gęstość stref GPB będących zarodkami dla dalszych przemian. Badania DSC przeprowadzone bezpośrednio po drugim przesyconiu jednoznacznie wskazują, że pierwsza reakcja egzotermiczna (związana z dekompozycją przesyconego roztworu stałego) zachodzi mniej intensywnie dla materiału poddanego nowej przeróbce cieplno-plastycznej. Wynik ten zinterpretowałem jako skutek przyspieszonej dyfuzji związanej z nadmiarowymi wakansami, które powstały w czasie obróbki plastycznej. Umożliwiły one utworzenie początkowych etapów - stref GPB już przed rozpoczęciem właściwego starzenia. Fazy te są kluczowe pod względem efektywności umocnienia wydzieleniowego ponieważ przemieniają się w fazę S' dającą największe dającą największe umocnienie. Obecność stref GPB na wczesnych etapach umocnienia wydzieleniowego w materiale poddanym odkształceniu plastycznemu potwierdziłem z użyciem wysokorozdzielczej mikroskopii skaningowo-transmisyjnej. Rysunek 19 przedstawia porównanie stanu wydzieli na wczesnych etapach starzenia dla dwóch materiałów – materiału referencyjnego ((a) i (b)) oraz poddanego nowej przeróbce (po jednym przepuszczeniu ARB (c) i (d), po trzech przepustach ARB (e) i (f)).



Rysunek 19 Stan wydzieleni w stopie AlCuMg poddanym obróbce przedstawionej na Rysunku 17. Materiał wyjściowy (a) czas starzenia 0.5h (b) 4h; 1xARB czas starzenia (c) 0.5h (d) 4h; 3xARB czas starzenie (e) 0.5h (f) 4h [C10]

Po 30 minutach starzenia w materiale referencyjnym nie znalazłem żadnych oznak przemian fazowych (Rysunek 19 (a)). Na tym samym etapie w materiale odkształconym widoczne są już pierwsze monobloki stref GPB stanowiące „budulec” większych wydzieleni tej fazy, Rysunki 19 (c) i (e). Obserwacja ta jest w pełnej zgodzie ze wspomnianymi wcześniej wynikami badań DSC. Obecność monobloków na wczesnym etapie procesów wydzieleniowych skutkuje mniejszym wydatkiem energetycznym potrzebnym do kontynuowania tej przemiany. W przypadku materiału referencyjnego (silniejsza przemiana egzotermiczna) energia uwolniona w czasie reakcji związana jest zarówno z utworzeniem zarodka jak i jego późniejszym wzrostem. Dopiero po 4h starzenia zauważyłem obecność stref GPB w materiale referencyjnym (Rysunek 19 (b)). Po tym samym czasie starzenia faza ta zaczęła się rozrastać w materiale po odkształceniu, Rysunki 19 (d) i (f). Ostatecznie przemiany te doprowadziły do utworzenia większej gęstości mniejszych wydzieleni w materiale odkształconym przed przeprowadzeniem umocnienia wydzieleniowego.

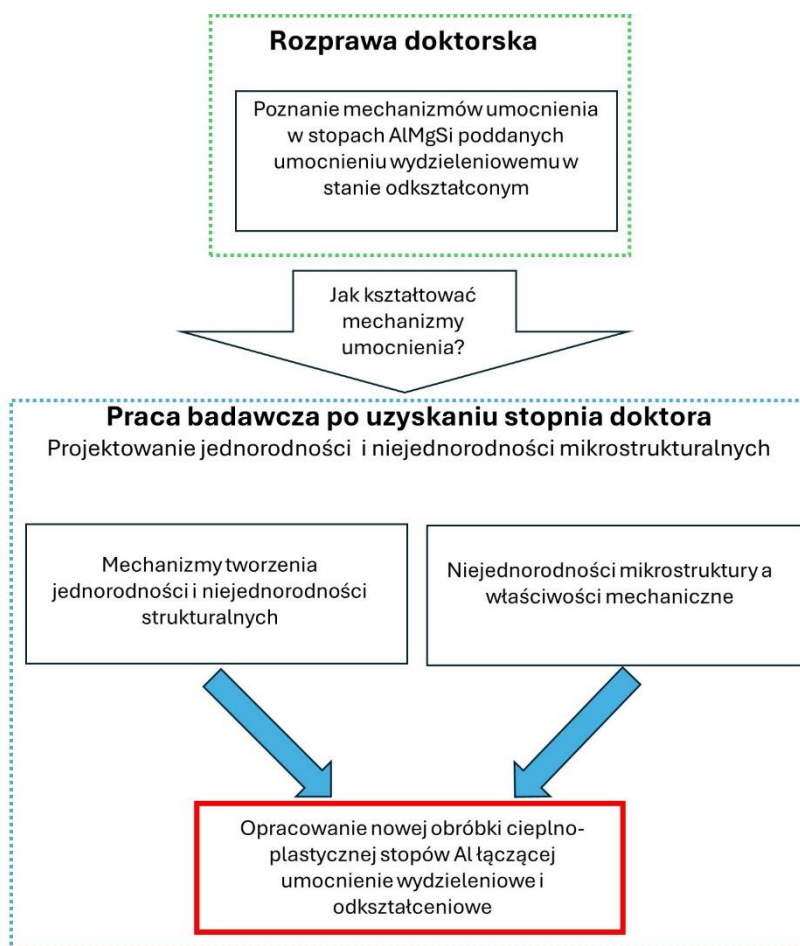
4.2.5 Oryginalne osiągnięcia naukowe stanowiące wkład w rozwój dyscypliny inżynieria materiałowa zawarte w cyklu publikacji

Przedstawiony cykl publikacji został podzielony na trzy wątki badawcze, w których motywem przewodnim były zagadnienia związane z jednorodnością i niejednorodnością mikrostruktury powstałymi w wyniku odkształcenia plastycznego lub obróbki cieplnej. Na podstawie badań mikrostrukturalnych w wykorzystaniem metod mikroskopii elektronowej wykazałem, że lokalne uwarunkowania mikrostrukturalne (tekstura krystalograficzna, konfiguracja defektów sieci krystalicznej) mogą być kształtowane poprzez odpowiednio zaprojektowany proces odkształcenia plastycznego w sposób świadomy, tzn. z wytworzeniem konkretnego typu niejednorodności lub celowym ujednorodnieniem mikrostruktury. Zabiegi te umożliwiają kontrolowanie właściwości mechanicznych w czystym aluminium lub w stopach. Tematyka osiągnięcia jest bezpośrednią kontynuacją wątków badawczych poruszonych przeze mnie w rozprawie doktorskiej. Jako jedno z głównych osiągnięć tamtej pracy uznaję rozpoznanie i ilościowe ujęcie aktywnych mechanizmów umocnienia w stopie AlMgSi o złożonej mikrostrukturze. Badania, które prowadziłem w tamtym okresie skupiały się przede wszystkim na charakteryzacji mikrostruktury. Prace późniejsze skupiały się przede wszystkim na poznaniu mechanizmów przemian mikrostrukturalnych odpowiedzialnych za powstawanie niejednorodności oraz sposobach ich kontrolowania w celu świadomego projektowania mikrostruktury stopów aluminium. Schematyczne ujęcie mojej drogi badawczej przedstawia Rysunek 20.

Szczegółowe osiągnięcia związane z każdym z wątków przedstawiam poniżej:

- Opisanie mechanizmu rozdrobnienia ziaren w procesie przyrostowego przeciskania przez kanał kątowy z uwzględnieniem aktywności dyslokacji, rotacji ziaren oraz wpływu naprężeń resztkowych;
- Powiązanie cech strukturalnych aluminium o jednorodnej strukturze z właściwościami mechanicznymi oraz ich anizotropią w płytkach wytworzonych metodą przyrostowego przeciskania przez kanał kątowy;
- Opracowanie techniki walcowania stopów aluminium pozwalającej na intensywną fragmentację ziaren oraz zaburzenie typowej tekstury włóknistej;
- Określenie roli lokalnej konfiguracji defektów sieci krystalicznej w dyslokacyjnym mechanizmie odkształcenia plastycznego i ich roli w umocnieniu odkształceniowym;

- Określenie wpływu dyslokacji oraz granic wytworzonych w czasie odkształcenia plastycznego na procesy wydzieleniowe w stopach AlMgSi;
- Opracowanie przeróbki cieplno-plastycznej opartej na technice *accumulative roll bonding* pozwalającej na uzyskanie synergicznego efektu umocnienia odkształceniowego i wydzieleniowego w stopach AlMgSi skutkującego podwyższeniem właściwości mechanicznych względem konwencjonalnej obróbki;
- Opracowanie przeróbki cieplno-plastycznej opartej na technice walcowania pozwalającej na zarodkowanie i wzrost faz umacniających w stopach AlCuMg na drodze przyspieszonej dyfuzji, skutkującej wzmocnieniem efektu umocnienia wydzieleniowego;
- Opisanie mechanizmu wyjaśniającego rolę wakansów oraz pierwiastków stopowych w zarodkowaniu stref GPB w stopach AlCuMg.



Rysunek 20 Schematyczna prezentacja wątków badawczych, którymi zajmowałem się w czasie swojej pracy naukowej

Dodatkowym aspektem badań prowadzonych przeze mnie jest opracowanie metod preparatyki próbek do badań metodami mikroskopii elektronowej oraz technik, które pozwalają na efektywne obrazowanie elementów mikrostruktury będących obiektem moich zainteresowań opisanych o osiągnięciu. Dotyczy to zarówno technik skaningowej jak i transmisyjnej mikroskopii elektronowej. Zagadnienie to jest często pomijane lub niepodkreślane w wystarczający sposób ze względu na bardziej techniczny aspekt prowadzenia badań, który przede wszystkim ułatwia prowadzenie obserwacji, ale nie jest celem samym w sobie.

4.3 Pozostałe osiągnięcia niewchodzące w skład cyklu publikacji

4.3.1 Powiązanie mikrostruktury metali lekkich poddanych dużemu odkształceniu plastycznemu z właściwościami mechanicznymi

Jednym z głównych obszarów mojej działalności naukowej jest analiza mikrostruktury materiałów poddanych odkształceniu plastycznemu. Wątek rozdrobnienia ziarna metodami dużego odkształcenia plastycznego (*severe plastic deformation*) i wpływu tych procesów na właściwości mechaniczne jest intensywnie badany na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. W ramach realizacji różnych projektów lub działalności niezwiązanej bezpośrednio z żadnym projektem prowadziłem obserwacje najważniejszych metali lekkich i ich stopów o rozdrobnionej strukturze z wykorzystaniem technik mikroskopii elektronowej. Badania mikrostruktury stopów aluminium po procesie przyrostowego odkształcenia plastycznego prowadziłem w ramach badań grupy badawczej Prof. Lewandowskiej oraz we współpracy z dr Asli Bulutsuz [20–23]. Mój udział w tych pracach polegał na przeprowadzeniu obserwacji mikroskopowych oraz analizie wyników pod kątem uzyskanych właściwości mechanicznych. Przemiany mikrostrukturalne w tytanie i jego stopach po różnych kombinacjach obróbki cieplno-plastycznej były badane w pracach [8,24,25]. Wykorzystując techniki transmisyjnej mikroskopii elektronowej byłem w stanie dostarczyć obrazy potwierdzające stawiane hipotezy badawcze dotyczące mechanizmów umocnienia oraz skuteczności metod dużego odkształcenia w rozdrobnieniu ziaren. Stosując technikę EBSD wspomagałem prace dotyczące przemian mikrostruktury oraz tekstury krystalograficznej w stopach magnezu oraz stali austenitycznej poddanych różnym wariantom przeróbki plastycznej o obróbki cieplnej [4,26–29]. Do najważniejszych prac z tego wątku zaliczam:

- M. Ciemiorek, **W. Chromiński**, C. Jasiński, M. Lewandowska, Microstructural changes and formability of Al–Mg ultrafine-grained aluminum plates processed by multi-turn ECAP and upsetting, *Mater. Sci. Eng. A.* 831 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.14220>
- K. Majchrowicz, A. Sotniczuk, B. Adamczyk-Cieślak, **W. Chromiński**, P. Jóźwik, Z. Pakieła, H. Garbacz, The influence of microstructure and texture on the hardening by annealing effect in cold-rolled titanium, *J. Alloys Compd.* 948 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169791>
- M. Ciemiorek, P. Bartkowski, **W. Chromiński**, L. Olejnik, M. Lewandowska, Forming Ability of Ultrafine-Grained Aluminum Plates Processed by Incremental ECAP, *Adv. Eng. Mater.* (2019). <https://doi.org/10.1002/adem.201900473>

4.3.2 Opisanie mechanizmów powstawania warstw tlenkowych w czasie korozji stopów Ti

Współpraca z dr inż. Agatą Sotniczuk opiera się na szczegółowej charakteryzacji metodami transmisyjnej mikroskopii elektronowej oraz analizie składu chemicznego warstw tlenkowych powstałych na stopach tytanu do zastosowań biomedycznych. Badania prowadzone przeze mnie mają na celu dostarczeniu analizy budowy warstwy tlenkowej, która pozwoli wnioskować na temat mechanizmów utleniania się powierzchni stopów tytanu w zależności od składu chemicznego, orientacji krystalograficznej czy odmiany alotropowej tytanu [30–34]. Współpraca zaowocowała m.in. opracowaniem nowych metod preparatyki porowatych warstw tlenkowych zawierających substancje organiczne występujące w ludzkiej krwi do badań z wykorzystaniem transmisyjnej mikroskopii elektronowej porowatych warstw tlenkowych powstałych podczas ekspozycji biomateriałów na działanie warunków symulujących stan zapalny. Do najważniejszych prac z tego wątku zaliczam:

- A. Sotniczuk, **W. Chromiński**, B. Adamczyk-Cieślak, M. Pisarek, H. Garbacz, Corrosion behaviour of biomedical Ti under simulated inflammation: Exploring the relevance of grain refinement and crystallographic texture, *Corros. Sci.* 200 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110238>
- A. Sotniczuk, B. Dou, C. Xie, J. Tang, D. Kalita, **W. Chromiński**, H. Garbacz, F. Sun, K. Ogle, New insights into the corrosion of orthopedic Ti-6Al-4V under cathodic polarization, *Corros. Sci.* 238 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.112354>.

- A. Sotniczuk, **W. Chromiński**, D. Kalita, H. Garbacz, C. Xie, J. Tang, B. Dou, M. Pisarek, A. Baron-Wiecheć, Ł. Kurpaska, F. Sun, K. Ogle, Effect of Zr addition on the corrosion resistance of Ti-Mo alloy in the H₂O₂-containing inflammatory environment, Appl. Surf. Sci. 681 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161518>

4.3.3 Analiza zniszczeń radiacyjnych w materiałach dla energetyki

Badania, które realizuję w ramach wykonywania projektu EuroFusion oraz wykonując swoje obowiązki w Centrum Doskonałości NOMATEN dotyczą analizy zniszczeń radiacyjnych w materiałach narażonych na działanie plazmy oraz wysokoenergetycznych jonów. W przypadku pierwszego projektu obserwacje przez mnie prowadzone skupiają się przede wszystkim na zjawiskach zachodzących w wolframie. Badania prowadzone w Centrum Doskonałości NOMATEN dotyczą analizy nowych materiałów: stopów o wysokiej entropii, stali ODS czy stopów niklu. Za swoje największe osiągnięcie w tej dziedzinie uważam opracowanie metod analizy ilościowej defektów sieci krystalicznej (dyslokacje, pęcherze, nanopustki) z wykorzystaniem metod transmisyjnej mikroskopii elektronowej. Techniki te doskonaliłem prowadząc badania własne dotyczące ewolucji struktur dyslokacyjnych w wolframie w zależności od stopnia zniszczeń radiacyjnych i temperatury. Zastosowanie tego podejścia pozwoliło mi na określenie wpływu gęstości strumienia jonów na powstałe struktury dyslokacyjne oraz zdolność do retencji deuteru [35,36] czy wpływu implantacji helu na stabilność struktur dyslokacyjnych [37,38]. Następnie, techniki przez mnie opracowane znalazły zastosowanie w badaniach innych metali o potencjale zastosowań w energetyce [39–42]. Obserwacje mikroskopowe, które prowadziłem posłużyły do interpretacji mikrostrukturalnych uwarunkowań właściwości mechanicznych materiałów poddanych ekspozycji na wiązkę jonów. Do najważniejszych prac z tego wątku zaliczam:

- **W. Chrominski**, L. Ciupinski, P. Bazarnik, S. Markelj, T. Schwarz-Selinger, TEM investigation of the influence of dose rate on radiation damage and deuterium retention in tungsten, Mater. Charact. 154 (2019) 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.05.028>.
- **W. Chromiński**, Ciupiński, P. Bazarnik, S. Markelj, T. Schwarz-Selinger, Microstructure evolution in helium implanted self-irradiated tungsten annealed at 1700 K studied by TEM, Mater. Charact. 174 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.110991>

- S. Markelj, T. Schwarz-Selinger, M. Pečovnik, **W. Chromiński**, A. Šestan, J. Zavašnik, Deuterium transport and retention in the bulk of tungsten containing helium: the effect of helium concentration and microstructure, Nucl. Fusion. (2020). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/abadae>

4.3.4 Zastosowanie metod mikroskopii elektronowej do analizy ilościowej jako danych wsadowych do modelowania zjawisk fizycznych

Zastosowanie metod analizy ilościowej z wykorzystaniem mikroskopii elektronowej (skaningowej i transmisyjnej) jest bardzo atrakcyjne ze względu na możliwość dostarczenia eksperymentalnych danych ilościowych do modelowania komputerowego zjawiska zachodzących w materiałach. Będąc zaangażowanym w prace Laboratorium Mikroskopii Elektronowej miałem możliwość dostosowywania metod obserwacji do specyficznych potrzeb symulacji. Badania prowadzone przeze mnie w ramach współpracy z Instytutem Podstawowych Problemów Techniki PAN dotyczyły symulacji procesu spiekania materiałów porowatych [43] oraz mechanizmów odkształcenia plastycznego w stopach Fe [44]. Zjawiska plastyczności materiałów o dużej gęstości defektów radiacyjnych podejmowałem także w ramach pracy w Centrum Doskonałości NOMATEN [45–47]. Badania tego typu wymagały kombinacji zastosowania technik dyfrakcyjnych oraz obrazowania defektów radiacyjnych i dyslokacji z wykorzystaniem różnych warunków obrazowania w transmisyjnym mikroskopie elektronowym. Zastosowanie modelowania układów równowagi fazowej wymaga walidacji z użyciem ilościowej analizy mikrostruktury, która może być przeprowadzona metodą dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych (EBSD). Współpracując z grupą dra Jana Wróbla z Politechniki Warszawskiej miałem okazję opracować eksperyment pozwalający na sprawdzenie opracowanego modelu nowych stopów o wysokiej entropii [48]. Do najważniejszych prac z tego wątku zaliczam:

- L. Kurpaska, F.J. Dominguez-Gutierrez, Y. Zhang, K. Mulewska, H. Bei, W.J. Weber, A. Kosińska, **W. Chromiński**, I. Jozwik, R. Alvarez-Donado, S. Papanikolaou, J. Jagielski, M. Alava, Effects of Fe atoms on hardening of a nickel matrix: Nanoindentation experiments and atom-scale numerical modeling, Mater. Des. 217 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110639>
- M. Fedorov, J.S. Wróbel, **W. Chromiński**, G. Cieślak, M. Płocińska, K.J. Kurzydłowski, D. Nguyen-Manh, Composition stability of single fcc phase in Cr–Fe–

Mn–Ni alloys: First-principles prediction and experimental validation, *Acta Mater.* 255 (2023) 119047. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.119047>

- A. Ustrzycka, F.J. Dominguez-Gutierrez, **W. Chromiński**, Atomistic analysis of the mechanisms underlying irradiation-hardening in Fe–Ni–Cr alloys, *Int. J. Plast.* 182 (2024) 104118. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2024.104118>

Literatura

- [1] X. Huang, G. Winther, Dislocation structures. Part I. Grain orientation dependence, *Philos. Mag.* 87 (2007) 5189–5214. <https://doi.org/10.1080/14786430701652851>.
- [2] G. Winther, X. Huang, Dislocation structures. Part II. Slip system dependence, *Philos. Mag.* 87 (2007) 5215–5235. <https://doi.org/10.1080/14786430701591505>.
- [3] P. Bazarnik, M. Lewandowska, M. Andrzejczuk, K.J. Kurzydłowski, The strength and thermal stability of Al – 5Mg alloys nano-engineered using methods of metal forming, *Mater. Sci. Eng. A.* 556 (2012) 134–139. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.06.068>.
- [4] A.T. Krawczynska, S. Gierlotka, P. Suchecki, D. Setman, B. Adamczyk-Cieslak, M. Gloc, W. Chrominski, M. Lewandowska, M. Zehetbauer, Phenomena Occurring in Nanostructured Stainless Steel 316LVM during Annealing under High Hydrostatic Pressure, *Adv. Eng. Mater.* (2018). <https://doi.org/10.1002/adem.201800101>.
- [5] K. Topolski, W. Pachla, H. Garbacz, Progress in hydrostatic extrusion of titanium, *J. Mater. Sci.* 48 (2013) 4543–4548. <https://doi.org/10.1007/s10853-012-7086-7>.
- [6] M. Lewandowska, K. Wawer, P. Kozikowski, M. Ohnuma, K.J. Kurzydłowski, Precipitation in a nanograined 7475 aluminium alloy - Processing , properties and nanoanalysis, *Adv. Eng. Mater.* 16 (2014) 482–485.
- [7] K. Ozaltin, W. Chrominski, M. Kulczyk, A. Panigrahi, J. Horky, M. Zehetbauer, M. Lewandowska, Enhancement of mechanical properties of biocompatible Ti-45Nb alloy by hydrostatic extrusion, *J. Mater. Sci.* 49 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8397-7>.
- [8] A.G. Bulutsuz, W. Chrominski, Y. Huang, P. Kral, M.E. Yurci, M. Lewandowska, T.G. Langdon, A Comparison of Warm and Combined Warm and Low-Temperature Processing Routes for the Equal-Channel Angular Pressing of Pure Titanium, *Adv. Eng. Mater.* 22 (2020). <https://doi.org/10.1002/adem.201900698>.
- [9] R.Z. Valiev, T.G. Langdon, Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement, *Prog. Mater. Sci.* 51 (2006) 881–981. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.003>.
- [10] P.-L. Sun, P.-W. Kao, C.-P. Chang, Effect of deformation route on microstructural development in aluminum processed by equal channel angular extrusion, *Metall. Mater. Trans. A.* 35 (2004) 1359–1368. <https://doi.org/10.1007/s11661-004-0311-5>.
- [11] A. Gholinia, P.B. Prangnell, M. V. Markushev, Effect of strain path on the development of deformation structures in severely deformed aluminium alloys processed by ECAE, *Acta Mater.* 48 (2000) 1115–1130. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(99\)00388-2](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(99)00388-2).
- [12] A.A. Salem, T.G. Langdon, T.R. McNelley, S.R. Kalidindi, S.L. Semiatin, Strain-path effects on the evolution of microstructure and texture during the severe-plastic deformation of aluminum, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 37 (2006) 2879–2891. <https://doi.org/10.1007/BF02586120>.

- [13] T.G. Langdon, The principles of grain refinement in equal-channel angular pressing, *Mater. Sci. Eng. A.* 462 (2007) 3–11. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.02.473>.
- [14] M. Cabibbo, E. Evangelista, C. Scalabroni, EBSD FEG-SEM, TEM and XRD techniques applied to grain study of a commercially pure 1200 aluminum subjected to equal-channel angular-pressing, *Micron.* 36 (2005) 401–414. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2005.03.004>.
- [15] Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya, T. Sakai, R.G. Hong, Ultra-fine grained bulk aluminium produced by accumulative roll-bonding (ARB) process, *Scr. Mater.* 39 (1998) 1221–1227.
- [16] W. Chrominski, M. Lewandowska, Precipitation phenomena in ultrafine grained Al–Mg–Si alloy with heterogeneous microstructure, *Acta Mater.* 103 (2016) 547–557. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.10.030>.
- [17] K. Teichmann, C.D. Marioara, S.J. Andersen, K.O. Pedersen, S. Gulbrandsen-Dahl, M. Kolar, R. Holmestad, K. Marthinsen, HRTEM study of the effect of deformation on the early precipitation behaviour in an AA6060 Al–Mg–Si alloy, *Philos. Mag.* 91 (2011) 3744–3754. <https://doi.org/10.1080/14786435.2011.593577>.
- [18] R.K.W. Marceau, C. Qiu, S.P. Ringer, C.R. Hutchinson, A study of the composition dependence of the rapid hardening phenomenon in Al–Cu–Mg alloys using diffusion couples, *Mater. Sci. Eng. A.* 546 (2012) 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.03.043>.
- [19] R.K.W. Marceau, G. Sha, R. Ferragut, A. Dupasquier, S.P. Ringer, Solute clustering in Al–Cu–Mg alloys during the early stages of elevated temperature ageing, *Acta Mater.* 58 (2010) 4923–4939. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.05.020>.
- [20] M. Ciemiorek, P. Bartkowski, W. Chromiński, L. Olejnik, M. Lewandowska, Forming Ability of Ultrafine-Grained Aluminum Plates Processed by Incremental ECAP, *Adv. Eng. Mater.* (2019). <https://doi.org/10.1002/adem.201900473>.
- [21] A. Günay Bulutsuz, W. Chrominski, Incremental Severe Plastic Deformation Effect on Mechanical and Microstructural Characteristics of AA6063, *Trans. Indian Inst. Met.* 74 (2021) 69–77. <https://doi.org/10.1007/s12666-020-02122-4>.
- [22] M. Ciemiorek, W. Chromiński, C. Jasiński, M. Lewandowska, Microstructural changes and formability of Al–Mg ultrafine-grained aluminum plates processed by multi-turn ECAP and upsetting, *Mater. Sci. Eng. A.* 831 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142202>.
- [23] M. Lipinska, W. Chrominski, L. Olejnik, J. Golinski, A. Rosochowski, M. Lewandowska, Ultrafine-Grained Plates of Al–Mg–Si Alloy Obtained by Incremental Equal Channel Angular Pressing: Microstructure and Mechanical Properties, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* (2017). <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4258-8>.
- [24] K. Ozaltin, A. Panigrahi, W. Chrominski, A.G. Bulutsuz, M. Kulczyk, M.J. Zehetbauer, M. Lewandowska, Microstructure and Texture Evolutions of Biomedical Ti–13Nb–13Zr Alloy Processed by Hydrostatic Extrusion, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 48 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4278-4>.
- [25] K. Majchrowicz, A. Sotniczuk, B. Adamczyk-Cieślak, W. Chromiński, P. Jóźwik, Z. Pakieła, H. Garbacz, The influence of microstructure and texture on the hardening by annealing effect in cold-rolled titanium, *J. Alloys Compd.* 948 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169791>.
- [26] K. Majchrowicz, P. Jóźwik, W. Chromiński, B. Adamczyk-Cieślak, Z. Pakieła, Microstructure, texture and mechanical properties of mg-6sn alloy processed by differential speed rolling, *Materials (Basel)*. 14 (2021) 1–17. <https://doi.org/10.3390/ma14010083>.

- [27] K. Majchrowicz, B. Adamczyk-Cieślak, W. Chromiński, P. Jóźwik, Z. Pakieła, Comparison of Microstructure, Texture, and Mechanical Properties of TZ61 and AZ61 Mg Alloys Processed by Differential Speed Rolling, *Materials* (Basel). 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15030785>.
- [28] A. Dobkowska, B. Adamczyk – Cieślak, M. Koralnik, W. Chromiński, J. Kubasek, J. Ciftci, D. Kuc, J. Mizera, Corrosion behavior of fine-grained Mg-7.5Li-3Al-1Zn fabricated by extrusion with a forward-backward rotating die (KoBo), *J. Magnes. Alloy*. 10 (2022) 811–820. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.08.020>.
- [29] A. Dobkowska, M. Koralnik, B. Adamczyk-Cieślak, D. Kuc, W. Chromiński, J. Kubasek, J. Mizera, The Effect of Extrusion Ratio on the Corrosion Resistance of Ultrafine-Grained Mg-4Li-3Al-Zn Alloy Deformed Using Extrusion with a Forward-Backward Oscillating Die, *J. Mater. Eng. Perform.* 31 (2022) 8932–8939. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06895-1>.
- [30] A. Sotniczuk, W. Chromiński, B. Adamczyk-Cieślak, M. Pisarek, H. Garbacz, Corrosion behaviour of biomedical Ti under simulated inflammation: Exploring the relevance of grain refinement and crystallographic texture, *Corros. Sci.* 200 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110238>.
- [31] A. Sotniczuk, J. Gilbert, Y. Liu, M. Matczuk, W. Chrominski, D. Kalita, M. Pisarek, H. Garbacz, Corrosion resistance of β -phase titanium alloys under simulated inflammatory conditions- Exploring the relevance of biocompatible alloying elements.pdf, *Corros. Sci.* 220 (2023) 111271.
- [32] A. Sotniczuk, Kalita, W. Chromiński, M. Matczuk, M. Pisarek, H. Garbacz, Albumin suppresses oxidation of Ti-Nb alloy in the simulated inflammatory environment.pdf, *J. Biomed. Mater. Res. Part B Appl. Biomater.* 112 (2024) e35404.
- [33] A. Sotniczuk, B. Dou, C. Xie, J. Tang, D. Kalita, W. Chromiński, H. Garbacz, F. Sun, K. Ogle, New insights into the corrosion of orthopedic Ti-6Al-4V under cathodic polarization, *Corros. Sci.* 238 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.112354>.
- [34] A. Sotniczuk, W. Chromiński, D. Kalita, H. Garbacz, C. Xie, J. Tang, B. Dou, M. Pisarek, A. Baron-Wiecheć, Ł. Kurpaska, F. Sun, K. Ogle, Effect of Zr addition on the corrosion resistance of Ti-Mo alloy in the H₂O₂-containing inflammatory environment, *Appl. Surf. Sci.* 681 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161518>.
- [35] W. Chrominski, L. Ciupinski, P. Bazarnik, S. Markelj, T. Schwarz-Selinger, TEM investigation of the influence of dose rate on radiation damage and deuterium retention in tungsten, *Mater. Charact.* 154 (2019) 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.05.028>.
- [36] S. Markelj, T. Schwarz-Selinger, M. Pečovnik, W. Chromiński, A. Šestan, J. Zavašnik, Deuterium transport and retention in the bulk of tungsten containing helium: the effect of helium concentration and microstructure, *Nucl. Fusion.* (2020). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/abadae>.
- [37] W. Chromiński, Ciupiński, P. Bazarnik, S. Markelj, T. Schwarz-Selinger, Microstructure evolution in helium implanted self-irradiated tungsten annealed at 1700 K studied by TEM, *Mater. Charact.* 174 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.110991>.
- [38] S. Markelj, T. Schwarz-Selinger, M. Pečovnik, A. Založnik, M. Kelemen, I. Cadez, J. Bauer, P. Pelicon, W. Chromiński, Ł. Ciupiński, Displacement damage stabilization by hydrogen presence under simultaneous W ion damaging and D ion exposure, *Nucl. Fusion.* (2019). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab2261>.
- [39] M. Frelek-Kozak, Kurpaska, K. Mulewska, M. Zieliński, R. Diduszko, A. Kosińska, D. Kalita, W. Chromiński, M. Turek, K. Kaszyca, A. Zaborowska, J. Jagielski, Mechanical behavior of ion-irradiated ODS RAF steels strengthened with different types of refractory oxides, *Appl. Surf. Sci.* 610 (2023) 10–12.

- <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155465>.
- [40] E. Wyszowska, C. Mieszczynski, Kurpaska, A. Azarov, W. Chromiński, I. Jóźwik, A. Esfandiarpour, A. Kosińska, D. Kalita, R. Diduszko, J. Jagielski, S.T. Nori, M. Alava, The Fe addition as an effective treatment for improving the radiation resistance of fcc NixFe1-x single-crystal alloys, *J. Nucl. Mater.* 584 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154565>.
- [41] E. Wyszowska, C. Mieszczynski, Kurpaska, A. Azarov, I. Jóźwik, A. Kosińska, W. Chromiński, R. Diduszko, W.Y. Huo, I. Cieślak, J. Jagielski, Tuning heterogeneous ion-radiation damage by composition in NixFe1-x binary single crystals, *Nanoscale*. (2023). <https://doi.org/10.1039/d2nr06178c>.
- [42] D. Kalita, I. Jóźwik, Kurpaska, Y. Zhang, K. Mulewska, W. Chrominski, J. O'Connell, Y. Ge, W.L. Boldman, P.D. Rack, Y. Wang, W.J. Weber, J. Jagielski, The microstructure and He+ ion irradiation behavior of novel low-activation W-Ta-Cr-V refractory high entropy alloy for nuclear applications, *Nucl. Mater. Energy*. 37 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.nme.2023.101513>.
- [43] S. Nosewicz, G. Jurczak, W. Chrominski, J. Rojek, K. Kaszyca, M. Chmielewski, Combined EBSD and Computer-Assisted Quantitative Analysis of the Impact of Spark Plasma Sintering Parameters on the Structure of Porous Materials, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 53 (2022) 4101–4125. <https://doi.org/10.1007/s11661-022-06821-z>.
- [44] A. Ustrzycka, F.J. Dominguez-Gutierrez, W. Chromiński, Atomistic analysis of the mechanisms underlying irradiation-hardening in Fe–Ni–Cr alloys, *Int. J. Plast.* 182 (2024) 104118. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2024.104118>.
- [45] L. Kurpaska, F.J. Dominguez-Gutierrez, Y. Zhang, K. Mulewska, H. Bei, W.J. Weber, A. Kosińska, W. Chrominski, I. Jozwik, R. Alvarez-Donado, S. Papanikolaou, J. Jagielski, M. Alava, Effects of Fe atoms on hardening of a nickel matrix: Nanoindentation experiments and atom-scale numerical modeling, *Mater. Des.* 217 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110639>.
- [46] K. Mulewska, F.J. Dominguez-Gutierrez, D. Kalita, J. Byggmästar, G.Y. Wei, W. Chromiński, S. Papanikolaou, M.J. Alava, Kurpaska, J. Jagielski, Self-ion irradiation of high purity iron: Unveiling plasticity mechanisms through nanoindentation experiments and large-scale atomistic simulations, *J. Nucl. Mater.* 586 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154690>.
- [47] C. Mieszczynski, E. Wyszowska, P. Jozwik, K. Skrobias, K. Stefanska-Skrobias, M. Barlak, R. Ratajczak, A. Kosinska, W. Chrominski, K. Lorenz, Damage kinetics in high-temperature irradiated Ni crystals, *Appl. Surf. Sci.* 676 (2024) 160991. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.160991>.
- [48] M. Fedorov, J.S. Wróbel, W. Chromiński, G. Cieślak, M. Płocińska, K.J. Kurzydłowski, D. Nguyen-Manh, Composition stability of single fcc phase in Cr–Fe–Mn–Ni alloys: First-principles prediction and experimental validation, *Acta Mater.* 255 (2023) 119047. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.119047>.

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

5.1 Staż w Trondheim – maj 2015

W czasie studiów doktorskich zostałem laureatem stypendium wyjazdowego przyznawanego przez Centrum Studiów Zaawansowanych Politechniki Warszawskiej. Nagroda pozwoliła na organizację miesięcznego wyjazdu do TEM Gemini Centre działającym przy Norwegian University of Science and Technology (NTNU) w Trondheim w Norwegii. Opiekunem mojego pobytu była Prof. Randi Holmestad. W czasie stażu zostałem przeszkolony z obsługi wysokorozdzielczego mikroskopu elektronowego i następnie zostałem dopuszczony do samodzielnej pracy. Przez trzy tygodnie prowadziłem obserwacje nanometrycznych wydzielen w odkształconym stopie aluminium 6082. Wyniki badań zostały przedstawione w szerszym kontekście w mojej rozprawie doktorskiej, a bezpośrednim efektem tego stażu jest publikacja:

- **W. Chrominski**, S. Wenner, C.D. Marioara, R. Holmestad, M. Lewandowska, *Strengthening mechanisms in ultra fine grained Al-Mg-Si alloy processed by hydrostatic extrusion – Influence of ageing temperature*, Mater. Sci. Eng. A. 669 (2016) 447–458

5.2 Praca w Narodowym Centrum Badań Jądrowych – 2021 - obecnie

Od roku 2021 jestem zatrudniony w Centrum Doskonałości NOMATEN jako specjalista badawczo-techniczny. Do moich głównych zadań należało utworzenie laboratorium transmisyjnej mikroskopii elektronowej, z uwzględnieniem zaprojektowania pomieszczeń i przeprowadzeniem procedury przetargowej, a następnie opieka nad nowoutworzonym laboratorium i prowadzenie obserwacji z wspierających badania materiałowe prowadzone przez jednostkę. Pracownia ta jest częścią Materials Characterization Group kierowanej przez dr hab. inż. Iwonę Jóźwik, prof. NCBJ. Obserwacje, które prowadzę dotyczą w znacznej części charakteryzacji i analizy ilościowej defektów radiacyjnych powstałych w wyniku oddziaływania przyspieszonych jonów z metalami i ceramiką oraz identyfikacja mechanizmów umocnienia tych materiałów na potrzeby grupy prowadzącej symulacje komputerowe. W wyniku zadań badawczych, w które byłem zaangażowany, powstało 12 publikacji. Wśród najważniejszych należy wymienić:

- L. Kurpaska, F.J. Dominguez-Gutierrez, Y. Zhang, K. Mulewska, H. Bei, W.J. Weber, A. Kosińska, **W. Chrominski**, I. Jozwik, R. Alvarez-Donado, S. Papanikolaou, J.

Jagielski, M. Alava, Effects of Fe atoms on hardening of a nickel matrix: Nanoindentation experiments and atom-scale numerical modeling, *Mater. Des.* 217 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110639>

- A. Ustrzycka, F.J. Dominguez-Gutierrez, **W. Chromiński**, Atomistic analysis of the mechanisms underlying irradiation-hardening in Fe–Ni–Cr alloys, *Int. J. Plast.* 182 (2024) 104118. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2024.104118>
- M. Frelek-Kozak, Kurpaska, K. Mulewska, M. Zieliński, R. Diduszko, A. Kosińska, D. Kalita, **W. Chromiński**, M. Turek, K. Kaszyca, A. Zaborowska, J. Jagielski, Mechanical behavior of ion-irradiated ODS RAF steels strengthened with different types of refractory oxides, *Appl. Surf. Sci.* 610 (2023) 10–12

5.3 Staż w Trondheim – sierpień-listopad 2021

W ramach projektu Sonatina1, którego byłem kierownikiem odbyłem drugi staż w TEM Gemini Centre działającym przy Norwegian University of Science and Technology (NTNU), tym razem trzymiesięczny. Podobnie jak w roku 2015 moim opiekunem była Prof. Randi Holmestad. Badania prowadzone w czasie drugiego pobytu skupiały się przede wszystkim na zastosowaniu ilościowych metod analizy obrazu w celu określenia kinetyki procesów wydzieleniowych stopach AlCuMg poddanych różnym procesom obróbki cieplno-plastycznej. Dodatkowo prowadzono obserwacje z wykorzystaniem wysokorozdzielczego mikroskopu w celu obrazowania wczesnych etapów procesów wydzieleniowych. Efektem tej współpracy jest publikacja znajdująca się w cyklu przedstawionym w postępowaniu habilitacyjnym:

- **W. Chrominski**, E. Christiansen, E. Choinska, R. Holmestad, M. Lewandowska, *Enhancing homogenous precipitation and strengthening effectiveness in AlCuMg alloy*, *J. Mater. Res. Technol.* 33 (2024) 6722–6731

5.4 Staż w Chimie Paris Tech - luty 2024

Pod koniec roku 2023 zostałem laureatem stypendium wyjazdowego Ambasady Francji - France Excellence SSHN na miesięczny pobyt badawczy we francuskiej jednostce. Staż odbyłem w Chimie Paris Tech Structural Metallurgy Laboratory pod opieką dra Fana Suna. W ramach pobytu przeprowadziłem serię eksperymentów odkształcenia plastycznego in-situ w transmisyjnym mikroskopie elektronowym. Jako materiał badawczy wybrałem stop AlMgSiAg, którego skład chemiczny i obróbkę cieplną opracowałem w ramach projektu

Sonata, którego jestem kierownikiem. Efektem współpracy jest sekwencja obrazów ukazująca oddziaływanie dyslokacji z wydzieleniami umacniającymi materiał. Wyniki te będą uzupełnione innymi badaniami w celu przygotowania publikacji.

5.5 Staż w Chimie Paris Tech – kwiecień 2024

Badania prowadzone w ramach mojego drugiego pobytu w Chimie Paris Tech są powiązane z pierwszym. Celem wyjazdu sfinansowanego przez Inicjatywę Doskonałości Uczelnia Badawcza w ramach konkursu Mobility było przeprowadzenie serii eksperymentów zmian przewodności elektrycznej w czasie obróbki cieplnej stopów AlMgSiAg oraz AlMgSiCuAg, których skład został opracowany w ramach projektu Sonata. Badania przewodności były prowadzone na różnych etapach procesu przeróbki cieplno-plastycznej w celu pośredniego określenia kinetyki rozpadu przesyconego roztworu stałego. Wyniki zostały użyte do przygotowania publikacji, która aktualnie znajduje się w recenzji.

Dodatkowym rezultatem pobytu w Chimie Paris Tech było nawiązanie ścisłej współpracy z grupą dra Fana Suna. Współpraca ta zaowocowała powstaniem dwóch publikacji z moim udziałem, których tematyka nie była bezpośrednio związana z badaniami prowadzonymi w ramach zdobytych stypendiów (lista poniżej). Dodatkowo zostały złożone dwa wspólne wnioski projektowe.

- A.Sotniczuk, B. Dou, C. Xie, J. Tang, D. Kalita, **W. Chromiński**, H. Garbacz, F. Sun, K. Ogle, *New insights into the corrosion of orthopedic Ti-6Al-4V under cathodic polarization*, Corros. Sci. 238 (2024)
- A. Sotniczuk, **W. Chromiński**, D. Kalita, H. Garbacz, C. Xie, J. Tang, B. Dou, M. Pisarek, A. Baron-Wiecheć, Ł. Kurpaska, F. Sun, K. Ogle, *Effect of Zr addition on the corrosion resistance of Ti-Mo alloy in the H₂O₂-containing inflammatory environment*, Appl. Surf. Sci. 681 (2025)

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

6.1 Dydaktyka

Ze względu na charakter mojego zatrudnienia w obu jednostkach, jako adiunkt badawczy na Politechnice Warszawskiej oraz specjalista badawczo-techniczny w Narodowym Centrum Badań Jądrowych, nie jestem bezpośrednio zaangażowany w proces dydaktyczny. W swojej pracy zajmuje się przede wszystkim prowadzeniem badań własnych, dla innych grup badawczych oraz utrzymaniem Laboratorium Mikroskopii Elektronowej. Niemniej jednak, sporadycznie uczestniczę w prowadzeniu zajęć (zarówno wykładów jak i ćwiczeń) w ramach przedmiotów kierowanych przez innych pracowników, jeżeli tematyka zajęć pokrywa się z moimi zainteresowaniami naukowymi. Wśród przedmiotów, w których realizacji brałem udział należy wymienić:

- Laboratorium *Podstawy Nauki o Materiałach 4*, w latach 2011-2016
- Laboratorium *Projekt Badawczy* w latach 2021, 2024. 2025
- Wykłady o metodach mikroskopowych w badaniach materiałów dla energetyki w ramach przedmiotu *Aspekty materiałowe oddziaływań plazma-ściana w reaktorach syntezy termojądrowej*, od 2021
- Ćwiczenia obliczeniowe *Podstawy Nauki o Materiałach 3*, od 2024

Dodatkowo aktywnie uczestniczę w przygotowywaniu prac dyplomowych magistrantów oraz doktorantów w dwojaki sposób. Po pierwsze jako osoba działająca przy Laboratorium Mikroskopii Elektronowej na Wydziale Inżynierii Materiałowych prowadzę badania na potrzeby realizowanych dyplomów. Po drugie, przed zatrudnieniem jako adiunkt sprawowałem opiekę nad realizacją badań w pracach promowanych przez Prof. M. Lewandowską. Od momentu zatrudnienia na stanowisku adiunkta byłem promotorem dwóch prac magisterskich oraz promotorem pomocniczym rozprawy doktorskiej obronionej na Politechnice Rzeszowskiej. Poniżej znajduje się szczegółowa lista dyplomantów, z którymi pracowałem.

Jako opiekun naukowy w czasie wykonywania badań do pracy magisterskiej:

- Marta Ciemiorek, praca pt. *Anizotropia właściwości mechanicznych aluminium 1050 o strukturze ultradrobnoziarnistej uzyskanej metodą przyrostowego ECAP*

- Rafał Czujwid, praca pt. *Wpływ odkształcenia plastycznego na procesy wydzieleniowe w stopie 6082*, praca zrealizowana w ramach projektu Sonatina1, którego byłem kierownikiem
- Monika Strąk, praca pt. *Wpływ walcowania i walcowania pakietowego (ARB) na umocnienie wydzieleniowe stopu aluminium 2024*, praca zrealizowana w ramach projektu Sonatina1, którego byłem kierownikiem

Jako promotor pracy magisterskiej:

- Bartłomiej Gromadka, praca pt. *Procesy wydzieleniowe w stopie AlMgSi z dodatkiem Cu*, praca zrealizowana w ramach projektu Sonata 16, którego byłem kierownikiem
- Michał Kanios, praca pt. *Mikrodomieszkowanie stopu aluminium 6082 w celu modyfikacji wczesnych etapów procesów wydzieleniowych* praca zrealizowana w ramach projektu Sonata 16, którego byłem kierownikiem

Jako promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej:

- Anna Baran-Sadleja, praca pt. *Rozpad odkształconego plastycznie martenzytu α' (α'') w stopie tytanu Ti-6Al-4V*, praca obroniona na Politechnice Rzeszowskiej, promotor dr hab. inż. Maciej Motyka, prof. PRz

6.2 Osiągnięcia organizacyjne

6.2.1 Projekty

Byłem kierownikiem 6 projektów badawczych:

Finansowane przez Narodowe Centrum Nauki

PRELUDIUM8 w latach 2015-2017

Badania in-situ mechanizmów odkształcenia plastycznego aluminium o silnie rozdrobnionej strukturze w transmisyjnym mikroskopie elektronowym, nr rejestracyjny 2014/15/N/ST8/02659

W ramach projektu powstały następujące publikacje:

- Witold Chrominski, Malgorzata Lewandowska, *Mechanisms of Plastic Deformation in Ultrafine- Grained Aluminium – insitu and ex-post studies*, Materials Science & Engineering A, 715C (2018) 320-331

- W. Chrominski, K. Majchrowicz, M. Lewandowska, *Microstructural response to compression deformation of ultrafine grained aluminum with various microstructures*, Mater. Sci. Eng. A. 763 (2019) 138184
- W. Chrominski, M. Lewandowska, *The importance of microstructural heterogeneities in the work hardening of ultrafine-grained aluminum, studied by insitu TEM straining and mechanical tests*, Mater. Sci. Eng. A. 764 (2019) 13820

SONATINA1 w latach 2017-2021

Optymalizacja mikrostruktury stopów aluminium pod kątem efektywności umocnienia wydzieleniowego., nr rejestracyjny 2017/24/C/ST8/00146

W ramach projektu powstały następujące publikacje:

- Witold Chrominski, Małgorzata Lewandowska, *Influence of dislocation structures on precipitation phenomena in rolled Al-Mg-Si alloy*, Materials Science and Engineering A 793 (2020) 139903
- W.Chrominski, Małgorzata Lewandowska, *Precipitation strengthening of Al-Mg-Si alloy subjected to multiple accumulative roll bonding combined with a heat treatment*, Materials & Design 219 (2022) 110813
- W. Chrominski, Małgorzata Lewandowska, *Effect of fiber orientation on microstructure and texture evolution during the cold-rolling of Al-Mg-Si alloy*, Advanced Engineering Materials 24 (2022) 2101610

SONATA16 w latach 2021-obecnie

Opracowanie składu chemicznego i obróbki cieplnej nowego, umacnianego wydzieleniowo stopu Al o zwiększonej wytrzymałości mechanicznej, nr rejestracyjny 2020/39/D/ST5/01375

W ramach projektu powstały następujące publikacje:

W. Chrominski, E. Christiansen, E. Choinska, R. Holmestad, M. Lewandowska, *Enhancing homogenous precipitation and strengthening effectiveness in AlCuMg alloy*, J. Mater. Res. Technol. 33 (2024) 6722–6731

Finansowane z subwencji Politechniki Warszawskiej w ramach programu Inicjatywa Doskonałości Uczelnia Badawcza

IDUB YOUNG w latach 2023-2025

Defekty mikrostruktury a procesy wydzieleniowe – zastosowanie tomografii elektronowej dla stopów AlCuMg

Finansowane przez Radę Naukową Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej

Umocnienie stopów o wysokiej entropii z układu CrFeMnNi przy pomocy chemicznego uporządkowania bliskiego zasięgu - symulacje i eksperyment, w latach 2024-2025

Ocena ewolucji mikrostruktury oraz właściwości odkształconego plastycznie niobu w aspekcie zastosowań w implantologii, w roku 2020

Dodatkowo byłem wykonawcą 9 projektów, których wykaz znajduje się w Załączniku 4 Wykaz osiągnięć

6.2.2 Organizacja konferencji naukowych

- Członek komitetu organizacyjnego XVI International Conference on Electron Microscopy, wrzesień 2017
- Udział w organizacji konferencji EMRS Fall Meeting w latach 2011-2013

6.2.3 Utworzenie nowych laboratoriów

- W roku 2022 prowadziłem działania mające na celu utworzenie nowego laboratorium obróbki cieplnej działającym na Wydziale Inżynierii Materiałowej
- W latach 2021-22 brałem udział w przygotowaniach do zakupu nowego mikroskopu transmisyjnego na Wydziale Inżynierii Materiałowej, przede wszystkim w prezentacjach urządzeń różnych firm oraz ich oceny pod względem przydatności do badań prowadzonych na Politechnice Warszawskiej. Później byłem zaangażowany w przygotowanie postępowania przetargowego, instalację oraz dostosowywania urządzenia do pracy
- W 2022-2023 byłem odpowiedzialny za utworzenie laboratorium transmisyjnej mikroskopii elektronowej w Narodowym Centrum Badań Jądrowych Centrum Doskonałości NOMATEN. Moje zadania obejmowały: wybór urządzenia odpowiadającego potrzebom jednostki, wybór dodatkowych urządzeń wspomagających pracę mikroskopu (preparatyka próbek, przechowywanie próbek i uchwytów itp.), udział w przygotowaniu

dokumentacji przetargowej oraz nadzorowanie procesu instalacji mikroskopu.

6.2.4 Członkostwo w towarzystwach naukowych

- Polskie Towarzystwo Mikroskopii od maja 2024
- European Microscopy Society od maja 2024
- Polskie Towarzystwo Materiałoznawcza od grudnia 2024

6.3 Popularyzacja nauki

- Spotkanie ze studentami pierwszego roku dotyczące codzienności pracy naukowca
- Wywiad w radiowej Trójce pt. *Świat w gigantycznym powiększeniu* w ramach audycji 'Trójka przed południem'

6.4 Recenzowanie artykułów

W latach 2020-2025 recenzowałem manuskrypty dla następujących czasopism

- 4 artykuły dla Journal of Alloys and Compounds
- 3 artykuły dla JOM
- Po jednym artykule dla Materials and Metals International, Materials Science and Technology, Materials Today Communications, Materials Characterization, Journal of Materials Science

7. Informacje dodatkowe

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

- W latach 2019, 2021, 2023, 2025 byłem nagrodzony zespołową Nagrodą JM Rektora Politechniki Warszawskiej pierwszego stopnia za osiągnięcia naukowe
- W roku 2020 zostałem laureatem Stypendium Ministra NiSW dla Wybitnych Młodych Naukowców
- W roku 2018 zostałem laureatem Stypendium START przyznawanym przez Fundację na Rzecz Nauki Polskiej

.....
(podpis wnioskodawcy)

Wykaz osiągnięć naukowych albo artystycznych, stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny

**I. WYKAZ OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH ALBO ARTYSTYCZNYCH,
O KTÓRYCH MOWA W ART. 219 UST. 1. PKT 2 USTAWY**

1. Monografie naukowe, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2a ustawy; lub

Nie dotyczy

2. Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy;

Cykl artykułów pt. *Projektowanie niejednorodności i jednorodności mikrostrukturalnych w stopach aluminium*

Artykuł C1 został opublikowany przed uzyskaniem stopnia doktora, jednak nie dotyczy on zagadnień ujętych w rozprawie doktorskiej.

[C1] W. Chrominski, L. Olejnik, A. Rosochowski, M. Lewandowska, *Grain refinement in technically pure aluminium plates using incremental ECAP processing*, Mater. Sci. Eng. A. 636 (2015) 172–180. IF₂₀₁₅=2.4

[C2] M. Ciemiorek, W. Chrominski, L. Olejnik, M. Lewandowska, *Evaluation of mechanical properties and anisotropy of ultra-fine grained 1050 aluminum sheets produced by incremental ECAP*, Mater. Des. 130 (2017) 392-402 IF₂₀₁₇=7.6

[C3] W. Chrominski, M. Lewandowska, *Effect of Fiber Orientation on Microstructure and Texture Evolution During the Cold-Rolling of Al–Mg–Si Alloy*, Adv. Eng. Mater. 24 (2022) 1–11. IF₂₀₂₂=3.862

[C4] W. Chrominski, M. Lewandowska, *Mechanisms of plastic deformation in ultrafine-grained aluminium – In-situ and ex-post studies*, Mater. Sci. Eng. A. 715 (2018). 320-331 IF₂₀₁₈=4.595

[C5] W. Chrominski, M. Lewandowska, *The importance of microstructural heterogeneities in the work hardening of ultra fine-grained aluminum , studied by in-situ TEM straining and mechanical tests*, Mater. Sci. Eng. A. 764 (2019) 138200. IF₂₀₁₉=5.254

[C6] W. Chrominski, K. Majchrowicz, M. Lewandowska, *Microstructural response to compression deformation of ultrafine-grained aluminum with various microstructures*, Mater. Sci. Eng. A. 763 (2019) 138184. IF₂₀₁₉=5.254

[C7] K. Majchrowicz, Z. Pakieła, W. Chrominski, M. Kulczyk, *Enhanced strength and electrical conductivity of ultrafine-grained Al–Mg–Si alloy processed by hydrostatic extrusion*, Mater. Charact. (2018) 104-114 . IF₂₀₁₈=4.8

[C8] W. Chrominski, M. Lewandowska, *Influence of dislocation structures on precipitation phenomena in rolled Al–Mg–Si alloy*, Mater. Sci. Eng. A. 793 (2020) 139903. IF₂₀₂₀=4.64

[C9] W. Chrominski, M. Lewandowska, *Precipitation strengthening of Al-Mg-Si alloy subjected to multiple accumulative roll bonding combined with a heat treatment*, Mater. Des. 219 (2022) 110813. IF₂₀₂₂=8.4

[C10] W. Chrominski, E. Christiansen, E. Choinska, R. Holmestad, M. Lewandowska, Enhancing homogenous precipitation and strengthening effectiveness in AlCuMg alloy, J. Mater. Res. Technol. 33 (2024) 6722–6731 IF₂₀₂₄=6.2

3. Zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne, technologiczne lub artystyczne, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2c ustawy;

Nie dotyczy

4. Inne, niż wymienione w pkt. I.1-3, osiągnięcia naukowe lub artystyczne.

Artykuły opublikowane po uzyskaniu stopnia doktora

1. A. Sotniczuk, W. Chromiński, D. Kalita, H. Garbacz, C. Xie, J. Tang, B. Dou, M. Pisarek, A. Baron-Wiecheć, Ł. Kurpaska, F. Sun, K. Ogle, Effect of Zr addition on the corrosion resistance of Ti-Mo alloy in the H₂O₂-containing inflammatory environment, Appl. Surf. Sci. 681 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161518>. IF₂₀₂₅=6.3
2. J. Smalc-Koziorowska, J. Moneta, G. Muzioł, W. Chromiński, R. Kernke, M. Albrecht, T. Schulz, I. Belabbas, The dissociation of (a+c) misfit dislocations at the InGaN/GaN interface, J. Microsc. 293 (2024) 146–152. <https://doi.org/10.1111/jmi.13234>. IF₂₀₂₄=1.5
3. A.Ustrzycka, F.J. Dominguez-Gutierrez, W. Chromiński, Atomistic analysis of the mechanisms underlying irradiation-hardening in Fe–Ni–Cr alloys, Int. J. Plast. 182 (2024) 104118. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2024.104118>. IF₂₀₂₄=9.4
4. C.Mieszczynski, E. Wyszowska, P. Jozwik, K. Skrobias, K.Stefanska-Skrobias, M. Barlak, R. Ratajczak, A. Kosinska, W. Chrominski, K. Lorenz, Damage kinetics in high-temperature irradiated Ni crystals, Appl. Surf. Sci. 676 (2024) 160991. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.160991>. IF₂₀₂₄=6.3
5. A.Masłowska, D.M. Kochanowska, A. Sulich, J.Z. Domagala, M. Dopierała, M. Kochański, M. Szot, W. Chromiński, A. Mycielski, Bridgman-Grown (Cd,Mn)Te and (Cd,Mn)(Te,Se): A Comparison of Suitability for X and Gamma Detectors, Sensors. 24 (2024). <https://doi.org/10.3390/s24020345>. IF₂₀₂₄=3.4
6. A.Olejarz, W. Huo, D. Kalita, M. Zieliński, E. Wyszowska, W. Chromiński, R. Diduszko, M. Chmielewski, I. Jóźwik, Ł. Kurpaska, Cr-rich structure evolution and enhanced mechanical properties of CoCrFeNi high entropy alloys by mechanical alloying, J. Mater. Res. Technol. 30 (2024) 1490–1504. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.116>. IF₂₀₂₄=6.2
7. A.Günay Bulutsuz, W. Chrominski, P. Bazarnik, E. Bruder, Development of Fe-10% (HA β -Tricalcium Phosphate) Composite via Solid-State Manufacturing Route and Investigation of Material Properties for Biodegradable Implant Applications.pdf, Adv. Eng. Mater. 26 (2024) 2301858. IF₂₀₂₄=3.4
8. D. Kalita, K. Mulewska, I. Jóźwik, A. Zaborowska, M. Gawęda, W. Chromiński, K. Bochenek, Rogal, Metastable β -Phase Ti–Nb Alloys Fabricated by Powder Metallurgy: Effect of Nb on Superelasticity and Deformation Behavior, Metall. Mater. Trans. A

- Phys. Metall. Mater. Sci. 55 (2024) 707–723. <https://doi.org/10.1007/s11661-023-07285-5>. IF₂₀₂₄=2.6
9. L. Kurpaska, M. Clozel, J.H. O’Connell, I. Jóźwik, E. Wyszowska, W.Y. Huo, W. Chrominski, D. Kalita, S.T. Nori, F. Fang, J. Jagielski, J.H. Neethling, Nanoindentation responses of Fe–Cr alloys from room temperature to 600 °C, Mater. Sci. Eng. A. 902 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146590>. IF₂₀₂₄=6.1
10. A. Sotniczuk, Kalita, W. Chromiński, M. Matczuk, M. Pisarek, H. Garbacz, Albumin suppresses oxidation of Ti-Nb alloy in the simulated inflammatory environment.pdf, J. Biomed. Mater. Res. Part B Appl. Biomater. 112 (2024) e35404. IF₂₀₂₄=3.2
11. A. Sotniczuk, B. Dou, C. Xie, J. Tang, D. Kalita, W. Chromiński, H. Garbacz, F. Sun, K. Ogle, New insights into the corrosion of orthopedic Ti-6Al-4V under cathodic polarization, Corros. Sci. 238 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.112354>. IF₂₀₂₄=7.4
12. A. Sotniczuk, J. Gilbert, Y. Liu, M. Matczuk, W. Chrominski, D. Kalita, M. Pisarek, H. Garbacz, Corrosion resistance of β -phase titanium alloys under simulated inflammatory conditions- Exploring the relevance of biocompatible alloying elements, Corros. Sci. 220 (2023) 111271. IF₂₀₂₃=7.56
13. J.J. Jasinski, T. Stasiak, W. Chmurzynski, L. Kurpaska, M. Chmielewski, M. Frelek-Kozak, M. Wilczopolska, K. Mulewska, M. Zielinski, M. Kowal, R. Diduszko, W. Chrominski, J. Jagielski, Microstructure and phase investigation of FeCrAl-Y2O3 ODS steels with different Ti and V contents, J. Nucl. Mater. 586 (2023) 154700. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154700>. IF₂₀₂₃= 2.8
14. K. Majchrowicz, A. Sotniczuk, B. Adamczyk-Cieślak, W. Chromiński, P. Jóźwik, Z. Pakieła, H. Garbacz, The influence of microstructure and texture on the hardening by annealing effect in cold-rolled titanium, J. Alloys Compd. 948 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.169791>. IF₂₀₂₃=5.8
15. E. Ura-Bińczyk, K. Kulikowski, W. Chromiński, J. Smolik, M. Lewandowska, Microstructure and properties of AlCr and AlCrFe coatings deposited by magnetron sputtering, Arch. Civ. Mech. Eng. 23 (2023) 1–9. <https://doi.org/10.1007/s43452-023-00681-z>. IF₂₀₂₃=4.4
16. M. Frelek-Kozak, Kurpaska, K. Mulewska, M. Zieliński, R. Diduszko, A. Kosińska, D. Kalita, W. Chromiński, M. Turek, K. Kaszyca, A. Zaborowska, J. Jagielski, Mechanical behavior of ion-irradiated ODS RAF steels strengthened with different types of refractory oxides, Appl. Surf. Sci. 610 (2023) 10–12. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155465>. IF₂₀₂₃=6.3
17. M. Frelek-Kozak, K. Mulewska, M. Wilczopolska, D. Kalita, W. Chromiński, A. Zaborowska, Kurpaska, J. Jagielski, The effects of high-temperature ion-irradiation on early-stage grain boundaries serrations formation in Ni-based alloys, Mater. Charact. 203 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.113060>. IF₂₀₂₃=4.8
18. E. Wyszowska, C. Mieszczynski, Kurpaska, A. Azarov, W. Chromiński, I. Jóźwik, A. Esfandiarpour, A. Kosińska, D. Kalita, R. Diduszko, J. Jagielski, S.T. Nori, M. Alava, The Fe addition as an effective treatment for improving the radiation resistance of fcc NiFe_{1-x} single-crystal alloys, J. Nucl. Mater. 584 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154565>. IF₂₀₂₃=2.8
19. D. Kalita, I. Jóźwik, Kurpaska, Y. Zhang, K. Mulewska, W. Chrominski, J. O’Connell, Y. Ge, W.L. Boldman, P.D. Rack, Y. Wang, W.J. Weber, J. Jagielski, The microstructure and He⁺ ion irradiation behavior of novel low-activation W-Ta-Cr-V refractory high entropy alloy for nuclear applications, Nucl. Mater. Energy. 37 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.nme.2023.101513>. IF₂₀₂₃=2.3

20. E. Wyszowska, C. Mieszczynski, Kurpaska, A. Azarov, I. Jóźwik, A. Kosińska, W. Chromiński, R. Diduszko, W.Y. Huo, I. Cieślak, J. Jagielski, Tuning heterogeneous ion-radiation damage by composition in NiFe_{1-x} binary single crystals, *Nanoscale*. (2023). <https://doi.org/10.1039/d2nr06178c>. IF₂₀₂₃=5.8
21. M. Fedorov, J.S. Wróbel, W. Chromiński, G. Cieślak, M. Płocińska, K.J. Kurzydłowski, D. Nguyen-Manh, Composition stability of single fcc phase in Cr–Fe–Mn–Ni alloys: First-principles prediction and experimental validation, *Acta Mater.* 255 (2023) 119047. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2023.119047>. IF₂₀₂₃=8.3
22. K. Mulewska, F.J. Dominguez-Gutierrez, D. Kalita, J. Byggmästar, G.Y. Wei, W. Chromiński, S. Papanikolaou, M.J. Alava, Kurpaska, J. Jagielski, Self-ion irradiation of high purity iron: Unveiling plasticity mechanisms through nanoindentation experiments and large-scale atomistic simulations, *J. Nucl. Mater.* 586 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.154690>. IF₂₀₂₃=2.8
23. S. Nosewicz, G. Jurczak, W. Chrominski, J. Rojek, K. Kaszyca, M. Chmielewski, Combined EBSD and Computer-Assisted Quantitative Analysis of the Impact of Spark Plasma Sintering Parameters on the Structure of Porous Materials, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 53 (2022) 4101–4125. <https://doi.org/10.1007/s11661-022-06821-z>. IF₂₀₂₂=2.2
24. L. Kurpaska, F.J. Dominguez-Gutierrez, Y. Zhang, K. Mulewska, H. Bei, W.J. Weber, A. Kosińska, W. Chrominski, I. Jozwik, R. Alvarez-Donado, S. Papanikolaou, J. Jagielski, M. Alava, Effects of Fe atoms on hardening of a nickel matrix: Nanoindentation experiments and atom-scale numerical modeling, *Mater. Des.* 217 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110639>. IF₂₀₂₂=8.4
25. M. Tallarico, Ł. Zadrozny, N. Squadrito, L. Colella, M. Gualandri, D. Montanari, G. Zibetti, S. Santini, W. Chromiński, E. Baldoni, S.M. Meloni, A.I. Lumbau, M. Pisano, Scanning Electron Microscopy Analyses of Dental Implant Abutments Debonded from Monolithic Zirconia Restorations Using Heat Treatment: An In Vitro Study, *Prosthesis*. 4 (2022) 500–510. <https://doi.org/10.3390/prosthesis4030041>. IF₂₀₂₂=3.4
26. M. Ciemiorek, W. Chromiński, C. Jasiński, M. Lewandowska, Microstructural changes and formability of Al–Mg ultrafine-grained aluminum plates processed by multi-turn ECAP and upsetting, *Mater. Sci. Eng. A.* 831 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142202>. IF₂₀₂₂=6.4
27. K. Majchrowicz, B. Adamczyk-Cieślak, W. Chromiński, P. Jóźwik, Z. Pakieła, Comparison of Microstructure, Texture, and Mechanical Properties of TZ61 and AZ61 Mg Alloys Processed by Differential Speed Rolling, *Materials (Basel)*. 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15030785>. IF₂₀₂₂=3.4
28. A. Dobkowska, B. Adamczyk – Cieślak, M. Koralnik, W. Chromiński, J. Kubasek, J. Ciftci, D. Kuc, J. Mizera, Corrosion behavior of fine-grained Mg-7.5Li-3Al-1Zn fabricated by extrusion with a forward-backward rotating die (KoBo), *J. Magnes. Alloy*. 10 (2022) 811–820. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.08.020>. IF₂₀₂₂=11.8
29. A. Sotniczuk, W. Chromiński, B. Adamczyk-Cieślak, M. Pisarek, H. Garbacz, Corrosion behaviour of biomedical Ti under simulated inflammation: Exploring the relevance of grain refinement and crystallographic texture, *Corros. Sci.* 200 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110238> IF₂₀₂₂=8.3
30. E. Ura-Bińczyk, A. Dobkowska, P. Bazarnik, J. Ciftci, A. Krawczyńska, W. Chromiński, T. Wejrzanowski, R. Molak, R. Sitek, T. Płociński, J. Jaroszewicz, J. Mizera, Effect of annealing on the mechanical and corrosion properties of 316L stainless steel manufactured by laser powder bed fusion, *Mater. Sci. Eng. A.* 860 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144263>. IF₂₀₂₂=6.4

31. A. Dobkowska, M. Koralnik, B. Adamczyk-Cieślak, D. Kuc, W. Chromiński, J. Kubasek, J. Mizera, The Effect of Extrusion Ratio on the Corrosion Resistance of Ultrafine-Grained Mg-4Li-3Al-Zn Alloy Deformed Using Extrusion with a Forward-Backward Oscillating Die, *J. Mater. Eng. Perform.* 31 (2022) 8932–8939. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06895-1>. IF₂₀₂₂=2.3
32. W. Chromiński, Ciupiński, P. Bazarnik, S. Markelj, T. Schwarz-Selinger, Microstructure evolution in helium implanted self-irradiated tungsten annealed at 1700 K studied by TEM, *Mater. Charact.* 174 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.110991>. IF₂₀₂₁=4.8
33. K. Majchrowicz, P. Jóźwik, W. Chromiński, B. Adamczyk-Cieślak, Z. Pakieła, Microstructure, texture and mechanical properties of mg-6sn alloy processed by differential speed rolling, *Materials (Basel)*. 14 (2021) 1–17. <https://doi.org/10.3390/ma14010083>. IF₂₀₂₁=3.75
34. Mycielski, A. Wardak, D. Kochanowska, M. Witkowska-Baran, M. Szot, R. Jakieła, J.Z. Domagała, L. Kowalczyk, M. Kochański, G. Janusz, M. Dopierała, A. Marciniak, B. Witkowska, B.S. Witkowski, A. Reszka, A. Avdonin, E. Łusakowska, W. Chromiński, M. Lewandowska, M. Górską, CdTe-based crystals with Mg, Se, or Mn as materials for X and gamma ray detectors: Selected physical properties, *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.* 67 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2021.100543>. IF₂₀₂₁=4.077
35. F. Dąbrowski, Ciupiński, J. Zdunek, W. Chromiński, M. Kruszewski, R. Zybala, A. Michalski, K.J. Kurzydłowski, Microstructure and THERMOELECTRIC PROPERTIES OF DOPED FeSi₂ WITH ADDITION OF B₄C NANOPARTICLES, *Arch. Metall. Mater.* 66 (2021) 1157–1162. <https://doi.org/10.24425/amm.2021.136436>. IF₂₀₂₁=0.633
36. A. Wardak, W. Chromiński, A. Reszka, D. Kochanowska, M. Witkowska-Baran, M. Lewandowska, A. Mycielski, Stresses caused by Cd and Te inclusions in CdMnTe crystals and their impact on charge carrier transport, *J. Alloys Compd.* 874 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159941>. IF₂₀₂₁=6.371
37. A. Günay Bulutsuz, W. Chrominski, Incremental Severe Plastic Deformation Effect on Mechanical and Microstructural Characteristics of AA6063, *Trans. Indian Inst. Met.* 74 (2021) 69–77. <https://doi.org/10.1007/s12666-020-02122-4>. IF₂₀₂₁=1.391
38. S. Markelj, T. Schwarz-Selinger, M. Pečovnik, W. Chromiński, A. Šestan, J. Zavašnik, Deuterium transport and retention in the bulk of tungsten containing helium: the effect of helium concentration and microstructure, *Nucl. Fusion.* (2020). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/abadae>. IF₂₀₂₀= 3.179
39. A.G. Bulutsuz, W. Chrominski, Y. Huang, P. Kral, M.E. Yurci, M. Lewandowska, T.G. Langdon, A Comparison of Warm and Combined Warm and Low-Temperature Processing Routes for the Equal-Channel Angular Pressing of Pure Titanium, *Adv. Eng. Mater.* 22 (2020). <https://doi.org/10.1002/adem.201900698>. IF₂₀₂₀=4.122
40. M. Motyka, W.J. Nowak, B. Wierzba, W. Chrominski, Characterization of the Interface Between α and β Titanium Alloys in the Diffusion Couple, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* (2020). <https://doi.org/10.1007/s11661-020-06023-5>. IF₂₀₂₀=2.023
41. M. Ciemiorek, Ł. Pawliszak, W. Chromiński, L. Olejnik, M. Lewandowska, Enhancing the Electrical Conductivity of Electrolytic Tough Pitch Copper Rods Processed by Incremental Equal Channel Angular Pressing, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* (2020). <https://doi.org/10.1007/s11661-020-05818-w>. IF₂₀₂₀=2.023

42. M. Ciemiorek, P. Bartkowski, W. Chromiński, L. Olejnik, M. Lewandowska, Forming Ability of Ultrafine-Grained Aluminum Plates Processed by Incremental ECAP, *Adv. Eng. Mater.* (2019). <https://doi.org/10.1002/adem.201900473> IF₂₀₂₀=3.862
43. Bulutsuz, A.G., Yurci, M.E., Ozaltin, K., Chrominski, W., Lewandowska, M. Tribological behavior of a hydrostatically extruded ultra-fine grained Ti-13Nb-13Zr alloy, (2019). *Materials Testing* 61 <https://doi.org/10.3139/120.111352>. IF₂₀₁₉=2.4
44. S. Markelj, T. Schwarz-Selinger, M. Pečovnik, A. Založnik, M. Kelemen, I. Cadež, J. Bauer, P. Pelicon, W. Chromiński, Ł. Ciupiński, Displacement damage stabilization by hydrogen presence under simultaneous W ion damaging and D ion exposure, *Nucl. Fusion*. (2019). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab2261>. IF₂₀₁₉=3.706
45. W. Chrominski, L. Ciupinski, P. Bazarnik, S. Markelj, T. Schwarz-Selinger, TEM investigation of the influence of dose rate on radiation damage and deuterium retention in tungsten, *Mater. Charact.* 154 (2019) 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.05.028>. IF₂₀₁₉=3.562
46. A.T. Krawczynska, S. Gierlotka, P. Suchecki, D. Setman, B. Adamczyk-Cieslak, M. Gloc, W. Chrominski, M. Lewandowska, M. Zehetbauer, Phenomena Occurring in Nanostructured Stainless Steel 316LVM during Annealing under High Hydrostatic Pressure, *Adv. Eng. Mater.* (2018). <https://doi.org/10.1002/adem.201800101>. IF₂₀₁₈=2.906
47. K. Ozaltin, A. Panigrahi, W. Chrominski, A.G. Bulutsuz, M. Kulczyk, M.J. Zehetbauer, M. Lewandowska, Microstructure and Texture Evolutions of Biomedical Ti-13Nb-13Zr Alloy Processed by Hydrostatic Extrusion, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 48 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4278-4>. IF₂₀₁₇=1.887
48. A.T. Krawczynska, W. Chrominski, E. Ura-Binczyk, M. Kulczyk, M. Lewandowska, Mechanical properties and corrosion resistance of ultrafine grained austenitic stainless steel processed by hydrostatic extrusion, *Mater. Des.* 136 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.09.050>. IF₂₀₁₇=7.6
49. M. Lipinska, W. Chrominski, L. Olejnik, J. Golinski, A. Rosochowski, M. Lewandowska, Ultrafine-Grained Plates of Al-Mg-Si Alloy Obtained by Incremental Equal Channel Angular Pressing: Microstructure and Mechanical Properties, *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* (2017). <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4258-8>. IF₂₀₁₇=1.887

Artykuły opublikowane przed uzyskaniem stopnia doktora

50. W. Chrominski, M. Lewandowska, Precipitation phenomena in ultrafine grained Al-Mg-Si alloy with heterogeneous microstructure, *Acta Mater.* 103 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.10.030>. IF₂₀₁₆=5.708
51. W. Chrominski, S. Wenner, C.D. Marioara, R. Holmestad, M. Lewandowska, Strengthening mechanisms in ultra fine grained Al-Mg-Si alloy processed by hydrostatic extrusion – Influence of ageing temperature, *Mater. Sci. Eng. A.* 669 (2016) 447–458. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.05.109>. IF₂₀₁₆=2.698
52. A. Panigrahi, B. Sulkowski, T. Waitz, K. Ozaltin, W. Chrominski, A. Pukenas, J. Horky, M. Lewandowska, W. Skrotzki, M. Zehetbauer, Mechanical properties, structural and texture evolution of biocompatible Ti–45Nb alloy processed by severe plastic deformation, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 62 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.04.042>. IF₂₀₁₆=3.3
53. W. Chrominski, M. Lewandowska, Dislocation substructure evolution during hydrostatic extrusion of Al-Mg-Si alloy, in: *Acta Phys. Pol. A, Polish Academy of*

- Sciences, 2015: pp. 585–588. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.128.585>. IF₂₀₁₅=0.545
54. M. Gizynski, Z. Pakiela, W. Chrominski, M. Kulczyk, The low temperature fracture behaviour of hydrostatically extruded ultra- fine grained Armco iron, Mater. Sci. Eng. A. 632 (2015) 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.02.066>. IF₂₀₁₅=2.647
55. K. Ozaltin, W. Chrominski, M. Kulczyk, A. Panigrahi, J. Horky, M. Zehetbauer, M. Lewandowska, Enhancement of mechanical properties of biocompatible Ti-45Nb alloy by hydrostatic extrusion, J. Mater. Sci. 49 (2014). <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8397-7>. IF₂₀₁₆=3.5
56. W. Chrominski, M. Kulczyk, M. Lewandowska, K.J. Kurzydłowski, Precipitation strengthening of ultrafine-grained Al-Mg-Si alloy processed by hydrostatic extrusion, Mater. Sci. Eng. A. 609 (2014) 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.04.092>. IF₂₀₁₅=3.65

II. WYKAZ AKTYWNOŚCI NAUKOWEJ ALBO ARTYSTYCZNEJ

1. Wykaz członkostwa w redakcjach naukowych monografii.
Nie dotyczy
2. Wykaz wystąpień na krajowych lub międzynarodowych konferencjach naukowych lub artystycznych, z wyszczególnieniem przedstawionych wykładów na zaproszenie i wykładów plenarnych.

Referaty przed uzyskaniem stopnia doktora (jako autor wiodący)

- 1st Dresden Nanoanalysis Symposium 24-27.04.2013 Drezno, Niemcy - *Precipitation phenomena in 6xxx aluminium alloy cold extruded to high strains*
- Light Metal Technologies 24-26.07.2013, Old Windsor Anglia - *Tailoring microstructure and mechanical properties of 6063 aluminium alloy for lightweight structural parts*
- 13th International Symposium on Physics of Materials, 31.08-4.09.2014, Praga Czechy - *Dislocation substructure evolution during hydrostatic extrusion of 6082 aluminium alloy*
- 6th International Conference on Nanomaterials by Severe Plastic Deformation 30.06-4.07.2014 Metz Francja - *Incremental ECAP as a novel tool for producing ultrafine grained aluminium plates*
- XV International Conference on Electron Microscopy 15-18.09.2014 Kraków Polska - *In-situ transmission electron microscopy investigations of dislocation structures evolution in severely deformed technically pure aluminium*
- EUROMAT2015, 21-24.09.2015, Warszawa Polska - *Precipitation phenomena in ultrafine grained Al-Mg-Si alloy with heterogeneous microstructure*
- TMS2016 Annual Meeting & Exhibition 14-18.02.2016 Nashville, USA - *Development of Dislocation Structures in Hydrostatically Extruded Pure Aluminium An in-situ study*

Postery przed uzyskaniem stopnia doktora (jako autor wiodący)

- TMS2016 Annual Meeting & Exhibition 14-18.02.2016 Nashville, USA - *Precipitation processes and strengthening mechanisms in Al-Mg-Si alloy extruded to high strains*
- 33rd Danubia Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics 20-23.09.2016 Portoroz Słowenia - *Deformation structures in a new Ni-base superalloy after creep and high cycle fatigue tests*

Referaty po uzyskaniu stopnia doktora (jako autor wiodący)

- 16th International Conference on Electron Microscopy 10-13.09.2017 Jachranka, Polska - *In-situ observations of dislocation activities in ultrafine-grained aluminium extruded to high strains*
- EUROMAT2019, 1-5.09.2019, Sztokholm Szwecja – *Precipitation processes in Al-Mg-Si alloy produced by accumulative roll bonding*
- TMS2020 Annual Meeting & Exhibition, 23-27.02.2020 SanDiego, CA, USA - *Tailoring strength of 6082 aluminum alloy via combination of rolling and heat treatment*
- CASA-NTNU seminar 9.09.2021, Trondheim Norwegia - *Optimization of the microstructure of aluminium alloys in terms of precipitation strengthening effectiveness* – **wykład zaproszony**
- EUROMAT2021 (konferencja online) 12-16.09.2021 - *Precipitation strengthening of 6082 aluminum alloy subjected to multiple accumulative roll bonding passes*
- SFI PhysMet Seminar 20.10.2021 Trondheim Norwegia – *Microstructure optimization for precipitation hardening effectiveness in aluminium alloys* **wykład zaproszony**
- 17th International Conference on the Physical Properties and Application of Advanced Materials 24-27.10.2023 Turyn Włochy - *Precipitation phenomena and strengthening behaviour of Al-Mg-Si alloy modified with minor Ag additions*
- International Conference on Plasticity, Damage & Fracture 2024 3-9.01.2024 PanamaCity, Panama - *An microscopic insight into precipitation strengthening in aluminium alloys – microalloying and unconventional thermo-mechanical procedures* – **wykład zaproszony**
- The 63rd Annual Conference of Metallurgists 19-22.08.2024, Halifax, Kanada - *Microalloying aluminium alloys with silver - effect on precipitation strengthening* – **wykład zaproszony**
- 18th International Conference on Electron Microscopy 9-12.06.2024 Zakopane, Polska - *Short range ordering in CrFeMnNi alloys*
- TMS2025 154th Annual Meeting & Exhibition 23-27 Marzec 2025, Las Vegas USA - *Methods for characterization of voids and bubbles in S/TEM*

Postery po uzyskaniu stopnia doktora (jako autor wiodący)

- 16th International Conference on Electron Microscopy 10-13.09.2017 Jachranka, Polska - *TEM observations of damages in tungsten targets subjected to W⁺ deuterium and W⁺He irradiation*
- TMS2018 Annual Meeting & Exhibition 10-16.03.2018 w Phoenix USA - *Precipitation processes and strengthening mechanisms in Al-Mg-Si alloy extruded to high strain*

- The 5th Nuclear Materials Conference, 14-18.10.2018, Seattle, USA - *TEM analysis of radiation induced degradation of tungsten*
 - Advanced Materials and Technologies 9-12.06.2019 Bukowina Tatrzańska, Polska - *Tailoring microstructure of 6082 aluminum alloy in terms of precipitation strengthening efficiency*
 - Microscience Microscopy Congress EMAG, 1-4.07.2019, Manchester Anglia - *Microstructure studies on combination of work and precipitation strengthening in 2024 aluminum alloy by a complex thermo-mechanical treatment*
 - 19th International Conference on Fusion Reactor Materials JaJolla California USA 27.10-1.11.2019 - *Evolution of dislocation structures and D retention under simultaneous W and D ions exposure in tungsten*
 - The XVIIth International Conference on Electron Microscopy (konferencja on-line) 30.11-2.12.2020 - *Influence of dislocation structures on precipitation phenomena in rolled Al-Mg-Si alloy. In-situ studies and the effect of foil thickness*
 - Advanced Materials and Technologies 18-21.06.2023 - *Precipitation phenomena in Al-Mg-Si alloy with minor additions of Ag and In*
 - 15th International Symposium on Fusion Nuclear Technology 10-15.09.2023 Las Palmas de Gran Canaria Hiszpania - *Methods for characterization of voids and bubbles in tungsten using S/TEM*
 - TMS2025 154th Annual Meeting & Exhibition 23-27 Marzec 2025, Las Vegas USA - *Controlling precipitation in AlMgCu alloys via microalloying and heat treatment*
3. Wykaz udziału w komitetach organizacyjnych i naukowych konferencji krajowych lub międzynarodowych, z podaniem pełnionej funkcji.
- EMRS Fall Meeting 2011-2013 – opiekun sal wykładowych
 - XVI International Conference on Electron Microscopy w roku 2017 – członek komitetu organizacyjnego
4. Wykaz uczestnictwa w pracach zespołów badawczych realizujących projekty finansowane w drodze konkursów krajowych lub zagranicznych, z podziałem na projekty zrealizowane i będące w toku realizacji, oraz z uwzględnieniem informacji o pełnionej funkcji w ramach prac zespołów.

Udział w projektach przed uzyskaniem stopnia doktora

Projekty zakończone

Jako kierownik

- 2015 - 2017 *Badania in-situ mechanizmów odkształcenia plastycznego aluminium o silnie rozdrobnionej strukturze w transmisyjnym mikroskopie elektronowym* – projekt finansowany przez Narodowe Centrum Nauki w ramach konkursu Preludium 8

Jako wykonawca

- 2009-2015 - *Nowe materiały metaliczne o strukturze nanometrycznej do zastosowań w nowoczesnych gałęziach gospodarki* – projekt finansowany w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka
- 2015-2016 - *Failure analysis and damage mechanisms of newly developed gamma-prime strengthened Ni-based superalloy* – projekt finansowany w ramach programu CleanSKY

Projekty w realizacji

Jako wykonawca

- od 2016 – *Implementation of activities described in the Roadmap to Fusion during Horizon 2020 through a Joint programme of the members of the EUROfusion consortium* – projekt finansowany przez European Atomic Energy Community

Udział w projektach po uzyskaniu stopnia doktora

Projekty zakończone

Jako kierownik

- 2017-2021 - *Optymalizacja mikrostruktury stopów aluminium pod kątem efektywności umocnienia wydzieleniowego* - projekt finansowany przez Narodowe Centrum Nauki w ramach konkursu Sonatina 1

Jako wykonawca

- 2020-2023 - *Technologie wytwarzania materiałów i struktur do detekcji promieniowania X i gamma, z wykorzystaniem nisko defektowych jednorodnych kryształów (Cd,Mn)Te, o wysokiej oporności na generację defektów w wyniku napromieniowania* - projekt finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach konkursu TechMatStrateg1
- 2021 - 2023 – *NOMATEN Centre of Excellence in Multifunctional Materials for Industrial and Medical Applications* – projekt finansowany przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego poprzez Fundację na Rzecz Nauki Polskiej w ramach programu Międzynarodowa Agenda Badawcza PLUS
- 2022-2023 - *Mazowiecka platforma technologii materiałowych i sensorycznych oraz zastosowań w konwersji i magazynowaniu energii, elektromobilności, lotnictwie oraz systemach autonomicznych* – projekt finansowany przez Regionalny Program Operacyjny Województwa mazowieckiego, współfinansowany przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego

- 2023-2024 - *Ewolucja mikrostruktury w stopach o wysokiej entropii Ta-Ti-V-W w symulacji ab initio do technologii druku 3D* - projekt finansowany przez Narodowe Centrum Nauki w ramach konkursu Sonata

Projekty w realizacji

Jako kierownik

- Od 2021 - *Opracowanie składu chemicznego i obróbki cieplnej nowego, umacnianego wydzieleniowo stopu Al o zwiększonej wytrzymałości mechanicznej* - projekt finansowany przez Narodowe Centrum Nauki w ramach konkursu Sonata

Jako wykonawca

- Od 2023 - *Wsparcie działalności Centrów Doskonałości utworzonych w Polsce w ramach programu Horyzont 2020* – projekt współfinansowany przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Ministerstwo Klimatu i Środowiska i Marszałka Województwa Mazowieckiego
- Od 2024 - *Kształtowanie nanomateriałów w wyniku wyżarzania pod wysokim ciśnieniem* - projekt finansowany przez Narodowe Centrum Nauki w ramach konkursu Weave-Unisono

5. Wykaz członkostwa w międzynarodowych lub krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych wraz z informacją o pełnionych funkcjach.

- Polskie Towarzystwo Mikroskopii, członek od maja 2024
- European Microscopy Society, członek od maja 2024
- Polskie Towarzystwo Materiałoznawcze, członek od grudnia 2024

6. Wykaz staży w instytucjach naukowych lub artystycznych, w tym zagranicznych, z podaniem miejsca, terminu, czasu trwania stażu i jego charakteru.

Przed uzyskaniem stopnia doktora

- Staż badawczy w Trondheim – maj 2015 – jako laureat stypendium wyjazdowego przyznawanego przez Centrum Studiów Zaawansowanych Politechniki Warszawskiej

Po uzyskaniu stopnia doktora

- Staż badawczy w Trondheim – sierpień-listopad 2021 – wyjazd w ramach realizacji projektu Sonatina 1, którego byłem kierownikiem
- Staż badawczy w Chimie Paris Tech - luty 2024 – jako laureat stypendium wyjazdowego Ambasady Francji -France Excellence SSHN

- Staż badawczy w Chimie Paris Tech – kwiecień 2024 – jako laureat konkursu Mobility finansowanego przez Politechnikę Warszawską w ramach programu Inicjatywę Doskonałości Uczelnia Badawcza
7. Wykaz członkostwa w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism wraz z informacją o pełnionych funkcjach (np. redaktora naczelnego, przewodniczącego rady naukowej, itp.).
- Brak
8. Wykaz recenzowanych prac naukowych lub artystycznych, w szczególności publikowanych w czasopismach międzynarodowych.
- G. Socha, B. Madejski, M. Gloc, W. Chrominski, L. Ciupinski, P. Georgsson, Accumulation and mechanism of the fatigue damage for a nickel based superalloy, in: Mater. Today Proc., (2017). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.075>.
 - M. Lewandowska, W. Chrominski, M. Lipinska, L. Olejnik, A. Rosochowski, Incremental ECAP as a method to produce ultrafine grained aluminium plates, (2016). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.710.59>.
 - L. Olejnik, W. Chrominski, A. Rosochowski, M. Lipinska, M. Lewandowska, Incremental ECAP as a novel tool for producing ultrafine grained aluminium plates, in: IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., (2014). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/63/1/012004>.
 - W. Chrominski, M. Kulczyk, M. Siwek, M. Lewandowska, Tailoring Microstructure and Mechanical Properties of 6063 Aluminium Alloy for Lightweight Structural Parts, Mater. Sci. Forum. 765 (2013) 388–392. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.765.388>
9. Wykaz uczestnictwa w programach europejskich lub innych programach międzynarodowych.
- Członek konsorcjum realizującym projekt EUROfusion finansowany przez European Atomic Energy Community
 - Członek Centrum doskonałości NOMATEN finansowanego przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego
 - Członek konsorcjum realizującego projekt Famec w ramach programu CleanSKY finansowanego przez FP7
10. Wykaz udziału w zespołach badawczych, realizujących projekty inne niż określone w pkt. II.4.

- 2020 - *Ocena ewolucji mikrostruktury oraz właściwości odkształconego plastycznie niobu w aspekcie zastosowań w implantologii* – projekt finansowany przez Radę Naukową Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej
- 2023-2025 - *Defekty mikrostruktury a procesy wydzieleniowe – zastosowanie tomografii elektronowej dla stopów AlCuMg* – projekt finansowany przez Inicjatywę Doskonałości Uczelnia Badawcza w ramach konkursu IDUB YOUNG
- 2024-2025 - *Umocnienie stopów o wysokiej entropii z układu CrFeMnNi przy pomocy chemicznego uporządkowania bliskiego zasięgu - symulacje i eksperyment* – Projekt finansowany przez Radę Naukową Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Warszawskiej

11. Wykaz uczestnictwa w zespołach oceniających wnioski o finansowanie badań, wnioski o przyznanie nagród naukowych, wnioski w innych konkursach mających charakter naukowy lub dydaktyczny.

- Ekspert Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej oceniający wnioski w ramach Działania 4.4 Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020

III. WSPÓŁPRACA Z OTOCZENIEM SPOŁECZNYM I GOSPODARCZYM

1. Wykaz dorobku technologicznego.

brak

2. Współpraca z sektorem gospodarczym.

Współpraca z GKM Aerospace w ramach projektu Famec finansowanego w ramach Programu CleanSKY

3. Wykaz uzyskanych praw własności przemysłowej, w tym uzyskanych patentów krajowych lub międzynarodowych.

brak

4. Wykaz wdrożonych technologii.

brak

5. Wykaz wykonanych ekspertyz lub innych opracowań wykonanych na zamówienie instytucji publicznych lub przedsiębiorców.

- 2024 – 2025 - Badania warstw epitaksjalnych dla Vigo Electronics

6. Wykaz udziału w zespołach eksperckich lub konkursowych.

brak

7. Wykaz projektów artystycznych realizowanych ze środowiskami pozaartystycznymi.

brak

IV. DANE NAUKOMETRYCZNE

1. Impact Factor (w dziedzinach i dyscyplinach, w których parametr ten jest powszechnie używany jako wskaźnik naukometryczny). Stan na 6.05.2025

Sumaryczny Impact Factor z 66 publikacji – 297,292

2. Liczba cytowań publikacji wnioskodawcy, z oddzielnym uwzględnieniem autocytowań. – stan na 6.05.2025

Wg Scopus – 1076 (807 bez autocytowań)

Wg Web of Science – 971 (874 bez autocytowań)

3. Indeks Hirscha – stan na 6.05.2025

Wg Scopus – 19

Wg Web of Science - 18

.....

(podpis wnioskodawcy)

OŚWIADCZENIE

Dane publikacji

Skład autorski: *Witold Chrominski, Lech Olejnik, Andrzej Rosochowski, Małgorzata Lewandowska*

Tytuł: *Grain refinement in technically pure aluminium plates using incremental ECAP processing*

Dane bibliograficzne: *Mater. Sci. Eng. A. 636 (2015) 172–180.*

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.03.098>.

Oświadczenie dotyczące merytorycznego wkładu w publikację i wyrażenie zgody na przedstawienie pracy do habilitacji

Nazwisko	Wkład w pracę	podpis
Witold Chromiński	- opracowanie koncepcji artykułu - opracowanie metodyki badawczej - wykonanie badań strukturalnych metodą EBSD wraz z analizą danych - wykonanie obserwacji mikroskopowych metodą TEM wraz z analizą wyników - wykonanie badań twardości - interpretacja wyników - przygotowanie publikacji	
Lech Olejnik	- współudział w opracowaniu parametrów procesu IECAP wykorzystanego do wytworzenia materiału badawczego - przeprowadzenie obróbki plastycznej badanego materiału - współudział w dyskusji wyników i korekcie oryginalnego manuskryptu	
Andrzej Rosochowski	- współudział w opracowaniu parametrów procesu IECAP wykorzystanego do wytworzenia materiału badawczego - współudział w dyskusji wyników i korekcie oryginalnego manuskryptu	
Małgorzata Lewandowska	- nadzór merytoryczny nad badaniami i analizą wyników - współudział w interpretacji i dyskusji wyników - zdobycie funduszy na badania, kierowanie projektem w ramach, którego powstała publikacja	

OŚWIADCZENIE

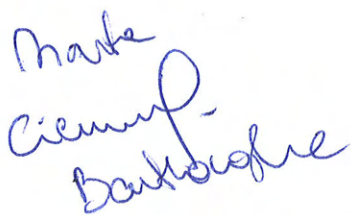
Dane publikacji

Skład autorski: *Marta Ciemiorek, Witold Chrominski, Lech Olejnik, Małgorzata Lewandowska*

Tytuł: *Evaluation of mechanical properties and anisotropy of ultra-fine grained 1050 aluminum sheets produced by incremental ECAP*

Dane bibliograficzne: *Mater. Des. 130 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.05.069>.139903*

Oświadczenie dotyczące merytorycznego wkładu w publikację i wyrażenie zgody na przedstawienie pracy do habilitacji

Nazwisko	Wkład w pracę	podpis
Marta Ciemiorek	- opracowanie koncepcji artykułu; -współudział w opracowaniu metodyki badawczej (właściwości mechaniczne); -wykonanie pomiarów właściwości mechanicznych wraz z analizą danych; -przeprowadzenie interpretacji uzyskanych wyników; -przygotowanie publikacji	
Witold Chromiński	-współudział w opracowaniu metodyki badawczej (badania mikrostrukturalne); - wykonanie badań strukturalnych metodą EBSD wraz z analizą danych; -korekta manuskryptu	
Lech Olejnik	-opracowanie parametrów procesu IECAP wykorzystanego do wytworzenia materiału badawczego - przeprowadzenie obróbki plastycznej badanego materiału - współudział w dyskusji wyników i korekcie oryginalnego manuskryptu	
Małgorzata Lewandowska	- nadzór merytoryczny nad badaniami i analizą wyników; - współudział w interpretacji i dyskusji wyników - korekta manuskryptu - zdobycie funduszy na badania, kierowanie projektem w ramach, którego powstała publikacja	

OŚWIADCZENIE

Dane publikacji

Skład autorski: *Witold Chrominski, Małgorzata Lewandowska*

Tytuł: *Effect of Fiber Orientation on Microstructure and Texture Evolution During the Cold-Rolling of Al-Mg-Si Alloy*

Dane bibliograficzne: *Adv. Eng. Mater. 24 (2022) 1–11. <https://doi.org/10.1002/adem.202101610>*

Oświadczenie dotyczące merytorycznego wkładu w publikację i wyrażenie zgody na przedstawienie pracy do habilitacji

Nazwisko	Wkład w pracę	podpis
Witold Chromiński	- opracowanie koncepcji artykułu - opracowanie metodyki badawczej - przeprowadzenie obróbki cieplno-plastycznej - wykonanie badań strukturalnych metodą EBSD wraz z analizą danych - przeprowadzenie interpretacji uzyskanych wyników - przygotowanie publikacji - zdobycie funduszy na badania, kierowanie projektem w ramach, którego powstała publikacja	
Małgorzata Lewandowska	- nadzór merytoryczny nad badaniami i analizą wyników - współudział w interpretacji i dyskusji wyników - korekta manuskryptu	

OŚWIADCZENIE

Dane publikacji

Skład autorski: *Witold Chrominski, Małgorzata Lewandowska*

Tytuł: *Mechanisms of plastic deformation in ultrafine-grained aluminium – In-situ and ex-post studies*

Dane bibliograficzne: *Mater. Sci. Eng. A. 715 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.12.083>*

Oświadczenie dotyczące merytorycznego wkładu w publikację i wyrażenie zgody na przedstawienie pracy do habilitacji

Nazwisko	Wkład w pracę	podpis
Witold Chromiński	- opracowanie koncepcji artykułu; - opracowanie metodyki badawczej; - wykonanie badań strukturalnych metodą EBSD wraz z analizą danych; - przeprowadzenie obserwacji TEM wraz z wykonaniem eksperymentu rozciągania w mikroskopie, analiza otrzymanych wyników; - przeprowadzenie interpretacji uzyskanych wyników ; - przygotowanie publikacji; - zdobycie funduszy na badania, kierowanie projektem w ramach, którego powstała publikacja	
Małgorzata Lewandowska	- nadzór merytoryczny nad badaniami i analizą wyników; - współudział w interpretacji i dyskusji wyników - korekta manuskryptu	

OŚWIADCZENIE

Dane publikacji

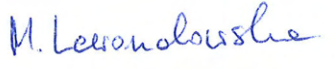
Skład autorski: *Witold Chrominski, Kamil Majchrowicz, Małgorzata Lewandowska*

Tytuł: *Microstructural response to compression deformation of ultrafine-grained aluminum with various microstructures*

Dane bibliograficzne: *Mater. Sci. Eng. A 763 (2019) 138184*

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138184>

Oświadczenie dotyczące merytorycznego wkładu w publikację i wyrażenie zgody na przedstawienie pracy do habilitacji

Nazwisko	Wkład w pracę	podpis
Witold Chromiński	- opracowanie koncepcji artykułu - opracowanie metodyki badawczej - wykonanie badań strukturalnych metodą EBSD wraz z analizą danych - przeprowadzenie obserwacji TEM wraz z analizą otrzymanych wyników - przeprowadzenie interpretacji uzyskanych wyników - przygotowanie publikacji - zdobycie funduszy na badania; kierowanie projektem w ramach, którego powstała publikacja	
Kamil Majchrowicz	- przeprowadzenie próby ściskania oraz opracowanie wyników - współudział w interpretacji i dyskusji wyników - korekta manuskryptu	
Małgorzata Lewandowska	- nadzór merytoryczny nad badaniami i analizą wyników - współudział w interpretacji i dyskusji wyników - korekta manuskryptu	

OŚWIADCZENIE

Dane publikacji

Skład autorski: *Witold Chrominski, Małgorzata Lewandowska*

Tytuł: *The importance of microstructural heterogeneities in the work hardening of ultra fine-grained aluminum, studied by in-situ TEM straining and mechanical tests*

Dane bibliograficzne: *Mater. Sci. Eng. A. 764 (2019) 138200.*

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138200>

Oświadczenie dotyczące merytorycznego wkładu w publikację i wyrażenie zgody na przedstawienie pracy do habilitacji

Nazwisko	Wkład w pracę	podpis
Witold Chromiński	- opracowanie koncepcji artykułu - opracowanie metodyki badawczej - wykonanie badań strukturalnych metodami EBSD i TKD wraz z analizą danych - przeprowadzenie obserwacji TEM wraz z wykonaniem eksperymentu rozciągania w mikroskopie, analiza otrzymanych wyników - przeprowadzenie interpretacji uzyskanych wyników - przygotowanie publikacji - zdobycie funduszy na badania, kierowanie projektem w ramach, którego powstała publikacja	
Małgorzata Lewandowska	- nadzór merytoryczny nad badaniami i analizą wyników - współudział w interpretacji i dyskusji wyników - korekta manuskryptu	

OŚWIADCZENIE

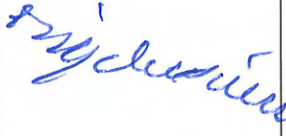
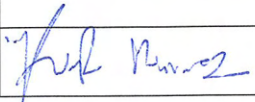
Dane publikacji

Skład autorski: *Kamil Majchrowicz, Zbigniew Pakieła, Witold Chrominski, Mariusz Kulczyk*

Tytuł: *Enhanced strength and electrical conductivity of ultrafine-grained Al-Mg-Si alloy processed by hydrostatic extrusion*

Dane bibliograficzne: *Mater. Charact. 135 (2018) 104-114.*
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.11.023>

Oświadczenie dotyczące merytorycznego wkładu w publikację i wyrażenie zgody na przedstawienie pracy do habilitacji

Nazwisko	Wkład w pracę	podpis
Kamil Majchrowicz	- opracowanie koncepcji badań eksperymentalnych - przeprowadzenie obróbki cieplnej stopu Al6101 - pomiary przewodności elektrycznej i twardości - wyznaczenie właściwości mechanicznych na podstawie statycznej próby rozciągania; - wyznaczenie gęstości dyslokacji na podstawie badań XRD oraz analiza tekstury - analiza wpływu parametrów wytwarzania na procesy wydzieleniowe i właściwości mechaniczne - opracowanie modelu teoretycznego opisującego wpływ poszczególnych elementów mikrostruktury na przewodność elektryczną -przygotowanie manuskryptu	
Zbigniew Pakieła	- opracowanie koncepcji badań eksperymentalnych oraz optymalizacja parametrów obróbki plastycznej i cieplnej stopu Al6101 - walidacja i analiza wyników przy uwzględnieniu aktualnych doniesień literaturowych, w tym analiza wpływu parametrów wytwarzania i mikrostruktury na procesy wydzieleniowe, właściwości mechaniczne i przewodność elektryczną stopu Al6101 -współredagowanie manuskryptu	
Witold Chromiński	- przeprowadzenie obserwacji TEM wraz z analizą otrzymanych wyników; - wykonanie badań strukturalnych metodą EBSD wraz z analizą danych; - zredagowanie części artykułu dotyczącej analizy mikrostruktury;	
Mariusz Kulczyk	-opracowanie parametrów technologicznych wyciskania hydrostatycznego i wytworzenie materiału do badań	

OŚWIADCZENIE

Dane publikacji

Skład autorski: *Witold Chrominski, Małgorzata Lewandowska*

Tytuł: *Influence of dislocation structures on precipitation phenomena in rolled Al–Mg–Si alloy*

Dane bibliograficzne: *Mater. Sci. Eng. A. 793 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139903>*

Oświadczenie dotyczące merytorycznego wkładu w publikację i wyrażenie zgody na przedstawienie pracy do habilitacji

Nazwisko	Wkład w pracę	podpis
Witold Chromiński	- opracowanie koncepcji artykułu; - opracowanie metodyki badawczej; - przygotowanie materiału do badań poprzez przeprowadzenie obróbki cieplno-plastycznej; - wykonanie badań strukturalnych metodą EBSD wraz z analizą danych; - przeprowadzenie obserwacji TEM wraz z wykonaniem eksperymentu grzania w mikroskopie, analizą otrzymanych wyników; - przeprowadzenie interpretacji uzyskanych wyników; - przygotowanie publikacji; - zdobycie funduszy na badania, kierowanie projektem w ramach, którego powstała publikacja	
Małgorzata Lewandowska	- nadzór merytoryczny nad badaniami i analizą wyników; - współudział w interpretacji i dyskusji wyników - korekta manuskryptu	

OŚWIADCZENIE

Dane publikacji

Skład autorski: *Witold Chrominski, Małgorzata Lewandowska*

Tytuł: *Precipitation strengthening of Al-Mg-Si alloy subjected to multiple accumulative roll bonding combined with a heat treatment*

Dane bibliograficzne: *Mater. Des. 219 (2022) 110813. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110813>*

Oświadczenie dotyczące merytorycznego wkładu w publikację i wyrażenie zgody na przedstawienie pracy do habilitacji

Nazwisko	Wkład w pracę	podpis
Witold Chromiński	- opracowanie koncepcji artykułu; - opracowanie metodyki badawczej; - przygotowanie materiału do badań poprzez przeprowadzenie obróbki cieplno-plastycznej; - wykonanie badań strukturalnych metodą EBSD wraz z analizą danych; - przeprowadzenie obserwacji TEM, analiza otrzymanych wyników; - przeprowadzenie pomiarów twardości; - przeprowadzenie interpretacji uzyskanych wyników; - przygotowanie publikacji; - zdobycie funduszy na badania, kierowanie projektem w ramach, którego powstała publikacja	
Małgorzata Lewandowska	- nadzór merytoryczny nad badaniami i analizą wyników; - współudział w interpretacji i dyskusji wyników - korekta manuskryptu	

STATEMENT

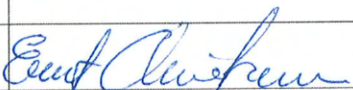
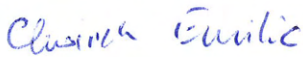
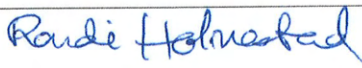
Publication data

Authors: Witold Chrominski, Emil Christiansen, Emilia Choinska, Randi Holmestad, Małgorzata Lewandowska

Title: *Enhancing homogenous precipitation and strengthening effectiveness in AlCuMg alloy*

Bibliographic data: J. Mater. Res. Technol. 33 (2024) 6722–6731.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.11.018>

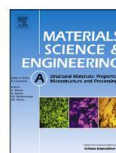
Statement on the substantive contribution of the work to the above-mentioned publication and consent to submit it for habilitation

Name	contribution	signature
Witold Chromiński	- conceptualization of the research; - methodology; - performing thermo-mechanical treatment of the samples - performing part of TEM and all STEM observations and data analysis; -conducting EBSD experiments and data analysis; - interpretation of results - writing the original manuscript; - founding acquisition and leading the project	
Emil Christiansen	- conducting part of TEM observations - reviewing the original manuscript	
Emilia Choinska	-methodology for DSC experiments; -conducting DSC experiments and data analysis; -correcting the original manuscript	
Randi Holmestad	- supervision on TEM experiments; - discussion - correcting the original manuscript	
Małgorzata Lewandowska	- supervision on the data analysis and interpretation - discussion - correcting the original manuscript	



Contents lists available at ScienceDirect

Materials Science & Engineering A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/msea

Grain refinement in technically pure aluminium plates using incremental ECAP processing

W. Chrominski^{a,*}, L. Olejnik^b, A. Rosochowski^c, M. Lewandowska^a^a Faculty of Materials Science and Engineering, Warsaw University of Technology, Woloska 141, 02-507 Warsaw, Poland^b Institute of Manufacturing Processes, Warsaw University of Technology, Narbutta 85, 02-524 Warsaw, Poland^c Design, Manufacture and Engineering Management, University of Strathclyde, 75 Montrose Street, Glasgow G1 1XJ, United Kingdom

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 February 2015

Received in revised form

24 March 2015

Accepted 25 March 2015

Available online 3 April 2015

Keywords:

Aluminium

Equal channel angular pressing

Grain refinement

Electron backscattered diffraction

Transmission electron microscopy

ABSTRACT

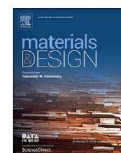
Ultrafine grained materials are capable of superplastic elongation at strain rates approximately two orders of magnitude faster than those currently employed for commercial superplastic forming operations. However, such operations require the material in the form of thin sheets. Therefore, in this work, a new approach to produce ultrafine grained plate samples using a modified equal channel angular pressing (ECAP) method, namely incremental ECAP, was proposed. Unlike conventional ECAP, incremental ECAP works in small steps in which deformation and feeding are associated with two different tools acting asynchronously. Eight passes were applied to technically pure aluminium, with the sample rotation by 90° around the Z axis, which resulted in two full rotations and accumulated strain equal to 9.2. It was demonstrated that grain refinement under these conditions occurs very efficiently. Eight passes resulted in grain size reduction to below 500 nm and very high fraction of high angle grain boundaries of about 80%. This was attributed to the activation of different slip systems in consecutive passes (thanks to sample rotation) and the lack of redundant strain, which results in early establishment of equiaxed grain structure. These two features confirm incremental ECAP to be one of the most effective severe plastic deformation methods in terms of grain size refinement and high angle grain boundaries formation.

© 2015 Elsevier B.V. All rights reserved.



Contents lists available at ScienceDirect

Materials & Design

journal homepage: www.elsevier.com/locate/matdes

Evaluation of mechanical properties and anisotropy of ultra-fine grained 1050 aluminum sheets produced by incremental ECAP

M. Ciemiorek^{a,*}, W. Chrominski^a, L. Olejnik^b, M. Lewandowska^a^a Faculty of Materials Science and Engineering, Warsaw University of Technology, Woloska 141, 02-507 Warsaw, Poland^b Institute of Manufacturing Processes, Warsaw University of Technology, Narbutta 85, 02-524 Warsaw, Poland

ARTICLE INFO

Keywords:

Incremental ECAP

Lankford coefficient

Ultra-fine grained

Texture

Anisotropy

ABSTRACT

Rectangular plates of technically pure 1050 aluminum processed by Incremental Equal Channel Angular Pressing were evaluated in terms of anisotropy and formability. After 8 passes, the plates exhibit in planar and through thickness isotropy which manifest by the independence of Y_S , UTS and r -values on the testing direction and fairly uniform distribution of microhardness across thickness. Such properties were attributed to randomized texture developed during processing and uniform microstructure with ultrafine equiaxed grains in all three plate's planes. The values of the parameters describing ability for deep drawing are very promising as r values only slightly decrease with I-ECAP passes while they became independent on testing direction. This indicates that although the processed plates are slightly prone to wall thinning (typical for aluminum alloys), they are resistant to earing formation, which is one of the main technological problem in deep drawing. The combination of isotropic parameters, enhanced mechanical strength and suitable ability to deep drawing may yield attractive products with a considerable potential for further forming.

Effect of Fiber Orientation on Microstructure and Texture Evolution During the Cold-Rolling of Al–Mg–Si Alloy

Witold Chrominski* and Malgorzata Lewandowska

A material with a strong double fibrous texture is subjected to rolling with various deformation paths—unidirectionally and with 90° rotations about the normal direction (cross-rolling). Additionally, the orientation of the initial fiber is manipulated to force unlikely grain rotations. The purpose of these procedures is to study the dependence between crystallographic and morphological texture changes caused by the rolling. Microstructure observations show that deformation mechanism responsible for the final microstructure depends on the initial fiber orientation. The crystallographic texture is related to the deformation mode and leads toward expected orientations; however, the initial grain boundaries alignment has a strong impact on the final microstructure. Unidirectional rolling results in typical orientations along the β -fiber in all investigated cases. The texture created during the more complex deformation path with inset rotations follows the geometrical constraints for fourfold symmetry, even if this required unlikely rotations toward the α -fiber.

1. Introduction

Rolling is one of the most important deformation techniques. In industrial applications, it is frequently used to produce flat sheets that are semiproducts for further technological processes. Rolling has also gained the attention of the scientific community and is widely studied by numerous groups exploring new opportunities for tailoring the microstructure and properties of materials. Despite a significant number of publications concerning rolling, the search is still on for new deformation variations or combinations with other treatments that can further extend the huge potential of the technique.

The process of microstructural evolution in face-centered cubic (fcc) metals during rolling has been the subject of numerous studies of texture, dislocation structures, and grain refinement, as summarized by Hansen.^[1] Texture development in aluminum is frequently described in terms of rotations of crystals along particular set of orientations known as the β -fiber.^[2,3] It has been shown that lattice rotations are dependent on the original orientation, and that texture components can be

easily predicted even at high strains.^[4,5] However, changing the rolling directions (RDs) relative to the original one may alter the intensity of orientations scattered around the β -fiber.^[6]

Transmission electron microscopy studies have shown the occurrence of certain typical dislocation structures that can be classified based on the level of applied strain,^[7–9] grain orientation relatively to the RD,^[10,11] active slip systems,^[12] or work hardening stages.^[13] This information has been used to further understand the microstructural evolution in the case of extremely high strains applied in a rolling-based severe plastic deformation technique—accumulative roll bonding.^[14] The microstructure transformations are directly linked with the work hardening stages^[13,15] which offer the potential for

tailoring mechanical properties with plastic deformation. This knowledge has led to a more conscious design of strain routes, which have been extended to introduce new strengthening mechanisms via alterations in the deformation procedures applied.^[16–19]

Most works focus on pure metals, although more complex and even multiphase materials are of higher importance due to their significantly higher strength. Alloying elements can cause changes in a material's response to deformation in terms of the type of microstructures generated and their impact on the material's behavior under working conditions.

A direct comparison of microstructure evolution during cold working in pure aluminum and 6xxx series alloy is given by Hockauf and coworkers.^[20] It indicates how chemical composition affects mechanical performance, even if the study concerns a deformation technique other than rolling. Such systematic comparisons for rolling are scarce; nevertheless, a juxtaposition of results given by different authors suggests tendencies similar to those given by Hockauf.^[20] Even small amounts of alloying elements bring changes in deformation mechanisms at conventional^[21–23] as well as at high strains^[24,25] when compared to pure metal.^[8,9] For this reason, the responses of alloys to the deformation routes applied cannot be deduced from studies on pure metals and require an individual approach. In terms of microstructure fragmentation, alloying elements (especially in aluminum) reduce stacking fault energy^[26]; thus, the most of aluminum alloys are non-cell forming metals that form dense dislocation tangles aligned with slip systems rather than low-angle grain boundaries (LAGBs).^[27,28] It has been shown that, up to a certain level of deformation, pure aluminum and

W. Chrominski, M. Lewandowska
Faculty of Materials Science and Engineering
Warsaw University of Technology
Wolowska 141, 02-507 Warsaw, Poland
E-mail: witold.chrominski@pw.edu.pl

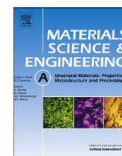
The ORCID identification number(s) for the author(s) of this article can be found under <https://doi.org/10.1002/adem.202101610>.

DOI: 10.1002/adem.202101610



Contents lists available at ScienceDirect

Materials Science & Engineering A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/msea

Mechanisms of plastic deformation in ultrafine-grained aluminium – In-situ and ex-post studies



Witold Chrominski*, Malgorzata Lewandowska

Warsaw University of Technology, Faculty of Materials Science and Engineering, Woloska 141, 02-507 Warsaw, Poland

ARTICLE INFO

Keywords:

Aluminium
Dislocation structures
Plastic deformation
Ultrafine grained materials
Electron microscopy
In-situ TEM straining

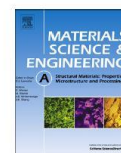
ABSTRACT

The microstructure of a 1050 aluminium alloy produced by hydrostatic extrusion varies in terms of grain boundary characteristics and the dislocation substructure depending on the grain orientation. This leads to a variance of plastic deformation mechanisms under external load. In this paper, the microstructure of as-extruded samples was compared to extruded and deformed in a bulk compression test to follow the reaction of various grains to external strain. In-situ TEM straining experiments were performed to study the variance of mobile dislocation activities depending on the local dislocation substructure in as-extruded material to deduce the operative deformation mechanism. These experiments accompanied with an estimation of strengthening mechanisms allowed to explain the role of different grains in the plastic deformation of ultrafine grained aluminium treated as a heterogenous complex system. It is demonstrated that well-developed ultrafine grains are responsible for providing strength since no intergranular dislocation intersections were reported but the motion of grain boundary dislocations or dislocation annihilation in boundaries. At the same time, relatively large grains with well-developed dislocation substructures accommodate plastic strain by provoking a more complex reaction – unstable dislocation arrays collapse while more advanced structures evolve into new low angle boundaries. The results from in-situ experiments were also used to explain subgrain shape changes observed after bulk deformation.



Contents lists available at ScienceDirect

Materials Science & Engineering A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/msea

The importance of microstructural heterogeneities in the work hardening of ultrafine-grained aluminum, studied by in-situ TEM straining and mechanical tests



Witold Chrominski*, Malgorzata Lewandowska

Warsaw University of Technology, Faculty of Materials Science and Engineering, Woloska 141, 02-507, Warsaw, Poland

ARTICLE INFO

Keywords:

Aluminum
Ultrafine-grained materials
Work hardening
Plastic deformation
Transmission electron microscopy
In-situ TEM straining

ABSTRACT

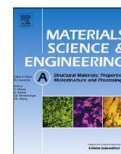
Technically pure aluminum was deformed by means of hydrostatic extrusion and incremental equal channel angular pressing in order to refine grains to a similar size. Different deformation routes resulted in microstructure varieties in terms of grain boundary characteristics, texture and local defects arrangements. These varieties affected the work hardening abilities measured macroscopically in the tensile test. In-situ TEM straining experiments were performed in order to capture dislocation occurrences in both samples and relate them to different values of strain hardening indices.

As a next step, microstructure-work hardening dependence of multiple samples was evaluated. Our study shows that work hardening in ultrafine-grained materials can be assured only if dislocations can interact with each other. This is possible when particular deformation structures are established during the grain refinement of the material. These results give an insight how to design ultrafine-grained structures which are capable to further processing.



Contents lists available at ScienceDirect

Materials Science & Engineering A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/msea

Microstructural response to compression deformation of ultrafine-grained aluminum with various microstructures

Witold Chrominski^{a,*}, Kamil Majchrowicz, Malgorzata Lewandowska^aWarsaw University of Technology, Materials Science and Engineering, Woloska 141, 02-507, Warsaw, Poland

ARTICLE INFO

Keywords:

Aluminum
Plastic deformation
Ultrafine-grained materials
Electron backscattered diffraction

ABSTRACT

Ultrafine-grained aluminum having a variety of microstructural features such as fibrous grain morphology, strong or random texture and a dominance of low- or high-angle grain boundaries was compressed to 4% of true strain. This made it possible to measure yield strength and begin a microstructure evolution to accommodate an external load. The level of deformation was high enough to provide changes in the microstructure, but relatively low in order to make it possible to determine the deformation mode in grain types recognized in the pre-compressed condition, before they become unrecognizable. As a next step, a detailed EBSD examination of these samples before and after compression was performed to track those changes. These observations revealed that, in the samples with a fibrous microstructure, the role of particular fibers changes when the grain refinement is more pronounced within them. In the sample with a relatively uniform microstructure and a grain size of below 800 nm, the post-deformation observations indicated there had been significant grain rotations with a blurring of the initial texture. Based on our observations, we can state that the heterogeneity of plastic deformation mechanisms in ultrafine-grained aluminum is dependent on local variations in microstructure – the arrangement of defects and the crystallographic orientation.



Contents lists available at ScienceDirect

Materials Characterization

journal homepage: www.elsevier.com/locate/matchar

Enhanced strength and electrical conductivity of ultrafine-grained Al-Mg-Si alloy processed by hydrostatic extrusion

Kamil Majchrowicz^{a,*}, Zbigniew Pakieła^a, Witold Chrominski^a, Mariusz Kulczyk^b^aWarsaw University of Technology, Faculty of Materials Science and Engineering, Woloska 141, 02-507 Warsaw, Poland^bInstitute of High Pressure Physics of the Polish Academy of Sciences, Sokolowska 29/37, 01-142 Warsaw, Poland

ARTICLE INFO

Keywords:

Ultrafine-grained materials
Al-Mg-Si alloys
Hydrostatic extrusion
Electrical conductivity

ABSTRACT

The effect of hydrostatic extrusion combined with an artificial aging on microstructure, mechanical and electrical properties of 6101 Al-Mg-Si alloy was investigated. It has been shown that such thermo-mechanical treatment is an effective method for producing of long wires with an ultrafine-grained microstructure (grain size of 300–400 nm) and enhanced ultimate tensile strength (> 330 MPa) and electrical conductivity (up to 58% IACS). The mechanical behavior of 6101 Al-Mg-Si alloy depended strongly on applied strains by hydrostatic extrusion and crystallographic texture. Higher accumulative strain accelerated the precipitation kinetics but decreased the age hardening response. The double fiber <100> and <111> texture was observed for hydrostatically extruded samples. The <001> grains with homogeneously distributed needle-like β'' precipitates provided precipitation strengthening of material while <111> grains resulted in more efficient grain boundary strengthening. Quantitative microstructure characterization allowed adjusting physical model to estimate the electrical conductivity and compare it with experimental data. The high conductivity was provided mainly by decomposition of solid solution due to precipitation of needle-like β'' precipitates in the grain interior and spherical β' or β particles located at grain boundaries.



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Materials Science & Engineering A

journal homepage: <http://www.elsevier.com/locate/msea>



Influence of dislocation structures on precipitation phenomena in rolled Al–Mg–Si alloy

Witold Chrominski^{*}, Malgorzata Lewandowska

Warsaw University of Technology, Faculty of Materials Science and Engineering, Woloska 141, 02-507, Warsaw, Poland

ARTICLE INFO

Keywords:

Aluminium alloys
Precipitation strengthening
Rolling
Transmission electron microscopy

ABSTRACT

The effect of heavy deformation on precipitation strengthening in a commercially available 6082 alloy was studied. Three levels of deformation were applied to a supersaturated solid solution (including two accumulative roll bonding cycles) followed by artificial ageing at the conventional temperature. The sample with the lowest accumulative strain was the only one that exhibited a strengthening effect. However, the initial examination of deformation induced dislocation structures has shown no differences between various deformation levels. In-situ heating TEM experiments were performed on all specimens to verify the impact of defects on precipitation and the results followed the behaviour of the bulk specimens. Then, dislocation structures were re-examined. It was found that the appearance of dislocation structures depend on the specimen thickness since in the thinnest area of observation dislocation density is significantly reduced in specimens after accumulative roll bonding. The mechanism of precipitates nucleation and further growth is discussed in the light of these observations.



Precipitation strengthening of Al-Mg-Si alloy subjected to multiple accumulative roll bonding combined with a heat treatment



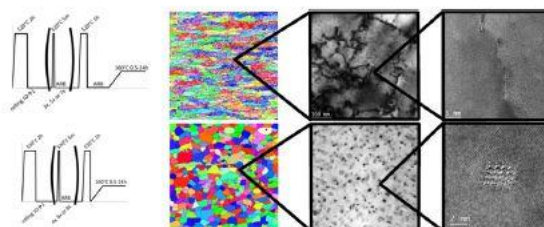
Witold Chrominski*, Malgorzata Lewandowska

Warsaw University of Technology, Faculty of Materials Science and Engineering, Woloska 141, 02-507 Warsaw, Poland

HIGHLIGHTS

- Accumulative roll bonding has been used to maintain thermal stability during solution heat treatment of aluminum alloy.
- Solution treatment followed by ageing of material after multiple accumulative roll bonding passes led to unexpectedly high strength increase.
- Hardness increase in deformed material was obtained despite no clear differences in precipitation conditions.
- In another set of specimens the presence of dislocation structure altered the precipitation sequence.
- The role of copper in precipitation phenomena was highlighted due to distorted diffusion in vicinity of defects.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Received 16 February 2022
Revised 14 May 2022
Accepted 31 May 2022
Available online 5 June 2022

Keywords:
Aluminum alloys
Accumulative roll bonding
Precipitation strengthening
Transmission electron microscopy

ABSTRACT

Thermo-mechanical treatment is one of the most important tools in designing properties of aluminum alloys. Plastic deformation introduces defects to microstructure and provides work hardening while a proper heat treatment may induce precipitation processes which lead to additional strengthening. In this work, a complex procedure is investigated with intention to increase mechanical strength of Al-Mg-Si alloy beyond conventional levels. Accumulative roll bonding is used as plastic deformation technique but with intention to provide a new microstructural feature – interlayer boundaries, instead of grain refinement. Solution heat treatment and ageing procedures are designed in a way that healing of the microstructure with maintaining some deformation-related features is maintained. Depending on the placement of solution treatment in the whole procedure, precipitation processes are similar or different from ones observed in a conventional solutionizing-ageing sequence. Nevertheless, the final hardness is always increased when compared to a typical heat treatment. Transmission electron microscope observations are performed to study variances in nucleation and growth of strengthening phases.

© 2022 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

* Corresponding author.

E-mail addresses: witold.chrominski@pw.edu.pl (W. Chrominski), malgorzata.lewandowska@pw.edu.pl (M. Lewandowska).

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110813>

0264-1275/© 2022 The Authors. Published by Elsevier Ltd.

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Materials Research and Technology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jmrt

Enhancing homogenous precipitation and strengthening effectiveness in AlCuMg alloy

W. Chrominski^{a,*}, E. Christiansen^b, E. Choinska^a, R. Holmestad^b, M. Lewandowska^a

^a Warsaw University of Technology, Faculty of Materials Science and Engineering, Woloska 141, 02-507, Warsaw, Poland

^b Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Department of Physics, 7491, Trondheim, Norway

ARTICLE INFO

Keywords:

Aluminium alloys
Precipitation strengthening
(Scanning) transmission electron microscopy
Differential scanning calorimetry
Diffusion

ABSTRACT

Precipitation strengthening is one of the most effective strengthening mechanisms in metallic alloys. Its effectiveness depends on the number density of small precipitates homogeneously distributed in the matrix. In this work, an attempt has been made to accelerate precipitation and thus precipitation strengthening in an AlCuMg alloy through a specially designed thermo-mechanical treatment. Solution heat treatment has been carried out before and directly after heavy rolling followed by conventional ageing in order to study homogenous nucleation of GPB zones. It appeared that samples solutionized after plastic deformation feature much higher hardness as well as density of precipitates when compared to ones after conventional treatment. The reasons of this unexpected outcome had been studied by means of differential scanning calorimetry and transmission electron microscopy. It was found that the evolution of GPB zones and further phases vary depending on the pre-ageing history. Diffusion-based phenomena controlling the nucleation seems to be accelerated in samples heat treated directly after the rolling. Based upon the affinity of solutes to the vacancies it has been deduced that magnesium plays a critical role in binding and releasing vacancies during the thermo-mechanical procedure. As a result, GPB zones are present in very early stages of ageing providing nucleation sites for the most strengthening precipitates which are fine and densely distributed within grains. An atomistic model for nucleation of early precipitates is discussed on the basis of DSC measurements, STEM analysis and data available in literature.



École nationale supérieure de chimie de Paris

11, rue Pierre et Marie Curie F75231 Paris Cedex 05
www.enscp.fr

Paris, 12th May 2025

Chimie ParisTech – PSL University,
11, rue Pierre et Marie Curie, 75005, Paris

To Whom It May Concern,

This letter is to formally confirm the research stay of Dr. Witold Chrominski at Chimie ParisTech from March 22, 2024, to April 21, 2024. During this period, Dr. Chrominski conducted a series of thermo-mechanical treatments on aluminium alloys and participated in resistivity measurements using our in-house-built facility.

His contributions were highly productive, and I am confident that the outcomes of this collaborative work will lead to a high-quality publication. We are also planning to pursue further collaborative projects in the future.

Sincerely,

.....

Fan Sun, Ph.D., HDR

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Fan Sun".

Researcher, PI

Métallurgie Structurale, IRCP, Chimie-Paristech, PSL university

Fan.sun@chimieparistech.psl.eu

0033 06 67 62 69 75



École nationale supérieure de chimie de Paris

11, rue Pierre et Marie Curie F75231 Paris Cedex 05
www.enscp.fr

Paris, 12th May 2025

Chimie ParisTech – PSL University,
11, rue Pierre et Marie Curie, 75005, Paris

To Whom It May Concern,

This letter is to formally confirm the research stay of Dr. Witold Chrominski at Chimie ParisTech from February 4, 2024, to March 8, 2024. During this period, Dr. Chrominski carried out a series of in-situ straining experiments in a transmission electron microscope on aluminium alloys.

His contributions were highly productive, and I am confident that the outcomes of this research will result in a high-quality publication. We are also planning to pursue further collaborative projects in the future.

Sincerely,

.....

Fan Sun, Ph.D., HDR

Researcher, PI

Métallurgie Structurale, IRCP, Chimie-Paristech, PSL university

Fan.sun@chimieparistech.psl.eu

0033 06 67 62 69 75

To whom it may concern

Confirmation of stay by Witold Chrominski

I hereby confirm that PhD student Mr. Witold Chrominski from Warsaw University and Technology, Faculty of Materials Science and Engineering, has been staying in our TEM group, Department of Physics, NTNU, Trondheim, Norway, for one month, between 7th of May and 9th of June 2015. He has had an office in our department, and has used the Transmission Electron Microscopes (TEMs).

Since Witold was a very experienced TEM user before he came, it was very easy to train him – he quickly became a user of two of the microscopes, and I think he obtained what he wanted to during his stay here. That involves using the 2100 microscope to obtain precipitate statistics in his alloys and the 2100F microscope to use the ‘nano-EBSD’ technique to study grain orientations. He also had a session on our top instrument (ARM200CF) with our postdoc as an operator. Witold gave two nice presentations for our group about his work while he was here. I find him very knowledgeable and mature in the field of TEM, dislocations and materials deformation, doing high quality work. We hope that the work he did here can result in a common publication, and hope we can continue this collaboration in the future. We have already discussed a possible revisit to Poland to use an in-situ straining holder .. ☺

Yours sincerely,



Randi Holmestad, professor Physics, NTNU

Address	Org.no. 974 767 880	Location	Phone	Professor
NO-7491 Trondheim	E-mail: postmottak@phys.ntnu.no http://www.phys.ntnu.no	Realfagbygget Høgskoleringen 5 NO-7034 Trondheim	+ 47 73 59 31 85 Fax + 47 73 59 77 10	Randi Holmestad Phone: + 47 73593880

All correspondence that is part of the case being processed is to be addressed to the relevant unit at NTNU, not to individuals. Please use our reference with all inquires.

To whom it may concern

Witold Chrominski's stay at NTNU

I hereby confirm that Witold Chrominski stayed at NTNU, in the TEM Gemini Center in Trondheim, Norway, for three months this year, from 8th of August to 10th of November 2021. During the stay Witold was investigating the microstructure of Al-Cu-Mg alloys after various thermo-mechanical treatments with use of two transmission electron microscopes (TEMs) – the JEOL 2100 and 2100F. Studies carried out by Witold were a part of his project financed by the National Science Center. Witold also gave a few (online) presentations about his work with good attendance.

I found Witold's stay very productive. He got very interesting results, and I believe that his study here will end up in a common publication. Please don't hesitate to contact me if you need more information (randi.holmestad@ntnu.no, Phone +4748170066)

Yours sincerely,



Randi Holmestad

Professor, Department of Physics, NTNU, Trondheim Norway

Address	Org. no. 974 767 880	Location	Phone	Professor
7491 Trondheim Norway	postmottak@nv.ntnu.no www.ntnu.no/fysikk	Høgskoleringen 5 Realfagbygget, D5-170	+47 73593478	Randi Holmestad randi.holmestad@ntnu.no Phone: +47 48170066

Please address all correspondence to the organizational unit and include your reference.