

Katowice 23.05.2017 r.

Prof. dr hab. inż. Janusz Szala  
Katedra Nauki o Materiałach  
40-019 Katowice  
ul. Krasińskiego 8

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Adriana Chlandy** p.t.:  
**„Charakterystyka wybranych właściwości powierzchni biodegradowalnych rusztowań nanowłóknistych na potrzeby inżynierii tkankowej”**

zleconej do wykonania przez  
Dziekana Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej  
pismem z dnia 09.05.2017 r.

### 1. UWAGI O WYBORZE TEMATYKI ROZPRAWY

Funkcjonalne zamienniki uszkodzonych tkanek lub całych narządów wytworzone w oparciu o zdobycze inżynierii tkankowej wydają się być przyszłością w klinicznym leczeniu pacjentów, którzy doświadczyli tych przypadłości. Doktorant skoncentrował się na jednej ze stosowanej do tego celu metod, polegającej na implantacji w miejsce ubytku biodegradowalnych, wytworzonych metodą elektroprzędzenia włóknistych polimerowych bądź kompozytowych rusztowań tkankowych, na których, zgodnie z założeniem ma dojść do adhezji komórek, ich namnożenia się i regeneracji tkanki. Szybkość tych procesów zależy zarówno od składu chemicznego i topografii rusztowania, jak i jego właściwości mechanicznych. Podjęcie przez Doktoranta próby zastosowania mikroskopu sił atomowych (AFM) do scharakteryzowania tych cech jest cennym wkładem metodycznym w proces weryfikacji powyższych hipotez.

Mikroskop sił atomowych jest klasycznym już urządzeniem, które pozwala w stosunkowo prosty sposób, bez konieczności stosowania wyszukanej preparatyki, na obrazowanie topografii oraz innych cech powierzchni próbek na poziomie nanometrycznym. W literaturze dostępne są liczne doniesienia na temat badania za pomocą tego urządzenia pojedynczych włókien składających się na rusztowanie tkankowe. W recenzowanej rozprawie rozszerzono ten obszar o ocenę całego splotu włókien we włókninie także w warunkach zbliżonych do panujących w ciele pacjenta po implantacji. Jest to istotnym osiągnięciem Doktoranta. Duże znaczenie praktyczne ma także ustalenie warunków obserwacji zapewniających uzyskanie optymalnych obrazów topograficznych powierzchni badanych próbek.

Szczególnie istotna jest przy tym kontynuacja prac podjętych w rozprawie doktorskiej dra inż. Janusza Rębisia dotyczących modyfikacji geometrii sond skanujących za pomocą metody FIB. Wyniki uzyskane przez Doktoranta stanowią kolejne potwierdzenie, że zmodyfikowane sondy pozwalają na uzyskanie dodatkowych informacji o strukturze badanych próbek, niedostępnych przy użyciu komercyjnych sond standardowych. Przyczyni się to bez wątpienia do dalszej poprawy możliwości badawczych mikroskopów sił atomowych.

### 2. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Recenzowana rozprawa liczy 80 stron tekstu zasadniczego poprzedzonego streszczeniem w języku polskim i angielskim, wykazem skrótów oraz podziękowaniami dla licznej grupy osób, bez pomocy których, zdaniem Doktoranta, recenzowana rozprawa nie ujrzałaby światła dziennego. Na uwagę zasługuje wysoki poziom edytorski jej papierowej wersji. W pracy przedstawiono wyniki badań zrealizowanych przez Doktoranta w ramach

kilku grantów oraz środków własnych Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. W pracy zacytowano 191 prac dotyczących zarówno badanych materiałów, jak i zastosowanej metodyki badawczej. W dwóch przypadkach Doktorant był współautorem tych publikacji. Dziwić musi brak rozdziału zatytułowanego „Studia literaturowe” lub „Część literaturowa”. Za to wprowadzenie liczy 39 stron, co stanowi prawie połowę objętości doktoratu. Jest to tym bardziej niezrozumiałe, gdy weźmie się pod uwagę, że na pierwszej stronie wprowadzenia Doktorant m.in. pisze: „W części literaturowej pracy [podkreślenie moje] skupiono się na opisie paradygmatów, na których opiera się inżynieria tkankowa. Przedstawiono biodegradowalne rusztowania wytwarzane na potrzeby inżynierii tkankowej, m.in. stawiane im wymagania, oczekiwane właściwości gotowego produktu, techniki wytwarzania rusztowań, materiały które są obecnie stosowane do ich wytworzenia”.

Układ rozprawy jest zgodny z zasadami przyjętymi dla rozpraw doktorskich w dziedzinie nauk technicznych, choć zazwyczaj objętość badań własnych jest wyraźnie większa od studiów literaturowych. Zarówno część studialna, jak i wyniki badań własnych są dosyć bogato ilustrowane obrazami z mikroskopu AFM, wykresami i rysunkami.

Pod względem językowym praca jest w zasadzie poprawna. Niemniej można w niej znaleźć nie tylko literówki, lecz także niezręczności językowe i błędy stylistyczne. Nie ma to wprawdzie negatywnego wpływu na poziom merytoryczny rozprawy, ale na część z nich chciałbym zwrócić uwagę, mając nadzieję, że pomoże to Doktorantowi unikać podobnych błędów w Jego dalszych publikacjach naukowych. Oto kilka z nich:

- Rozdziały w doktoracie zostały oznaczone kolejnymi cyframi rzymskimi. Numeracja zawartych w nich podrozdziałów rządzi się swoimi prawami i nie jest w żaden sposób skorelowana z numeracją rozdziałów. Prowadzi to do pewnego chaosu.
- Proponuję by sposób cytowania większej liczby publikacji zaproponowanej przez Doktoranta zastąpić prostszym rozwiązaniem. Przykładowo, zamiast [1], [2], [3], [5], [23] lepiej napisać [1-3, 5, 23].
- W tekście nie zawsze po przecinku jest spacja.
- Błąd w opisie tabeli 11: Wyniki ilościowej analizy lokalnych właściwości mechanicznych powierzchni włókien badanych sondami modyfikowanymi i niemodyfikowanymi ostrzeniem.
- Tabela 8: na osi Y nie ma ilości zliczeń lecz liczba włókien. Wyniki te uzyskano w trakcie pomiarów, a nie zliczeń.
- Tabela 15: Mapa DMT próbki 1 pochodzi w rzeczywistości z próbki 0. Mapy DMT próbek 0 i 2 są identyczne. Jest to ta sama mapa.
- Strona 58. Zdanie „Z uwagi na przeprowadzone studia literaturowe (Tabela 5/rozdział 3.2), zdecydowano się na obrazowanie włókien w trybie TM AFM.” nie jest zbyt szczęśliwe. Sugeruję zastąpić je zdaniem „Na podstawie przeprowadzonych studiów literaturowych...”.
- Strona 70: jest "nanoprzędzonych", powinno być "nanoprzędzonych".
- W publikacjach z zakresu inżynierii materiałowej podpisy pod rysunkami zazwyczaj rozpoczynają się od "Rys. \*.". Dlaczego Doktorant przyjął inną formułę? Jest ona oczywiście do zaakceptowania, ale po numerze rysunku powinna być kropka.

Są to uwagi dotyczące zasadniczego tekstu rozprawy. Jak widać jest ich niewiele. Znacznie więcej błędów, w większości dla mnie niezrozumiałych, budzących różne domysły, pojawiło się w opisie bibliograficznym cytowanych publikacji. Poniżej przytoczę tylko niektóre. Inne zaznaczyłem w dostarczonym mi papierowym egzemplarzu rozprawy.

Pierwsze, co się rzuca w oczy, to ogromna liczba autorów niektórych publikacji. Zwyczajowo, gdy liczba autorów jakiejś publikacji jest większa niż np. 3, wymienia się tylko trzy pierwsze nazwiska i wprowadza się dodatek "i inni". Początkowo sądziłem, że Doktorant przyjął zasadę wymieniania wszystkich autorów. Jednak po przeanalizowaniu pracy oznaczo-

nej numerem [61] doszedłem do wniosku, że coś w jej opisie bibliograficznym się nie zgadza. Udało mi się odszukać w Internecie tę publikację pod adresem doi:10.1039/C6TB01623E. Ku mojemu zaskoczeniu wymienieni zostali tu tylko czterej autorzy. Skąd zatem w rozprawie tak dużo autorów, że dla ich wymienienia potrzeba aż 21 linijek tekstu? Przystudiowałem w/w publikację i okazało się, że pozostałe wymienione w rozprawie osoby to autorzy prac cytowanych w tej publikacji. To samo dotyczy, choć w mniejszym stopniu opisu pracy [64].

W opisie bibliograficznym innych publikacji także panuje bałagan. Oto kilka przykładów:

- Jak rozumieć zapisy J. Nowacki, L.A. Dobrzański, F. Gustavo, Implanty w osteosyntezie kości, (n.d.) w pracy [33]. W rzeczywistości jest to publikacja: J. Nowacki, L.A. Dobrzański, F. Gustavo, Implanty śródszpikowe w osteosyntezie kości długich, Open Access Library, 2012, vol.11 (17). Przystudiowałem tę publikację, ale nie znalazłem w niej wzmianki o podanej na stronie 22 rozprawy "Biomaterials Consensus Conference".
- Jak rozumieć zapis: K.K. Małgorzata Lewandowska, Nanomateriały inżynierskie konstrukcyjne i funkcjonalne w pracy [81].
- Skład autorski prac [151], [155] został przeniesiony na zasadzie „kopiuj, wklej” bez usunięcia znaków odwołujących do afiliacji autorów.

Myślę, że podobnych niedoróbek jest więcej. Ponieważ jednak nie stanowi to o meritum rozprawy, nie drążyłem dalej tego tematu. Niemniej rodzi się pytanie, jaka jest geneza powstania tak ewidentnych błędów? Czy Doktoranta nie zdziwiła tak duża liczba autorów w wymienionych wcześniej publikacjach? Mam nadzieję, że zostanie to wyjaśnione.

### 3. OCENA MERYTORYCZNA ROZPRAWY

Część literaturową rozprawy można podzielić na dwie zasadnicze części. Pierwsza dotyczy szerokiego spektrum zagadnień związanych z inżynierią tkankową; druga jest natomiast poświęcona mikroskopii sił atomowych. Zgodnie z definicją „inżynieria tkankowa jest interdyscyplinarną dziedziną nauki, zajmującą się wykorzystaniem wiedzy medycznej oraz metod inżynierii materiałowej do wytwarzania funkcjonalnych zamienników uszkodzonych tkanek lub całych narządów”. Doktorant jest specjalistą z zakresu inżynierii materiałowej, dlatego dominująca część rozprawy dotyczy tych zagadnień. Nie mógł jednak całkowicie pominąć, przynajmniej w części literaturowej, medycznych aspektów inżynierii tkankowej. Należy przyznać, że zrobił to w bardzo przystępnej formie. Na samym początku zdefiniował pojęcia macierzy zewnątrzkomórkowej, która stanowi naturalne rusztowanie dla komórek. Obecne w macierzy włókna kolagenowe decydują o jej właściwościach mechanicznych, a ich architektura - o właściwościach biomechanicznych tej podpory. Macierz zewnątrzkomórkowa po oczyszczeniu z komórek i nawodnieniu stanowi może naturalne rusztowanie na potrzeby inżynierii tkankowej.

Intensywny rozwój inżynierii tkankowej jest jednak nierozdzielnie związany z zastosowaniem rusztowań syntetycznych, w których udało się odtworzyć włóknistą strukturę oraz właściwości mechaniczne naturalnej macierzy zewnątrzkomórkowej. W dalszej części przeglądu literaturowego Doktorant wymienia i opisuje warunki, jakie musi spełniać idealne rusztowanie. Zaliczyć do nich można m.in. biokompatybilność, biodegradowalność, bioaktywność, właściwa architektura i porowatość. Nie bez znaczenia są także odpowiednie właściwości mechaniczne oraz aspekty technologiczne. Wymienione cechy powodują, że nie każdy materiał może być zastosowany do tego celu. Mimo to współczesna inżynieria tkankowa dysponuje szeroką gamą biomateriałów metalicznych, ceramicznych, polimerowych oraz kompozytowych. Ponieważ w rozprawie badano biomateriały polimerowe, zostały

one szerzej scharakteryzowane. W grupie tej są zarówno materiały pochodzenia naturalnego, jak np. celuloza, skrobia, chityna, wełna, jedwab, żelatyna i kolagen, jak i syntetyczne. Polimery naturalne, co zrozumiałe, charakteryzują się bardzo dużą biogodnością oraz wykazują właściwą biodegradowalność. Ich wadą są natomiast słabe właściwości mechaniczne, a także ograniczone zasoby, co podnosi ich cenę. Jak wynika m.in. z tabel 1 i 2, właściwości fizyko-mechaniczne polimerów syntetycznych są bardzo zróżnicowane. Możliwy jest zatem taki ich dobór by pokrywały się one z właściwościami różnych tkanek w organizmie człowieka.

W grupie polimerów syntetycznych stosowanych na rusztowania w medycynie regeneracyjnej istotną rolę odgrywa polikaprolakton (PCL). Wynika to m.in. z dobrych właściwości mechanicznych, łatwości wytwarzania rusztowań o zaprojektowanej wielkości porów oraz, co jest bardzo istotne, z możliwości programowania kinetyki degradacji. Włókniny z tego właśnie tworzywa otrzymane metodą elektroprzędzenia z roztworu są przedmiotem badań w niniejszej rozprawie. Spośród wszystkich omówionych w niej technik produkcji biodegradowalnych rusztowań, elektroprzędzenie, jak się wydaje, pozwala najlepiej odtworzyć morfologię naturalnej macierzy zewnątrzkomórkowej. Poprawę biogodności otrzymanych rusztowań biodegradowalnych można, na co także zwrócono uwagę w części literaturowej rozprawy, uzyskać stosując metody modyfikacji powierzchni tych rusztowań.

Druga część przeglądu literaturowego poświęcona została, jak wspomniałem o tym wcześniej, mikroskopii sił atomowych, technice, która została zastosowana przez Doktoranta do scharakteryzowania zarówno topografii powierzchni, jak i właściwości mechanicznych wytworzonych przez Niego włókien. Skoncentrował się przy tym na idei działania mikroskopów sił atomowych, dostępnych w nich technikach badawczych oraz czynnikach wpływających na ich możliwości badawcze. Oddzielny rozdział poświęcił metodom modyfikacji sond skanujących, gdyż, jak słusznie zauważył, jednym z tych czynników jest geometria sondy. Krytycznej analizie poddał także zastosowanie techniki AFM do oceny właściwości mechanicznych pojedynczych włókien oraz wytworzonych z nich włókien. Zwrócił przy tym uwagę na brak tego typu badań w podwyższonej temperaturze oraz w środowisku ciekłym. Częściowo lukę tę udało się Doktorantowi wypełnić w trakcie realizacji niniejszej rozprawy, co wzbogaciło wiedzę o zachowaniu się materiału rusztowania w warunkach zbliżonych do panujących w ciele pacjenta.

Na podstawie studiów literaturowych Doktorant sformułował trzy cele naukowe rozprawy związane z różnymi aspektami doskonalenia techniki AFM zastosowanej do analizy topografii oraz właściwości mechanicznych biomateriałowych włóknistych rusztowań w skali nanometrycznej oraz jakościowej i ilościowej oceny zmian tych cech wywołanych przez degradację hydrolityczną tych rusztowań oraz modyfikację ich powierzchni. Przeprowadzone w tym celu badania powinny, zdaniem Doktoranta, doprowadzić do osiągnięcia celu użytecznego rozprawy, za jaki uznał „wykorzystanie mikroskopu sił atomowych jako narzędzia do ilościowego pomiaru lokalnych i zmiennych w czasie właściwości biodegradowalnych rusztowań włóknistych wytwarzanych na potrzeby inżynierii tkankowej”. Z lektury dalszej części rozprawy wynika, że cel ten udało się osiągnąć.

Badania własne Doktoranta można podzielić na kilka zwartych etapów. W pierwszej kolejności, korzystając z doświadczenia i pomocy współpracowników macierzystego

wydziału, wytworzył przy zastosowaniu techniki elektroprzędzenia z roztworu dwa rodzaje nanowłóknistych rusztowań: polimerowe z polikaprolaktanu (PCL) i kompozytowe na osnowie tego samego polimeru z dodatkami nanocząstek hydroksyapatytu (HAp). Uzyskano dwa typy próbek różniących się rozmiarami. Mniejsze posłużyły głównie do optymalizacji parametrów obrazowania i badania właściwości mechanicznych włókien z użyciem mikroskopu sił atomowych, większe natomiast badano pod kątem wpływu modyfikacji dokonanej w oparciu o technikę RF-CVD na topografię ich powierzchni i właściwości mechaniczne. Technologia wytwarzania próbek została szczegółowo opisana i zilustrowana odpowiednimi zdjęciami. Szkoda, że Doktorant nie podał, jak dużo cząstek hydroksyapatytu (udział objętościowy) wprowadzono do roztworu PCL. Informacja ta byłaby cenna w świetle rozważań prowadzonych na stronie 69 dotyczących zmiany średnicy włókien pod wpływem tych cząstek.

Drugi etap badań własnych dotyczył optymalizacji parametrów obrazowania topografii powierzchni wytworzonych włókien. Optymalizację przeprowadzono zarówno na sondach komercyjnych o różnej sztywności i geometrii oraz na sondach modyfikowanych metodą FIB. Oceniano wpływ szybkości skanowania i amplitudę drgań dźwigienki skanującej powierzchnię na powietrzu oraz pokrytej filmem z cieczy. Zastosowano dwa mikroskopy sił atomowych o różnym zakresie pracy w kierunku osi Z. Stwierdzono że łatwiej dobrać właściwe warunki obserwacji dla mikroskopu MFP 3D BIO firmy Asylum Research/Oxford Instruments, dla którego wspomniany w poprzednim zdaniu parametr miał większą wartość wynoszącą 40  $\mu\text{m}$ . Ze zrozumiałych względów Doktorant zrezygnował z bezkontaktowego trybu pracy mikroskopu AFM. Wstępne badania wykluczyły także tryb kontaktowy. W związku z tym doskonaleniu poddano akwizycję obrazów w trybie kontaktu przerywanego. Doktorant dokonał wnikliwej i krytycznej oceny uzyskanych obrazów. Wskazał w przekonujący sposób na źródła zaobserwowanych niedoskonałości otrzymanych obrazów. Zaproponował i zweryfikował wartości parametrów zapewniających uzyskanie najlepszych jakościowo obrazów topografii powierzchni badanych włókien. Zapomniał jednak podać, który z mikroskopów był źródłem obrazów przedstawionych na rys. 26 i dalszych. Do tego problemu powrócę jeszcze raz w dalszej części rozprawy.

Pewnym mankamentem użytej przez Doktoranta procedury optymalizacyjnej polegającej na wizualnym porównaniu obrazów otrzymanych w różnych warunkach jest to, że nie były to obrazy dokładnie tego samego miejsca na badanej próbce. Zdaję sobie sprawę z tego, że identyczne pozycjonowanie próbki w trakcie kolejnych obserwacji nie jest sprawą łatwą, ale trudno uznać, że metodyka użyta w rozprawie daje w pełni obiektywne wyniki. Na problem ten zwracałem także uwagę w recenzji rozprawy doktorskiej dr inż. Janusza Rębisia, która jest często przytaczana przez Doktoranta. Mimo tych uwag trzeba przyznać, że obrazy uzyskane w warunkach uznanych w rozprawie za optymalne są w porównaniu z innymi rzeczywiście najlepszej jakości, co jednoznacznie potwierdzają także obrazy zawarte w dodatku.

Pobocznym, w stosunku do głównych celów rozprawy zagadnieniem, był pomiar grubości wytworzonych włókien. Doktorant słusznie uznał, że pomiary te o wiele szybciej można przeprowadzić na obrazach z mikroskopu skaningowego bez obawy o istotne pogorszenie ich dokładności w stosunku do wyników uzyskanych za pomocą AFM. Do otrzymanych wyników nie można mieć zastrzeżeń. Obserwowane różnice zostały

logicznie wyjaśnione z zastrzeżeniem, o którym wspomniałem wcześniej. Za nazbyt śmiało uznać należy jednak stwierdzenie: „Wnioskować należy, że modyfikacja nie wpłynęła na zmianę morfologii, kształtu i ułożenia miękkich włókien polimerowych.” gdy weźmie się pod uwagę, że wynika ono według Doktoranta z tego, że „Zmierzone średnice włókien mieszczą się w podobnym zakresie wartości.”.

Właściwości mechaniczne oceniano w oparciu o analizę krzywych siła-przemieszczenie sondy względem powierzchni badanej próbki. W trakcie tej analizy dopasowuje się jeden z istniejących modeli matematycznych opisujących te krzywe do zarejestrowanych danych pomiarowych. Na tej podstawie Doktorant określał m.in. wartości modułu sprężystości. Ponieważ tak wyznaczonych wartości nie można utożsamiać z modułem Younga, a modelem najlepiej opisującym otrzymane krzywe był model DMT (od nazwisk Derjaguin-Muller-Toporov), w dalszej części rozprawy moduł sprężystości nazwano modułem DMT.

W pierwszej kolejności, po kalibracji i optymalizacji warunków akwizycji danych, oceniono wpływ temperatury na wartość modułu DMT polikaprolaktonu (PCL). Zmiany wartości tego modułu w zakresie temperatury 22-37°C są stosunkowo niewielkie. Wyraźny spadek zarejestrowano natomiast w temperaturze 60°C, co wynikać może z topnienia tego polimeru. Wyniki te wyznaczono z map rozkładu wartości modułu DMT. Szkoda, że Doktorant nie umieścił na nich legendy wyjaśniającej znaczenie użytych na nich kolorów. Bez tego analiza tych map jest bardzo utrudniona. Ponieważ wyznaczone wartości modułu sprężystości są o około 50% niższe od modułu Younga, Doktorant dokonał szczegółowej analizy przyczyn tego zjawiska. Użyte w tej analizie argumenty świadczą o tym, że Doktorant jest bardzo doświadczonym użytkownikiem mikroskopów AFM o głębokiej wiedzy na temat budowy, zasady ich działania oraz możliwości badawczych, a także natury właściwości mechanicznych ocenianych włókien.

Istotnym elementem badań właściwości mechanicznych rusztowań włóknistych, wytworzonych na potrzeby inżynierii tkankowej była ocena oddziaływań między włóknami. Na otrzymanych mapach wartości modułu DMT jaśniejsze obszary świadczące o wyższym module sprężystości widoczne są głównie w miejscu łączenia się kilku włókien. Równocześnie deformacja w tych obszarach jest najmniejsza. Doktorant uznał, że miejsca łączenia się włókien ze względu na większą stabilność, mogą stanowić obszary uprzywilejowanej adhezji komórek tuż po ich osadzeniu na rusztowaniu. Stwierdzenie to wymaga jednak potwierdzenia.

Używane w pracy sondy ostrzono w mikroskopie FIB. Zgodnie z przypuszczeniami tak zmodyfikowane sondy pozwalają na uzyskanie lepszej zdolności rozdzielczej w mapach topograficznych oraz dokładniejszych wyników na mapach wartości modułu sprężystości DMT. Podobnie, jak w przypadku optymalizacji warunków pracy AFM, wnioski te wyciągnięto na podstawie wizualnego porównania obrazów zarejestrowanych za pomocą sond standardowych i modyfikowanych. Jednak i tym razem nie są to obrazy dokładnie tego samego miejsca na badanej próbce. Wyjątkiem jest rys. 35, na którym przedstawiono profile tego samego włókna wizualizowanego sondami obydwu typów. Z rysunku tego jednoznacznie wynika, że sonda modyfikowana uwidacznia znacznie więcej szczegółów włókna.

Wszystkie obrazy zamieszczone w rozprawie do tego miejsca charakteryzują się bardzo dobrą jakością. Do analizy wpływu modyfikacji powierzchni rusztowań na ich topografię i właściwości mechaniczne użyto, jak należy wnioskować, inny mikroskop sił atomowych pracujący w trybie spektroskopii sił (FS). Jaki był tego powód? Jakość obrazów

uzyskanych za pomocą tego mikroskopu jest dużo gorsza od wcześniej prezentowanych. Czy poprzednio stosowany mikroskop może pracować w trybie FS? Jeżeli tak, jaka jest jakość obrazów uzyskiwanych za jego pomocą? Pytań jest dużo, ale wynika to z tego, że trudno na zaprezentowanych w tym miejscu obrazach dostrzec to, o czym Doktorant próbuje przekonać czytelnika. Dotyczy to przykładowo wniosków wysnutych na podstawie tabeli 12. Prawdziwe jest natomiast stwierdzenie, że "analiza jakościowa otrzymanych map właściwości mechanicznych w cieczy (Tabela 13) nie pozwala stwierdzić, wzmocnienia włókniny w miejscu styku kilku włókien". Moim zdaniem nie musi to być jednak równoznaczne z brakiem takiego wzmocnienia, ale wynikać ze słabej rozdzielczości zarejestrowanych obrazów. Mam nadzieję, że Doktorant odniesie się do tych uwag. Interesujące są natomiast zmiany wartości modułu DMT oraz kąta zwilżania wywołane modyfikacją powierzchni rusztowań. Doktorant dokonał logicznego wyjaśnienia większości zaobserwowanych tu zjawisk.

Czas degradacji biodegradowalnych rusztowań polimerowych to jedna z kluczowych cech, decydujących o ich funkcjonalności. Ponieważ w literaturze znaleźć można liczne doniesienia dotyczące degradacji polikaprolaktanu (PCL) opisywanej w oparciu o standardowe metody badań, Doktorant słusznie uznał, że w rozprawie skoncentruje się na ocenie właściwości mechanicznych włókien poddanych działaniu wodnego roztworu chlorku sodu buforowanego fosforanami (PBS). Wyniki tych badań przedstawiono w formie map topograficznych i skorelowanych z nimi map modułu DMT. Pokazują one, że nawet po sześciu miesiącach ekspozycji włókien na działanie wyżej wymienionego odczynnika nie pojawiły się na ich powierzchni pory. Nie zmieniła się także architektura włókien. Dowodzi to, że czas potrzebny do ich pełnej degradacji jest znacznie dłuższy. O tym, że proces ten został jednak zapoczątkowany świadczyć może pojawienie się na powierzchni włókien struktury lamelarniej, której nie obserwowano we włóknach tuż po ich wytworzeniu. Z praktycznego punktu widzenia istotne jest także to, że efekt ten można było jedynie zaobserwować na obrazach modułu DMT.

W posumowaniu rozprawy Doktorant jeszcze raz wymienia najważniejsze osiągnięcia oraz formułuje wnioski o charakterze zarówno metodycznym, jak i poznawczym.

#### 4. UWAGI KOŃCOWE

Z uwag przedstawionych w niniejszej recenzji wynika, że mgr inż. Adrian Chlanda w swojej rozprawie skoncentrował się na zagadnieniach metodycznych związanych z zastosowaniem mikroskopii AFM do oceny istotnych parametrów wybranych włókien biodegradowalnych. Udało Mu się zoptymalizować warunki prowadzonych obserwacji, m.in. poprzez zmianę geometrii sond użytych w badaniach. Jest to równoznaczne z osiągnięciem dwóch pierwszych z wymienionych w rozdziale II celów naukowych oraz związanego z nimi celu użytecznego rozprawy. Sposób przedstawienia tych zagadnień świadczy o Jego głębokiej wiedzy teoretycznej dotyczącej mikroskopii AFM oraz o praktycznym opanowaniu dostępnych w niej technik.

Działania Doktoranta nie ograniczyły się jednak do samego tylko zarejestrowania obrazów ujawniających różne cechy badanych włókien, lecz poszerzone zostały o analizę procesów zachodzących w włóknach PCL, które wpływają na te cechy. Osiągnięty został w ten sposób ostatni z planowanych celów naukowych. Z analizy tej wynika, że Doktorant swobodnie porusza się w tym obszarze, o czym dodatkowo świadczyć może część literaturowa rozprawy poświęcona różnym aspektom wytwarzania, modyfikowania i zastosowania biodegradowalnych rusztowań polimerowych. Trzeba zgodzić się w tym miejscu ze stwierdzeniami Autora rozprawy zamieszczonym w podsumowaniu, że „uzyskane wyniki wzbogaciły stan wiedzy o nano- i submikronowej wielkości biodegradowalnych włókninach” oraz, że „mogą zostać wykorzystane przy projektowaniu nowych, biodegradowalnych rusztowań na potrzeby inżynierii tkankowej.”

Podsumowując, Doktorantowi udało się osiągnąć wszystkie cele rozprawy. Praca nie jest pozbawiona usterek głównie w sposobie opisu cytowanych w niej publikacji, co szeroko opisałem we wcześniejszych rozdziałach recenzji. Pod względem formalnym i merytorycznym spełnia jednak wymagania stawiane rozprawom doktorskim zapisane w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki z dnia 14.03.2003 r. wraz z późniejszymi zmianami.

Biorąc to wszystko pod uwagę, wnioskuję o dopuszczenie mgra inż. **Adriana Chlandy** do publicznej obrony rozprawy doktorskiej przed Radą Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej.

