

## **1. Przemiany tekstur w procesie odkształcenia i rekrytalizacji**

Prowadzone badania dotyczą wyjaśnienia mechanizmów kontrolujących przemianę tekstury odkształcenia w teksturę rekrytalizacji w metalach o sieci rsc o zróżnicowanej energii błędu ułożenia, ze szczególnym uwzględnieniem opisu mechanizmów odpowiedzialnych za formowanie się silnej składowej  $\{100\}\langle 001\rangle$  w blachach ze stopów aluminium. Analizowane są zarówno fundamentalne aspekty tej szczególnej przemiany fazowej (badania na próbkach mono- oraz poli- krystalicznych), jak i wpływ formujących się podczas rekrytalizacji orientacji nowych ziaren na anizotropowe własności blach.

## **2. Formowanie się niestabilności płynięcia plastycznego**

W ramach tej tematyki prowadzone są prace eksperymentalne mające na celu wyjaśnienie krystalograficznych uwarunkowań mechanizmu formowania się niestabilności płynięcia plastycznego w metalach. Analizowane jest zachowanie umocnieniowe krystalitów o orientacjach sprzyjających formowaniu się obszarów zlokalizowanego odkształcenia oraz zmiany mikrostrukturalne prowadzące do uformowania się mikro-/makro- pasm ścinania w metalach o zróżnicowanej energii błędu ułożenia a także opis uwarunkowań krystalograficznych sprzyjających skoordynowanej penetracji poślizgów poprzez granice ziaren. Prowadzone analizy dotyczą zarówno niestabilności plastycznego płynięcia formujących się w warunkach odkształceń statycznych (pasma ścinania), jak i dynamicznych (adiabatyczne pasma ścinania).

## **3. Kształtowanie własności metali i stopów poprzez rozdrobnienie struktury metodami intensywnej przeróbki plastycznej**

W ramach tego zagadnienia analizowana jest problematyka formowania się silnie rozdrobnionych (mikro)struktur w tworzywach metalicznych oraz ich wpływie na własności (pół)wyrobu. Prowadzone badania dotyczą możliwości wykorzystania technik intensywnej odkształcenia plastycznego do wytworzenia materiałów ultra-drobno-ziarnistych w metalach oraz problematyka ich 'stabilności temperaturowej', tj. 'odporności struktury' na rozrost ziarna w procesach wygrzewania. W szczególności, w ramach tej problematyki analizowana jest możliwość wykorzystania techniki walcowania spajania akumulacyjnego do wytworzenia układów wielowarstwowych na bazie metali lekkich (Al/Ti/Mg) wzmacnianych fazami międzymetalicznymi uformowanymi podczas długotrwałego wygrzewania.

### 4. Mechanizmy łączenia platerów wytwarzanych z wykorzystaniem energii wybuchu oraz wieloskalowa analiza (mikro)struktury strefy połączenia z uwzględnieniem jej wpływu na własności układu

Prowadzone prace dotyczą analiz zmian (mikro)strukturalnych w dwu- i wielo- warstwowych układach platerów zachodzących w trakcie spajania z wykorzystaniem energii wybuchu oraz w trakcie późniejszego długotrwałego wygrzewania. Na każdym etapie prowadzonych prac obserwowane zmiany są korelowane z własnościami mechanicznymi (pół)wyrobu. Badania te z jednej strony zogniskowane są na technologicznych aspektach wytworzenia materiałów wielowarstwowych 'zbrojonych' fazami międzymetalicznymi oraz cząstkami ceramicznymi, które wykazują silnie o zwiększoną odporność na przebicie. Z drugiej strony analizowane jest zagadnienie destrukcji tych układów w procesie wysokoenergetycznego niszczenia układów wielowarstwowych, a zwłaszcza problematyka formowania się adiabatycznych pasm ścinania.

### O PRACOWNI

Od samego początku istnienia Pracowni Odkształcenia Plastycznego Metali prowadzone prace badawcze dotyczą w głównej mierze zagadnień związanych z przemianami zachodzącymi w procesie odkształcenia i rekrytalizacji, formowaniem się niestabilności plastycznego płynięcia, a także własnościami metali o silnie rozdrobnionej mikrostrukturze. W ostatnich latach istotną rolę w prowadzonych badaniach odgrywa tematyka związana z wieloskalową charakterystyką strefy połączenia materiałów zgrzewanych wybuchowo. Zagadnienia te znajdują odzwierciedlenie nie tylko w licznych publikacjach naukowych oraz pracach doktorskich realizowanych w pracowni DN-6, ale także w projektach oraz szerokiej współpracy prowadzonej zarówno z jednostkami naukowymi z kraju, jak i zagranicą, w tym także i partnerami przemysłowymi.

### Wybrane publikacje z zakresy realizowanej tematyki badawczej:

-

S.M. Fatemi, A. Zarei-Hanzaki, **H. Paul**, Strain-induced nano recrystallization in AZ31 magnesium: TEM characterization, Journal of Alloys and Compounds, 699 (2017) 796-802.

-

M. Prażmowski, D. Rozumek, **H. Paul**, Static and fatigue tests of bimetal Zr-steel made by explosive welding, *Engineering Failure Analysis*, 75 (2017), pp. 71-81.

-

**M.M. Miszczyk, H. Paul**, J.H. Driver, J. Poplewska, The influence of deformation texture on nucleation and growth of cube grains during primary recrystallization of AA1050 alloy, *Acta Materialia*, 129 (2017) 378-387

-

**M.M. Miszczyk, H. Paul**, J.H. Driver, P. Drzymała, Recrystallization nucleation in stable aluminium-base single crystals: Crystallography and mechanisms, *Acta Materialia*, 125 (2017) 109-124

-

**M. M. Miszczyk, H. Paul**, J.H. Driver, TEM and SEM analyses of the orientation relations of recrystallized grains in a stable Al-1wt.%Mn single crystals, *Materials Characterization*, 112 (2016) 68-80

-

**M. M. Miszczyk, H. Paul**, J.H. Driver and C. Maurice, New orientation formation and growth during primary recrystallization in stable single crystals of three face-centred cubic metals, *Acta Materialia*, 83 (2015) 120-136

-

**H. Paul**, J. Driver, **A. Tarasek**, W. Wajda, **M.M. Miszczyk**, Mechanism of macroscopic shear band formation in plane strain compressed fine-grained aluminium, *Materials Science and Engineering A*, A642 (2015) 167-180.

-

**H. Paul**, J. Morgiel, M. Faryna, M. Prażmowski, **M.M. Miszczyk**, Microstructure and interfacial reactions in the bonding zone of explosively welded Zr700 and carbon steel plates, *International Journal of Materials Research*, 106 (2015) 782-792.

-

S.M. Fatemi-Varzaneh, A. Zarei-Hanzaki, **H. Paul**, Characterization of ultrafine and nano grained magnesium alloy processed by severe plastic deformation, *Materials Characterization*, 87 (2014) 27-35

-

A. Morawiec, E. Bouzy, **H. Paul**, J.J. Fundenberger, Orientation precision of TEM-based orientation mapping techniques, *Ultramicroscopy*, 136 (2014) 107-118

-

**H. Paul**, J. Morgiel, T. Baudin, F. Brisset, M. Prażmowski, **M. Miszczyk**, Characterization of Explosive Weld Joints by TEM and SEM Orientation Imaging Microscopy, *Archives of Metallurgy and Materials*, 59 (2014) 1129-1136.

-

**H. Paul**, Lityńska-Dobrzyńska, L., Prażmowski, M., Microstructure and phase constitution near the interface of explosively welded aluminum/copper plates, *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 44 (2013) 3836-3851

-

S. Wronski, J. Tarasiuk, B. Bacroix, K. Wierzbowski, **H. Paul**, Microstructure heterogeneity after the ECAP process and its influence on recrystallization in aluminium, *Materials Characterization*, 78 (2013) 60-68.

-

L. Madej, **H. Paul**, L. Trębacz, W. Wajda, M. Pietrzyk, Multi billet extrusion technology for manufacturing bi-layered components, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61 (2012) 235-238.

-

**H. Paul**, A. Morawiec, T. Baudin, Early stages of recrystallization in ECAP-deformed AA3104 alloy investigated using SEM and TEM orientation mappings, *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 43A (2012) 4777-4793.

-

**H. Paul**, T. Baudin, F. Brisset, Effect of strain path and second phase particles on microstructure and texture evolution of AA3104 aluminium alloy processed by ECAP, Archives of Metallurgy and Materials, 56 /2 (2011) 245-261.

**Wybrane projekty badawcze finansowane ze środków NCN/MNiSW:**

-

*Mechanizm formowania się ziaren o orientacji  $\{100\}<001>$  w procesie rekrytalizacji odkształconych metali o sieci rsc o średniej i dużej energii błędu ułożenia, **Kierownik: dr inż. Magdalena Miszczyk***

(projekt badawczy w ramach programu OPUS finansowany przez Narodowe Centrum Nauki na lata 2017-2020).

-

*Mechanizm formowania się warstw dyfuzyjnych w wielowarstwowych układach platerów na bazie metali lekkich o zwiększonej odporności udarowej, **Kierownik: prof. Henryk Paul***  
(projekt badawczy w ramach programu OPUS finansowany przez Narodowe Centrum Nauki na lata 2017-2020).

-

*Mechanizmy zarodkowania i wzrostu nowych ziaren w procesie rekrytalizacji metali o sieci rsc i o wysokiej energii błędu ułożenia, **Kierownik: dr inż. Magdalena Miszczyk*** (projekt badawczy w ramach programu SONATA finansowany przez Narodowe Centrum Nauki na lata 2017-2019).

-

*Trójwymiarowa charakterystyka granic międzyziarnowych w metalach o strukturze regularnej ściennie centrowanej po odkształceniu plastycznym i rekrytalizacji, **Kierownik: dr inż. Piotr***

**Bobrowsk**

i (projekt

badawczy w ramach programu SONATA finansowany przez Narodowe Centrum Nauki na lata 2016-2019).

-

*Krystalograficzne i mechaniczne uwarunkowania formowania się niestabilności plastycznego płynięcia w metalach o sieci rsc po zmianie drogi deformacji oraz w procesie monotonicznego odkształcenia, Kierownik: **prof. Henryk Paul** (projekt badawczy w ramach programu OPUS finansowany przez Narodowe Centrum Nauki na lata 2015-2018)*

-

*Przemiany fazowe w strefie połączenia dwu- i trój- warstwowych platerów na bazie miedzi wytwarzanych metodą spajania wybuchowego, Kierownik: **prof. Henryk Paul** (projekt badawczy w ramach programu OPUS finansowany przez Narodowe Centrum Nauki w latach 2013-2016).*

-

*Weryfikacja i nowa interpretacja mechanizmów niejednorodnego odkształcenia poli- i monokryształów o strukturze rsc w świetle zjawisk emisji akustycznej i tarcia wewnętrznego, Kierownik: **dr hab. Andrzej Pawelek** (projekt badawczy w ramach programu OPUS finansowany przez NCN w latach 2013-2016).*

-

*Krystalograficzne aspekty procesu rekrytalizacji w technicznych stopach aluminium, Kierownik: **dr inż. Magdalena Miszczyk** (Projekt badawczy w ramach programu luventus Plus finansowany przez MNiSW w latach 2012-2014).*

-

*Phase transformations and microstructure changes in the interfacial zone of bi- and tri- metallic strips based on reactive metals fabricated by explosive welding, Kierownik: **prof. Henryk Paul** (Projekt Międzynarodowy Niewspółfinansowany, finansowany ze strony polskiej przez Narodowe Centrum Nauki w latach 2012-2014).*

-

*Opracowanie i identyfikacja modeli naprężenia uplastyczniającego materiałów polikrystalicznych w skali mikro, Kierownik: dr inż. Wojciech Wajda* (projekt badawczy w ramach programu OPUS finansowany przez NCN w latach 2011-2014).

-

*Mechanizmy ewolucji struktury i tekstury w procesach zdrowienia i rekrytalizacji metali o sieci regularnej ściennie centrowanej, Kierownik: prof. Henryk Paul* (Projekt finansowany przez MNiSW w latach 2011-2014).

-

*The Influence of Second Phase Particles on Structure Refinement and Recrystallization Behaviour in Aluminium Alloys Fabricated by Severe Plastic deformation, Kierownik: prof. Henryk Pau* I (Projekt Międzynarodowy Niewspółfinansowany, finansowany ze strony polskiej przez MNiSW w latach 2010-2012).

**Współpraca z ośrodkami naukowymi z kraju i z zagranicy oraz partnerami przemysłowymi:**

**Współpraca zagraniczna:**

-

**Faculty of Mechanical Engineering of Shahid Rajaee Teacher Training University, Lavizan, Tehran, Iran**, Structure and properties of functional materials based on light metals, manufactured by using severe plastic deformation (SPD) and bi-, tri- and multi- layered composite materials manufactured by explosive bonding technology, 2015-2019, Prof. Henryk Paul (IMMS PAS)/Prof. Mahmood Fatemi (SRTTU).

-

**University of Louvain (UCL), CESAME-MEMA, Belgium;** Analiza mechanizmów deformacji w skali mikro próbek ze stali TWIP ściskanych w płaskim stanie odkształcenia, 2014-2016 (Dr inż. W. Wajda)/(Prof. Laurent Delannay).

-

**Institut de Chimie Moléculaire et des Matériaux d'Orsay (ICMMO), Laboratoire de Physico-Chimie de l'Etat Solide, Université Paris-Sud, Orsay, France.** Badania struktury i właściwości materiałów dla przemysłu nuklearnego, w szczególności stopów Zr i Ti, a także materiałów kompozytowych na bazie Zr i Ti, wytwarzanych z wykorzystaniem technologii wybuchowego spajania, 2010-2015, Prof. Thierry Baudin/Prof. Henryk Paul.

-

**Instytut Materiałów i Mechaniki Maszyn, Słowacka Akademia Nauk, Bratysława, Słowacja;** Emisja akustyczna w ściskanych stopach i kompozytach Mg i Al przed i po przetwarzaniu metodami intensywnego odkształcania, 2010-2016.

-

**École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, Centre Sciences des Matériaux et des Structures;** Modifications de la microstructure et de la texture pendant le recuit des métaux déformés de structure c.f.c - Thèse de Docteur - Magdalena Maria Miszczyk, 2005-2013, Prof. Henryk Paul (IMMS PAS)/Prof. Julian H. Driver (EMSE).

#### **Współpraca krajowa:**

-

**Politechnika Opolska,** Wydział Mechaniczny (dr Mariusz Prażmowski) - w zakresie wieloskalowej charakterystyki układów grzewanych wybuchowo.

-

**AGH WMiIP** (Prof. Łukasz Madej) - w zakresie modelowania procesów deformacji w oparciu o model Crystal Plasticity oraz Digital Material Representation.



## Współpraca z przemysłem:

-

**ZTW Explomet w Opolu** - w zakresie badania własności mechanicznych i analizy zmian zachodzących w strefie połączenia platerów wytwarzanych z wykorzystaniem energii wybuchu.

## Prace doktorskie:

### Prace doktorskie zrealizowane w pracowni DN-6:

**2016 - Wojciech Skuza**, Wieloskalowa charakterystyka połączeń w platerach Ti/Cu spajanych metodą wybuchową (Promotor: prof. Henryk Paul, promotor pomocniczy: dr inż. Katarzyna Berent).

**2015 - Jagoda Poplewska**, Role of low-angle boundaries in microstructure and texture transformations during annealing of severely deformed aluminum alloys (Promotor: Henryk Paul).

**2013 - Magdalena Miszczyk**, Microstructure and texture evolution during annealing of plane strain compressed fcc metals (Promotorzy: prof. Henryk Paul oraz prof. Julian H. Driver, promotor pomocniczy: dr Claire Maurice).

**2010 - Joanna Bogucka**, Zmiany plastyczności stopów aluminium poddanych rozdrobnieniu ziarna metodą intensywnych odkształceń plastycznych (Promotor: †prof. Jan Kuśnierz/prof. Henryk Paul)

**2008 - Marcin Bijak**, Zależność orientacji w procesie rekrytalizacji odkształconych monokryształów stopu Al-Mn (Promotor: prof. Henryk Paul)