

Warszawa, dnia 11.04.2007

Doc. dr hab. inż. Zbigniew Kowalewski
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
00-049 Warszawa, ul. Świętokrzyska 21

RECENZJA
pracy doktorskiej mgr inż. Michała Maja
pt.
Wpływ kierunku wstępnego odkształcenia na proces magazynowania
energii w polikryształach

wykonana na wniosek Rady Naukowej IPPT PAN

1. Treść i zakres rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy problemów związanych z wpływem wstępnej deformacji na proces magazynowania energii w polikryształach. Praca podzielona została na dziewięć rozdziałów zawierających łącznie 56 rysunków, spis treści oraz wykaz literatury obejmujący 83 pozycje. Cała rozprawa zajmuje w sumie 99 stron.

W części wprowadzającej rozprawy Doktorant podaje, że jej celem jest zbadanie wpływu kierunku wstępnej deformacji plastycznej na proces magazynowania energii podczas jednoosiowego rozciągania materiałów polikrystalicznych oraz wyjaśnienie jak wpływa zmiana kierunku odkształcenia na bilans energii podczas deformacji plastycznej i jakie zjawiska mikroskopowe temu towarzyszą.

W rozdziale drugim Doktorant definiuje zasadnicze pojęcia związane z przemianą energii w czasie prowadzenia deformacji plastycznej.

Rozdział trzeci obejmuje dość obszerny przegląd metod wyznaczania energii zmagazynowanej.

W rozdziale czwartym omówiono metodę wyznaczania energii zmagazynowanej opracowanej w IPPT PAN, którą wykorzystywano w recenzowanej rozprawie doktorskiej. Metodę tę przyjęto z uwagi na jej możliwości wyznaczania energii w dowolnym punkcie procesu bez potrzeby jego przerywania i dodatkowo bez konieczności stosowania kalorymetru. Wykorzystywaną metodę można tylko stosować w zakresie deformacji makroskopowo jednorodnej. Do pomiaru rozkładu temperatury badanej powierzchni próbek zastosowano system termowizyjny AGA 680, który zmodernizowano przez wbudowanie do systemu przetwornika analogowo-cyfrowego. Dało to możliwość wzmocnienia sygnału z

wyjścia detektora i jednocześnie zapewniło bezpośrednie zbieranie danych i ich obróbkę przy pomocy dostępnego oprogramowania komputerowego.

W rozdziale piątym omówiono charakterystykę występujących rodzajów defektów sieci krystalicznej i ich znaczenie w procesie magazynowania energii. Ponieważ defekty w strukturze, ich charakter i liczba, wpływają na przebieg wielu procesów – ze względu na właściwości geometryczne - podzielono je na punktowe, liniowe i powierzchniowe. Przeprowadzona dyskusja wspomnianych efektów doprowadziła do konkluzji mówiącej, że oddziaływanie defektów sieci krystalicznej powoduje nakładanie się pól naprężeń z nimi związanych. W rozprawie doktorskiej usiłuje się zbadać przyczynę występowania maksimum zdolności magazynowania energii, występującego na początku deformacji plastycznej materiałów i przeanalizowanie jego możliwego związku z polem naprężeń, powstałych w wyniku odkształcenia sąsiadujących ze sobą ziaren. Założenie to przedyskutowano na podstawie badań zjawiska poślizgu oraz obserwacji obszarów przy granicy ziarna. Na tej podstawie stwierdzono, że na maksimum zdolności magazynowania energii w początkowym stadium odkształcenia plastycznego mają wpływ dyslokacje geometryczne niezbędne w celu akomodacji plastycznej naprężeń na skutek niekompatybilnych poślizgów. Jako główny cel pracy Doktorant wskazał wyznaczanie energii zmagazynowanej w próbkach poddanych wstępnej deformacji plastycznej i analizę zmian mikrostruktury.

Przeprowadzone badania doświadczalne omówiono w rozdziale szóstym. Wykonano je dla stali austenitycznej 316L charakteryzującej się dużą opornością właściwą, niską przewodnością elektryczną i cieplną. Próbki do badań wycinano z arkusza blachy obrabianej cieplnie. W badaniach stosowano trzy rodzaje próbek różniące się kierunkiem wstępnej deformacji. Wykonano również próbki z materiału w stanie nieodkształconym, które stanowiły punkt odniesienia w stosunku do próbek z historią deformacji. Dla wszystkich rozciąganych próbek wyznaczono energię zmagazynowaną. Próby rozciągania prowadzono na nowoczesnej maszynie wytrzymałościowej firmy MTS. Z kolei określanie charakterystyk termomechanicznych i symulacje procesu nagrzewania próbki prowadzono z wykorzystaniem własnych układów pomiarowych, wcześniej już zaprojektowanych i zweryfikowanych pod względem poprawności ich działania. Rejestrację obrazów termicznych, siły i wydłużenia dokonywano z częstotliwością 10 Hz. Dla wszystkich badanych próbek określono obciążenia, przemieszczenia i zmiany temperatury w zależności od czasu.

Istotną część pracy stanowią badania mikroskopowe przedstawione w rozdziale siódmym. Prowadzono je przy użyciu mikroskopu optycznego pracującego w kontraście interferencyjnym oraz transmisyjnego mikroskopu elektronowego. Przeprowadzone badania

mikroskopowe umożliwiły obserwację efektów powstających podczas ostatniego etapu odkształcenia próbek oraz zbadanie ewolucji struktur dyslokacyjnych towarzyszącej zmianom ścieżki odkształcenia. Zawarta w rozprawie dokumentacja fotograficzna obejmuje 29 zdjęć z mikrostrukturami badanych próbek.

Rozdział ósmy poświęcony jest dyskusji otrzymanych wyników z wykonanych badań w skali makro, mezo i mikro. Na podstawie wykresów krzywych naprężenie – odkształcenie oraz zależności zmiany temperatury w funkcji naprężenia i w funkcji odkształcenia Doktorant zaobserwował obniżenie wartości granicy plastyczności dla tych próbek, w których zmieniano kierunek rozciągania. Ponadto zauważył, że zmiana kierunku przyłożonego obciążenia powoduje zmianę dominującego systemu poślizgu.

Autor pracy dokonał interpretację jakościową dotyczącą zjawiska poślizgu poparł analizą ilościową, z której wynika między innymi, że zmiana kierunku rozciągania wywołuje kilkukrotny wzrost udziału ziaren, w których występuje więcej niż jedna rodzina pasm poślizgu. W oparciu o szczegółową analizę dyfrakcyjną identyfikującą orientację krystalograficzną badanych ziaren i na podstawie obserwacji zmian gęstości i konfiguracji układów dyslokacyjnych przeprowadzono szczegółową interpretację otrzymanych wyników bilansu energii. Wydaje się, że w tym fragmencie pracy, stanowiącym niewątpliwą jej zaletę, powinno się ostrożnie używać sformułowania "korelacja". Uwaga ta związana jest z faktem, iż na przykład pomimo przeprowadzenia ilościowych badań mikrostruktury traktujących o udziale ziaren, w których występuje więcej niż jedna rodzina pasm poślizgu i pomimo przeprowadzenia badań w skalach: makro mezo i mikro nie dokonano analizy korelacyjnej sensu stricto. W analizie takiej wymagane jest bowiem podanie kryterium istotności obliczonego na podstawie określonej liczby pomiarów odniesionego do teoretycznego kryterium istotności. Obie wielkości wynikają z ogólnie przyjętych analiz korelacyjnych przeprowadzanych w oparciu o metody statystyczne. Nie umniejsza to jednak wartości naukowo-poznawczej tej części pracy natomiast bezpieczniej byłoby, zdaniem recenzenta, podkreślić, że analiza owa ma charakter wnikliwej analizy porównawczej skupiającej się na mechanizmach zjawisk zachodzących podczas odkształcania polikryształów.

W przeprowadzonej analizie wyników Doktorant nie stawia konkretnych wniosków, a najczęściej posługuje się terminem „przypuszcza się”, co prowadzi do wrażenia, że problem nie został wyczerpująco zbadany. Dla przykładu na stronie 87 czytamy „Można przypuszczać, że skutkiem oddziaływania dyslokacji poruszającej się w nowym systemie poślizgu z dyslokacjami powstałymi podczas odkształcenia wstępnego, jest intensywna anihilacja dyslokacji, będąca procesem silnie dyssypacyjnym”. Na stronie 88 mamy zdanie:

„Przypuszcza się, że uruchomienie dodatkowego systemu poślizgu na początku odkształcenia, tuż po zmianie kierunku rozciągania jest rezultatem akomodacji naprężeń dalekiego zasięgu powstających pomiędzy sąsiednimi ziarnami polikryształu, na skutek niekompatybilnych poślizgów w ziarnach o różnej orientacji”. Dalej na stronie 89: „Przypuszcza się, że różnica poziomów zdolności magazynowania energii pomiędzy końcem krzywej ... „. Kolejne przykłady można wskazać na stronie 90, cytując: „Przypuszcza się, że jest to spowodowane koniecznością akomodacji, generowanej pomiędzy sąsiednimi ziarnami, na skutek zmiany kierunku przyłożonego obciążenia” i dalej „Można przypuszczać, że jest to wynikiem akomodacji plastycznej naprężeń powstających na skutek niekompatybilnych odkształceń poszczególnych ziaren,”.

Rozprawa zakończona jest rozdziałem dziewiątym zawierającym uwagi i wnioski końcowe.

2. Ocena merytoryczna rozprawy

Rozprawa dotyczy bardzo istotnego zagadnienia badań zjawisk występujących podczas rozciągania materiału wstępnie poddanego znanej deformacji ze szczególnym uwzględnieniem wpływu tej deformacji na proces magazynowania energii w polikryształach. Jest to problem, któremu w literaturze światowej stale poświęca się wiele miejsca i z tego powodu uważam, że wybór tematyki rozprawy jest trafny. Praca ma głównie charakter doświadczalny. Na podkreślenie zasługuje podjęta próba skorelowania wyników z badań przeprowadzonych na poziomie makro-, mezo- i mikroskopowym. W moim przekonaniu szczególnie wykonane badania mikroskopowe wnoszą wiele inspirujących możliwości interpretacyjnych zachodzących zjawisk i stanowią materiał, który można by wykorzystywać przy opracowywaniu efektywnych modeli teoretycznych. Niestety Autor pracy nie podejmuje tutaj żadnych działań w tym zakresie.

Pewien niedosyt odczuwa się wskutek braku dyskusji przedstawionych w rozprawie problemów w aspekcie zastosowań otrzymanych wyników w praktyce. Niedosyt ten pogłębia także fakt realizacji badań tylko dla jednego materiału. Dysponując stosunkowo skromnymi danymi doświadczalnymi nic dziwnego, że w wielu wspomnianych już wcześniej miejscach pracy Doktorant stosuje we wnioskowaniu tryb przypuszczający.

Za główny wkład Doktoranta do rozwoju mechaniki uważam oryginalne podejście do badań polegające na pomyśle skorelowania wyników z testów wykonanych w różnych skalach. Jest to podejście cieszące się coraz większym uznaniem ze względu na możliwości

uzyskiwania nowych spostrzeżeń i wzajemnych związków pomiędzy parametrami mikro i makrostrukturalnymi, mimo że stosuje się metody badawcze powszechnie znane.

Rozprawa napisana jest starannie i w dobrym językowym stylu oraz praktycznie bez błędów o charakterze edytorskim. Nieliczne literówki, czy brak znaków interpunkcyjnych zostały odnotowane w otrzymanym egzemplarzu pracy.

Ujemną stroną opiniowanej rozprawy jest jej słaba przejrzystość i pewne braki w strukturze. Po pierwsze, co moim zdaniem jest chyba najważniejsze w rozprawie nie ma rozdziału, w którym Doktorant w sposób jasny przedstawia tezy swojej pracy. Są one oczywiście w pracy wymienione, ale w sposób zawołowany i w wielu jej miejscach. Tymczasem wystarczyłoby zrobić to w oddzielnym punkcie odpowiednio zatytułowanym. W rozprawie wyraźnie odczuwa się brak spisu stosowanych oznaczeń. Na pewno przydałoby się jej streszczenie. Wiele do życzenia pozostawia także spis publikacji, nie tylko ze względu na fakt braku alfabetycznego jego uporządkowania względem nazwisk autorów, ale głównie z powodu braku tytułów cytowanych publikacji.

Mimo ogólnej pozytywnej oceny rozprawy dają się jednak w niej zauważyć pewne braki, potknięcia i słabsze jej strony, które w sposób szczegółowy omówiono w następnym punkcie niniejszej recenzji.

3. Uwagi szczegółowe

Na wstępie pracy, jak już to zaznaczono w drugim punkcie niniejszej recenzji, brak jest precyzyjnego określenia tezy rozprawy, jej celu i zakresu. Informacje te pojawiają się dopiero w kolejnych rozdziałach. Utrudnia to określenie podstawowych dążeń Doktoranta.

Rozdział wprowadzający w problematykę rozprawy moim zdaniem jest mało treściwy. Powinien on zawierać założenia do realizacji tematu, krótko przedstawiać, jaki jest stan aktualnej wiedzy oraz informować skąd wynika potrzeba prowadzenia proponowanych badań. Dobrze jest również, jeśli w takim rozdziale wprowadzającym znajduje się krótka charakterystyka tematyki omawianej w poszczególnych rozdziałach.

Jak już wcześniej wspomniano, w rozprawie odczuwa się wyraźny brak zbiorczego zestawienia używanych oznaczeń. Niektóre z wielkości oznaczane są różnymi symbolami, jak na przykład energia zmagazynowania oznaczana jest w jednych miejscach jako małe e_s , a gdzie indziej duże E_s . W niektórych wzorach pojawiają się wielkości o dziwnych indeksach np. E_{hkl} , v_{hkl} . Przydałby się tutaj opis wyjaśniający tę sprawę.

Zawarty w trzecim rozdziale opis metod wyznaczania energii zmagazynowanej uważam za zbyt skromny. Wskazane byłoby tutaj szerzej omówić stosowane urządzenia wraz z podaniem ich schematów na rysunkach. Równie oszczędny opis zawiera rozdział piąty, punkty 5.1.1., 5.1.2., 5.1.3., w których Doktorant prezentuje podstawowe defekty mikrostrukturalne. Aż prosi się w wymienionych punktach zamieszczenie schematów ilustrujących te defekty.

Rysunki 11 i 12 przedstawiające typy spotykanych defektów strukturalnych są mało informacyjne. Na zamieszczonych zdjęciach przydałoby się w kółkach ująć miejsca występowania opisywanych defektów.

Praca pisana jest w języku polskim, dlatego dziwić może fakt stosowania w niektórych rysunkach opisów w języku angielskim (na przykład rysunki 15 i 16). Innym mankamentem tych rysunków jest fakt ich skanowania, przez co jakość ich jest słaba.

Opracowanie wyników z prób rozciągania próbek małych nie jest wyczerpujące i pozostawia wiele do życzenia. Dlaczego nie podano opracowania tych wyników w formie zawierającej podstawowe parametry naprężeniowe i odkształceniowe statycznych prób rozciągania? Ponadto, jeśli próby powtarzano sześciokrotnie dla każdego kierunku w stosunku do deformacji wstępnej, to dlaczego nie ma rzetelnej informacji na temat rozrzutów wyników dotyczących modułu Younga, granicy plastyczności, granicy wytrzymałości doraźnej i innych. Takie dane uwiarygodniają prowadzone badania, bez nich trudno czytelnikowi rozprawy ocenić dokładność bardziej zaawansowanych badań, takich jak pomiar energii zmagazynowanej. Dziwnie wyglądają również zestawienia wyników z prób rozciągania na rys. 25 i 26. Dlaczego nie zastosowano jednolitej skali tych rysunków, przez co wprost uzyskałoby się porównanie krzywej rozciągania materiału odniesienia (bez deformacji wstępnej) z krzywymi rozciągania materiału wstępnie odkształconego?

W niektórych miejscach pracy Doktorant prezentuje bardzo ogólnikowe podejście do opisywanych problemów, co charakteryzuje wspomniany już brak co najmniej kilku rysunków oraz braki w powołaniach się na pozycje umieszczone w spisie publikacji. Już na samym początku pracy mamy przykład, cytuję: „badaniom procesu magazynowania energii podczas deformacji plastycznej poświęcono wiele prac” i wymienia się tylko sześć pozycji. W innych miejscach jest znacznie gorzej, ponieważ Doktorant nie powołuje się na żadną publikację, np. strona 87, wiersz 8 od góry; strona 88 wiersze 10 i 11 od dołu.

Przy okazji prowadzenia badań doświadczalnych warto jest zawsze poświęcić trochę uwagi tzw. „kuchni” eksperymentu. W prezentowanej pracy szczegóły eksperymentu są podane w sposób zbyt skromny. Brak jest szczegółowych informacji dotyczących

zamocowania próbek w uchwytach, rodzaju ekstensometru do pomiaru odkształceń, szczegółów związanych z dokładnością pomiarów, itp. Podanie tego rodzaju szczegółów wpływa na uwiarygodnienie uzyskiwanych wyników doświadczalnych nawet przy braku ich obróbki statystycznej.

Wnikliwsza lektura rozprawy pokazuje szereg niedociągnięć o charakterze terminologicznym i w kilku przypadkach edycyjnym. W tekst rozprawy wkradły się drobne literówki, str. 3 wiersz 9, str. 43 rysunek 14 oznaczony jest jako 17, str. 58, nieuporządkowane odwołanie do spisu publikacji, na stronie 4 jest [7, 2] zamiast [2, 7], oraz potknięcia terminologiczne, np. na stronie 18 w tekście dotyczącym prezentowanego rysunku Doktorant pisze o materiale sprężysto-idealnie plastycznym, a na rysunku jest zamieszczona krzywa rozciągania materiału sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem, na stronie 61 oznaczono naprężenie grecką literą τ i nazwano je jako naprężenie Kirchhoffa, jak to rozumieć?

4. Wniosek końcowy

Mgr inż. Michał Maj jest Autorem rozprawy doktorskiej wnoszącej wkład w rozwój mechaniki ciała stałego. Praca dała odpowiedzi na pytania, jak wpływa zmiana kierunku odkształcenia na bilans energii podczas deformacji, oraz jakie zjawiska mikroskopowe są za to odpowiedzialne. Tematyka pracy stanowi poważne aktualne zagadnienie naukowe. Doktorant przy jego rozwiązaniu wykazał się umiejętnością prowadzenia prac naukowo-badawczych, zwłaszcza w zakresie badań mikrostrukturalnych. Zamieszczone w niniejszej recenzji uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny, bądź to dotyczą strony formalnej i nie zmniejszają w sposób istotny wartości rozprawy.

Rozprawa doktorska mgr inż. Michała Maja spełnia zatem wymagania ustawy o tytule naukowym i stopniach naukowych, dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Michała Maja do jej publicznej obrony.

Kowalewski