

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Wierzbanowski

Kraków, 20.01.2023

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

Akademia Górniczo-Hutnicza

Kraków

Recenzja pracy doktorskiej pani mgr inż. Izabeli Mania:

„Krystalograficzne aspekty formowania się pasm ścinania w metalach odkształcanych w zakresie dużych i ekstremalnie dużych prędkości odkształcenia”

Przedstawiona praca doktorska jest obszernym studium własności krystalograficznych, strukturalnych i mechanicznych pasm ścinania powstających podczas odkształceń metali o strukturze regularnej, przy zastosowaniu bardzo dużych (ekstremalnych) prędkości odkształcenia. Istotne jest tu także porównanie badanych mechanizmów odkształcenia z tymi, które pojawiają się w materiałach odkształcanych z prędkościami konwencjonalnymi. Podkreślić należy, iż dynamiczne odkształcanie metali ma istotne znaczenie w zastosowaniach przemysłowych oraz w przemyśle zbrojeniowym.

Praca zawiera obszerny przegląd literatury dotyczący obecnego stanu wiedzy na temat formowania się różnych typów pasm ścinania w metalach o sieci regularnej ściennie centrowanej (RSC), przy czym przegląd ten dotyczy przede wszystkim konwencjonalnych prędkości odkształcenia (Rozdz. 2). Następnie przedstawione są teza i cel pracy: dotyczą one wyjaśnienia mechanizmów formowania się niestabilności płynięcia plastycznego w postaci pasm ścinania podczas dynamicznego odkształcenia metali (Rozdz. 3).

W dalszej części (Rozdz. 4) pracy Autorka przedstawia eksperymentalną część pracy, a więc: badane próbki mono- i polikrystaliczne, geometrie ich odkształcenia oraz zastosowane techniki badawcze (mikroskopia świetlna i elektronowa TEM, SEM/EBSD, dyfrakcja rentgenowska, badanie nano-twardości). Warto tu podkreślić odpowiedni dobór metod odkształcenia z ekstremalnie dużymi prędkościami.

Właściwe wyniki badań przedstawione są w obszernym Rozdziale 5, w którym Autorka omawia całość otrzymanych rezultatów, ich klasyfikację i interpretację.

W końcowej części pracy przedstawione są Podsumowanie i Wnioski.

Proces odkształcenia plastycznego bardzo często ma charakter niejednorodny. Ścinanie poślizgowe nie jest bowiem rozłożone równomiernie w objętości materiału, lecz koncentruje się w pasmach poślizgu lub w pasmach ścinania. Do tego dochodzi jeszcze bliźniakowanie mechaniczne, które także jest skoncentrowane w pewnych obszarach materiału. Kolejną trudnością, która napotyka się przy badaniu odkształceń materiałów

polikrystalicznych (a więc takich, które mają praktyczne i technologiczne zastosowania) jest konieczność uwzględnienia roli granic ziaren, wydzieleni, struktur dyslokacyjnych, itp. Dlatego też, w celu uchwycenia najbardziej podstawowych mechanizmów odkształcenia w przedstawionej pracy większość badań skupiona jest na próbkach monokrystalicznych, o ściśle dobranych orientacjach sieci.

Przy realizacji odkształcenia z ekstremalnymi prędkościami użyto dwóch różnych metod. Odkształcenie próbek monokrystalicznych realizowano w matrycy kanalikowej z wykorzystaniem energii wybuchu, natomiast próbki polikrystaliczne (przygotowane w kształcie 'kapeluszowym') zgniatano z wykorzystaniem młota opadowego.

W celu zbadania mechanizmów powstawania pasm ścinania w różnych warunkach i w różnych materiałach przygotowano całą serię próbek.

Jeśli chodzi o monokryształy, to Autorka przygotowała zestaw kilku próbek posiadających wybrane orientacje krystalograficzne. Są to: próbka aluminium z orientacją C, próbki miedzi z orientacjami C, S, G, Br, oraz stop Cu-14%Al z orientacją C. Te trzy metale mają wyraźnie różne energie błędu ułożenia, dlatego ich wybór umożliwia zbadanie wpływu tej energii na powstawanie pasm ścinania.

W kategorii materiałów polikrystalicznych badano trzy rodzaje próbek: aluminium AA1050, miedź ETP oraz mosiądz Cu-30%Zn. Z kolei te trzy materiały mają wyraźnie różne przewodnictwo cieplne, jak również temperaturę topnienia – ten dobór parametrów umożliwia badanie wpływu procesów termicznych w trakcie tworzenia się pasm ścinania.

W przypadku wszystkich badanych materiałów starano się znaleźć zależności kątowe pomiędzy orientacją osnowy i orientacją powstającego pasma ścinania – poprzez znalezienie osi i kąta obrotu opisujących tę relację. W tym celu Autorka łączyła wyniki pomiarów techniką EBSD, dyfrakcji rentgenowskiej i mikroskopii transmisyjnej TEM. Muszę przyznać, że jestem pod wrażeniem sprawności przeprowadzonych tymi metodami analiz i trafnością znajdujących wyników.

Przeprowadzone badania prowadzą do szeregu wniosków dotyczących powstawania pasm ścinania przy dużych prędkościach odkształcenia, zarówno dla próbek mono- oraz polikrystalicznych. I tak:

- Zachowanie próbek monokrystalicznych, o różnych orientacjach sieci (C, S, G, Br), jest inne w zakresie dużych prędkości odkształcenia niż w przypadku konwencjonalnych prędkości. Ta różnica jest związana głównie z wystąpieniem bliźniakowania odkształceniowego oraz z formowaniem się pasm odkształcenia (w monokryształach z orientacjami G i Br) i pasm ścinania (w monokryształach z orientacjami C i S). Ten typ zachowania przy dużych prędkościach odkształcenia monokryształów miedzi (w matrycy kanalikowej), charakteryzowany ewolucją tekstury i mikrostruktury, jest analogiczny do odkształcania ze standardowymi

prędkościami, ale w temperaturze ciekłego azotu (77 K), lub do deformacji metali o małej energii błędu ułożenia.

- Monokryształy z orientacjami G i Br podczas odkształcenia z ekstremalnymi prędkościami tracą swoją stabilność strukturalną i teksturową z powodu tworzenia się cienkich płytek bliźniaków i pasm odkształcenia. Bliźniaki powstawały poprzez transformację na płaszczyznach $\{111\}$, czyli tych samych na których występuje poślizg.

- Monokryształy z orientacjami C i S Wykazały intensywne bliźniakowanie i jednocześnie tworzenie pasm ścinania.

W pracy badano także rolę energii błędu ułożenia, I tutaj, pomimo ekstremalnie dużych prędkości odkształcenia, zachowanie okazało się poniekąd zgodne z oczekiwaniami: w monokryształe Al (o wysokiej energii błędu ułożenia) bliźniakowanie nie pojawiło się, natomiast wystąpiło intensywnie w krystalitach stopu Cu-14%Al (o niskiej energii błędu ułożenia).

Zasadniczym celem pracy jest wyjaśnienie mechanizmów tworzenia się pasm ścinania. Autorka zaproponowała bardzo spójny opis tego procesu.

Początek formowania się pasma ścinania związany jest z anizotropową i docelowo niestabilną strukturą bliźniak-osnowa. W obszarze tym powstają tzw. pasma ugięcia, które są prekursorami pasm ścinania. Intensyfikują one proces bliźniakowania i w efekcie pojawia się nowa orientacja sieci we wnętrzu tak powstającego pasma ścinania, a płaszczyzna habitus bliźniaka staje się równoległa do płaszczyzny ścinania.

Analogiczny mechanizm proponuje Autorka w celu wyjaśnienia efektu propagacji pasma ścinania wzdłuż jednej płaszczyzny ścinania poprzez wiele ziaren w materiale polikrystalicznym. W pracy potwierdzono, że zachodzi lokalna reorientacja sieci krystalicznej w ziarnach sąsiadujących ze strefą ścinania, w taki sposób, aby jedna z płaszczyzn $\{111\}$ stała się równoległa do płaszczyzny ścinania, zaś jeden z kierunków $\langle 110 \rangle$ lub $\langle 112 \rangle$ stał się równoległy do kierunku ścinania. Potwierdza to krystalograficzny charakter powstających pasm ścinania, gdyż płaszczyzny $\{111\}$ są płaszczyznami bliźniakowania, jak i poślizgu w metalach o sieci RSC. Ponadto, kierunki $\langle 110 \rangle$ oraz $\langle 112 \rangle$ są odpowiednio kierunkami poślizgu i bliźniakowania. A zatem makroskopowa płaszczyzna ścinania składa się kawałków wyżej wymienionych płaszczyzn, przy czym są tylko nieznacznie odchyłone od makroskopowej płaszczyzny ścinania.

Głównym osiągnięciem pracy są właśnie powyżej zaproponowane mechanizmy powstawania pasm ścinania zarówno wewnątrz ziaren (obszarów monokrystalicznych), jaki i w materiałach polikrystalicznych. Również istotne jest rzetelne zbadanie ich charakterystyk (orientacje krystalograficzne, mikrotwardość, profile dezorientacji, cechy morfologiczne).

Praca jest zredagowana starannie, napisana poprawnym językiem, tylko ze sporadycznymi błędami typu 'literówek'. Zwraca też uwagę duża liczba, jakość i komunikatywność zamieszczonych rysunków.

Podkreślić należy szeroki wachlarz precyzyjnie przeprowadzonych przez Autorkę pomiarów i analiz.

Otrzymany zestaw wyników i wniosków niewątpliwie poszerza wiedzę na temat mechanizmów powstawania oraz charakterystyk pasm ścinania zarówno w mono- jak i polikryształach. A trzeba podkreślić, że odkształcenie ma zazwyczaj niejednorodny charakter, dlatego takie badania mają podstawowe znaczenie w inżynierii materiałowej.

Na koniec, prosiłbym Autorkę o wyjaśnienie kilku punktów pracy:

- W jaki sposób były nadawane i kontrolowane wybrane orientacje sieci krystalograficznej w badanych próbkach monokrystalicznych ?
- W jaki sposób wyznaczone były osie i kąty obrotu np. między osnową a pasmem ścinania ? Czy zidentyfikowane je wstępnie graficznie na figurach biegunowych a następnie weryfikowano analitycznie ? Z jaką precyzją kątową wyznaczano osie i kąty obrotu ?
- Jaka jest powtarzalność wyników w badaniu odkształceń realizowanych przy użyciu energii wybuchu ?

Konkludując, wyrażam przekonanie, że praca doktorska p. mgr inż. Izabeli Mania pt. „Krystalograficzne aspekty formowania się pasm ścinania w metalach odkształcanych w zakresie dużych i ekstremalnie dużych prędkości odkształcenia” stanowi przykład rzetelnej i systematycznej pracy naukowej w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie: inżynieria materiałowa.

Przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymagania, o których mowa w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.).

Wnioskuje zatem o dopuszczenie p. mgr inż. Izabeli Mania do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Ponadto, biorąc pod uwagę wysoki poziom przeprowadzonych badań i uzyskanie kompletu oryginalnych wyników dot. pasm ścinania w metalach odkształcanych z ekstremalnymi prędkościami – wnoszę o wyróżnienie tej pracy.

Krzysztof Wienbowanli