

Kraków, dnia 2 czerwca, 2007 r.

Prof. nzw. dr hab. inż. Marek Szczerba  
Katedra Struktury i Mechaniki Ciała Stałego  
Akademia Górniczo-Hutnicza  
Al. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Maja  
p.t. „Wpływ kierunku wstępnego odkształcenia na proces magazynowania energii  
w polikryształach”

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska jest doświadczalną pracą naukową o charakterze poznawczym i interdyscyplinarnym, której tematykę ulokować można na styku doświadczalnej mechaniki ciała stałego i nauki o materiałach. Rozprawa doktorska zawiera 99 stron tekstu wraz z 56 rysunkami, 61 wzorami i 3 tabelami, oraz cytuje 83 pozycje fachowej literatury przedmiotu. Układ pracy jest przejrzysty oraz właściwie dobrane są ilościowe proporcje pomiędzy częścią opisującą stan zagadnienia a częścią pracy związaną z badaniami własnymi. Mankamentem jest brak krótkiego rozdziału pracy, w którym to czytelnik mógłby zapoznać się z wyjaśnieniami autora uzasadniającymi wybór celów pracy lub stawianych głównych tez rozprawy. W zamian za to autor już we wstępie pracy sugeruje, iż (cytat): „ Aby świadomie sterować mechanizmami deformacji plastycznej poprzez zmianę kierunku odkształcenia, należy znaleźć odpowiedzi na następujące pytania: Jak wpływa zmiana kierunku odkształcenia na bilans energii podczas deformacji? Jakie zjawiska mikroskopowe są odpowiedzialne za ten wpływ?”. W kolejnym akapicie autor konkluduje (cytat): „Niniejsza rozprawa poszukuje

odpowiedzi na tak postawione pytania. Jej celem jest zbadanie wpływu kierunku wstępnego odkształcenia na proces magazynowania energii podczas jednoosiowego rozciągania materiałów polikrystalicznych oraz jego interpretacja na podstawie obserwacji zmian mikrostruktury". Z kolei w innym miejscu rozprawy, na stronie 47 autor wskazuje, że (cytat) „Jednym z aspektów niniejszej rozprawy jest zbadanie, czy genezą maksimum zdolności magazynowania energii, występującego w początkowym stadium deformacji plastycznej materiałów polikrystalicznych jest pole naprężeń powstałych w wyniku niekompatybilnych odkształceń sąsiadujących ze sobą ziaren". Z uwagi na fakt, iż w tekście rozprawy związanym z interpretacją wyników badań autor rzeczywiście poświęca dużo uwagi temu aspektowi rozprawy, uznaję zatem, iż obok tych sformułowanych we wstępie rozprawy stanowi on jeszcze jeden wyznaczony przez autora cel do osiągnięcia. Po lekturze tej rozprawy recenzentowi nasuwa się jeszcze uwaga wstępna, co do tytułu rozprawy, który jest zbyt ogólny, mianowicie, z uwagi na fakt, iż badania przeprowadzono tylko na jednym materiale polikrystalicznym, tzn. na poddanej rozciąganiu stali 316L, stosowniejszym tematem rozprawy byłby np. „Wpływ kierunku wstępnego odkształcenia na proces magazynowania energii w rozciąganej stali 316L”.

Wybór tematyki badawczej rozprawy doktorskiej jest logiczną konsekwencją i kontynuacją prac prowadzonych przez promotora rozprawy, Panią Docent Wierę Oliferuk, które to prace związane są z oryginalną metodą wyznaczania energii zmagazynowanej w odkształcanym plastycznie materiale, opracowaną około dwadzieścia lat temu w IPPT PAN. Uważam, za słuszne i zasadne, że kontynuacja tych prac posiada w niniejszej rozprawie wyraźnie interdyscyplinarny charakter, wymagający od autora podstawowej wiedzy i umiejętności posługiwania się zarówno metodami badawczymi doświadczalnej mechaniki ciała stałego jak i zaawansowanymi metodami badań struktury materiałów. Przepuszczalnie w wyborze tematyki badawczej rozprawy nie bez znaczenia był fakt ukończenia przez autora studiów wyższych na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej.

Ten interdyscyplinarny charakter pracy znajduje bezpośrednie odzwierciedlenie w doborze diskutowanych problemów w kolejnych jej rozdziałach.

I tak, w rozdziale 2 autor szczegółowo zaznajamia czytelnika z pojęciem energii zmagazynowanej oraz słusznie decyduje się na wybór konkretnego parametru ( $de_s/dw_p$ ), w celu ilościowego opisu zdolności materiału do magazynowania energii podczas odkształcenia plastycznego. W rozdziale 3 na tle metody wyznaczania energii zmagazynowanej zastosowanej w niniejszej pracy dokonany jest przegląd innych alternatywnych metod doświadczalnych. Z aprobatą przyjmuję fakt, iż przeprowadzona w rozdziale 4 dyskusja nie ograniczyła się tylko do wykazania zalet stosowanej w pracy metody, lecz również do uświadomienia istotnych jej ograniczeń, co skutkowało w pełni racjonalnym doбором materiału do badań (stal 316L) oraz warunków przeprowadzania próby rozciągania (zakres odkształcenia plastycznego, temperatura i prędkość odkształcenia). W tym miejscu recenzji chciałbym podzielić się refleksją, iż ponieważ pryncypia tej metody zostały już opublikowane w prestiżowych czasopismach naukowych (np. w pracy W. Oliferuk, S.P. Gadaj, M.W. Grabski, *Materials Science and Engineering*, 70(1985)131), a zatem zostały poddane opinii międzynarodowego środowiska specjalistów, to uważam za niekonieczne moje szczegółowe odniesienie się jeszcze raz, co do poprawności jej zastosowania w omawianym problemie naukowo-badawczym. Z kolei w rozdziale 5 w oparciu o dosyć bogatą literaturę przedmiotu autor przeprowadza dyskusję nad mikrostrukturalnymi aspektami procesu magazynowania energii w odkształcanym materiale. Uważam, że dyskusja dotycząca jakościowej korelacji pomiędzy podstawowymi elementami mikrostruktury dyslokacyjnej a zdolnością materiału do akumulacji energii odkształcenia plastycznego została przeprowadzona poprawnie, aczkolwiek w mojej opinii zabrakło w niej odniesienia do takich klasycznych prac jak Teoria Dyslokacji Hirtha i Lothe. Może dlatego, w podrozdziale 5.2.1 p.t. „Podstawowe układy dyslokacyjne i ich energia”, do opisu energii układów dyslokacyjnych wprowadzone są głównie pojęcia stosowane przez grupę specjalistów skupionych wokół prac Kuhlman-Wilsdorf (cytowane w rozprawie prace w pozycjach 57-63). Chciałbym w tym miejscu prosić autora rozprawy o poszerzony komentarz do zdania ze strony 38 (cytat) „W układach tych, w wyniku nakładania się pól naprężeń sąsiadujących ze sobą dyslokacji, zmienia się wartość energii przypadającej na jednostkę długości linii dyslokacyjnej”.

Z lektury rozdziałów pracy związanych z badaniami własnymi wynika, iż głównym osiągnięciem pracy jest z jednej strony dostarczenie danych o anizotropii własności mechanicznej materiału (polikrystaliczna stal 316L), jaką jest zdolność do magazynowania energii odkształcenia plastycznego, a z drugiej strony, próba strukturalnej interpretacji jej anizotropowego charakteru w oparciu o ilościowe badania zjawiska formowania linii poślizgu wewnątrz wybranej populacji ziaren polikrystalicznej stali 316L (metoda mikroskopii optycznej) oraz jakościowe obserwacje podstawowych elementów mikrostruktury dyslokacyjnej przeprowadzone metodą mikroskopii elektronowej. Uzyskane w pracy wyniki badań wskazują, że po pierwsze, wstępnie odkształcona polikrystaliczna stal 316L posiada różną zdolność magazynowania energii w zależności od kierunku wtórnej próby rozciągania; po drugie, obserwowana anizotropia zdolności magazynowania energii nie jest bezpośrednio związana z populacją ziaren, w których występuje dominacja tylko jednej lub więcej niż tylko jednej rodziny systemów poślizgu (zbliżone wartości parametru  $de/dw_p$  dla próbek L i T i istotnie różne wartości parametru  $\eta$  z tabeli 3 (odpowiednio 1.9 i 8.7); istotnie różne wartości parametru  $de/dw_p$  dla próbek T i S a zbliżone wartości parametru  $\eta$  z tabeli 3 (odpowiednio 8.7 i 9.4). W oparciu o obserwacje elektrono-mikroskopowe autor pracy stwierdza, że różnice poziomów zdolności magazynowania energii np. dla próbek S i T są związane z obecnością mikropasm ścinania, które tylko w przypadku próbki T są zdolne do propagacji w poprzek granicy ziarna. Recenzent oczekuje jednak od autora rozprawy wyjaśnień związanych z tym dodatkowym kryterium strukturalnym, zwłaszcza że, zamieszczone dyfrakcje elektronowe na rysunku 46 (próbka S) oraz te z rysunków 49-52 dla próbki T wyraźnie sugerują, że omawiane mikropasma ścinania są w istocie rzeczy mikrobliźniakami odkształcenia plastycznego, które w takim materiale jak stal 316L można stosunkowo łatwo generować z uwagi na niską energię błędu ułożenia. W tej fazie dyskusji nad głównymi osiągnięciami pracy recenzent wnioskuje również o poszerzony komentarz autora, co do odpowiedzi na następujące pytanie: w jakim stopniu anizotropia zdolności magazynowania energii jest generowana stosunkowo niewielkim ( $\epsilon^p=0.068$ ) wstępnym odkształceniem plastycznym, a w jakim stopniu

mogłaby być dziedziczona poprzez początkową teksturę materiału? W podsumowaniu dyskusji nad głównymi osiągnięciami autora pracy recenzent nie wnosi zastrzeżeń, co do strukturalnej interpretacji obserwowanych w początkowej fazie wtórnego rozciągania próbek S i T maksimów na wykresie zależności parametru  $de/dw_p$  od wielkości odkształcenia plastycznego (możliwy wpływ dyslokacji geometrycznie niezbędnych).

Przechodząc do szczegółowych uwag merytorycznych chciałbym w porządku chronologicznym zarówno w formie komentarza jak i pytań do autora wskazać na kilka wybranych polemicznych stwierdzeń czy też informacji, na które natknąłem się studiując lekturę niniejszej rozprawy doktorskiej.

- (1) - w tabeli 2 na stronie 50 nie podano jednostek fizycznych dla niektórych zamieszczonych tam własności fizycznych stali 316L.
- (2) - struktura wyjściowa badanej stali 316L charakteryzuje się zgodnie z rysunkiem 17 dużą ilością bliźniaków wyżarzania. Czy bliźniaki wyżarzania mogą mieć wpływ na uzyskane wyniki badań?
- (3) - na rysunku 26 błędnie zaznaczono poziom granicy plastyczności dla próbki-matki (435 MPa a powinno być około 285 MPa),
- (4) - wykres z rysunku 27 pozwala według autora na precyzyjne wyznaczenie wartości granicy plastyczności badanych próbek wtórnych. Proszę o podanie tych wartości przy uwzględnieniu rozdzielczości metody pomiarowej.

W podsumowaniu niniejszej recenzji chcę zaznaczyć, że rezygnuję z przedstawienia uwag wyjątkowo szczegółowych o charakterze edytorskim, które nie

posiadają żadnego znaczenia merytorycznego, i które mogą być zawsze usunięte na etapie procedury publikacyjnej.

W końcu, stwierdzam, że uwagi, które przedstawiłem nie naruszają w istocie mojej pozytywnej opinii o całokształcie tej ambitnej pracy i mają za zadanie wskazać doktorantowi takie rozszerzenie jego projektów naukowych w przyszłości, które umożliwi uzyskanie jeszcze pełniejszych rozwiązań rzeczywiście trudnych zagadnień naukowych, jakie postawił on przed sobą w niniejszej rozprawie.

Wniosek końcowy.

Na podstawie pozytywnej oceny przedłożonej pracy doktorskiej, jak również mojej znajomości dotychczasowego dorobku oraz sylwetki naukowej doktoranta stwierdzam, że zgodnie z obowiązującymi przepisami Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym, Pan mgr inż. Michał Maj spełnia warunki wymagane do uzyskania stopnia doktora nauk technicznych i stawiam wniosek o dopuszczenie go do publicznej obrony przed stosowną Radą Naukową IPPT PAN.

