

Prof. dr hab. inż. Małgorzata Lewandowska  
Politechnika Warszawska  
Wydział Inżynierii Materiałowej

**Recenzja rozprawy doktorskiej**

mgr inż. Izabeli Manii

pt.

**Krystalograficzne aspekty formowania się pasm ścinania w metalach odkształcanych w zakresie dużych i ekstremalnie dużych prędkości odkształcenia wykonanej pod opieką naukową prof. dr hab. inż. Henryka Paula**

**Uwagi ogólne o tematyce rozprawy**

Tworzenie pasm ścinania, mechanizm i warunki sprzyjające ich powstawaniu, wpływ na proces odkształcenia plastycznego oraz właściwości odkształcanych metali są przedmiotem dociekań naukowych od wielu lat. Znaczący wkład w rozwój wiedzy z tego zakresu wniósł promotor rozprawy Prof. Henryk Paul, a wcześniej inni znamienicy pracownicy Instytutu Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN w Krakowie, jak na przykład Prof. Jasieński. Praca jest więc dobrze zakorzeniona w bogatych tradycjach Instytutu dotyczących odkształcenia plastycznego metali. Należy jednak podkreślić, że chociaż nastąpił bardzo duży postęp w zakresie zrozumienia formowania się pasm ścinania w metalach i stopach, to jednak zagadnienie to jest dalekie od pełnego poznania i konsensusu środowiska naukowego. Dotyczy to zwłaszcza pasm ścinania tworzących się w warunkach adiabatycznych przy bardzo dużych prędkościach odkształcania, gdzie ciągle wiele pytań pozostaje bez odpowiedzi, np. rola i mechanizm rekrytalizacji dynamicznej, rola bliźniakowania mechanicznego, czy wpływ podwyższonej temperatury.

Podjęta tematyka rozprawy doktorskiej ma duże znaczenie naukowe w zakresie zdobycia nowej wiedzy na temat formowania się tzw. adiabatycznych pasm ścinania (APS) przy dużych i ekstremalnie dużych prędkościach odkształceń. Ma także walory praktyczne, bowiem APS powstają w wielu operacjach technologicznych związanych z kształtowaniem plastycznym czy oddziaływaniami balistycznymi i zazwyczaj prowadzą do znaczącego obniżenia plastyczności oraz pęknięcia materiałów. Znajomość mechanizmów ich powstawania oraz warunków sprzyjających ich powstawaniu może pozwolić na lepsze projektowanie procesów technologicznych i projektowanie materiałów odpornych na oddziaływanie balistyczne.

## **Najważniejsze wyniki i ocena merytoryczna pracy**

Recenzowana rozprawa ma układ klasyczny charakterystyczny dla rozpraw doktorskich. Część eksperymentalna poprzedzona jest Wprowadzeniem, w którym doktorantka omawia zagadnienia istotne z punktu widzenia tematyki rozprawy. Są to: formowanie się pasm ścinania przy konwencjonalnych prędkościach odkształcenia, pasma ścinania typu miedzi i mosiądzu, wpływ orientacji (stabilne, niestabilne) na formowanie pasm ścinania, tworzenie pasm ścinania w polikryształach i krystalograficzne ich aspekty, problem lokalizacji odkształcenia plastycznego i jej wpływ na zarodkowanie i propagację pęknięć, a na koniec stan wiedzy w zakresie formowania pasm ścinania przy dużych prędkościach odkształcenia. Jest to dość zwarta (liczy ok. 20 stron), ale bardzo dobrze napisana część pracy, w której doktorantka wykazała się umiejętnością syntetycznego przedstawiania omawianych oraz bardzo dobrą znajomością tematyki rozprawy doktorskiej. Doktorantka eksponuje braki w wiedzy i stawia pytania, nad którymi warto się zastanowić. Z tej części jasno wynikają cele i tezy pracy. Dobór źródeł literaturowych jest także godny pochwały. Nie zapominając o starszych pracach, cytuje wszystkie najważniejsze doniesienia z obszaru tematyki rozprawy z ostatnich lat w liczbie 100.

Celem przeprowadzonych badań było wyjaśnienie mechanizmów formowania się niestabilności plastycznego płynięcia w postaci pasm ścinania w procesie dynamicznego odkształcenia metali. W badaniach przyjęto następujące tezy:

- proces zarodkowania pasm ścinania w warunkach obciążeń dynamicznych związany jest z wystąpieniem lokalnej, lecz ściśle ukierunkowanej reorientacji sieci krystalicznej wewnątrz pasma, pozwalającej na realizację procesu ścinania w metalach wzdłuż płaszczyzn najbliższego obsadzenia atomami;
- formowanie się pasm ścinania w zakresie ekstremalnie dużych prędkości odkształcenia opisują te same mechanizmy, jakie dominują w przypadku pasm izostacyjnych formujących się w metalach odkształcanych w zakresie konwencjonalnych prędkości odkształcenia.

Należy w tym miejscu podkreślić, że postawione tezy pracy są oryginalne i nie były przedtem przedmiotem dociekań naukowych opisanych w dostępnej literaturze.

Dla udowodnienia postawionych tez zaproponowano bogaty program badawczy obejmujący badania na monokryształach metali różniących się EBU, tj. Cu, CuAl i Al. Wspólną orientacją dla tych trzech materiałów była orientacja C (112)[11-1]. Dla monokryształów Cu badano różne orientacje (stabilne i niestabilne w płaskim stanie odkształcenia). Monokryształy poddano ściskaniu w matrycy kanalikowej z wykorzystaniem wybuchu do napędzenia stempla matrycy i osiągnięcia bardzo dużych prędkości odkształcenia, co wymagało zaprojektowania specjalnego układu. Jest to oryginalna niekonwencjonalna metoda odkształcenia. Badano także próbki polikrystaliczne wykonane z Cu, Al i stopu CuZn w kontekście formowania pasm ścinania w trakcie penetracji pocisku. Wykorzystano do tego celu tzw. próbki kapeluszowe, które były odkształcane z wykorzystaniem młota opadowego.

Do charakterystyki mikrostruktury i tekstury wykorzystano szereg technik badawczych: dyfrakcja promieniowania X, EBSD, SEM, TEM, mikroskopia świetlna. Dodatkowo w celu określenia lokalnego umocnienia materiałów w pasmach ścinania wykorzystano technikę nanoindentacji. Jest to także program badawczy adekwatny do zrealizowania celu pracy i udowodnienia postawionej tezy.

Doktorantka dokonuje bardzo szczegółowej analizy mikrostruktury odkształcanych materiałów, identyfikując przy tym aktywne systemy bliźniakowania i poślizgu, obroty sieci krystalicznej, a wreszcie mechanizmy powstawania pasm ścinania. To bardzo mocna strona pracy, a przeprowadzone analizy są na bardzo wysokim poziomie. Ciekawym wątkiem były także badania lokalnego umocnienia w pasmach ścinania i odkształconej osnowie, co pozwoliło wykazać, że w pasmach ścinania nie dochodzi do osłabienia materiału wbrew niektórym postulatam. Należy także podkreślić i docenić fakt konfrontowania swoich wyników badań z doniesieniami literaturowymi, co nie jest regułą w rozprawach doktorskich (przynajmniej ja mam takie doświadczenie).

Po lekturze pracy nasunęły mi się pewne pytania czy uwagi o charakterze dyskusyjnym i prosiłabym doktorantkę o odniesienie się do nich:

1. Dlaczego w przypadku monokryształów materiałem o niskiej EBU był stop CuAl, a w przypadku polikryształów CuZn? I jaka jest EBU tego ostatniego, bo w pracy tej informacji zabrakło?
2. Polikrystaliczne próbki kapeluszowe były wycinane z blachy (Al) lub pręta (Cu i stop CuZn). Charakteryzowały się inną wielkością ziarna i teksturą. Czy takie zróżnicowanie wyjściowej mikrostruktury może mieć wpływ na formowanie się pasm ścinania?
3. Uzyskane wyniki badań wskazują, że prędkość odkształcenia ma wpływ na mechanizm odkształcenia – np. pojawianie się bliźniaków odkształcenia dla tzw. orientacji stabilnych (nie obserwowanych dla konwencjonalnych prędkości odkształcenia). Nie zaobserwowano jednak dla tych orientacji pasm ścinania. Czy zwiększenie szybkości odkształcenia może doprowadzić do ich formowania się?
4. Jakie są wskazania praktyczne dla projektowania materiałów i procesów przeróbki plastycznej wynikające z przeprowadzonych badań?

Uwagi te w żaden sposób nie obniżają wartości całej rozprawy, a mają jedynie na celu wymianę spostrzeżeń.

### **Formalna strona pracy**

Recenzowana rozprawa ma układ typowy dla rozpraw doktorskich i obejmuje stan zagadnienia, materiał i metodykę badań, cel i tezę pracy, wyniki badań wraz z dyskusją oraz wnioski. Praca jest napisana z dużą starannością, poprawnym językiem polskim i czyta się ją przyjemnie. Z drobnych uchybień zwróciłabym uwagę na używanie słowa krystalit w

odniesieniu do próbek monokrystalicznych. Słowa tego używa się raczej do określenia małego obszaru koherentnie rozpraszającego promieniowanie rtg. W przypadku makroskopowych próbek monokrystalicznych właściwszym słowem jest kryształ. Nie jestem także zwolenniczką używania słowa charakteryzacja w odniesieniu do mikrostruktury (czy właściwości). Charakteryzacja ma miejsce w teatrze lub na planie filmowym. Wydaje mi się, że lepiej używać sformułowania charakterystyka mikrostruktury. Doktorantka nie przywiązuje także wagi do stawiania przecinków (w wielu miejscach ich bardzo brakuje).

Praca jest dobrze opracowana pod względem edycyjnym (formatowanie jest spójne, a całość przejrzysta i czytelna), na pochwałę zasługuje materiał ilustracyjny w postaci zdjęć mikroskopowych i map EBSD, które są bardzo dobrej jakości, a wykresy są czytelne.

### **Opinia końcowa**

W opinii końcowej chciałabym stwierdzić, że uważam recenzowaną pracę za bardzo wartościową pod względem naukowym, podejmującą nowe wyzwania i odkrywającą nowe fakty naukowe i je interpretującą. Doktorantka przedstawiła oryginalne rozwiązania problemów badawczych i wniosła wkład w zrozumienie mechanizmów formowania adiabatycznych pasm ścinania. Opanowała także szereg metod badawczych materiałów. Z pełnym przekonaniem mogę więc stwierdzić, że rozprawa doktorska pt. **„Krystalograficzne aspekty formowania się pasm ścinania w metalach odkształcanych w zakresie dużych i ekstremalnie dużych prędkości odkształcenia”** spełnia wszystkie ustawowe warunki kwalifikujące ją jako rozprawę doktorską, a mgr inż. Izabela Mania zasługuje na stopień doktora. Wnoszę więc o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Warszawa, 13 lutego 2023