

Katowice, dnia 10.02.2020r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. **Mileny KORALNIK**

**pt. „Wpływ osiowo-symetrycznych metod odkształcania na kształtowanie mikrostruktury oraz zmęczenie niskocyklowe przemysłowego stopu aluminium 6063”**

wykonanej na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej  
pod kierunkiem Pana prof. dr hab. inż. Jarosława Mizery

### Podstawa prawna opracowania recenzji:

*Recenzja została wykonana na podstawie uchwały Rady Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej z dnia 20 grudnia 2019 roku, zgodnie z art. 14, ust.2 i art.20, ust. 5 Dz.U. Nr 65, poz. 595 z dnia 16 kwietnia 2003r. (z późniejszymi zmianami) na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej z dnia 22 stycznia 2020r. oraz rozprawy doktorskiej pt. „Wpływ osiowo-symetrycznych metod odkształcania na kształtowanie mikrostruktury oraz zmęczenie niskocyklowe przemysłowego stopu aluminium 6063”.*

### 1. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Kształtowanie właściwości materiałów, w szczególności zmian w mikrostrukturze oraz właściwości mechanicznych, w procesach odkształcania plastycznego wciąż znajduje się w centrum zainteresowań wielu światowych ośrodków naukowych. Zjawiska towarzyszące zmianom struktury odkształcanych plastycznie materiałów od skali makroskopowej, poprzez mikrometryczną aż do skali nanometrycznej są bardzo złożone i mimo wielu badań nie do końca wyjaśnione. W szczególności dotyczy to zjawisk towarzyszących procesom cyklicznego odkształcania. Nadaje to tematowi rozprawy doktorskiej Pani Mileny Koralnik walor aktualności i oryginalności. Szczególnie jest to widoczne w aspekcie oceny zmian struktury w przypadku odkształcania stopów aluminium po zastosowaniu różnych osiowo-symetrycznych metod odkształcania. Do badań w pracy wybrano przemysłowy stop aluminium umacniany wydzieleniowo 6063 (główne pierwiastki stopowe to Mg i Si).

Stop ten w stanie przesyconym był odkształcany plastycznie w procesach wyciskania hydrostatycznego, wyciskania na gorąco, wyciskania ze skręcaniem oraz ciągnięcia. Następnie stop poddano procesom umacniania wydzieleniowego w warunkach starzenia naturalnego lub przyspieszonego. Umożliwiło to ocenę mechanizmów umocnienia, dyslokacyjnego i granicami ziaren z mechanizmem utwardzania wydzieleniowego. Do oceny zmian struktury i właściwości mechanicznych zaproponowano zastosowanie szerokiej gamy metod strukturalnych. Pani Milena Koralnik w swojej pracy zaprezentowała kompleksowe podejście do zagadnienia, a otrzymane w niniejszej pracy wyniki wnoszą, w moim przekonaniu, istotny wkład w opracowanie technologii kształtowania struktury i właściwości mechanicznych stopów aluminium w różnych procesach odkształcenia plastycznego oraz poznanie przebiegu zjawisk towarzyszących przemianom. Tematyka tej pracy świetnie wpisuje się w krąg problematyki badawczej z zakresu zaawansowanych badań struktury i właściwości materiałów rozwijanej od wielu lat z powodzeniem w Politechnice Warszawskiej.

## 2. Charakterystyka szczegółowa rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska liczy 157 stron. Autorka powołuje się na 248 pozycje literaturowe, jest to imponująca liczba powołań literaturowych w pracy doktorskiej. Analiza doboru źródeł bibliograficznych wskazuje na bardzo dobre rozeznanie Pani Mileny Koralnik w literaturze przedmiotu.

Cześć studialna pracy jest integralnie związana z jej tematem i została oparta na szerokim przeglądzie pozycji literaturowych i monograficznych. Część literaturową rozprawy doktorskiej oceniam bardzo wysoko. Autorce udało się w bardzo krótkiej formie przedstawić aktualny stan zagadnienia dotyczącego tematyki rozprawy w zakresie: odkształcenia plastycznego metali (rozdział 2.1), ewolucji mikrostruktury podczas odkształcenia plastycznego (rozdział 2.2), obróbki cieplno-plastyczne stopów aluminium (rozdział 2.3), ale przede w rozdziale o cyklicznym odkształceniu (rozdział 2.4) scharakteryzować wpływ mikrostruktury na wytrzymałość zmęczeniową (rozdział 2.4.1) oraz zmęczenie niskocyklowe stopów aluminium umacnianych wydzieleniowo (rozdział 2.4.2).

Na uwagę zasługuje zwrócenie uwagi Autorki na możliwości oceny efektów zmian w mikrostrukturze w powiązaniu z właściwościami mechanicznymi. Przykłady z badań dostępnych w literaturze są dobrze dobrane i służą zobrazowaniu problematyki związanej bezpośrednio z badaniami Pani mgr inż. Mileny Koralnik w recenzowanej rozprawie doktorskiej.

Wynikiem krytycznej analizy literatury i jej podsumowania w genezie pracy (rozdział 3) jest klarowne sformułowanie przez Panią Milenę Koralnik celu pracy:

*„Celem pracy było określenie w jaki sposób, dostępne na skalę przemysłową, osiowo-symetryczne metody odkształcenia plastycznego wpływają na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne, ze szczególnym uwzględnieniem zachowania w warunkach zmęczenia niskocyklowego, przemysłowego stopu aluminium 6063. Dokonano również porównania tych metod odkształcania pod kątem otrzymania optymalnej mikrostruktury z punktu widzenia badanych właściwości mechanicznych.”*

Cel pracy uważam za poprawny pod względem naukowym, jasno sformułowany i jednocześnie na tyle ogólny, że można zaplanować kilka różnych dróg jego realizacji. Zastosowane metody badań (rozdziały 4.2 - 4.4) są całkowicie adekwatne do postawionych zadań. Wybrane zostały następujące metody: odkształcenia plastycznego (wyciskanie hydrostatyczne, wyciskanie na gorąco, ciągnięcie, wyciskanie ze skręcaniem), analizy mikrostruktury (analiza obrazu, pomiary gęstości dyslokacji, badania orientacji ziaren i dezorientacji granic ziaren, charakterystyka wydzielań), badania właściwości mechanicznych (pomiary twardości, statyczna próba rozciągania, próba zmęczenia niskocyklowego).

Materiał do badań, zaproponowany przez Panią mgr inż. Milenę Koralnik do realizacji postawionego celu rozprawy doktorskiej, to przemysłowy stop aluminium Al-Mg-Si: 6063. Był to wybór jak najbardziej właściwy z punktu widzenia zaplanowanych badań.

Pani Milena Koralnik położyła główny nacisk w pierwszym rzędzie na przygotowania stopu aluminium w odpowiednim stanie mikrostruktury. Dostarczone pręty wyciskane na gorąco były umacniane wydzieleniowo: przesycanie w 540°C, 1h z chłodzeniem w wodzie i następnie starzenie naturalne (temperatura pokojowa, co najmniej 30 dni) lub sztuczne (180°C, 6h z chłodzeniem na powietrzu). Należy tu podkreślić niezwykle przemyślane i precyzyjnie dobrane parametry obróbki cieplnej dla materiałów przeznaczonych do dalszych badań. Ten etap badań stworzył bowiem realne możliwości rokujące uzyskanie ciekawych wyników w rozprawie doktorskiej. Opis materiału do badań oraz charakterystyka zastosowanych metod badawczych nie budzą żadnych zastrzeżeń, poza drobnymi nieścisłościami językowymi.

Pierwsza część wyników badań własnych (rozdział 5.1) w prezentowanej rozprawie doktorskiej dotyczyła opisu ewolucji mikrostruktury po kolejnych procesach odkształcenia plastycznego (SEM, TEM, EBSD). Na uwagę w tej części pracy zasługuje analiza struktury na obrazach TEM wraz z wynikami badań EBSD – mapami orientacji krystalograficznych oraz kątami dezorientacji ziaren.

W drugiej części badań własnych (rozdział 5.2) Pani Milena Koralnik skupiła się na charakterystyce właściwości mechanicznych materiałów odkształczanych. Cenne w tej części pracy jest to, że Autorka na bieżąco konfrontuje każdorazowo otrzymane wyniki swoich badań z różnych punktów widzenia. Ta część badań została wykonana poprawnie i przeanalizowana szczegółowo oraz bogato udokumentowana wynikami w pracy.

W następnym rozdziale (rozdział 5.3) zaprezentowana została charakterystyka materiałów podczas zmęczenia niskocyklowego. Otrzymane w tej części wyniki świetnie korespondują z pozostałymi wynikami badań otrzymanymi w poprzednich rozdziałach (rozdział 5.1 i 5.2). Pragnę zwrócić uwagę, że ta część badań jest niezwykle szeroko omawiana w pracy i stanowi jej bardzo wartościowy fragment. Interesujące uzupełnienie tych badań stanowi analiza faktograficzna przełomów po statycznej próbie rozciągania oraz po zmęczeniu niskocyklowym.

W obszernej analizie wyników badań własnych (rozdział 6, str. 95-136) przedstawionej rozprawy doktorskiej Pani Milena Koralnik dokonuje dyskusji wszystkich otrzymanych wyników, a całość swoich dociekań naukowych podsumowuje syntetycznie w rozdziale 7, dowodząc w całej pełni realizacji postawionego celu rozprawy. W tej części pracy Autorka w pełni wykazała umiejętność syntetycznego i zarazem pogłębionego w stosunku do wcześniejszych opracowań, ujęcia teoretycznych i praktycznych aspektów badań własnych. Złożony problem wpływu odkształcenia plastycznego na strukturę i właściwości stopu aluminium 6063, został tu ujęty przeglądowo ale jednocześnie niezwykle wnikliwie i szczegółowo. Widać tu wyraźne starania Autorki o uogólnienia i usystematyzowanie współzależności oddziaływania i interakcji różnorodnych czynników w procesie ewolucji struktury i ich wpływu na właściwości mechaniczne. Jest to bardzo pogładowa i komunikatywna forma analizy otrzymanych wyników. Na szczególną uwagę zasługują opracowane przez Autorkę zestawienia wyników badań własnych w postaci tabel i rysunków. Obrazy struktury wykonane przy użyciu elektronowego mikroskopu transmisyjnego są niezwykle piękne i doskonale wybrane do zobrazowania poszczególnych etapów ewolucji struktury w zależności od charakteru odkształcenia plastycznego. Tę część pracy oceniam szczególnie wysoko.

Wnioski sformułowane na podstawie otrzymanych wyników badań są przedstawione w sposób jasny i wykazujący, że postawiony przez Panią Mileną Koralnik cel w rozprawie doktorskiej został osiągnięty.

### 3. Ocena rozprawy doktorskiej

Za największe zalety pracy uważam:

1. Określenie mechanizmów rozdrobnienia i ewolucji mikrostruktury podczas odkształcania plastycznego stopu różnymi technikami.
2. Wykazanie pomijalnej roli umocnienia wydzieleniowego w przypadku obciążeń monotonicznych dla stopu silnie rozdrobnionego .
3. Wykazanie, że dla materiałów łatwo odkształcalnych, silnie rozdrobnioną mikrostrukturę i bardzo dobre właściwości mechaniczne, można uzyskać także przy zastosowaniu konwencjonalnych technik odkształcenia (np. ciągnięcia).

Oceniając bardzo pozytywnie rozprawę doktorską, pozwolę sobie na kilka uwag do dyskusji, a w szczególności:

1. Proszę, na podstawie wyników badań własnych, o wskazanie głównych czynników decydujących o mechanizmach odkształcenia plastycznego w badanym stopie aluminium 6063 po różnych procesach odkształcania.
2. Proszę o wskazanie jakie inne metody badań, niż zastosowane w rozprawie, można użyć do analizy mechanizmów odkształcenia plastycznego w badanym stopie aluminium.

W podsumowaniu recenzji stwierdzam, że pod względem edytorskim praca jest wykonana starannie, napisana prostym i jasnym językiem. Zauważone drobne nieścisłości stylistyczne nie są warte umieszczenia w recenzji.

Natomiast, w ogólnej ocenie stwierdzam, że Pani Milena Koralnik w pełni i w szerokim zakresie zrealizowała zadanie badawcze będące przedmiotem rozprawy. Zawarte w rozprawie wnioski są w pełni udokumentowane.

Biorąc pod uwagę aktualność tematyki pracy, klarowne sformułowanie celów pracy oraz ich osiągnięcie na drodze dobrze zaplanowanych i przeprowadzonych badań wraz z dyskusją otrzymanych wyników, oceniam przedstawioną rozprawę doktorską pozytywnie i wnioskuję o dopuszczenie Pani mgr inż. Mileny Koralnik do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Na podstawie przedstawionej opinii stwierdzam, że praca spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim, przewidziane odpowiednimi ustawami i jednocześnie wnioskuję o jej wyróżnienie.

Katowice, 10 lutego 2020r.



prof. dr hab. inż.  
Maria Sozańska