

dr hab. inż. Jarosław Filipiak, prof. PWr
Politechnika Wrocławska
Katedra Mechaniki, Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej
ul. Łukasiewicza 5
50-371 Wrocław

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba Bańczerowskiego
pt. „Proces technologiczny oraz modelowanie numeryczne obróbki termoplastycznej tytanu
na potrzeby inżynierii biomedycznej”

Recenzję opracowano na prośbę Dziekana Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Tomasza Chmielewskiego, zgodnie z uchwałą Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej z dnia 10.05.2023r. (pismo MT.521.5.2023 z dnia 19.05.2023r.)

Doktorant postawił sobie za cel wykazanie możliwości modyfikacji właściwości mechanicznych czystego tytanu poprzez zastosowanie odpowiedniej obróbki plastycznej w podwyższonej temperaturze. Celem praktycznym tych działań jest możliwość zastosowania czystego tytanu do wytwarzania silnie obciążonych komponentów endoprotez stawów. Endoprotezoplastyka stawów, w szczególności kończyn dolnych, jest obecnie głównym sposobem leczenia zaawansowanych zmian zwyrodnieniowych stawów. Ze względu na skomplikowany kształt powierzchni stawowych oraz złożony stan obciążenia siłami o znacznych wartościach, szczególne wymagania muszą spełniać materiały stosowane do wytwarzania komponentów endoprotez. Materiały te muszą charakteryzować się odpowiednimi parametrami wytrzymałościowymi – pozwalającymi na sprośnięcie polu naprężenia o znacznych wartościach - oraz technologicznymi, które umożliwią kształtowanie elementów o złożonej geometrii. Ponadto, od tych materiałów wymaga się jeszcze jednej cechy – biogodności. Biogodność materiału rozumiana jest dwojako. Po pierwsze materiał wprowadzony do środowiska organizmu żywego nie może wykazywać oddziaływania toksycznego i generować odczynów zapalnych, czy alergizujących. Z drugiej strony, materiał musi sprośać oddziaływaniu niezwykle agresywnego środowiska, jakim są struktury tkankowe organizmu żywego. Obecnie takie wymagania spełniają tylko nieliczne materiały spośród znanych człowiekowi i przez niego wytwarzanych. W grupie materiałów metalicznych obecnie liczną grupę stanowią stopy tytanu, w tym najpopularniejszy – Ti-6Al-4V. Jednak w literaturze coraz częściej pojawiają się doniesienia wykazujące toksyczne działanie wydzielającego się i następnie koncentrującego się w tkankach aluminium i wanadu, szczególnie w wyniku długotrwałego kontaktu z środowiskiem tkankowym. Biorąc pod uwagę fakt rosnącej średniej długości życia populacji światowej, a więc potencjalnie dłuższy czas eksploatacji endoprotezy, oraz wzrost liczebności młodych pacjentów, w wieku 20 ÷ 30 lat, kiedy to ma miejsce zaimplantowanie endoprotezy, problem nabiera szczególnej wagi. Z tego względu

podejmowane są działania mające na celu wyeliminowanie tego niekorzystnego efektu poprzez zastępowanie aluminium i wanadu innymi pierwiastkami, np.: niobem, tantalum, cyrkonem, molibdenem. Inna droga polega na poszukiwaniu możliwości poprawy parametrów mechanicznych czystego tytanu poprzez odpowiednio prowadzone procesy technologiczne. I tym właśnie zagadnieniem zajmuje się Pan mgr inż. Jakub Bańczerowski w swojej rozprawie doktorskiej. Należy zatem stwierdzić, że podjęta w rozprawie tematyka wpisuje się w aktualne trendy badawcze w zakresie poszukiwania sposobów uzyskiwania biomateriałów o korzystniejszych właściwościach fizycznych, umożliwiających wytwarzanie implantów o jak najlepszym dopasowaniu biomechanicznym. W tym kontekście rozprawa mieści się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska została napisana w formie zwartej publikacji zawierającej osiem głównych rozdziałów oraz spis materiałów źródłowych, spis rysunków i tabel, a także streszczenia w językach polskim i angielskim.

Układ pracy jest typowy dla prac eksperymentalno – obliczeniowych. W rozdz. 1 Doktorant przedstawił tematykę rozprawy, oraz genezę podjętego problemu badawczego, argumentując zasadność podjęcia przedstawionego programu badań.

W rozdziale 2 przedstawiono analizę aktualnego stanu wiedzy w dwóch obszarach. Pierwszy, dotyczy metod modyfikacji własności mechanicznych tytanu i stopów tytanu stosowanych do wytwarzania implantów. Skoncentrowano się na metodzie dużych odkształceń plastycznych i obróbce termoplastycznej. Przedstawiono i omówiono aktualny stan wiedzy na temat wymienionych procesów technologicznych zwracając uwagę na ich słabe i mocne strony. Drugi obszar związany jest z przeglądem modeli matematycznych stosowanych w opisie procesu obróbki plastycznej. Omówiono i porównano najczęściej stosowane modele fenomenologiczne i fizyczne. Analizując poszczególne modele skoncentrowano się na spektrum procesów fizykalnych towarzyszących procesowi obróbki plastycznej i uwzględnionych w poszczególnych modelach, a także zagadnieniom związanych z łatwością praktycznej implementacji tych modeli w kontekście wyznaczania stałych materiałowych i parametrów wymaganych w modelach. Studium literaturowe obejmuje 113 pozycji.

W rozdziale 3 Doktorant sformułował tezę oraz trzy główne cele, których realizacja powinna dostarczyć argumentów na potwierdzenie tezy. W tezie Doktorant stwierdza, że: „czysty tytan po obróbce plastycznej w podwyższonej temperaturze może zastąpić obecnie stosowane w inżynierii biomedycznej stopy tytanu”.

Aby udowodnić postawioną tezę Doktorant przeprowadził prace badawcze i obliczeniowe opisane w trzech następnych rozdziałach. W rozdziale 4 przedstawiono prace badawcze mające na celu wyznaczenie charakterystyk technologicznej plastyczności dla czystego tytanu Grade 2 w warunkach przeróbki plastycznej na gorąco. Na symulatorze Gleeble 3800, umożliwiającym badania w temperaturach odpowiadającym rzeczywistym warunkom walcowania, przeprowadzono testy jednoosiowego ściskania cylindrycznych próbek dla różnych wartości temperatur (400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C i 800 °C) oraz prędkości odkształcenia (0,01 s⁻¹, 0,1 s⁻¹, 1 s⁻¹ i 10 s⁻¹). Jednocześnie przyjęto 60 % redukcję wysokości próbki, co w przypadku dużych odkształceń wyrażanych w mierze logarytmicznej odpowiada odkształceniu rzeczywistemu o wartości 0,98. Na podstawie przeprowadzonych testów wyznaczono charakterystyki $\sigma - \epsilon$, które posłużyły do oceny wpływu rozpatrywanych zmiennych zależnych na przebieg procesu uplastycznienia i procesów zachodzących w materiale badanych próbek. Otrzymane wyniki wykazały istotne oddziaływanie analizowanych parametrów na przebieg procesu uplastycznienia czystego tytanu Grade 2. W rozdziale 5 rozszerzono analizę o ocenę

mikrostruktury badanych próbek, koncentrując się na zmianie wielkości ziarna w zależności od przyjętych zmiennych, tj. temperatury i prędkości odkształcenia. Badania przeprowadzono przy pomocy mikroskopu Hitachu SU70. W badaniach analizowano wielkość ziaren w próbce referencyjnej – niezdeformowanej – i próbkach odkształconych w temp. 400 °C i 800 °C. Wyniki badań potwierdziły możliwość redukcji wielkości ziarna czystego tytanu za pośrednictwem obróbki termoplastycznej o odpowiednio dobranych wartościach temperatury i prędkości odkształcenia. W tym samym rozdziale przedstawiono badania doświadczalne mające na celu wyznaczenie i porównanie właściwości mechanicznych próbek poddanych przeróbce plastycznej z określonymi wartościami temperatury i prędkości odkształcenia. Przeprowadzono test quasi statycznego ściskania oraz pomiar twardości w skali Vickersa. Otrzymane wyniki pozwoliły na stwierdzenie, że możliwe jest rozdrobnienie ziarna tytanu Grade 2 stosując obróbkę termoplastyczną, a także możliwe jest zwiększenie twardości materiału o ok. 27 % przy jednoczesnym uzyskaniu granicy plastyczności na poziomie 900 MPa, charakterystycznej dla stopu tytanu Ti-6Al-4V.

W rozdziale 6 Autor rozprawy podjął się porównania skuteczności modelowania procesu obróbki termoplastycznej za pomocą czterech wybranych modeli: Arrheniusa, Johnsona-Cooka, Khanga-Huanga-Lianga oraz Ananda. Na podstawie danych z wcześniejszych badań eksperymentalnych wyznaczono lub dobrano wartości stałych występujących w modelach. Krzywe $\sigma - \epsilon$ odpowiadające poszczególnym modelom porównano z krzywymi doświadczalnymi wyznaczonymi w rozdz. 4 i określono współczynnik determinacji ilustrujący stopień ich dopasowania. Na podstawie przeprowadzonych analiz Doktorant stwierdza, że spośród rozpatrywanych modeli, to model Ananda najlepiej opisuje przebieg obróbki termoplastycznej czystego tytanu. Kolejnym, logicznym krokiem było zweryfikowanie poprawności implementacji modelu Ananda. W tym celu w rozdz. 7 Doktorant przeprowadził porównanie rezultatów symulacji MES w środowisku Ansys z wynikami badań eksperymentalnych. Symulacje przeprowadzono na modelu próbki walcowej, w której materiał opisano za pomocą lepkoplastycznego modelu Ananda. Zastosowano warunki brzegowe odpowiadające tym z etapu badań eksperymentalnych. Również parametry zmienne, które rozpatrywano, czyli temperatura i prędkość odkształcenia przyjęto takie same. Wyniki symulacji analizowano na podstawie pola naprężeń normalnych wzdłuż osi próbki. W ostatnim rozdziale Doktorant sformułował końcowe wnioski podsumowujące osiągnięte wyniki oraz kierunki dalszych prac przede wszystkich zmierzających do wykorzystania omawianego modelu obróbki termoplastycznej na przykładzie rzeczywistego prefabrykatu implantu.

Odnosząc się do strony redakcyjnej rozprawy stwierdzam, że pomimo starannej edycji rozprawy Doktorant nie uniknął wielu potknięć redakcyjnych. Rażąco są błędne odniesienia w tekście (str. 34) do rysunków 3.3, 3.4. – takich rysunków nie ma w pracy! Na str. 46 w tekście jest powołanie na rys. 5.21, a powinno być powołanie na rys. 5.15. Na str. 48 jest powołanie na rys. 5.24, a powinno być na rys. 5.18. Istotnym z niedopatrzaniem, poważnie utrudniającym analizę wyników badań wytrzymałościowych opisanych w rozdz. 5.1. jest nieprecyzyjne zdefiniowanie próbki referencyjnej. Doktorant poprzestaje na określeniu „próbka referencyjna” wprowadzając czytelnika w spore zakłopotanie. Sądząc po wartości R_p , można się domyślać, że w tym przypadku Autor porównuje parametry próbek czystego tytanu grade 2 poddanych obróbce termoplastycznej z właściwościami stopu tytanu – prawdopodobnie Ti-6Al-4V. Ale to tylko domysły. Czy taki był zamysł Doktoranta?

Podsumowując tę część recenzji stwierdzam, że teza postawiona na początku pracy została udowodniona poprzez wyniki prac badawczych i obliczeniowych przedstawionych w rozdziałach 4 ÷ 8. Do oryginalnych osiągnięć zaprezentowanych przez Doktoranta należy zaliczyć:

1. Wykazanie pozytywnego oddziaływania obróbki termoplastycznej tytanu Grade 2, przy czym najkorzystniejsze efekty uzyskuje się w zakresie temperatur 400 ÷ 600 °C i prędkości odkształcenia 0,1 ÷ 1 s⁻¹. Obserwowany jest wzrost twardości w skali Vickersa, średnio o 27% przy jednoczesnym utrzymaniu poziomu naprężeń uplastyczniających charakterystycznych dla stopu Ti-6Al-4V.
2. Przeprowadzenie analizy porównawczej modeli matematycznych, które potencjalnie mogą być przydatne do opisu procesu obróbki termoplastycznej czystego tytanu. Doktorant wybrał spośród prezentowanych w literaturze przedmiotu, cztery modele: Arrheniusa, Johnsona-Cooka, Khanga-Huanga-Lianga oraz Ananda. Bazując na danych literaturowych oraz rozważaniach własnych zostały określone średnie wartości stałych wymaganych w poszczególnych modelach, a następnie wyznaczone funkcje $\sigma(\epsilon)$ porównano z analogicznymi przebiegami uzyskanymi eksperymentalnie w rozdz. 4 niniejszej dysertacji. Na podstawie oceny stopnia dopasowania krzywych teoretycznych do krzywych eksperymentalnych Doktorant stwierdził, że model matematyczny zaproponowany Ananda w najlepszym stopniu opisuje proces obróbki termoplastycznej tytanu Grade 2.
3. Opracowanie symulacji MES procesu ściskania próbki walcowej wykonanej z czystego tytanu Grade 2, z zastosowaniem modelu matematycznego Ananda, w celu określenia pola naprężenia w próbce poddanej obróbce termoplastycznej. Porównanie wyników symulacji z wynikami badań doświadczalnych pozwala na stwierdzenie, że zastosowany opis matematyczny może być przydatny na etapie wstępnej analizy efektów obróbki termoplastycznej elementów wykonanych z czystego tytanu Grade 2.

Należy również podkreślić, że Doktorant jest pierwszym autorem dwóch wieloautorskich publikacji o tematyce bezpośrednio związanej z tematyką rozprawy. Publikacje ukazały się w renomowanym czasopiśmie *Materials Science and Technology* legitymującym się pięcioletnim IF = 2.586 (2021). Publikacje są cytowane w ocenianej rozprawie i stanowią bardzo dobre wsparcie merytoryczne.

Wymienione osiągnięcia stanowią nowe spojrzenie na możliwość modelowania procesu obróbki termoplastycznej czystego tytanu Grade 2, w aspekcie poszukiwania zestawu parametrów procesu technologicznego pozwalającego na uzyskanie parametrów mechanicznych, które obecnie są charakterystyczne dla stopów tytanu. Należy również podkreślić, że wyniki prac badawczych i obliczeniowych zawarte w ocenianej rozprawie zawierają duży potencjał praktyczny w obszarze wytwarzania implantów układu kostno - stawowego, polegający na możliwości zastąpienia obecnie stosowanych stopów tytanu czystym tytanem.

Studiowanie ocenianej rozprawy doktorskiej nasuwa recenzentowi pewne wątpliwości i pytania, które wymagają wyjaśnienia i ustosunkowania się Doktoranta. Poniżej przedstawiam kilka z nich:

1. Wartości rozpatrywanych w badaniach temperatur Doktorant przyjął w zakresie od 400 do 800 °C w równych odstępach, co 100 °C. Tymczasem już pierwsze wyniki przedstawione na rysunkach 4.4. ÷ 4.6. pokazują inny przebieg krzywej $\sigma - \epsilon$ dla

temperatury 400 °C i prędkości odkształcenia 10 s⁻¹, w porównaniu z wyższymi temperaturami. W tym momencie rodzi się pytanie: jak kształtuje się przebieg krzywej $\sigma - \epsilon$ dla niższej temperatury np. 350 °C lub nieco wyższej, np. 450 °C? W takich sytuacjach sprawdzają się narzędzia planowanego eksperymentu. Przyjęcie odpowiedniego planu eksperymentu pozwala na „wychwycenie” obserwowanych zmienności, a poza tym ułatwiają prowadzenie analizy statystycznej zależności pomiędzy rozpatrywanymi zmiennymi.

2. Na zdjęciach przedstawiających obrazy EBSD (rys. 5.3, 5.5, 5.7, 5.9, 5.11, 5.13) widoczne są zdeformowane – wydłużone – ziarna materiału. Doktorant nie komentuje tego faktu. Wcześniej pojawia się sugestia występowania, cytując: „pewnej anizotropii materiału związanej prawdopodobnie z nierównomiernym przewalcowaniem wytwarzanego pręta”. Jeśli tak jest, to jaki wpływ - zdaniem Doktoranta – ma ten fakt na wyniki badań opisywane w kolejnych rozdziałach?
3. Analizując wyniki testów wytrzymałościowych próbek czystego tytanu po procesie obróbki termoplastycznej (rozd. 5.1), Doktorant skupił się na parametrach R_p i $HV 0,2$. Dlaczego nie skomentowano zmian wartości modułu Younga (E)? W kontekście sugerowanego na wstępie rozprawy przewidywanego zastosowania rozpatrywanych materiałów do projektowania i wytwarzania implantów układu kostno – stawowego, Moduł Younga jest bardzo ważnym parametrem materiałowym.
4. Opisując przebieg testów wytrzymałościowych (rozd. 5.1) Doktorant nie podał wymiarów próbek użytych w badaniach. Jakie były wymiary tych próbek?
5. Proszę scharakteryzować typ elementu skończonego zastosowanego w symulacji MES.

Przedstawione uwagi i pytania mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na moją pozytywną ocenę merytoryczną osiągnięć Doktoranta opisanych w dysertacji.

W podsumowaniu stwierdzam, że przedłożona rozprawa doktorska stanowi udokumentowanie ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz rozwiązania oryginalnego problemu naukowego. Jednocześnie stwierdzam, iż rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Bańczerowskiego pt.: „Proces technologiczny oraz modelowanie numeryczne obróbki termoplastycznej tytanu na potrzeby inżynierii biomedycznej” jest osiągnięciem naukowym i spełnia wymagania ustawy. W związku z powyższym stawiam wniosek do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej o jej przyjęcie oraz dopuszczenie do publicznej obrony.