

prof. dr hab. inż. Maria Kotelko
Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji
Wydział Mechaniczny, Politechnika Łódzka
ul. B. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź
maria.kotelko@p.lodz.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Izabeli Abramczyk**

pt.: ” Analiza wpływu procesu trawienia implantów wytworzonych metodą addytywną ze stopu Ti6Al4VELI na ich wybrane właściwości fizyko-chemiczne”

Podstawę do opracowania niniejszej recenzji stanowi pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Bydgoskiej, Pana dr hab.inż.Łukasza Muślewskiego, prof.PBS z dnia 11.12.2025 r. oraz Uchwała tejże Rady o wyznaczeniu recenzentów w postępowaniu ws nadania stopnia doktora mgr inż. Izabeli Abramczyk z dnia 9. 12.2025.

1. Przedmiot rozprawy

Przedmiotem rozprawy jest analiza wpływu parametrów trawienia chemicznego na własności fizyko-chemiczne elementów wytworzonych metodą addytywną (druku 3D) ze stopu tytanowego, o symbolu zawartym w tytule rozprawy. Tematyka pracy ma charakter interdyscyplinarny, obejmuje bowiem zagadnienia z obszaru dyscypliny inżynieria mechaniczna oraz (w mojej ocenie w dużym stopniu) dyscypliny inżynieria materiałowa.

Addytywne metody wytwarzania stwarzają zupełnie nowe możliwości produkcji elementów konstrukcyjnych o bardzo skomplikowanych kształtach i złożonej strukturze.

W inżynierii mechanicznej produkcja addytywna zmienia podejście do projektowania i wytwarzania elementów o złożonej strukturze. Umożliwia bowiem tworzenie elementów konstrukcyjnych o wyjątkowych właściwościach i kształtach , nieosiągalnych tradycyjnymi metodami. Metody wytwarzania addytywnego są coraz powszechniej stosowane w lotnictwie (m.in. łopatki turbin) , jako części maszyn oraz narzędzia specjalne, w budownictwie, a także jako specjalne elementy konstrukcyjne , np. absorbery energii w pojazdach i statkach kosmicznych. Są też stosowane w medycynie do produkcji implantów i protez. Ten ostatni obszar zastosowań techniki 3D jest przedmiotem analizy w recenzowanej rozprawie. Jednym z wyzwań przy stosowaniu tej techniki jest obróbka postprocesowa, m.in. usuwanie podpór, naddatków i wygładzenie powierzchni. Alternatywą obróbki mechanicznej jest w tym przypadku trawienie chemiczne. Biorąc powyższe aspekty pod uwagę, należy stwierdzić , że recenzowana praca wpisuje się w najnowsze trendy rozwoju obu dyscyplin, tj. inżynierii mechanicznej i inżynierii materiałowej.

2. Treść rozprawy

Praca składa się z 6-ciu rozdziałów, spisu literatury cytowanej w tekście, tj bibliografii zawierającej 121 pozycji, 12 norm, 15 patentów i zgłoszeń wynalazków, 5 kart materiałowych oraz 4 stron internetowych. Praca zawiera także streszczenia w języku polskim i angielskim. Ogółem praca zawiera 165 stron.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do rozprawy, w którym omówiono rys historyczny technologii przyrostowej, a także obecnie stosowane techniki wytwarzania tą metodą oraz wyniki badań w tym obszarze. W szczególności omówiono zagadnienia związane z trawieniem chemicznym elementów wykonanych ze stopów tytanu oraz wpływ procesu trawienia na własności mechaniczne tych stopów. W podsumowaniu tego rozdziału Doktorantka formułuje wnioski wynikające z przeglądu literatury przedmiotu.

Rozdział drugi zawiera sformułowanie zagadnienia badawczego, cel, tezę oraz zakres pracy. Doktorantka stawia tezę, iż „ *zastosowanie chemicznego trawienia wspomaganego ultradźwiękami .. elementów ze stopu Ti6Al4VELI ... pozwala na kontrolowaną modyfikację powierzchni ... przy jednoczesnym zachowaniu lub poprawie właściwości mechanicznych, pod warunkiem właściwego doboru czasu trwania procesu*”. Rozdział zawiera cel badań oraz bardzo szczegółowy opis zakresu badań. Doktorantka opisuje rodzaje badań, jakim poddano dwa rodzaje próbek w 3 etapach. Były to próbki wytworzone metodą hutniczą oraz metodą addytywną. Dla obu rodzajów próbek podano zakresy badań w trzech etapach.

W rozdziale trzecim przedstawiono schemat programu badań. Program ten zaprojektowano na 3 etapy. W etapie 1. przeprowadzono badania na próbkach wytworzonych metodą hutniczą i metodą addytywną oraz trawionych w trzech roztworach o różnym składzie chemicznym, przy różnych czasach trawienia. Badania te obejmowały analizę optyczną powierzchni, analizę składu chemicznego, ubytku masy, chropowatości powierzchni oraz twardości. Etap 2. obejmował badania próbek normatywnych trawionych w wybranym, jako optymalny, roztworze „B”, przy udziale lub bez udziału fali ultradźwiękowych, przy różnych czasach trawienia. Przeprowadzono badania optyczne powierzchni, ubytku masy, parametrów mechanicznych w próbach wytrzymałościowych. W etapie 3. przeprowadzono badania belek z otworami, wytworzonych metodą addytywną, trawionych w roztworze „B” z udziałem fali ultradźwiękowej, przy różnych czasach trawienia. Badano powierzchnie metodą SEM, skład chemiczny, ubytek masy, chropowatość powierzchni oraz przeprowadzano normatywną próbę czteropunktowego zginania belek.

Rozdział zawiera także szczegółowy opis materiału do badań, tj stopu Ti6Al4VELI, opis próbek do badań, opis procesu trawienia chemicznego oraz metody badań. Badania te, jak wspomniano wyżej, obejmowały pomiar masy, twardości powierzchni metodą Vickersa, badania chropowatości powierzchni oraz badania optyczne. Osobną grupę stanowiły badania wytrzymałościowe, tj. statyczna próba rozciągania i próba czteropunktowego zginania. Ponadto przeprowadzono analizę widmową i badanie składu pierwiastkowego EDS.

Najobszerniejszy rozdział 4. zawiera wyniki badań. Doktorantka przedstawiła bardzo szczegółowo, w postaci tabel i wykresów, kolejno dla trzech etapów, wyniki badań wspomnianych wyżej. W podsumowaniu wyników etapu pierwszego uzasadniła wybór roztworu „B”, jako optymalnego ze względu na otrzymane wyniki. Komentarz tego wyboru zawarty jest w dalszej części recenzji. W podsumowaniu wyników etapu drugiego dokonała wyboru opcji trawienia z udziałem fali ultradźwiękowej, jako optymalny. Następnie przedstawiła szczegółowe wyniki badań etapu trzeciego, w podpunkcie 4.3, w którego tytule użyła sformułowania „*badania implantów*”.

W rozdziale 5. Doktorantka przeprowadziła analizę otrzymanych wyników, w tym wyników badań wytrzymałościowych, chropowatości powierzchni, ubytku masy, oraz morfologii powierzchni.

W ostatnim rozdziale 6. przedstawiono końcowe wnioski wynikające z przeprowadzonych analiz, a także omówiono perspektywy dalszych badań.

2. Ogólna ocena rozprawy

Doktorantka podjęła się rozwiązania zagadnienia naukowego o charakterze eksperymentalnym, dotyczącego zbadania wpływu procesu trawienia w obróbce postprocesowej elementów metalowych, wytworzonych metodą addytywną na ich szeroko pojęte własności chemiczne i mechaniczne. Zagadnienie jest bardzo istotne z punktu widzenia rozwoju wiedzy zarówno w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, jak i inżynieria materiałowa. Badania eksperymentalne zostały zaplanowane w sposób logiczny i przejrzysty w trzech etapach. Ich sekwencja pozwoliła na wyciągnięcie wniosków koniecznych do przeprowadzenia etapu następnego. Na podkreślenie zasługuje bardzo duży zakres przeprowadzonych badań, począwszy od badań składu chemicznego, poprzez badania optyczne oraz badania własności mechanicznych. Badania zostały przeprowadzone bardzo starannie, a ich wyniki przedstawione w sposób klarowny i wyczerpujący. Pewne uwagi krytyczne dotyczące badań własności mechanicznych zawarte są w następnym paragrafie. Teza pracy została udowodniona, tj. Doktorantka wykazała, że zastosowanie chemicznego trawienia wspomaganego falą ultradźwiękową w obróbce postprocesowej elementów wytworzonych metodą addytywną w przypadku stopów tytanu wpływa na poprawę własności chemicznych i mechanicznych tych elementów. Oryginalnym osiągnięciem pracy jest zbadanie tego wpływu na określone parametry, takie jak ubytek masy, chropowatość powierzchni, twardość powierzchni oraz parametry wytrzymałościowe.

Kandydatka wykazała się szeroką wiedzą z zakresu metod eksperymentalnych w dziedzinie m. in. mechaniki oraz umiejętnością zaplanowania i przeprowadzenia eksperymentu. Jak wspomniano wyżej, zakres badań był bardzo obszerny i zostały one przeprowadzone z wielką starannością, co jest jednym z podstawowych warunków poprawności badań eksperymentalnych. Bardzo szeroki zakres tych badań i użyteczność ich wyników rekompensuje w mojej opinii brak w rozprawie analiz teoretycznych, czy to na gruncie metod analitycznych, czy też z numerycznych.

Układ pracy jest przejrzysty, jej redakcja jest bardzo staranna. Drobne uwagi edytorskie zawarte są w dalszym paragrafie. Bibliografia opracowana jest adekwatnie do tematu pracy. Biorąc powyższe pod uwagę, moja ogólna merytoryczna ocena rozprawy jest pozytywna, mimo pewnych uwag krytycznych, przedstawionych niżej. Uwagi te dotyczą jedynie tej części rozprawy, która ściśle mieści się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Jak już wspomniałam, praca ma charakter interdyscyplinarny, a moje kompetencje jako recenzenta, mieszczą się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

3. Uwagi krytyczne

- 3.1. Brakuje szerszego uzasadnienia wyboru wariantu roztworu trawiącego „B”. Oczywiście jest, że wybór ten jest kompromisem pomiędzy trzema wariantami, ale należałoby wskazać wyraźnie, jakie są pozytywne i negatywne tego wyboru. Nie przeprowadzono prób wytrzymałościowych w tym etapie, a zatem nie wiadomo,

- jaki wpływ na parametry mechaniczne miałyby zastosowanie pozostałych wariantów.
- 3.2. W etapach 2. i 3. nie przeprowadzono standardowych prób udarności. Jest to parametr mający duży wpływ na wytrzymałość zmęczeniową, co ma istotne znaczenie z punktu widzenia obciążeń takich elementów konstrukcyjnych, jak implanty.
 - 3.3. Mimo przedstawienia bardzo obszernych wyników badań składu chemicznego, badań optycznych, ubytku masy, chropowatości, a także obszernych wyników prób wytrzymałościowych (umownej granicy plastyczności, wytrzymałości na zerwanie, wydłużenia maksymalnego) nie przedstawiono żadnych porównawczych wykresów rozciągania, które dostarczyłyby informacji o wpływie czynników trawienia na całą charakterystykę materiału w pełnym cyklu obciążenia, aż do zniszczenia (m.in. charakter wzmocnienia po uplastycznieniu, zmianę modułu Younga). Nie podano wartości modułu Younga, które standardowo wyznacza się w próbie rozciągania, parametru ważnego z punktu widzenia własności mechanicznych materiału.
 - 3.4. Opis próby czteropunktowego zginania jest dość lakoniczny. Próby przeprowadzono zgodnie z normą. Do wykonania tych prób skonstruowano specjalny przyrząd, pokazany na zdjęciu (rys. 3.19b), które nie daje dokładniejszej informacji o sposobie zamocowania (podparcia) i obciążenia próbki. Na rys. 4.19 pokazano próbki (należy się domyślać) po zniszczeniu w próbie zginania, których kształt deformacji (ugięcia) jest niesymetryczny, co należałoby skomentować. Układ podpór i punktów przyłożenia siły powinien być w tej próbie symetryczny. Rozmieszczenie otworów było również symetryczne. Podobnie, jak w przypadku prób rozciągania, nie przedstawiono żadnych porównawczych wykresów siły w funkcji ugięcia, czy też momentu gnącego w funkcji kąta ugięcia. Wykresy takie dostarczyłyby informacji o „scenariuszu” zniszczenia i wpływie czynników trawienia na ten scenariusz. Na str. 123 wspomniano iż, „próbki wykazują uszkodzenie w centralnej strefie w obszarze otworu, co odpowiada największej koncentracji naprężeń ..”. Jest to obserwacja zgodna z oczekiwaniami, jednakże dobrym uzupełnieniem byłyby zdjęcia tych uszkodzeń.
 - 3.5. Badania etapu trzeciego Doktorantka określiła, jako badanie „*implantów*”. W istocie były to badania belek osłabionych otworami. Na str. 108 stwierdza, że „*przygotowano próbki w postaci implantów, przy zachowaniu nieco uproszczonej geometrii ...*”. Nie przedstawia przykładów lub przykładu rzeczywistego implantu, którego modelem jest wspomniana wyżej belka. Dostarczyłoby to informacji o stopniu uproszczenia modelu. W implancie rzeczywistym, o bardziej skomplikowanej geometrii, obszary koncentracji naprężeń mogą być nieco inaczej rozłożone niż w badanym modelu, a także współczynniki koncentracji naprężeń mogą różnić się od tych w uproszczonym modelu. Wpływ procesu trawienia w rzeczywistym implancie może być zatem nieco inny, niż w belce o uproszczonej geometrii. Doktorantka nie wyjaśnia też, czym kierowała się przy doborze wymiarów próbek na zginanie, szczególnie, czy stosunek średnicy otworu do wysokości przekroju próbki był analogiczny do tego stosunku w implancie. Jest to istotne ze względu na wartość współczynnika spiętrzenia naprężeń na dnie otworu, a także ze względu na zmniejszenie grubości ścianki przekroju w procesie trawienia. W kontekście powyższych uwag, stwierdzenie (str. 121): „*Uzyskane wyniki pozwalają nie tylko na ocenę wpływu procesu trawienia chemicznego na własności mechaniczne implantów, ale także dostarczają istotnych danych*”

praktycznych dotyczących ich potencjalnej eksploatacji w warunkach klinicznych” jest nie w pełni uzasadnione.

- 3.6. Jak już wspomniałam wyżej, brak w rozprawie jakichkolwiek analiz teoretycznych jest rekompensowany obszernymi wynikami badań eksperymentalnych. Jednakże rozprawę niewątpliwie wzbogaciłaby np. analiza numeryczna stanu naprężenia modeli badanych implantów metodą elementów skończonych. Analiza taka i jej wyniki powiększyłyby udział w rozprawie tej części jej treści, która mieściła by się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

4. Uwagi edytorskie

Ogólnie stwierdzam, iż redakcja pracy jest bardzo staranna. Praca zawiera jednakże pewne drobne błędy edytorskie i nieliczne niepoprawne sformułowania. M.in. :

- na str.25 użyto niefortunnego sformułowania „*spadek rozkładu naprężeń*” , w domyśle chodziło zapewne o spadek wartości naprężeń,
- na str. 58 stwierdzono „*dokładność odczytu wynosiła 4 miejsca po przecinku*”, podczas gdy , jak wiadomo z podstaw metrologii, dokładność odczytu nie zależy od „liczby miejsc po przecinku”.

Niektóre rysunki i zdjęcia nie wnoszą istotnych informacji, np. rys. 3.9, 3.10,3.12, 3.17a, 3.21.

Wniosek końcowy

Dorobek publikacyjny Doktorantki obejmuje 2 artykuły wg bazy Scopus, w tym jedną publikację w czasopiśmie z listy JCR. Kandydatka jest współautorką tych publikacji. Tematyka jednej z nich jest powiązana z tematyką rozprawy.

Biorąc pod uwagę:

1. Merytoryczną, pozytywną ocenę rozprawy , przedstawioną powyżej, na podstawie której wnioskuję, iż rozprawa spełnia w stopniu dostatecznym wymogi ustawowe , w szczególności wymóg *oryginalnego rozwiązania problemu naukowego*,
2. oraz dotychczasowy dorobek publikacyjny Doktorantki spełniający również w stopniu dostatecznym wymagania ustawowe,

stwierdzam, że ogólnie dorobek publikacyjny i rozprawa doktorska mgr inż. Izabeli Abramczyk pt: „*Analiza wpływu procesu trawienia implantów wytworzonych metodą addytywną ze stopu Ti6Al4VELI na ich wybrane właściwości fizyko-chemiczne*” spełnia w stopniu wystarczającym warunki stawiane przez ustawę „*Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce*” z dn. 20.07. 2018 r. (Dz.U. z 2024 r., poz. 1571) wraz z *późniejszymi zmianami* i może być podstawą do nadania stopnia doktora w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna. Wnioskuję zatem o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Łódź, 31. marca 2026 r

