



Instytut Wysokich Ciśnień Polskiej Akademii Nauk w Warszawie
Laboratorium Plastyczności pod Wysokim Ciśnieniem
dr hab. inż. Mariusz Kulczyk

Warszawa 06 lipca 2023 r.

Recenzja

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Bańczerowskiego pt. „Proces technologiczny oraz modelowanie numeryczne obróbki termoplastycznej tytanu na potrzeby inżynierii biomedycznej”,
opracowana na zlecenie Pana Prodziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki
Warszawskiej prof. dr hab. inż. Tomasza Chmielewskiego**

pismo z dnia 19 maja 2023

Praca wpisuje się w trendy badawcze w dziedzinie projektowania nowoczesnych procesów kształtowania materiałów z wykorzystaniem numerycznych modeli obróbki plastycznej, pozwalających na szczegółowe planowanie tych procesów wraz doбором ich optymalnych parametrów. Dotyczy to szczególnie czystego tytanu, który od lat jest przedmiotem badań mających na celu praktyczne wykorzystanie tego materiału w medycynie jako zamiennik obecnie stosowanych stopów zawierających toksyczne dla organizmu dodatki. Bariery wykorzystania tego materiału są jego zbyt niskie właściwości mechaniczne w porównaniu do jego stopów z dodatkami aluminium, niobu czy wanadu. Próby poprawy właściwości mechanicznych tytanu, choć od lat będące przedmiotem publikacji i patentów, wciąż stanowią wyzwanie do dalszych badań i rozwiązywania kolejnych problemów, zwłaszcza na etapie wytwarzania gotowych półwyrobów oraz gotowych wyrobów. Najczęściej analizowane w literaturze są próby podniesienia właściwości wytrzymałościowych tytanu przy wykorzystaniu metod dużych odkształceń plastycznych SPD. Do realizacji tych prób wykorzystywane są niekonwencjonalne techniki przeróbki plastycznej, takie jak procesy przeciskania przez zagięty kanał kątowy ECAP, wyciskania hydrostatycznego HE czy skręcania pod wysokim ciśnieniem HPT. Wadą większości tych metod są ich ograniczenia związane z wymiarami i geometrią wytwarzanych produktów, uniemożliwiające ich praktyczne wykorzystanie w przemyśle. Jako alternatywę dla tych metod Autor rozprawy podejmuje próbę analizy procesów obróbki termoplastycznej TMP, w której, jak wskazuje stosunkowo mało prac, dotyczy czystego tytanu. Autor pracy postanawia na bazie przeprowadzonego przeglądu literaturowego oraz własnej analizy dobrać model matematyczny najwierniej opisujący proces obróbki plastycznej czystego

tytanu. Po identyfikacji stałych materiałowych, Autor przeprowadza symulację numeryczną przeprowadzonych wcześniej procesów TMP metodą elementów skończonych, badając zgodność otrzymanych wyników z danymi eksperymentalnymi.

Uważam, że problematyka i temat rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Bańczerowskiego zostały trafnie sformułowane. Wybór tematyki jest jak najbardziej aktualny i wpisuje się w trendy badawcze w obszarze dyscypliny inżynierii mechanicznej związanej z projektowaniem procesów kształtowania plastycznego nowoczesnych materiałów (przewód otwarty został w dyscyplinie – mechanika).

Ocena rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa, napisana pod Promotorstwem naukowym prof. dr hab. inż. Marka Pawlikowskiego składa się ze 122 stron, zawiera 9 rozdziałów, spis ilustracji oraz spis tabel, streszczenie w języku polskim oraz angielskim, 77 rysunków w postaci zdjęć, wykresów oraz schematów a także 12 tabel i 113 pozycji literaturowych, w tym 2 autora dysertacji w renomowanym czasopiśmie anglojęzycznym *Materials Science and Technology*.

Część pierwsza pracy dotyczy przeglądu literaturowego mającego na celu analizę stanu zagadnienia. Część ta została podzielona na dwa rozdziały obejmujące łącznie 18 stron. Początek przeglądu literaturowego dotyczy badanego materiału, opisu jego gatunków, podstawowych właściwości oraz zastosowania. Autor przedstawia zależność Halla-Petcha, mówiącą o powiązaniu wytrzymałości materiału z wielkością jego ziarna w kontekście badanego tytanu. Zwraca uwagę na zjawisko odwrotnego efektu Halla Petcha, zachodzącego na skutek nadmiernego bliźniakowania. Pierwszy rozdział przedstawia metody ulepszania właściwości mechanicznych tytanu i jego stopów stosowanych w bioinżynierii. Metody te zostały podzielone przez Autora na procesy dużych odkształceń plastycznych oraz procesy obróbki termoplastycznej. Przedstawiono szereg metod dużych odkształceń plastycznych używanych do przeróbki czystego tytanu, m.in. metodę ECAP (przeciskanie przez zagięty kanał kątowy), ARB (cykliczne walcowanie) czy HE (wyciskania hydrostatyczne). Zwrócono uwagę na ograniczenia związane z zastosowaniem tych metod, wynikające z małych wymiarów wytwarzanych produktów. Podobną analizę przeprowadzono dla metod termoplastycznej przeróbki plastycznej tytanu, z zaznaczeniem stosunkowo małej ilości prac dotyczących opisu tytanu α . Zwrócona została uwaga na istotne problemy badawcze związane z zachodzeniem procesów rekrytalizacji w obrabianym termoplastycznie tytanie i jego stopach. Druga część analizy stanu zagadnienia dotyczy przeglądu modeli matematycznych obróbki plastycznej z podziałem na modele fizyczne, uwzględniające termodynamikę procesów zachodzących podczas odkształcenia oraz fenomenologiczne, budowane w oparciu o dane eksperymentalne. W oparciu o obszerne dane literaturowe przedstawiono założenia wszystkich analizowanych modeli matematycznych wraz ze wskazaniem ich wad i zalet oraz zasadności ich stosowania w danych warunkach deformacji plastycznej. Autor podkreśla zasadność wyboru modeli fenomenologicznych w oparciu o łatwość identyfikacji stałych materiałowych, oraz o dane eksperymentalne.

Analiza literaturowa, oparta o wiele publikacji anglojęzycznych, obejmowała najważniejsze zagadnienia dotyczące tematyki podjętej pracy.

Na podstawie przeglądu literaturowego Autor w trzecim rozdziale swojej pracy przedstawia jej cele oraz tezę. Głównymi celami dysertacji są: *opracowanie technologii obróbki plastycznej tytanu w podwyższonej temperaturze, która polepszy właściwości strukturalne i mechaniczne materiału, sformułowanie dokładnego równania opisującego obróbkę plastyczną i identyfikacja parametrów procesu oraz zdefiniowanie modelu numerycznego i wykonanie symulacji obróbki termoplastycznej*. Postawiona zostaje teza że „Czysty tytan po obróbce plastycznej w podwyższonej temperaturze może zastąpić obecnie stosowane w inżynierii biomedycznej stopy tytanu”. Przedstawione cele pracy dobrze określają istotę rozprawy.

Część druga dysertacji, obejmująca badania własne została podzielona na 4 rozdziały (4-7), zajmujące w sumie 73 strony.

Wątpliwości budzi brak odrębnego, syntetycznego opisu metodyki badawczej zastosowanej przez Autora pracy. Informacje o kolejnych metodach oraz narzędziach badawczych można jedynie sukcesywnie czerpać analizując kolejne rozdziały niniejszej pracy.

Część badawczą pracy Autor rozpoczyna od przedstawienia wyników obróbki termoplastycznej, realizowanej w podwyższonej temperaturze przy zmiennych prędkościach odkształceń (str. 30 - 37). Obróbka termoplastyczna przeprowadzona została na symulatorze Gleeble 3800 w zakresie temperatury od 400 do 800°C, co 100°C oraz przy prędkościach odkształcenia 0,01s⁻¹, 0,1 s⁻¹, 1 s⁻¹ oraz 10 s⁻¹. Przyjęto odkształcenie 60% próbki, co odpowiada 0,98 odkształcenia rzeczywistego. Uzyskane wyniki testów Autor przedstawił w postaci krzywych naprężenie odkształcenie (rys 4.4 do rys 4.6). Wraz ze wzrostem temperatury obserwowano niższe wartości naprężeń uplastyczniających. Wzrost prędkości deformacji plastycznej powodował wyższe wartości naprężeń. W zakresie niższych temperatur dla 400°C oraz 500°C, przy większych prędkościach deformacji plastycznej obserwowano zmienny charakter krzywych wywołany zmianą intensywności zachodzenia procesów rekrytalizacji oraz zdrowienia dynamicznego, co zostało przedyskutowane w oparciu o dane literaturowe. Krzywe uzyskane w wyższej temperaturze (od 600°C do 800°C) wykazywały podobny charakter, gdzie po fazie umocnienia odkształceniowego obserwowano przejście do fazy uplastycznienia.

W rozdziale piątym Autor pracy przedstawił wyniki badań mikrostrukturalnych oraz mechanicznych, a także pomiary mikrotwardości (str. 38 - 54). W celu scharakteryzowania mikrostruktury wykorzystana została technika skaningowej mikroskopii elektronowej SEM oraz analiza dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych EBSD. Do badań wyselekcjonowano próbki uzyskane w skrajnej temperaturze 400°C oraz 800°C. Zostały przedstawione mapy EBSD oraz analiza rozkładu wielkości ziaren. Materiał w stanie wyjściowym charakteryzował się ziarnami o jednolitej wielkości, w którym średnia wielkość ziarna wynosiła 6,06µm. Po procesie deformacji plastycznej w temperaturze 400°C dla niskiej prędkości 0,01/s zaobserwowano efekty wydłużenia ziaren oraz rozdrobnienia do poziomu średniej wielkości 3,79µm. Wzrost prędkości odkształcenia w temperaturze 400°C powodował dalsze zmniejszanie się średniej wielkości ziarna odpowiednio 2,62µm oraz 2,1µm przy prędkości 0,1/s oraz 1/s. Po największej prędkości deformacji plastycznej tj. 10/s, wskutek zachodzenia procesów dynamicznej

rekrytalizacji, wielkość ziarna rośnie do średniej wartości $5,04\mu\text{m}$ oraz obserwowany jest bimodalny charakter rozkładu wielkości ziaren.

Przy najwyższej temperaturze deformacji plastycznej, wynoszącej 800°C , obserwuje się silny rozrost ziaren w materiale. Przy najmniejszej prędkości deformacji $0,01/\text{s}$ średnia wielkość ziarna wynosi $15,5\mu\text{m}$, a przy największej $10/\text{s}$ – $11,1\mu\text{m}$. Autor pracy przedstawia także wyniki badań mikrostrukturalnych dla temperatury 600°C , gdzie wartości średniej wielkości ziarna wynosiły poniżej $2\mu\text{m}$, aczkolwiek badania te realizowane były na materiale zakupionym u innego dostawcy. Kończącym wnioskiem Autora, dotyczącym obserwacji mikrostrukturalnych jest wskazanie możliwości rozdrobnienia ziarna w czystym tytanie przy wykorzystaniu obróbki termoplastycznej. Na bazie wyników uzyskanych w temperaturze 400°C Autor stwierdza, że najlepsze efekty uzyskuje się przy średnich prędkościach deformacji plastycznej.

Badania właściwości mechanicznych realizowane były w testach ściskania bez braku zgodności z rekomendowaną normą, co wiązało się z uzyskanym kształtem próbek po procesach termoplastycznych. Według Autora pracy „z tego powodu wykonano analizę porównawczą między próbką referencyjną a próbkami poddanymi TMP”. Badaniom została także poddana twardość materiału w testach Vickersa przy skali HV0.2. W próbkach uzyskanych w temperaturze 400°C obserwuje się wzrost granicy plastyczności jedynie przy najmniejszej prędkości deformacji $0,01/\text{s}$. Przy wyższych prędkościach granica plastyczności jest niższa w porównaniu do materiału wyjściowego, co Autor tłumaczy procesami rekrytalizacji dynamicznej zachodzącej w trakcie deformacji. Zastanawiający jest wyraźny wzrost średnich wartości twardości w porównaniu do materiału referencyjnego, niezależnie od prędkości deformacji plastycznej. Dla próbki poddawanej procesom TMP w temperaturze 500°C obserwuje się już wyższe wartości granicy plastyczności dla wszystkich prędkości odkształcenia, przy czym najwyższa wartość uzyskana jest przy największej prędkości $10/\text{s}$. Podobnie, średnia twardość, rośnie wraz ze wzrostem prędkości deformacji. W 600°C wzrost średniej twardości jest mniejszy, a wyraźnie wyższa wartość granicy plastyczności zostaje osiągnięta tylko przy największej deformacji plastycznej. Dalej w 700°C oraz 800°C mierzone wartości granicy plastyczności ulegają zmniejszeniu wraz ze wzrostem temperatury, poniżej wartości dla materiału referencyjnego. Pomimo tego, twardość ściskanych próbek wciąż jest wyższa.

Rozdział 6 pracy skupia się na symulacji numerycznej obróbki termoplastycznej tytanu z wykorzystaniem różnych fenomenologicznych modeli matematycznych (str. 55 -77). Celem badań różnych modeli matematycznych było znalezienie modelu, który będzie jak najlepiej odwzorowywał procesy przeróbki plastycznej tytanu. Autor pracy, w oparciu o dane literaturowe wytypował do analizy cztery modele: model Arrheniusa, Johnsona-Cooka, Khanga-Huanga-Lianga oraz Ananda. Uzyskane dane eksperymentalne posłużyły do wyznaczenia stałych w równaniach, pozwalających na określenie krzywych teoretycznych w celu porównania z rzeczywistymi wynikami uprzednio przeprowadzonych badań. Według Autora dysertacji model Arrheniusa dobrze odwzorowuje dane eksperymentalne tylko w pierwszej fazie odkształcenia. Dodatkowe różnice między modelem matematycznym, a rzeczywistymi eksperymentami obserwuje się przy trzystopniowym odkształceniu tytanu wywołanym dynamicznym zdrowieniem i rekrytalizacją. Model Johnsona-Cooka nie jest zdolny do odzwierciedlenia pierwszej fazy odkształcenia, nie pokazuje zmian zachodzących

między naprężeniem sprężystym, a plastycznym. Dobrze natomiast odwzorowuje plastyczne płynięcie materiału (Rys. 6.7). Model Khana-Huanga-Lianga także nie pozwala na dopasowanie krzywej dla pełnego zakresu odkształceń. Im bliżej trzeciej fazy odkształcenia tym obserwowane różnice były coraz większe. Model nie odwzorowywał spadku naprężeń. Wykazano także istotne niedopasowanie przy przejściu z naprężenia sprężystego do plastycznego. Najlepsze dopasowanie do danych eksperymentalnych uzyskano przy analizie modelu Ananda. Model dobrze odwzorowywał początkową fazę odkształcenia sprężystego jak i plastycznego. Pewne rozbieżności autor obserwował w końcowej fazie odkształcenia. Dla wszystkich badanych modeli autor przeanalizował statystyczne parametry analizy regresji, sumę kwadratów błędów SSE, współczynnik determinacji R-kwadrat oraz średnią kwadratową różnicę między wartościami rzeczywistymi zmiennej zależnej, a wartościami przewidywanymi przez model RSME. Uzyskane wyniki zostały szeroko przedyskutowane w oparciu o dane literaturowe. Warto zauważyć że niektóre badane modele nie były do tej pory stosowane dla tytanu.

Rozdział 7 pracy (str. 78 – 103) to weryfikacja poprawności implementacji modelu Ananda, który użyto w programie Ansys z wykorzystaniem uprzednio określonych stałych materiałowych. Autor stworzył model geometryczny w programie SolidWorks, który zaimportował do programu Ansys. Poza odwzorowaniem przeprowadzonych rzeczywistych eksperymentów przeprowadzono także symulację dla prędkości 5 s^{-1} . Przeprowadzona analiza MES wykazała duże rozbieżności, co Autor próbował tłumaczyć nietypowym odkształceniem próbek polegającym na niesymetrycznej deformacji i występowaniu naprężeń ścinających nie uwzględnionych w modelu. Innym powodem mogła być anizotropia właściwości w zakupionym materiale. Zgodny z rzeczywistością charakter zmian obserwowano w zakresie stopnia odkształcenia do 0.5, 0.6.

Rozdział 8 (str. 104 -107) to podsumowanie pracy Autora, gdzie przedstawiono krótką dyskusję oraz wnioski potwierdzające osiągnięcie podstawowych celów pracy.

Osiągnięcia Doktoranta

Najważniejsze osiągnięcia doktoranta to:

- umiejętność połączenia rzeczywistych eksperymentów deformacji plastycznej tytanu, realizowanych poprzez ściskanie na gorąco w symulatorze Gleeble, z szerokim spektrum modeli matematycznych odwzorowujących zachowanie się materiału w trakcie odkształcenia plastycznego,
- przeprowadzenie kompleksowej analizy modeli matematycznych dla czystego tytanu wraz wyznaczeniem stałych materiałowych, weryfikacją ich dopasowania do rzeczywistych danych eksperymentalnych oraz szeroką dyskusją z danymi literaturowymi.

Dysertacja została napisana poprawną polszczyzną zarówno ze strony ogólnej jak i technicznej. Konstrukcja pracy była logiczna, poprawnie przedstawiono informacje zarówno w części przeglądu literaturowego jak i w części wyników badań własnych. Duża ilość zrealizowanych badań, zarówno rzeczywistych eksperymentów jak i symulacji matematycznych z

wykorzystaniem wielu modeli teoretycznych świadczy o dużej wiedzy Doktoranta w obszarach badawczych związanych z dyscypliną inżynierii mechanicznej, a także o umiejętności planowania oraz analizowania wyników eksperymentów.

Recenzowana praca stanowi oryginalne osiągnięcie Doktoranta. Przeprowadzone badania zostały szeroko udokumentowane dużą ilością wykresów i tabel, a eksperymenty naukowe zostały przeprowadzone prawidłowo, zgodnie z założeniami pracy. Niniejsza Dysertacja zawiera w sobie zbiór danych, który może być z powodzeniem wykorzystany podczas analizy kolejnych zagadnień naukowo-badawczych dotyczących optymalizacji obróbki termoplastycznej czystego tytanu, zarówno poprzez rzeczywiste eksperymenty, jak i ich symulacje metodami numerycznymi.

Uwagi merytoryczne

Przedstawiona przez Autora Dysertacja wzbudza pewne wątpliwości, które należy przedyskutować.

1. Na stronie 11 w rozdziale 2 „Przegląd Literatury” przedstawiono skład chemiczny badanego tytanu według normy ASTM (nie podano jednostek miary). Na stronie 31 w podrozdziale 4.1 „Materiał i metody” podano ponownie skład chemiczny badanego tytanu według normy EN, gdzie wskazana jest dodatkowo zawartość wodoru. Czy to są dwa różne materiały? Który był przedmiotem badań?
2. Na stronie 12 w rozdziale 2.1 „Metody ulepszania własności mechanicznych tytanu i jego stopów stosowanych w bioinżynierii” Autor przedstawia metody otrzymywania mikro i nano ziaren w metalach. Według Doktoranta metody te dzielimy na dwie grupy, obróbkę termoplastyczną TMP oraz duże odkształcenie plastyczne SPD. Obie przedstawione metody bazują na odkształceniu plastycznym i rozdrobnieniu struktury poprzez zgniot. Brak jest informacji o szeregu innych metod takich jak: konsolidacja nanoproszków, metody chemicznego oraz elektrolitycznego osadzania czy metody nanokrystalizacji materiałów amorficznych.
3. W pracy często pojawia się określenie efektów zmniejszenia wielkości ziaren w materiale jako „fragmentacja ziarna”. Zgodnie z wytycznymi inżynierii materiałowej poprawne określenie to „rozdrobnienie ziarna”. Przykład takiego nazewnictwa można znaleźć na stronie 13 w rozdziale 2.1.1. „Metody SPD”.
4. Na stronie 13 w rozdziale 2.1.1. „Metody SPD” Autor pracy podkreśla, że po procesie HE otrzymujemy materiał o niskiej plastyczności oraz małych rozmiarach ograniczających zastosowania przemysłowe. Co oznacza niska plastyczność? Plastyczność tytanu po procesach HE wynosząca ~ 10% wydłużenia jest w pełni wystarczająca do dalszego kształtowania tego materiału metodami obróbki numerycznej na gotowe wyroby. Elementy złączne wykonywane z nanokrystalicznego tytanu zostały skomercjalizowane.
5. Na stronie 14 w rozdziale 2.1.2. Autor pracy wskazuje, że główną zaletą obróbek TMP jest to, że można je wykorzystać do produkcji prefabrykatów, nadających się pod

obróbkę skrawaniem. Główną zaletą tych procesów jest prawdopodobnie możliwość kontrolowania procesów dynamicznego zdrowienia i rekrytalizacji w celu optymalizacji mikrostruktury materiałów po deformacji plastycznej. Prefabrykaty pod obróbkę skrawaniem mogą być równie dobrze wytwarzane po procesach SPD, jakim jest np. metoda HE.

6. Na stronie 24 w rozdziale 2.2.2. „Modele fizyczne” w trakcie opisu „Modele uwzględniające dynamiczne zdrowienie (DRV) i dynamiczną rekrytalizację (DRX)” Autor wskazuje, że proces rekrytalizacji dynamicznej zachodzi podczas odkształcania metali w wysokiej temperaturze, przy niskich wartościach prędkości odkształcenia. Wysokiej, czyli jakiej? Przy odpowiednio dużym zgniocie, energia zmagazynowana w materiale jest tak wysoka, że proces może zachodzić w relatywnie niskich temperaturach, szczególnie przy dużych prędkościach deformacji plastycznej.
7. Na stronie 29 w rozdziale 3. „Cele i teza pracy” jest napisane przez Autora, że „Klasyczne obróbki SPD znacznie zwiększają wytrzymałość, twardość, oraz plastyczność materiału”. W rozdziale 2.1.1. „Metody SPD” Autor wielokrotnie wskazuje na niską plastyczność jako wadę metod SPD. Zatem, czy procesy SPD powodują niską plastyczność czy poprawę plastyczności?
8. Na stronie 29 w rozdziale 3. „Cele i teza pracy” Autor stawia tezę „Czysty tytan, po obróbce plastycznej w podwyższonej temperaturze może zastąpić obecnie stosowane w inżynierii biomedycznej stopy tytanu”. Teza jest dosyć odważna zwłaszcza, że praca nie przewiduje badań klinicznych materiału, a także bardziej zaawansowanych badań mechanicznych jak np.: badania zmęczeniowe czy badania anizotropii mikrostruktury oraz właściwości.
9. Na stronie 30 w rozdziale 4 „Badania termoplastyczne.....” Autor przechodzi do opisu badań ściskania na gorąco tytanu, przedstawienia wyników oraz ich dyskusji. Brak jest jasno przedstawionej Metodyki Badawczej obejmującej kompleksowo schemat badań w całej pracy oraz wykorzystane narzędzia i techniki. Wszystkie te informacje czytelnik musi zbierać analizując kolejne rozdziały pracy.
10. Na stronie 30 w rozdziale 4 „Badania termoplastyczne...” Autor stwierdza, że w trakcie przeróbki plastycznej na gorąco w strukturze materiału zachodzą jednocześnie procesy wynikające z mechanizmu odkształcenia plastycznego oraz procesy umocnienia. Oba zjawiska są tożsame. Umocnienie jest efektem odkształcenia plastycznego.
11. Na stronie 31 w rozdziale 4.1 „Materiał i metody” Autor przedstawia próbki do badań o geometrii cylindrycznej o wymiarach $\varnothing 10\text{mm}$ i wysokości 12mm. Jak to ma się do małej objętości materiałów po procesach SPD wskazywanej jako jedną z ich głównych wad?
12. Na stronie 34 w rozdziale 4.2. „Wyniki testów termoplastycznych” Autor pracy wskazuje na tendencję do większego odkształcenia w jednym kierunku próbek po procesie TMP. Autor tłumaczy to anizotropią związaną prawdopodobnie z nierównomiernym przewalcowaniem wytwarzanego pręta. Przeszłość technologiczna badanego materiału może determinować otrzymywane wyniki. Z tego powodu przed przystąpieniem do badań, wymagana jest analiza właściwości materiału w stanie wyjściowym, najlepiej przeprowadzona na obu kierunkach (wzdłużnym oraz poprzecznym). Jeśli stwierdzona anizotropia może w znacznym stopniu wpływać na

rezultaty prowadzonych badań materiał należy poddać obróbce cieplnej wyżarzania w celu ujednorodnienia mikrostruktury.

13. W rozdziale 5 na stronie 38 „Obserwacje mikrostruktury i analiza EBSD” Autor pracy wskazuje na konieczność wyboru do analizy mikrostrukturalnej tylko kilku próbek z uwagi na długotrwały proces ich preparatyki (praca nad jednym preparatem trwa około 6 godzin). Z punktu widzenia kilkuletniej procedury realizacji badań w ramach pracy doktorskiej nie jest to zbyt trafny argument.
14. W rozdziale 5 na stronie 38 „Obserwacje mikrostruktury i analiza EBSD” Autor pracy stwierdza, że wybrano próbki uzyskane w temperaturze 400°C oraz 800°C. Analiza wyników badań mechanicznych w rozdziale 5.1 na stronach 47 -53 wskazuje, że w wybranej temperaturze wartości granicy plastyczności są niższe w porównaniu do materiału referencyjnego niemal dla wszystkich prędkości deformacji, zarówno w 400°C jak i 800°C. Wyższe wartości obserwuje się dla temperatury 500°C oraz 600°, które nie były analizowane. W pracy, wyniki wstawione dla temperatury 600°C pochodzą z badań materiału dostarczonego przez innego producenta (strona 46), zatem zestawienie ich z pozostałymi badaniami może być obarczone dużym błędem. Pełna ewolucja mikrostruktury od 400°C do 800°C znacznie by wzbogaciła niniejszą pracę oraz pozwoliła na wyciągnięcie bardziej trafnych wniosków.
15. W rozdziale 5 na stronach 38 – 47 brak jest informacji czy obserwowano przekrój wzdłużny czy poprzeczny próbek. To jest istotna informacja szczególnie, że Autor pracy wskazywał na anizotropowy charakter materiału w trakcie testów przeróbki plastycznej.
16. W rozdziale 5 na stronach 41 – 42 analizując obrazy EBSD próbek uzyskanych w temperaturze 400°C przy prędkości odkształcenia plastycznego 1/s Autor pracy stwierdza, że ziarna są bardziej wydłużone i zdeformowane, a między nimi możemy zaobserwować rozdrobnienie ziaren poniżej rozdzielczości aparatury badawczej. Poniżej rozdzielczości aparatury badawczej niewiele można zaobserwować. W przyszłych badaniach dobrze by było skorzystać w takim przypadku z innych technik badawczych jak np.: transmisyjna mikroskopia elektronowa TEM.
17. W rozdziale 5.1. „Testy wytrzymałościowe” na stronach 48 -53 Autor wskazuje, że nie było możliwe wykonanie próbek do testów wytrzymałościowych zgodnie z rekomendacjami zawartymi w normie ASTM. Czy testy na materiale wyjściowym były przeprowadzone zgodnie z normą? Zastanawiające są w wielu przypadkach niższe wartości granicy plastyczności w porównaniu do materiału referencyjnego pomimo wyraźnie wyższej twardości. Wyniki pomiarów twardości są jak najbardziej logiczne, na co wskazuje wykres 5.27 na stronie 53.
18. Testy wytrzymałościowe przeprowadzone w rozdziale 5.1 budzą wątpliwości. Realizowane są poprzez próby ściskania uprzednio ściskanych próbek. Być może bardziej trafne wyniki można by było otrzymać w próbach rozciągania, realizowanych na mini próbkach. Mogłoby to wpłynąć na poprawność otrzymanych wyników. Szczególnie, że w pracy często przywoływane są zagadnienia związane z plastycznością materiału, którą najlepiej określa procentowy współczynnik wydłużenia w badaniach rozciągania. Powoduje to, że wniosek przywołany w rozdziale 5.2 na stronie 54

„obróbka TMP nie wpłynęła znacząco na właściwości plastyczne tytanu” jest dyskusyjny.

Uwagi edycyjne:

Praca zawiera szereg błędów edycyjnych. Poniżej wymieniono niektóre z nich.

1. W pracy nie zachowano kolejności pojawiania się kolejnych referencji. Pierwsze powołanie przedstawione we wstępie pracy ma numer [52] (strona 9). Kolejne numery pojawiają się w sposób przypadkowy.
2. Na stronie 13 w rozdziale 2.1.1. w trzecim akapicie pojawia się skrót MDF, którego znaczenie nie zostało przedstawione.
3. Wielokrotnie w pracy różne przedstawiane parametry mają dodatkowo tłumaczenia na język angielski. Przykładem jest opis na stronie 16 w rozdziale 2.2.1 „Modele fenomenologiczne” – ostatni akapit. Jaki sens ma tłumaczenie wybiórcze tylko niektórych parametrów?
4. Strona 16 tytuł rozdziału 2.2.1. „Modele fenomenologiczne”. Powinno być „Modele fenomenologiczne”.
5. Strona 16, rozdział 2.2.1. W pierwszej linijce, w pierwszym zdaniu pojawia się przekreślony wyraz „są”.
6. Strona 27 ostatni akapit „zdecydowanie prostsze w zastosowaniu równania fenomenologiczne”. Powinno być „zdecydowanie prostsze w zastosowaniu są równania fenomenologiczne”
7. Strona 30, rozdział 4, ostatni akapit, drugie zdanie. „ ... i przy różnych wartościach prędkościach odkształcenia”. Powinno być „ ... i przy różnych wartościach prędkości odkształcenia”
8. Rozdział 4.1. „Materiał i metody”, strona 31 powinien stanowić całkowicie osobny rozdział obejmujący wszystkie narzędzia oraz techniki badawcze, a także schemat przeprowadzonych badań.
9. Strona 34, rozdział 4.2. „wyniki testów termoplastycznych” Drugie zdanie od końca strony. Autor pracy powołuje się na rysunki 3.3 oraz 3.4. Brak jest w pracy takich rysunków. Prawdopodobnie pomyłona została numeracja.
10. Rozdział 5 „Obserwacje mikrostruktury i analiza EBSD” strona 38. Drugi akapit, pierwsze zdanie „wybrano obszar z centralnych obszarów” błąd stylistyczny.
11. Rozdział 5 „Obserwacje mikrostruktury i analiza EBSD” strona 38. Drugi akapit, dwie kropki na końcu trzeciego zdania.
12. Rozdział 5 „Obserwacje mikrostruktury i analiza EBSD” strona 46. Drugie zdanie. Powołanie na rysunek 5.21 chyba tutaj jest błędne. Szczególnie że brak jest powołania na rysunek 5.15.
13. Rozdział 5.1, strona 47, „Testy wytrzymałościowe oraz pomiary twardości” powinien być odrębnym rozdziałem a nie częścią podpiętą pod badania mikrostrukturalne.
14. Rozdział 5.1, strona 47, „Testy wytrzymałościowe oraz pomiary twardości” Autor przedstawia twardość materiału w stanie wyjściowym która wynosi 200,4 HV0.2. Przy tak wysokiej wartości podawanie wyniku z dokładnością po przecinku nie jest

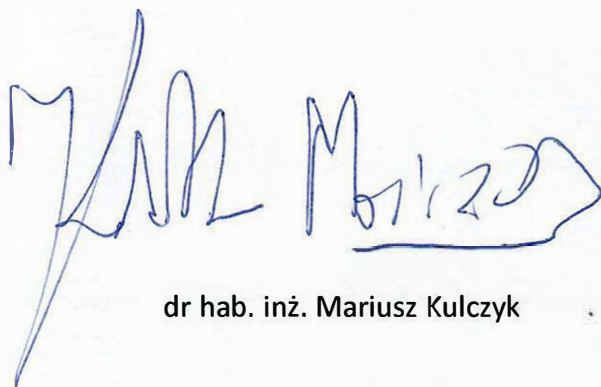
- potrzebne. Różnice leżą w zakresie błędów pomiarowych. Dotyczy to globalnie wszystkich pomiarów twardości.
15. Rozdział 5.1, strona 48, „Testy wytrzymałościowe oraz pomiary twardości”. W ostatnim akapicie jest powołanie na rysunek 5.24. Nie jest to prawdopodobnie poprawny numer.
 16. Rozdział 5.1, strony 48 – 53. Rysunki 5.17, 5.19, 5.21, 5.23, 5.25. Brak symbolu odkształcenia na osi X. Brak poprawnego opisu kolejnych serii. Prędkość powinna być wyrażona z zastosowaniem potęgi „s⁻¹”. Co oznacza tytuł Seria „400”, seria „500” ? Nie powinno być tego napisu albo powinna być jasno wskazana temperatura.
 17. Rozdział 5.1, strony 49 – 53. Rysunki 5.18, 5.20, 5.22, 5.24, 5.26. Brak prawidłowych symboli na osi X oznaczających prędkość deformacji plastycznej.
 18. Rozdział 6.2 „Model Arrheniusa” strona 57 – 59. Brak powołania w tekście na rysunki 6.1, 6.2, 6.3, 6.4.
 19. Rozdział 6.2 „Model Arrheniusa” strona 61. Ostatni akapit „Dla przypadku 400-10”. Powinno być „dla temperatury 400°C i prędkości 10/s”.
 20. Rozdział 6.3 „Model Johnsona-Cooka” strona 67. Ostatni akapit w tym rozdziale. Powołanie na rysunek 4.7a. Brak takiego rysunku.
 21. Rozdział 6 na stronie 55 „Modele matematyczne oraz symulacja numeryczna” oraz rozdział 7 na stronie 78 „Symulacje numeryczne”. Tytuły obu rozdziałów są chaotyczne. Wprowadzają w zakłopotanie czytelnika.
 22. Rozdział 7.4 „Wyniki analiz”, strony 83 -98. Sugeruję unikania nazywania kolejnych rozdziałów przypadek 400°C, przypadek 500°C To jest zbyt skrótowe i mało profesjonalne. Można napisać „Symulacja numeryczna tytanu przerabianego plastycznie w temperaturze 400°C”.
 23. Rozdział 7.4 „Wyniki analiz”, strona 85. Pomiędzy rysunkami 7.7 oraz 7.8 znajduje się powołanie na rysunek 4.15. Brak takiego rysunku w pracy.

Powyższe uwagi merytoryczne oraz edycyjne nie umniejszają znacznie wartości dysertacji. Rozprawa doktorska jest wartościowa oraz oryginalna. Przedstawione wątpliwości oraz dyskusja części wyników ma na celu pomoc w prawidłowym podejściu podczas przyszłej kontynuacji przeprowadzonych badań.

Ocena końcowa

Ocena przedstawionej dysertacji mgr. inż. Jakuba Bańczerowskiego pozwala stwierdzić, że Autor poprzez wnikliwą analizę stanu zagadnienia trafnie sformułował cele swojej rozprawy. Umiejętność połączenia rzeczywistych eksperymentów badawczych deformacji plastycznej tytanu w podwyższonej temperaturze z teoretycznymi modelami matematycznymi oraz ich weryfikacja stanowi osiągnięcie doktoranta i wpisują się w cele przedstawione w pracy. Widoczna jest umiejętność wykorzystania metod, technik i narzędzi badawczych oraz poprawność realizowanych badań naukowych wraz z ich analizą. Pomimo szeregu nieuniknionych uwag o charakterze merytorycznym oraz edycyjnym, należy mieć na względzie, że stanowią one jedynie sugestie dla dalszego kształtowania kariery naukowo-badawczej Doktoranta.

Uważam, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone ustawą o stopniach i tytułach naukowych, wnioskując tym samym o dopuszczenie Pana mgr inż. Jakuba Bańczerowskiego do publicznej obrony w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Mariusz Kulczyk', with a stylized flourish at the end.

dr hab. inż. Mariusz Kulczyk