

Prof. dr hab. inż. Jarosław Mizera
Wydział Inżynierii Materiałowej
Politechnika Warszawska

Warszawa, 1 września 2023 r.

OCENA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Sandra MUSIAŁ

„Analiza procesu przemiany energii podczas deformacji plastycznej materiałów
polikrystalicznych”

Uwagi ogólne

Opiniowana praca powstała pod opieką prof. dr hab. inż. Wiery Oliferuk w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie. W zespole Pani Profesor w Zakładzie Mechaniki Materiałów od lat prowadzone są badania podstawowe w zakresie fizycznych aspektów odkształcenia plastycznego materiałów metalicznych. Recenzowana praca wpisuje się doskonale w nurt prac badawczych tego Zakładu.

Badania nad wyznaczeniem energii zmagazynowanej są interesujące zarówno z punktu widzenia mechaniki jak i inżynierii materiałowej, gdyż pomagają zrozumieć przebieg procesu deformacji oraz mechanizmy procesów zdrowienia i rekrytalizacji. Badania dotyczące energetycznego aspektu deformacji plastycznej prowadzone są od dziesięcioleci, ale zagadnienie to jest cały czas aktualne i ciągle brakuje prac eksperymentalnych i numerycznych, które w kompleksowy sposób podchodziłyby do tematu przemiany energii w zakresie lokalizacji odkształcenia plastycznego. Aby w pełni opisać to, co się dzieje z materiałem w trakcie lokalizacji, należałoby wyznaczyć i przedstawić ewolucje rozkładów wszystkich składników bilansu energii oraz uzyskane rezultaty odnieść do zmian mikrostruktury badanego materiału.

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Sandry Musiał dotyczy analizy procesu przemiany energii podczas odkształcania materiałów polikrystalicznych. W procesie deformacji plastycznej część energii mechanicznej dostarczanej do materiału magazynuje się w nim, zwiększając jego energię wewnętrzną, a reszta ulega rozproszeniu w postaci ciepła. Doktorantka opracowała eksperymentalną metodykę wyznaczania powierzchniowych rozkładów składników bilansu energii, tj. pracy odkształcenia plastycznego oraz energii dyssypowanej w postaci ciepła w całym zakresie sprężysto-plastycznej deformacji stali austenitycznej 310S. Wykorzystała do tego m.in. cyfrową korelację obrazów, termografię podczerwieni oraz elementy teorii przepływu ciepła i plastyczności. Rozprawa zawiera również część obliczeniową dotyczącą wyznaczania rozkładu naprężeń i źródeł ciepła.

Autorka pracy wykazała, że zdolność magazynowania energii nie jest stała podczas deformacji plastycznej. Ponadto, wyznaczyła zmianę lokalnej orientacji krystalograficznej podczas jednoosiowego rozciągania badanej stali, za pomocą metody dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych i skorelowała ją ze zmianami energii.

Recenzowana praca dotyczy, moim zdaniem, zagadnień o istotnej wartości poznawczej. Podjęto w niej wciąż aktualny wątek badawczy w inżynierii materiałowej związany z analizą energetycznego aspektu przebiegu deformacji plastycznej polikrystałów.

Uwagi redakcyjne

Recenzowana praca ma klasyczny układ, jest kompletna i napisana w sposób komunikatywny. Autorka wyodrębniła w niej kilka części. Na wstępie przedstawiła analizę aktualnego stanu wiedzy w obrębie tematyki dysertacji po czym sformułowała wynikający z tego przeglądu cel pracy. Należy zwrócić uwagę na bardzo dobrze dokonany przegląd aktualnego stanu wiedzy – krótki i zawierający najistotniejsze informacje w obszarze tematycznym dysertacji. Dalsze rozdziały zapoznają czytelnika z koncepcją realizacji celów pracy i metodyką badań. Następnie Doktorantka scharakteryzowała badany materiał, przygotowanie próbek, układ pomiarowy oraz

parametry stosowane w analizie cyfrowej korelacja obrazów i termografii podczerwieni. Najistotniejsza część pracy dotyczy prezentacji i dyskusji otrzymanych wyników badań eksperymentalnych oraz obliczeń numerycznych. Ostatni rozdział zawiera podsumowanie uzyskanych rezultatów oraz wynikające z nich wnioski.

Dysertację czyta się z dużym zainteresowaniem tym bardziej, że jest ona napisana bardzo dobrym językiem i praktycznie nie zawiera błędów redakcyjnych. Na uwagę zasługują trafnie dobrane powołania literaturowe.

Teza, cel i zakres pracy

Z przeprowadzonej przez Doktorantkę krytycznej analizy aktualnego stanu wiedzy związanego z tematem pracy wynika, że „brakuje pracy, która w kompleksowy sposób podchodziłaby do tematu przemiany energii w zakresie lokalizacji odkształcenia plastycznego. Żeby w pełni opisać to, co się dzieje z materiałem w trakcie lokalizacji, należałoby wyznaczyć i przedstawić ewolucje rozkładów wszystkich składników bilansu energii oraz uzyskane rezultaty odnieść do ewolucji mikrostruktury badanego materiału”.

Fakt ten był bezpośrednią inspiracją Autorki rozprawy do sformułowania celu pracy i zadań badawczych. Doktorantka za cel badawczy postawiła analizę procesu przemiany energii podczas deformacji plastycznej stali austenitycznej (w zakresie deformacji makroskopowo i mikroskopowej tzn. lokalizacji odkształcenia plastycznego) oraz odniesienie uzyskanych wyników do rozwoju tekstury krystalograficznej. Autorka pracy wyznaczyła następujące zadania badawcze:

- „•Opracowanie eksperymentalnej metodyki wyznaczania powierzchniowych rozkładów składników bilansu energii, tj. pracy odkształcenia plastycznego oraz energii dosypywanej w postaci ciepła dla nieadiabatycznych procesów deformacji;
- Wykorzystanie opracowanej metodyki do wyznaczenia rozkładów składników bilansu energii oraz zdolności magazynowania energii na powierzchni próbek wykonanych ze stali austenitycznej 310S podczas jednoosiowego rozciągania;
- Analiza zmian orientacji krystalograficznej i rozwoju tekstury stali 310S podczas jednoosiowego rozciągania oraz odniesienie uzyskanych wyników do zmiany zdolności magazynowania energii podczas deformacji”.

Doktorantka postawiła również tezę pracy stwierdzając, że „możliwe jest przeprowadzenie eksperymentalnej analizy przemiany energii w procesie deformacji plastycznej materiału polikrystalicznego z uwzględnieniem nieadiabatyczności tego procesu, wykorzystując pola przemieszczenia i temperatury wyznaczone przy użyciu metody korelacji obrazów cyfrowych i termografii podczerwieni oraz elementy teorii przepływu ciepła i teorii plastyczności”.

Teza ta została postawiona post factum – komentarz odnośnie do tezy zawarłem w rozdziale „Uwagi”.

Uważam, że przeprowadzone przez Doktorantkę badania dostarczyły spójnych informacji, które pozwoliły na zrealizowanie celu pracy. Chciałbym podkreślić duże znaczenie poznawcze uzyskanych wyników badań.

W podsumowaniu stwierdzam, że cel i zakres opiniowanej pracy w pełni spełniają wymagania stawiane badaniom będącym podstawą rozpraw doktorskich.

Ocena rozprawy doktorskiej

Niniejsza praca ma charakter poznawczy. Autorka rozprawy opracowała eksperymentalną metodę wyznaczania powierzchniowych rozkładów składników bilansu energii, tj. pracy odkształcenia plastycznego oraz energii dyssypowanej w postaci ciepła wykorzystując zmierzone pola przemieszczenia i temperatury. Zaproponowała metodę wyznaczania zdolności magazynowania energii na powierzchni próbek wykonanych ze stali austenitycznej 310S podczas jednoosiowego rozciągania. Ponadto Doktorantka dokonała analizy tekstury badanej stali po różnym stopniu deformacji i odniosła ją do wyznaczonej zdolności magazynowania energii.

Uważam, że bardzo ważne z punktu widzenia poznawczego jest wykazanie przez Doktorantkę, że zdolność magazynowania energii nie jest stała podczas deformacji plastycznej. Wartość tej energii zależy od odkształcenia co skorelowane jest ze zmianą mikrostruktury materiału. Zależność zdolności magazynowania energii od odkształcenia na wczesnym etapie deformacji związane jest z ruchem dyslokacji i interakcji pomiędzy nimi. Spadek zdolności magazynowania energii wraz ze

wzrostem odkształcenia jest z kolei wynikiem powstawania niskoenergetycznych układów dyslokacyjnych w mikrostrukturze materiału.

Istotnym osiągnięciem jest przeprowadzona przez Doktorantkę analiza zależności zdolności magazynowania energii od odkształcenia plastycznego na etapie jego lokalizacji w relacji z lokalnymi zmianami orientacji krystalograficznej ziaren. Wykazała Ona, że w obszarze, w którym wielkości zdolności magazynowania energii przyjmują wartości ujemne tworzy się bardzo drobna struktura lamelowa złożona z naprzemiennych warstw bliźniak-osnowa. Autorka dysertacji wykazała, że bliźniakowanie zależy od początkowej orientacji ziaren oraz od poprzedzającego poślizgu dyslokacji, który wywołuje obroty ziaren w kierunku orientacji korzystnych dla bliźniakowania. Wpływa to z kolei na zmianę mikrostruktury poprzez wprowadzanie dodatkowych barier dla ruchu dyslokacji. Wraz ze wzrostem odkształcenia rośnie liczba bliźniaków, a co za tym idzie prowadzi to do powstania drobnoziarnistej struktury lamelowej złożonej z naprzemiennych warstw osnowa-bliźniak.

Moim zdaniem uzyskane przez Doktorantkę wyniki badań poszerzają wiedzę w obszarze energetycznych aspektów odkształcenia plastycznego wybranej grupy polikryształów. Niewątpliwie należy do tego zaliczyć opracowanie metodyki wyznaczania rozkładów (na powierzchni deformowanej próbki) naprężeń, pracy odkształcenia plastycznego i energii dyssypowanej w postaci ciepła na podstawie pola przemieszczenia i temperatury. Doktorantka opracowała również procedury wyznaczania rozkładu źródeł ciepła i pochodnej materialnej temperatury na powierzchni odkształconego materiału.

Dokonała ponadto analizy wpływu czasu trwania procesu deformacji na udziały poszczególnych członów równania przewodzenia ciepła w stanie nieustalonym oraz poszczególnych źródeł ciepła.

Ważnym wątkiem badawczym w dysertacji była analiza ewolucji orientacji krystalograficznej badanej stali 310S dokonana podczas odkształcania i odniesienie jej wyników do przemiany energii.

Uważam, że cennym wątkiem w pracy jest wskazanie przez Doktorantkę kierunków dalszych badań. Przedstawiła konieczność dalszego rozszerzenia wiedzy w obszarze analizy procesu przemiany energii podczas deformacji plastycznej materiałów metalicznych. Autorka dysertacji sugeruje aby w przyszłości udoskonalić

opracowaną przez nią metodę opisu badań przemian energetycznych w czasie odkształcenia plastycznego, tak aby uwzględniała ona trójosiowy stan naprężenia oraz przemiany fazowe zachodzące w materiale. Innym kierunkiem dalszych badań byłoby, zdaniem Autorki dysertacji, rozszerzenie zaproponowanej przez nią metodyki badań, uwzględniające anizotropię właściwości termicznych badanego materiału. Warto byłoby również przeprowadzić odpowiednio zaprojektowane badania mikroskopowe, które pozwoliłyby potwierdzić obecność pasm ścinania oraz zachodzącego w ich obszarze mechanizmu zdrowienia, które powoduje uwalnianie części energii zmagazynowanej w materiale.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Sandry Musiał stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego o charakterze poznawczym. Recenzowana dysertacja jest bardzo dobrze osadzona naukowo na pograniczu dyscyplin Inżynieria Materiałowa i Inżynieria Mechaniczna.

Uwagi

Swoją dysertację Doktorantka zatytułowała „Analiza procesu przemiany energii podczas deformacji plastycznej materiałów polikrystalicznych”. Uważam, że tytuł ten jest zbyt ogólny. Treść pracy nie odzwierciedla jej zawartości. Poruszane przez Autorkę rozprawy problemy badawcze nie dotyczą szeroko rozumianej grupy materiałów polikrystalicznych, a jedynie tych o strukturze jednofazowej krystalizujących w układzie regularnym.

Jakich wyników, zdaniem Doktorantki, należy spodziewać się w przypadku badań prowadzonych na innej niż w pracy grupie polikrystałów?

Z reguły hipo(tezę) badawczą w pracach naukowych stawia się na podstawie przeglądu aktualnego stanu wiedzy w wybranym obszarze badawczym i/lub na podstawie własnych badań wstępnych, aby w dalszej kolejności zweryfikować ją w oparciu o zaplanowane eksperymenty, symulacje fizyczne bądź numeryczne.

Autorka dysertacji w rozdziale 1.4 „Cel, zakres i teza pracy doktorskiej” stwierdza, że „przedstawione w rozprawie wyniki pozwoliły wykazać następującą tezę:

Możliwe jest przeprowadzenie eksperymentalnej analizy przemiany energii w procesie deformacji plastycznej materiału polikrystalicznego z uwzględnieniem nieadiabatyczności tego procesu, wykorzystując pola przemieszczenia i temperatury wyznaczone przy użyciu metody korelacji obrazów cyfrowych i termografii podczerwieni oraz elementy teorii przepływu ciepła i teorii plastyczności”.

Tak więc teza ta jest postawiona post factum i z definicji jest raczej podsumowaniem otrzymanych wyników niż hipo(tezą) badawczą.

Uważam, że wartości naukowej nie umniejszyłoby zrezygnowanie ze stawiania hipo(tezy). Wyznaczony cel i zakres pracy jest ambitny i posiada wysokie walory naukowe.

Doktorantka w rozdziale 4.1 „Dobór materiału” napisała, że ”badania procesu przemiany energii podczas deformacji przeprowadzono na stali austenitycznej 310S. Ta stal ma jednofazową strukturę, w której podczas deformacji nie zachodzą przemiany fazowe. Oznacza to, że wyznaczone wewnętrzne źródła ciepła są indukowane sprężysto-plastycznym odkształceniem badanego materiału, co istotnie ułatwia analizę bilansu energii i interpretację uzyskanych wyników”.

Nasuwa się jednak pytanie - jak przedstawiałby się analizowany przez Doktorantkę problem badawczy np. dla polikrystalicznych materiałów o wysokiej energii błędu ułożenia, wielofazowych lub tych z przemianą fazową?

W tym samym rozdziale Doktorantka stwierdza, że „próbki do badań poddała obróbce cieplnej i „pomimo tego, że w wyżarzanej strukturze ziarna są równoosiowe, to widoczna jest niewielka tekstura krystalograficzna (maksymalna intensywność figury biegunowej wynosi 2,21), powstała podczas procesu walcowania”.

Jedno nie wyklucza drugiego tzn. równoosiowe ziarna obserwowane w stopie po wyżarzaniu nie oznaczają, że nie występuje w nim tekstura krystalograficzna. Równooosiowość jest cechą morfologiczną tekstury i nie przesądza o występowaniu po obróbce cieplnej tekstury krystalograficznej (nawet silnie wykształconej).

W rozdziale 5.3.1 „Analiza EBSD tego samego obszaru” Doktorantka stwierdza, że „deformacja plastyczna badanej stali zachodzi poprzez złożenie poślizgu dyslokacji oraz bliźniakowania. W różnych ziarnach, w zależności od ich orientacji krystalograficznej, orientacji sąsiednich ziaren i innych czynników, mogą wystąpić różne udziały tych mechanizmów”.

Ponadto w rozdziale 6.2 „Kierunki dalszych badań” Autorka dysertacji sugeruje aby w przyszłości badania „rozszerzyć o analizę przemian energii w skali pojedynczego ziarna. Tego typu analiza wymagałaby zestawienia pól przemieszczenia i temperatury z rozkładem orientacji krystalograficznej w danym ziarnie oraz wykorzystania elementów teorii plastyczności kryształów w modelu materiału”.

W tym kontekście, czy zdaniem Doktorantki, wykonanie badań procesu przemiany energii podczas deformacji plastycznej na monokryształach o różnej orientacji i wartości energii błędu ułożenia byłoby celowe? Jakie „korzyści” (w sensie poznawczym) mógłby przynieść taki eksperyment?

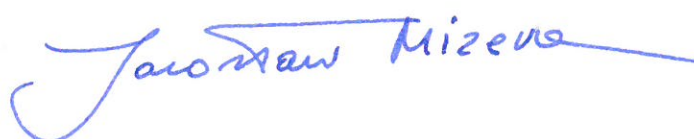
Opinia końcowa

Wysoko oceniam pracę doktorską mgr inż. Sandry Musiał. Autorka pracy wybrała bardzo interesujący problem badawczy, umiejętnie sformułowała cel i zakres pracy oraz wnikliwie przeprowadziła analizę otrzymanych wyników badań. Należy podkreślić, że przeprowadzone przez Doktorantkę badania stanowią oryginalny wkład w rozwój wiedzy w obszarze przemiany energii deformacji plastycznej materiałów polikrystalicznych.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska przedłożona przez Panią mgr inż. Sandrę Musiał pt. „Analiza procesu przemiany energii podczas deformacji plastycznej materiałów polikrystalicznych” spełnia warunki określone w Art. 187. Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. (Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce, Dz. U. 2022, poz. 574) i wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie o dopuszczenie mgr inż. Sandry Musiał do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk Inżynieryjno-Technicznych w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.

Chciałbym podkreślić, że uzyskane w niniejszej rozprawie wyniki badań stanowią oryginalny wkład do rozwoju wiedzy w obszarze przemiany energii podczas odkształcania materiałów polikrystalicznych. Uważam, że Doktorantka wykazała nieprzeciętną zdolność do zidentyfikowania i skutecznej realizacji ambitnego celu badawczego. Opracowała oryginalną metodykę wyznaczania rozkładów (na powierzchni deformowanej próbki) naprężeń, pracy odkształcenia plastycznego i energii dyssypowanej w postaci ciepła na podstawie pola przemieszczenia i temperatury. Uzyskane wyniki odniosła do ewolucji orientacji krystalicznej ziaren w badanej stali. Autorka dysertacji opanowała umiejętność prowadzenia badań przy użyciu zaawansowanych technik badawczych i obliczeniowych.

W związku z powyższym wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Sandry Musiał pt. „Analiza procesu przemiany energii podczas deformacji plastycznej materiałów polikrystalicznych”.

A handwritten signature in blue ink, reading "Jarosław Mizek". The signature is fluid and cursive, with a long horizontal stroke extending to the right.