

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Żanety Anny MIERZEJEWSKIEJ

pt.

„Wytwarzanie implantów dla chirurgii rekonstrukcyjnej z wykorzystaniem technologii selektywnego spiekania laserowego”

Podstawa opracowania: pismo Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej prof. zw. dr hab. inż. Andrzeja Seweryna nr WM-400.4130.17.19 z dn. 8.07.2019r.

Zasadność podjęcia tematu rozprawy doktorskiej i jej zakres

W swojej rozprawie Doktorantka podjęła aktualny temat kształtowania własności fizyko-mechanicznych i strukturalnych implantacyjnego stopu tytanu Ti-6Al-4V otrzymywanego w technologii selektywnego topienia laserowego (DMLS), wychodząc ze słusznego założenia, że ... *analiza literatury wskazuje na brak systematycznego podejścia do badania interakcji laser-metal, które byłoby korzystne dla dalszego rozwoju tej technologii* ... Dotychczasowe doświadczenia badaczy wskazują, iż mimo standaryzacji metody selektywnego topienia laserowego, materiał implantacyjny posiada strukturę i właściwości odbiegające od otrzymanych tradycyjnymi metodami odlewania i obróbki mechanicznej. Równie aplikacja znormalizowanych przebiegów obróbki cieplnej w tym przypadku nie przyniosła oczekiwanych rezultatów.

Mgr inż. Żaneta Anna Mierzejewska konstruując koncepcję swojej pracy postawiła ważną również z punktu widzenia aplikacyjnego, hipotezę badawczą: ... *prawidłowy dobór parametrów wytwarzania w technologii DMLS oraz obróbki cieplnej umożliwi otrzymanie elementów o wysokiej gęstości, odpowiedniej strukturze, niskiej porowatości i korzystnych*

właściwościach mechanicznych porównywalnych do właściwości materiałów kształtowanych tradycyjnymi technologiami ...

Z tego też względu zagadnienia kształtowania czy wręcz optymalizacji doboru parametrów technologicznych w nowoczesnych technikach generatywnych otrzymywania biomateriałów jako substytutów kostnych stanowią bardzo aktualną i złożoną, a równocześnie ciągle nie w pełni rozwiązana problematykę badawczą.

Swoje opracowanie Autorka przedstawiła łącznie na 268 stronach zawierających tekst pracy, tabele, rysunki, wykresy, wykaz cytowanej literatury, wykaz tabel i rysunków oraz stosowne załączniki. Fundamentalne dla pracy to rozdziały 6 – 10, w których przedstawia wyniki badań własnych dotyczących wpływu parametrów technologicznych scalania laserowego stopu Ti-6Al-4V oraz dodatkowych zabiegów termicznych i powierzchniowych na jego mikrostrukturę i morfologię powierzchni oraz własności wytrzymałościowe i odporność korozyjną. Poddaje też ocenie jego bioaktywność w warunkach *in-vitro* w środowisku symulowanych płynów ustrojowych oraz oznacza aktywność cytotoksyczną stopu wobec linii osteoblastów. Część badań własnych Doktorantka podsumowuje w rozdziale 11 eksponując oryginalne elementy swojej rozprawy oraz wskazując na kierunki dalszych badań.

1. Ocena merytoryczna rozprawy

Praca ma typowo doświadczalny charakter. Doktorantka posiada już rozległą i ugruntowaną wiedzę z zakresu inżynierii materiałowej i biomedycznej oraz instrumentalnych metod badań doświadczalnych własności fizyko-mechanicznych materiałów. Prawdopodobnie potrafi ocenić podjęty przez siebie problem, właściwie sformułować tezę i cele badawcze, do realizacji których stosuje odpowiedni plan badań eksperymentalnych oraz zaawansowane narzędzia nowoczesnych metod pomiarowych własności wytrzymałościowych, termicznych, strukturalnych i morfologicznych. Biegle porusza się w podjętej tematyce badawczej i bardzo dobrze potrafi skomentować otrzymane wyniki swoich badań na tle osiągnięć badawczych publikowanych przez innych autorów. Do najważniejszych osiągnięć Doktorantki moim zdaniem należy zaliczyć:

- obszerne i wyczerpujące studium literaturowe dotyczące metod badań elementów kształtowanych technologiami addytywnymi dla biomedycznych stopów tytanowych,

- opracowanie metody doświadczalnej weryfikacji struktury, morfologii oraz zachowania mechanicznego i aktywności biologicznej medycznego stopu tytanu Ti-6Al-4V otrzymywanego w technologii selektywnego spiekania laserowego, popartej bardzo szerokim programem badawczym uwzględniającym duże liczebności próbek w danych szarżach,
- wykazanie w ramach opracowanej metodologii następujących prawidłowości:
 - generacja najbardziej stabilnych ścieżek scalania laserowego dla prędkości skanowania w zakresie 500 – 900 mm/s przy mocach lasera w zakresie 130 – 210 W skutkujących najniższym parametrem chropowatości oraz najwyższymi własnościami wytrzymałościowymi spieków,
 - prędkości skanowania w dolnym zakresie 500 mm/s skutkują też największą homogennością spieków (najmniejsza porowatością) niezależnie od mocy lasera, a uwzględniając czas naświetlania (gęstość energii) Doktorantka określiła w analizie korelacyjnej optymalny jej zakres na $(100 - 130) \text{ J/mm}^3$,
 - konieczność stosowania uzupełniających zabiegów obróbki termicznej wynikającą z bardzo dużych prędkości chłodzenia w technologii DMLS w celu wyeliminowania struktur martenzytycznych o właściwościach ferromagnetycznych warunkujących aplikacje biomedyczne stopu tytanu; Doktorantka wartość progową temperatury wygrzewania określiła na 850 °C,
 - istotne obniżenie własności wytrzymałościowych, z wyjątkiem udarności, spieków poddanych niskotemperaturowej obróbce termicznej eliminującej struktury martenzytyczne (850 – 900) °C; opracowane krzywe regresji spełniają jednocześnie wymagania normy ASTM F 1472 dla stopów tytanu jako biomateriałów medycznych,
 - nieznacznie niższa odporność korozyjna biomedycznego stopu tytanu scalanego laserowo, przy zachowaniu wysokiej aktywności biologicznej i braku cech cytotoksyczności dla wszystkich analizowanych chropowatości próbek.

Podsumowując tę część opinii mogę stwierdzić, że przedstawiona do oceny rozprawa zawiera aspekty poznawcze, a wymienione powyżej jej elementy stanowią niezaprzeczalnie oryginalny dorobek Autorki w zakresie technologii generatywnych w metalurgii proszków, kształtowania, badań i zastosowań biomedycznych stopów tytanu jako implantów kostnych w dyscyplinie inżynieria biomedyczna.

2. Uwagi krytyczne

W punkcie tym chciałem przedstawić główne uwagi krytyczne, które nasunęły mi się po zapoznaniu się z recenzowaną pracą. Najważniejsze z nich to:

- moim zdaniem tytuł pracy jest zbyt ogólny i niezbyt ‘szczęśliwie’ dobrany do treści merytorycznych rozprawy, która przedmiotowo dotyczy wpływu parametrów technologicznych selektywnego scalania laserowego na własności fizyko-mechaniczne, strukturalne i morfologię badanego stopu Ti-6Al-4V w badaniach prowadzonych na znormalizowanych próbkach przewidzianych przez określone standardy; w tym aspekcie tak naprawdę tylko punkt 11.2 Aplikacja wyników badań w procesie wytwarzania implantu ubytku kości czaszki w technologii DMLS odpowiada tytułowi pracy; z drugiej strony w zakresie badań własnych Autorka znacznie szerzej realizuje podjęty temat, badając aktywność biologiczną stopu i jego cytotoksyczność wobec linii osteoblastów,
- praca zawiera również niepotrzebnie wiele powtarzających się w treści akapitów, co szczególnie widoczne jest w rozdziale IX; w podsumowaniu i wnioskach należy ująć najważniejsze efekty zrealizowanej pracy, a nie wprowadzenie do podsumowania czy omówienie wyników; nie ułatwia to zadania czytelnikowi/recenzentowi,
- w tekście pracy Doktorantka wielokrotnie podkreśla znaczenie dokładności wymiarowej wytwarzanych technikami generatywnymi implantów; przy wysokich temperaturach scalania laserowego oraz dodatkowych obróbkach cieplnych ten aspekt jest szczególnie istotny, a Autorka go praktycznie pomija; analiza chropowatości to nie wszystko, natomiast uwzględnienie np. we wspomnianym już punkcie 11.2 podstawowych analiz metrologicznych wypełniło by tę lukę,
- w przypadku implantów kostnych jednym z ważniejszych kryteriów są własności zmęczeniowe; stopy tytanu, w porównaniu do innych materiałów, po pewnych obróbkach cieplnych cechują się szczególnie wysokim stosunkiem wytrzymałości zmęczeniowej do doraźnej, sięgającym nawet 85%; Doktorantka stosując w pracy wiele zabiegów cieplnych mogła się pokusić o pewną analizę w zakresie korelacji swoich badań z danymi literaturowymi; uwaga ma oczywiście

charakter polemiczny, bo efekty zmęczenia materiału to osobny, szeroki program badawczy,

- Autorka kolokwialnie używa określenia granica plastyczności (wykaz symboli na str. 12 oraz w tekście pracy, czasami zamiennie R_e lub $R_{p0,2}$); zgodnie z aktualnie obowiązująca normą dla materiałów bez wyraźnej granicy plastyczności powinno się używać pojęcia umowna granica plastyczności przy wydłużeniu nieproporcjonalnym,
- badanie udarności Doktorantka nadinterpretuje jako badanie odporności na kruche pękanie (str. 150), które jest kwintesencją mechaniki pękania i związane jest z kryteriami oceny odporności na kruche pękanie (teorie Grifftha, Irwina, Rice, COD i inne); w tym kontekście nie jest ‘szczęśliwe’ oznaczenie udarności jako K_{Ic} , w mechanice przyjęło się to oznaczenie dla krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężeń, zgodnie z cytowaną normą i rodzajem użytej próbki należało udarność określać jako KV,

Pozostałe uwagi mają charakter uwag szczegółowych, w tym o charakterze redakcyjnym:

- w dostarczonym egzemplarzu rozprawy doktorskiej brak jest wzorów (3.1) oraz (5.2) do (5.5),
- praca jest napisana starannie edycyjnie, dobrą polszczyzną, z odpowiednią reprezentacją graficzną, chociaż Autorka nie ustrzegła się nielicznych błędów literowych i składniowych, w tym w streszczeniu w j. angielskim,
- w bardzo obszernym wykazie literatury zdarzają się niepełne odwołania bibliograficzne – brak podania oficyny wydawniczej czy stron.

Uwagi te oczywiście nie obniżają wartości merytorycznej rozprawy doktorskiej oraz mojej jednoznacznie pozytywnej o niej opinii.

3. Wniosek końcowy

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy stwierdzam, iż w moim przekonaniu praca jest metodycznie poprawna, jej cele zostały zrealizowane, a przyjęta teza naukowa udowodniona. Autorka przedstawiła własną, oryginalną procedurę badań i oceny własności mechanicznych i fizykochemicznych i strukturalnych stopu Ti-6Al-4V otrzymywanego w metalurgii proszków metodą scalania laserowego przeznaczonego do zastosowań w rekonstrukcji tkanki kostnej.

Doktorantka wykazała się umiejętnością samodzielnego prowadzenia prac badawczych, popartą bardzo dobrym przygotowaniem w zakresie przeglądu literaturowego przedmiotowego zagadnienia.

Dorobek naukowy oraz rozprawę doktorską mgr inż. Żanety Anny Mierzejewskiej można sklasyfikować w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie naukowej inżynieria biomedyczna.

Opiniowana praca odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim i w nawiązaniu do przepisów Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789) oraz w związku z § 179 ust. 1 Ustawy z dn. 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018r., poz. 1669) , wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie Autorki do publicznej obrony przed Radą Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'L. Żaneta'.