

dr hab. inż.  
Magdalena Barbara Jabłońska,  
prof. PŚ

Katowice, 25 sierpnia 2023

### **Recenzja**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Sandry Musiał**

**pt. „Analiza procesu przemiany energii podczas deformacji plastycznej  
materiałów polikrystalicznych”**

#### **Uwagi formalne**

Opinię niniejszą wykonałam na podstawie przesłanego do mnie pisma Pana Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk prof. dr hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego z dnia 3 lipca 2023 roku.

Opracowując recenzję rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Sandry Musiał, zgodnie z przyjętymi standardami oraz literą i duchem regulacji prawnych, kierowałam się przede wszystkim następującymi kryteriami:

- trafność wyboru tematyki badawczej oraz umiejętność określenia przedmiotu i zakresu pracy,
- oryginalność rozwiązania problemu naukowego, poprawność ustalenia celów rozprawy, tez rozprawy, strategii i procedur badawczych oraz struktury rozprawy,
- jakość rozprawy z punktu widzenia warsztatu naukowego i poziomu pisarskiego,
- stopień realizacji przyjętego celu rozprawy,
- wykazanie ogólnej wiedzy z zakresu objętego tematyką rozprawy oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia dyskursu naukowego.

#### **Ocena istotności podjętego problemu naukowego i ocena merytoryczna rozprawy**

Zasadniczym problemem podjętym w rozprawie doktorskiej Pani mgr inż. Sandry Musiał, jest skupienie się na zagadnieniu analizy przemiany energii podczas odkształcenia plastycznego i eksperymentalnej deskrypcji bilansu energii jaki zachodzi podczas deformacji plastycznej materiałów. Praca opisuje proces przemiany

energii mechanicznej dostarczanej w trakcie odkształcenia na energię zaabsorbowaną przez badany materiał oraz na ciepło, generowane w trakcie procesu, jakie w części ulega rozproszeniu.

W badaniach materiałowych podstawowe charakterystyki mechaniczne i właściwości plastyczne wyznaczone są w trakcie odkształcenia plastycznego w próbach rozciągania i ściskania rzadziej ścinania. Są to najczęściej stosowane badania, na podstawie których nie tylko wyznaczone są właściwości mechaniczne i plastyczne danego materiału ale służą one również i przede wszystkim do analizy zmian mikrostrukturalnych jakie zasadniczo decydują o charakterystykach materiałowych.

Charakterystyki mechaniczne zwykle wyznacza się w zakresie bardzo małych prędkości odkształcenia tj. ok.  $0,0005\text{ s}^{-1}$  do  $0,001\text{ s}^{-1}$ . W takim zakresie prędkości odkształcenia czas trwania próby jest znacznie dłuższy niż w procesach technologicznych związanych z kształtowaniem plastycznym materiałów. Chcąc analizować właściwości w szerszym zakresie prędkości odkształcenia zaczynamy mieć do czynienia z czynnikami, jakie warunkować mogą istotne zmiany sub- i mikrostrukturalne zachodzące między innymi na skutek procesów generowania i wymiany energii, i ciepła w samym materiale oraz z otoczeniem, co w konsekwencji zmusza do uwzględnienia przy opracowaniu charakterystyk danego materiału wielu czynników.

Istotnym, aczkolwiek niezbyt często analizowanym w literaturze przedmiotu zagadnieniem jest tematyka jakiej podjęła się w swej dysertacji pani mgr inż. Sandra Musiał. Jest to zagadnienie związane z procesami przemiany energii podczas plastyczno - sprężystej deformacji. Autorka, na przykładzie znanego gatunku stali austenitycznej, podjęła próbę opracowania autorskiej metodyki wyznaczania powierzchniowych rozkładów składników tzw. bilansu energetycznego, czyli zamiany energii mechanicznej na pracę odkształcenia plastycznego oraz energię cieplną jaka ulega rozproszeniu podczas procesu. Dodatkowo skupiła się na zagadnieniu obliczenia zdolności do magazynowania energii odkształcanego materiału z uwzględnieniem zjawisk związanych z przepływem ciepła w próbce jak i wymiany ciepła z otoczeniem w powiązaniu z teorią plastyczności.

Takie podejście do problemu jest nader interesujące i ważne. Szczególnie należy brać je pod uwagę w przypadku gdy, w dobie rozwijającej się gospodarki poszukujemy wciąż nowych materiałów bądź materiałów znanych ale o ulepszonym składzie chemicznym, jaki to skład umożliwia wpływanie na coraz to lepsze właściwości stopów metali. Poznanie zagadnień wpływu prędkości deformacji plastycznej na zmiany właściwości oraz przede wszystkim zmiany mikrostrukturalne decydujące o charakterystykach materiałowych nowych i ulepszonych stopów metali uwzględniając zagadnienia przemiany energii w trakcie tejże deformacji plastycznej, wydaje się szczególnie interesującym tematem, zarówno z punktu widzenia naukowego jak i praktycznego.

W tym kontekście wybór tematyki rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Sandry Musiał jest w pełni uzasadniony. Ma to odzwierciedlenie zarówno w przyjętej strategii planowania, zaprojektowania oraz realizacji poszczególnych etapów pracy, które Autorka przemyślała, na podstawie literatury przedmiotu oraz niewątpliwie doświadczeń Promotor rozprawy Pani Prof. dr hab. inż. Wiery Oliferuk i Promotora pomocniczego pana dr inż. Michała Maja w tym obszarze, jak też w prowadzeniu i analizie kolejnych etapów prac badawczych dysertacji.



**Przedłożona do recenzji praca doktorska wpisuje się więc, swoją tematyką w interesujące i bardzo aktualne obszary badań podstawowych, jednocześnie nakreślających wymierne podstawy aplikacyjne w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.**

Przedłożone do oceny zwarte ale i kompleksowe opracowanie zostało przygotowane w formie oprawionego wydruku komputerowego formatu A4 o objętości 105 stron. Atutem pracy jest estetyka, przejrzystość, dokładność i spójność opracowania. Struktura rozprawy nie odbiega od przyjętych standardów. Doktorantka podzieliła pracę na sześć części.

Pierwsza z nich, zatytułowana „Wprowadzenie”, zajmuje 18 stron i podzielona jest na 4 podrozdziały. W nim znajdujemy tzw. przegląd literaturowy zagadnień objętych tematyką pracy aczkolwiek rozdział 1.2. nazwany jest jedynie przeglądem literatury w zakresie przemiany energii podczas deformacji, co w kontekście całego Wprowadzenia może być mylące. Niemnie jednak część I rozprawy wprowadza czytelnika w tematykę zagadnień związanych z bilansem energetycznym w trakcie odkształcenia plastycznego materiałów, procesami przemiany energii podczas odkształcania zarówno w przypadku deformacji makroskopowo jednorodnej jak i w zakresie lokalizacji odkształcenia. Dodatkowo znajdujemy tutaj informacje na temat bilansu energii podczas deformacji dynamicznej materiałów. Dalsza część opracowania opisuje tematykę ewolucji mikrostruktury w procesach związanych z odkształceniem plastycznym oraz powiązanie zmian strukturalnych z magazynowaniem energii w materiałach podczas deformacji. Autorka wnikliwie analizuje defekty struktury krystalicznej i ich oddziaływanie w odniesieniu do procesu odkształcenia materiałów o różnej wartości EBU. Starannie opisuje podstawowy mechanizm odkształcenia plastycznego metali i dokonuje deskrypcji ewolucji struktur dyslokacyjnych jakie zachodzą w miarę postępu odkształcenia plastycznego. Dokonuje opisu mechanizmów odkształcenia plastycznego w zależności od wartości EBU i omawia metody badań wykorzystywane do ujawniania zjawisk strukturalnych, jakie towarzyszą odkształcaniu stopów metali. Zwraca przy tym uwagę na wielkoskalowość i adekwatność metody EBSD.

Rozdział Wprowadzenie kończy Cel, zakres i teza pracy, które omówione zostaną w dalszej części recenzji.

W rozdziale 2 Doktorantka wskazuje czytelnikowi metody pomiarowe jakie zostały użyte w rozprawie. Dokonuje ich opisu i wskazuje ich przewagę nad innymi metodami. Na uwagę zasługuje podkreślenie, że metoda DIC a ściślej algorytm DIC użyty do wyznaczenia pola przemieszczeń został opracowany w Laboratorium Termoplastyczności IPPT PAN oraz wykorzystany w autorskim oprogramowaniu ThermoCorr, którego współtwórcą jest promotor pomocniczy rozprawy pan dr inż. Michał Maj. W rozdziale tym opisano również metodykę pomiarów z użyciem termografii podczerwieni IRT oraz analizę EBSD. W tym miejscu muszę podkreślić dobrze przedstawioną metodykę badań EBSD z powołaniem na te elementy, jakie Doktorantka wykorzystuje w swej dysertacji. Jedynie uwagę wnoszę w nomenklaturę specjalistyczną, gdyż powszechnie w języku polskim technicznym nie używa się standardowo łączenia elementów z języka technicznego angielskiego. W dysertacji Doktorantka posługuje się wielokrotnie i tylko terminem „misorientacja”. Zalecałabym jednak w pracach pisanych w języku polskim oraz w ustnych prezentacjach używać określenia „dezorientacja” a w języku angielskim oczywiście „misorientation”.

Kolejnym trzecim rozdziałem w rozprawie jest opis metodyki wyznaczania pracy odkształcenia plastycznego w badanych próbkach poddanych deformacji, energii dyssypowanej podczas tej deformacji i



następnie opis obliczeń energii zmagazynowanej w odkształconym materiale. Ten rozdział niejako można już rozpatrywać jako część badawczą pracy, gdyż uwzględnia on zastosowane procedury i ich kolejne kroki jakie prowadziła Doktorantka aby uzasadnić w efekcie metodykę opracowania cyfrowej korelacji obrazów DIC dla wyznaczenia pól przemieszczeń. Autorka logicznie porusza się tutaj w zagadnieniach trudnych i przywołuje w odpowiedni sposób dostępną literaturę. W podrozdziale 3.2. Autorka dysertacji szczegółowo rozpatruje model dwuwymiarowy przepływu ciepła jaki przyjęła w rozważaniach dotyczących obliczeń ciepła jako wartości energii dyssypowanej podczas deformacji. Ciekawym i bardzo dobrze przeanalizowanym podejściem jest opracowanie na podstawie doświadczeń własnych zespołu oraz literatury, procedury określania obszaru roboczego analizy, który uwzględnia zmianę kształtu próbki podczas deformacji gdzie tym samym zmianie ulegają możliwe do analizy wybrane punkty odniesienia przyjmowane do obliczeń. Na tej podstawie oraz z uwzględnieniem równań ruchu, obszar analizy zostaje w sposób właściwy dopasowany do rzeczywistego, a w kolejnych krokach uzyskuje się w efekcie wygenerowane do analizy DIC obrazy oraz pola temperatury dla chwil czasu wygenerowanych w trakcie odkształcenia. Rozdział ten zakończony jest opisem procedury wyznaczania zmagazynowanej w próbce podczas odkształcenia energii.

Rozdział 4 pracy można zaliczyć już „stricte” do części eksperymentalnej. W połączeniu z kolejnymi rozdziałami tj. wynikami badań oraz podsumowaniem i wnioskami zajmuje on połowę objętości rozprawy. Tę część pracy otwiera rozdział „Opis eksperymentu”, a następnie rozdziały „Wyniki badań”, i „Podsumowanie i wnioski”. Autorka przedstawia czytelnikowi ideę podjętego zagadnienia dla znanego materiału jakim jest stal austenityczna 310S, układ pomiarowy zastosowany w eksperymencie, metodykę stosowanej korelacji obrazów DIC a także opis prowadzenia badań EBSD. W tym miejscu pozwolę sobie powrócić do Celu i tezy rozprawy.

Autorka dysertacji jako **Cel** wskazuje: przeprowadzenie eksperymentalnej, połowej analizy procesu przemiany energii podczas deformacji plastycznej stali austenitycznej 310S, zarówno w zakresie deformacji makroskopowo jednorodnej, jak i podczas lokalizacji odkształcenia plastycznego oraz odniesienie uzyskanych wyników do rozwoju tekstury krystalograficznej.

Wskazuje dwa zadania jakie wykonała, czyli po pierwsze opracowanie metodyki wyznaczania powierzchniowych rozkładów składników wymiany energii na podstawie wyznaczania pól przemieszczenia i temperatury na powierzchni próbki i teorii bilansu cieplnego oraz teorii plastyczności metali, po drugie dla badanej stali austenitycznej użycie w.w metodyki do wyznaczenia rozkładu składników bilansu energii i zdolności stali do magazynowania energii na powierzchni oraz po trzecie opisu i analizy zmian orientacji krystalograficznej i rozwoju tekstury badanej stali podczas odkształcenia w aspekcie zdolności do magazynowania energii odkształcenia plastycznego.

Następnie doktorantka stawia tezę rozprawy.

Teza brzmi: **”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”.**



W tym miejscu należało by zadać pytanie czy jeśli stawiamy za cel przeprowadzenie polowej analizy procesu przemiany energii podczas deformacji plastycznej stali austenitycznej i w celu stawiamy zadania w tym dotyczące opracowania metodyki wyznaczania powierzchniowych rozkładów składników bilansu energii z wykorzystaniem pól przemieszczeń i temperatury oraz z uwzględnieniem elementów teorii plastyczności i teorii wymiany ciepła to czy Teza rozprawy powinna być postawiona w sposób tak ogólny i tylko jako tzw. „możliwość przeprowadzenia eksperymentalnej analizy...”?

**Tak postawiona teza rozprawy nie zawiera bowiem żadnych parametrów jakie decydują o prawidłowości zastosowanych procedur i parametrów metod badawczych które w sposób właściwy i zwalidowany pozwoliły na poprawną i skuteczną metodę służącą analizie procesu przemiany energii podczas deformacji plastycznej w materiale polikrystalicznym.**

W opinii recenzentki wnikliwsze podejście do zaprezentowania Tezy rozprawy zmieniłoby sposób patrzenia na uzyskane wyniki i wnioski w kontekście wartości dodanej jaką Autorka pracy włożyła w niniejsze opracowanie naukowe.

**Niemniej jednak cele zostały postawione w sposób właściwy i zrealizowane.**

Zatem muszę podkreślić, iż pomimo braku precyzyjności i wysokiego poziomu ogólności tezy rozprawy odnosząc się do opisanych wcześniej w recenzji rozdziałów będących niejako opracowanymi autorskimi procedurami, **słuszność Celów i ich spełnienie Autorka wykazała w kolejnych rozdziałach badawczych Swojej pracy.** Jednocześnie muszę zaznaczyć, że praca jest w całości na wysokim poziomie naukowym a Doktorantka zrealizowała w niej, adekwatny, dobrze przemyślany i rozwinięty o własne koncepcje, na podstawie wcześniejszych badań i prac zespołu kierowanego przez Panią Promotor, prof. dr hab. inż. Wierę Oliferuk oraz promotora pomocniczego dr inż. Michała Maja program badań. Całość opracowania posiada bez wątpienia znamiona oryginalności na tle dostępnych prac naukowych o podobnej tematyce.

Na podstawie szczegółowej analizy rozdziału w którym Doktorantka zaprezentowała wyniki swych badań należy wskazać najważniejsze osiągnięcia pracy:

- przeprowadzenie dokładnych badań odkształcenia plastycznego stali 310S dla pięciu zakresów prędkości odkształcenia,
- opracowanie rozkładów pól przemieszczeń i temperatury dla zastosowanych prędkości odkształcenia badanych próbek,
- opracowanie metodyki wyznaczenia wartości odkształcenia dla obszaru lokalizacji odkształcenia w rozciąganych próbkach,
- opracowanie autorskiej metodyki obliczeń wartości pracy odkształcenia plastycznego i energii wydzielanej w postaci ciepła dla procesów odkształcenia o różnym udziale członów równania przewodzenia ciepła (zależnych od prędkości odkształcenia),
- opracowanie zależności zdolności do magazynowania energii od ekwiwalentnego odkształcenia plastycznego dla obszarów lokalizacji odkształcenia,
- wyznaczenie rozkładów orientacji krystalograficznej dla wybranych wartości odkształcenia i ich analiza pod kątem uprzywilejowania mechanizmu odkształcenia plastycznego badanej stali.



Konkludując, Doktorantka wykonała/zrealizowała ciekawy poznawczo, warty uwagi materiał z badań. Część eksperymentalna recenzowanej rozprawy została dobrze przygotowana. Dysertacja jest poprowadzona w sposób logiczny a Autorka dołożyła starań aby zadbać o przemyślany tok realizacji pracy, w tym także odpowiednie przygotowanie i prowadzenie eksperymentów. Załączone rysunki, mikrofotografie, tabele oraz schematy są przejrzyste i uzupełniają tekst rozprawy. Muszę zaznaczyć, iż w tekście rozprawy odnalazłam bardzo nieliczne błędy literowe. Niemniej jednak pozwolę sobie na małą dygresję w kierunku sformułowania „stosunkowo” jakiego dość często Autorka używa w pracy. Proszę w przyszłości unikać tego typu sformułowania gdyż jest ono nazbyt ogólne a ponadto nie wskazuje żadnego odniesienia w stosunku do czegoś co może być „stosunkowo większe” lub „stosunkowo mniejsze” itp. Na podkreślenie zasługuje w pracy przygotowany wykaz oznaczeń i skrótów.

W tym miejscu czuję się zobligowana do pewnych kwestii dyskusyjnych, do których Pani mgr inż. Sandra Musiał będzie miała możliwość odnieść się podczas publicznej obrony:

1. Czy na podstawie doświadczeń podczas pisania rozprawy i analizy literaturowej opracowana procedura mogłaby sprawdzić się w przypadku zastosowania większych prędkości odkształcenia tj. prędkości w zakresie quasi statycznym i dynamicznym? Jakie czynniki w opracowanej metodyce odniesionej do większych prędkości odkształcenia miałyby najistotniejszy wpływ na wynik końcowy obliczeń i rozkładów polowych otrzymanych wielkości?
2. Czy można dokonać predykcji i analizy wartości parametru  $Z$  uwzględniając pominięcie składowej sprężystej w procesie deformacji. Wartość zdolności magazynowania energii spada w miarę wzrostu odkształcenia i jest to związane, jak Doktorantka tłumaczy z zmianami konfiguracji dyslokacyjnych prowadzących do tworzenia niskoenergetycznych układów defektów. Dla jakiej wartości odkształcenia można więc przewidywać w badanej stali tworzenie układów niskoenergetycznych i czy pominięcie zakresu sprężystego w analizach wpłynie, a jeśli tak to jak, na zmianę wartości  $Z$ ?
3. Czy dla opracowanych wyników analizy mikrostrukturalnej oraz obliczeń współczynnika Schmita można zaproponować schemat ujmujący wpływ prędkości odkształcenia i wartości odkształcenia na zmianę dominującego mechanizmu odkształcenia plastycznego badanej stali? Czy w tym przypadku stwierdzenie, iż bliźniakowanie zaczyna dominować przy odkształceniu  $\epsilon$  wynoszącym 0,3 z uwzględnieniem ograniczenia pomiaru orientacji bliźniaczych w metodzie EBSD może mieć znaczenie w końcowych stwierdzeniach o dominacji danego mechanizmu odkształcenia plastycznego?
4. Czy na etapie badań mikrostruktury udało się zaobserwować pasma ścinania w badanej stali? Czy obecność mikrospasm i pasm ścinania jakie mogą zarodkować w obszarach niestateczności struktur typu osnowa - bliźniak przewidywano/obserwowano jedynie w strefach lokalizacji odkształcenia? Czy powstawanie mikrospasm i pasm ścinania nie jest skutkiem postępującej ewolucji mikrostruktury stali i mogą tworzyć się one nie tylko w obszarach lokalizacji odkształcenia ale lokalnie prowadząc tym samym do dalszego odkształcenia?

Powyższe pytania oraz uwagi, w tym dyskusyjne, nie umniejszają mojej pozytywnej opinii o recenzowanej pracy doktorskiej Pani mgr inż. Sandry Musiał.

Stwierdzam, iż przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi cenną bazę informacji dla dalszych, celowych badań w obszarze związanym z implementacją metod opartych o korelacje obrazów DIC i IRT jako bardzo ciekawego rozwiązania, do analizy szczegółów związanych z procesami konwersji energii w próbach deformacji materiałów krystalicznych. Przedstawione i opisane w pracy wyniki badań nakreślają wiele kierunków dalszych prac naukowych z tego obszaru.

### **Wniosek końcowy**

Moja ogólna ocena pracy jest pozytywna. Doktorantka rozwiązała problemy o znaczeniu analitycznym, poznawczym i naukowym. Wykazała się niezbędną wiedzą z zakresu przedmiotu pracy, stosowanych technik i metod badawczych oraz umiejętnościami połączenia wielu wyników badań i logicznego wnioskowania w tym w powiązaniu z dostępnymi danymi z literatury.

Stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska  
Pani mgr inż. Sandry Musiał pt.:

### **„Analiza procesu przemiany energii podczas deformacji plastycznej materiałów polikrystalicznych”**

jest dziełem dysertabilnym i spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2020 roku poz. 85, z późn. zm.). W związku z tym **wnoszę o przyjęcie rozprawy** mgr inż. Sandry Musiał i **dopuszczenie jej Autorki do publicznej obrony**. Ponadto uznaję, że dysertacja posiada dużą wartość merytoryczną i naukową, stąd wnoszę o jej wyróżnienie.

