

Warszawa, 01.09.2016

Prof. nzw. dr hab. inż. Anna Boczkowska  
Wydział Inżynierii Materiałowej  
Politechniki Warszawskiej

**Ocena dorobku naukowego dr. Łukasza Figla  
w związku z postępowaniem o nadanie  
stopnia naukowego doktora habilitowanego  
prowadzonego przez Radę Naukową Instytutu Podstawowych Problemów  
Techniki Polskiej Akademii Nauk**

**Podstawy formalne**

Niniejsza opinia została opracowana w związku z pismem Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, dr hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego, profesora IPPT PAN, z dnia 27 kwietnia 2016 r. Opinię wykonano na podstawie dokumentacji dołączonej do pisma, opracowanej przez Kandydata do stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie – inżynieria materiałowa.

**Ogólna charakterystyka Kandydata**

Dr Łukasz Figiel jest absolwentem Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej który ukończył w roku 1999. W 2000 roku rozpoczął pracę naukową w Instytucie Badań nad Polimerami na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Technicznego w Dreźnie, którą zakończył w 2004 roku obroną rozprawy doktorskiej pt. „Sensitivity Analysis of Interface Fatigue Crack Propagation in Elastic Composite Laminates”. Po obronie doktoratu w latach 2005-2006 Pan Łukasz Figiel uzyskał pozycję post-doc’a w Instytucie Badań nad Materiałami w Niemieckim Centrum Lotnictwa/Kosmonautyki (DLR) w

Kolonii, a następnie w latach 2006-2009 na Wydziale Nauk Inżynierskich Uniwersytetu w Oksfordzie. W latach 2009-2012 był zatrudniony jako wykładowca na Wydziale Mechanicznym, Lotniczym i Biomedycznym Uniwersytetu w Limerick w Irlandii, w latach 2012-2013 jako specjalista w Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych Polskiej Akademii Nauk w Łodzi, zaś w przez kolejny rok jako wykładowca na Wydziale Inżynierii Uniwersytetu w Portsmouth w Wielkiej Brytanii. Dr Figiel od 2014 roku pracuje jako adiunkt na Uniwersytecie w Warwick w Wielkiej Brytanii. Można zatem stwierdzić, że Pan Łukasz Figiel ma ogromne doświadczenie naukowe zdobyte podczas pracy w licznych zagranicznych ośrodkach i laboratoriach badawczych. W tym kontekście dziwi trochę skromny udział w konsorcjach i sieciach naukowych. Wyszczególniony jest jedynie udział w konsorcjum QUBOX (Uniwersytetów w Oksfordzie, Bradford i Belfaście) w ramach projektu EPSRC w latach 2006-2009. Dość skromnie wygląda też członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych (członek jednego towarzystwa – Engineering Professors Council od 2015 roku oraz członek stowarzyszenia absolwentów Institute of Materials, Minerals and Mining od 2015 roku).

Dr Figiel recenzował artykuły dla czasopism międzynarodowych, takich jak np. Computational Materials Science, Polymer, European Journal of Mechanics, Composites Part B, Composites Science and Technology i inne. W sumie od 2008 roku Kandydat wykonał 25 recenzji, co daje średnio 3 – 4 recenzje rocznie.

### **Ocena zgłoszonego osiągnięcia naukowego**

Kandydat do stopnia naukowego doktora habilitowanego przedstawił do oceny osiągnięcie ujęte w jedno tematycznym cyklu 9 publikacji, pod wspólnym tytułem „Zbadanie związku przetwarzanie-morfologia-zachowanie mechaniczne dla nanokompozytów polimerowych: modelowanie i eksperymenty”. Cykl ten składa się z 9 publikacji naukowych o spójnej tematyce, których łączny IF wynosi 20,069. W publikacjach tych dr Figiel jest w jednym przypadku jedynym autorem, pozostałe to publikacje współautorskie, przy czym w dwóch jest pierwszym autorem, w pięciu drugim, a w jednej trzecim. Jego wkład w poszczególne publikacje, według oświadczenia jest wiodący i waha się od 45 do 100%. Niestety załączone oświadczenia współautorów publikacji nie potwierdzają procentowych udziałów Kandydata w ich tworzeniu, a stanowią jedynie oświadczenia zakresu wkładu merytorycznego współautorów, który trudno jest ocenić procentowo.

Przedstawiony do oceny cykl publikacji pod wspólnym tytułem „Zbadanie związku przetwarzanie-morfologia-zachowanie mechaniczne dla nanokompozytów polimerowych: modelowanie i eksperymenty” dotyczy opracowania modeli numerycznych dla nanokompozytów polimerowych o osnowie termoplastycznej oraz duroplastycznej domieszkowanych glinokrzemianem warstwowym lub nanorurkami węglowymi, które opisują właściwości mechaniczne nanokompozytów łącząc ze sobą wiele skal czasu i długości. Publikacje oznaczone od H1 do H9 można podzielić na dwie główne grupy biorąc pod uwagę typ polimeru:

1. o osnowie termoplastycznej

- H1-H3 dotyczą nanokompozytów na bazie poli(tereftalanu etylenu) (PET) z glinokrzemianem warstwowym,
- H4 dotyczy nanokompozytów na bazie polilaktydu (PLA) z glinokrzemianem warstwowym,
- H5 dotyczy również nanokompozytów polimerowych z glinokrzemianem warstwowym, ale bez skonkretyzowania typu polimeru.

2. o osnowie duroplastycznej

- H6 dotyczy żywic epoksydowych z glinokrzemianem warstwowym,
- H7-H9 dotyczą żywic epoksydowych z nanorurkami węglowymi.

Można zatem uznać, że przedstawione pod wspólnym tytułem publikacje rzeczywiście stanowią cykl, którego osi są nanonapełniacze w postaci płytek bądź rurek wprowadzane do polimerów termo i duroplastycznych. Pan dr Łukasz Figiel do opisu numerycznego właściwości mechanicznych oparł się na koncepcji reprezentatywnego elementu objętości (REO). Modele numeryczne weryfikował w oparciu o dane doświadczalne, w zdecydowanej większości pochodzące z publikacji różnych autorów. Niewiele prac dostępnych w literaturze koncentruje się na przewidywaniu nieliniowych właściwości mechanicznych nanokompozytów polimerowych, zwłaszcza w obszarze dużych odkształceń.

Głównym celem naukowym badań dr. Łukasza Figla było określenie, za pomocą eksperymentów komputerowych opartych o koncepcję REO, związku pomiędzy morfologią, warunkami przetwórstwa a właściwościami mechanicznymi nanokompozytów polimerowych oraz dostarczenie danych do budowy nowych modeli. Na szczególne uznanie zasługuje uwzględnienie w modelu takich cech morfologicznych, jak: stopień eksfoliacji i zorientowania nanonapełniacza oraz oddziaływań na granicy nanonapełniacz - osnowa polimerowa wraz z określeniem właściwości warstwy granicznej. Było to niezwykle trudne, gdyż wymagało przejścia od skali nano do makro, aby pokazać wpływ elementów mających rozmiary nanometryczne na zachowanie materiału pod obciążeniem w skali makroskopowej.

Zagadnienia te wymagały także połączenia koncepcji REO z odpowiednim opisem fizycznym zachowania mechanicznego polimerów, warstwy granicznej (tzw. interfazy) w odpowiednim przedziale czasowo-temperaturowym.

Za trafne należy uznać wytypowanie przez dr Figła materiałów do badań, a to ze względu na to, iż glinokrzemiany warstwowe i nanorurki węglowe są chyba najczęściej stosowanym nanonapełniaczem do polimerów. Co więcej glinokrzemiany są powszechnie stosowane dla zwiększenia właściwości barierowych polimerów używanych w przemyśle opakowaniowym (PET – butelki, PLA –folie), zaś nanorurki węglowe w polimerach epoksydowych głównie dla zwiększenia ich odporności zmęczeniowej, na udar i poprawy przewodności elektrycznej, czym zainteresowany jest m.in. przemysł lotniczy. A zatem poznanie związków pomiędzy morfologią a właściwościami mechanicznymi takich nanokompozytów ma nie tylko aspekt naukowy, ale także aplikacyjny i może umożliwić świadome kształtowanie ich właściwości do konkretnych zastosowań. Zaproponowanie przy tym przez Pana dr Łukasza Figła eksperymentów komputerowych zamiast licznych czasochłonnych doświadczeń należy uznać za celowe, gdyż znacznie przyspiesza osiągnięcie celu badawczego. Należy również podkreślić, że wyniki uzyskiwane w metodach komputerowych były weryfikowane w oparciu o wyniki eksperymentów dostępnych w literaturze. W jednej pracy H4 znaleźć można własne wyniki doświadczalne dr Figła, związane z wytwarzaniem i charakteryzacją nanokompozytów. W tym przypadku były to nanokompozyty na bazie PLA i glinokrzemianów warstwowych. Praca ta pozwoliła stwierdzić, że Pan Łukasz Figiel potrafi umiejętnie zastosować zaawansowane techniki charakteryzacji materiałów, takie jak różnicową kalorymetrię skaningową, transmisyjną mikroskopię elektronową, szerokokątową dyfrakcję rentgenowską i reometrię rotacyjną.

Główny jednak wkład dr. Figła w rozwój inżynierii materiałowej polega na opracowaniu komputerowych modeli nanokompozytów w oparciu o koncepcję REO, połączoną z procedurą Monte Carlo do rekonstrukcji ich morfologii oraz modeli konstytutywnych opisujących właściwości mechaniczne zarówno w temperaturze pokojowej jak i nieco powyżej temperatury zeszklenia. I tak w pracy H1 Pan dr Figiel analizował wpływ pełnego rozwarstwienia (tzw. eksfoliacji) płytek glinokrzemianu w zakresie temperatury nieco powyżej temperatury zeszklenia. Jest to z pewnością morfologia idealna, ale też najbardziej pożądana z punktu widzenia właściwości nanokompozytu. Na potrzeby stworzenia modelu założono, że PET nie zmienia swoich właściwości wokół nanocząstek, co jest oczywistym uproszczeniem nie mającym odzwierciedlenia w rzeczywistości. Modelowano nanokompozyty o różnej zawartości nanonapełniacza: 1; 2,5; i 5% objętościowo. Uwzględniono także

współczynnik kształtu płytek nanonapełniacza oraz ich orientację. Modelowanie komputerowe pozwoliło przewidzieć wpływ nanonapełniacza, a w szczególności jego udziału objętościowego na makroskopowe krzywe naprężenie - odkształcenie. W kolejnej pracy H2 Pan dr Figiel skoncentrował się na modelowaniu zjawisk zachodzących podczas odkształcania PET o największym udziale objętościowym glinokrzemianu warstwowego (5%) w jednej wybranej temperaturze 100°C, dla układu płytek wraz z galerią międzywarstwową, które określa jako taktoid. W modelu uwzględnił różną ilość taktoidów i ich orientację, co odzwierciedla aglomeraty nanopłytek. W dalszym ciągu opracowany model nie uwzględniał zmian właściwości polimeru na granicy z nanonapełniaczem oraz zakładał ich idealne połączenie, ale za to uwzględniał zachowanie mechaniczne galerii międzywarstwowej. Symulacje komputerowe pozwoliły stwierdzić, że moduł Younga wzrasta wraz ze zmniejszaniem się liczby płytek w aglomeracie, co jest w zgodzie z ogólną wiedzą zdobytą w wyniku badań doświadczalnych. Określono również wpływ składu taktoidu na średni kąt zorientowania płytek podczas odkształcania.

Kolejnym etapem prac nad rozwojem modelu numerycznego, celem zbliżenia się do warunków rzeczywistych, było uwzględnienie wpływu oddziaływań na granicy polimer – nanonapełniacz na właściwości mechaniczne w zakresie temperatury zeszklenia (H3). Można zatem stwierdzić, że opracowany model uwzględniający morfologię nanokompozytów był przez dr Łukasza Figla konsekwentnie rozwijany. Aby uwzględnić zmianę mobilności polimeru wokół nanonapełniacza zmodyfikowano model konstytutywny dla nienapełnionego polimeru z pracy H1. W opinii recenzenta nie jest uzasadniony fizycznie fakt zwiększenia mobilności w interfacie w porównaniu z nienapełnionym polimerem. Powszechnie wiadome jest, że w okolicy napełniacza, w tym również nanonapełniacza, dochodzi do ograniczenia ruchliwości makrocząsteczek ze względu na oddziaływania na granicy faz. Uwzględniona w analizie numerycznej maksymalna temperatura 100°C jest znacznie poniżej temperatury przetwórstwa PET. Nie jest zrozumiałe co Kandydat do stopnia doktora habilitowanego określa jako „przetwarzanie polimeru”, o jakie temperatury chodzi i dlaczego mogły one doprowadzić do degradacji modyfikatora powierzchni glinokrzemianu warstwowego. Nie wiadomo też o jakim modyfikatorze jest mowa. Glinokrzemiany warstwowe najczęściej poddawane są modyfikacji polegającej na zamianie kationów w galerii międzywarstwowej przez związki alkiloaminowe, aminokwasy, kationowe surfaktanty o różnej strukturze i inne. Dr Figiel w swojej interpretacji wyników, zarówno w H1 jak i H3, przywołuje zjawisko krystalizacji PET wywołane odkształceniem w okolicy 100°C. Należy nadmienić, że w tej temperaturze dochodzi do krystalizacji PET także bez orientacji makrocząsteczek spowodowanej rozciąganiem.

Ciekawa wydaje się praca H4, w której dr Figiel zawarł własne wyniki doświadczalne, na bazie których będzie można opracować model służący do optymalizacji procesów przetwórstwa, takich jak np. wytłaczanie z rozdmuchem. Model ten, ponieważ jeszcze nie opracowany z oczywistych względów nie wchodzi w zakres osiągnięcia naukowego. Należy zauważyć, że w dotychczasowych pracach (H1 – H3) prowadzone były obliczenia dla udziałów objętościowych nanonapełniacza na poziomie 1 – 5 %. W pracy H4 (jedynej doświadczalnej) posługiwano się udziałami masowymi 3 i 5 %. Należałoby zatem zastanowić się nad weryfikacją modeli, przy tych samych udziałach masowych, gdyż wartości co do udziałów objętościowych będą się różnić. Zgodnie z wiedzą recenzenta glinokrzemiany wprowadzane są najczęściej do polimeru w ilości maksymalnej do 5 % masowo, a nie objętościowo.

W pracy H5 dr Figiel skoncentrował się na wyznaczeniu wpływu parametrów morfologii, takich jak stopnia eksfoliacji i zorientowania płytek glinokrzemianów na podłużny, poprzeczny i ścinający moduł sprężystości w temperaturze pokojowej, wykorzystując liniowo-sprężyste modele komputerowe nanokompozytu na bazie koncepcji REO oraz teorii Moriego i Tanaki.

W pracach H6 – H9 Pan dr Łukasz Figiel skoncentrował się na typie osnowy polimerowej o usieciowanej strukturze napełnianej głównie nanorurkami węglowymi (jedynie w pracy H6 wykorzystano jak w poprzednich glinokrzemian warstwowy o budowie płytkowej). **Ważnym wkładem dr Figla w wiedzę dotyczącą poznania mechanizmów zniszczenia nanokompozytów napełnianych glinokrzemianem warstwowym było stwierdzenie, na podstawie symulacji obliczeniowych, że zniszczenie nanokompozytu inicjowane jest wyłącznie poprzez zniszczenie interfazy, ponieważ posiada ona mniejszą odporność na pękanie niż galeria międzywarstwowa.** Przy tej samej odporności na pękanie interfazy i galerii dochodzi do rozwarstwienia ich obu. Wyniki modelowania wykazały, że **kluczową dla wytrzymałości nanokompozytu jest chemiczna modyfikacja zarówno oddziaływania na granicy polimer – płytka, jak i galerii między warstwowej celem podniesienia ich odporności na pękanie.** Niewątpliwie jest to oryginalne osiągnięcie Kandydata do stopnia doktora habilitowanego.

Systematyczne badania numeryczne wpływu interfazy dr Łukasz Figiel kontynuował na przykładzie polimerów epoksydowych z nanorurkami węglowymi jako nanonapełniaczem. Opracował osiowo-symetryczny model nanokompozytu za pomocą uproszczonego podejścia REO w postaci pojedynczej komórki periodycznej. Poszczególne właściwości mechaniczne interfazy opisał za pomocą podejścia strefy kohezyjnej zintegrowanego z pojedynczą komórką periodyczną. Uzyskane wyniki obliczeniowe pozwoliły na wyznaczenie wpływu wielkości

interfazy na prędkość uwalniania energii na czole szczeliny w funkcji odkształcenia. **Po raz pierwszy stwierdzono, że obecność nanorurek w polimerze powoduje obniżenie naprężeń na czole szczeliny, prowadzi do zmniejszenia uwolnionej energii, co w efekcie prowadzi do zwiększenia odporności na pękanie nanokompozytu. Opisanie tych zjawisk jest niewątpliwym osiągnięciem dr. Figla.** W tym miejscu należy jednak zauważyć, że zarówno w pracy H7, a już w szczególności w pracy H8 dr Figiel opisuje wzmocnienie materiału po przekroczeniu granicy plastyczności, co w przypadku polimerów epoksydowych, które są kruche i nie odkształcają się plastycznie ze względu na usieciowaną strukturę może dziwić, tym bardziej, że wyniki te zostały opublikowane w renomowanych i recenzowanych czasopismach. Pomijając wątek wykorzystania nieliniowego modelu konstytutywnego do wyznaczenia wartości granicy plastyczności w nanokompozytach epoksydowych, które takiej granicy nie posiadają, należy stwierdzić, że w kolejnej pracy H9 udało się dr Figlowi opisać **wpływ efektów pofalowania nanorurek węglowych oraz ich niedoskonałego połączenia z polimerem na właściwości mechaniczne nanokompozytu** za pomocą rozszerzonego modelu komputerowego 3D. Pofalowanie nanorurek węglowych Pan Łukasz Figiel przybliżył za pomocą funkcji sinusoidalnej w oparciu o rzeczywiste obrazy SEM nanorurek węglowych. **Praktycznym wnioskiem wynikającym z wyników symulacji komputerowych opisywanych w H9 jest to, iż aby uzyskać nanokompozyt o jak największej zdolności do pochłaniania energii mechanicznej nanorurki powinny być proste, niepofalowane i dobrze połączone z osnową polimerową.**

Można stwierdzić, że Pan Łukasz Figiel wykazał się znaczną wiedzą z zakresu inżynierii materiałowej, a także umiejętnie wykorzystał zaawansowane metody modelowania w różnych skalach dla powiązania morfologii nanokompozytów z ich właściwościami mechanicznymi, co niewątpliwie stanowi jego wkład w rozwój wiedzy o nanomateriałach.

### **Ocena dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego Kandydata**

Od początku swojej działalności naukowej dr Łukasz Figiel zajmuje się problematyką badawczą związaną z wykorzystaniem metod analizy numerycznej do oceny właściwości kompozytów polimerowych, a w szczególności do analizy propagacji pęknięć zmęczeniowych na granicy faz. Swoje doświadczenia zawodowe po ukończeniu studiów zdobywał w laboratoriach zagranicznych. Stopień naukowy doktora uzyskał na Uniwersytecie Technicznym w Dreźnie. Wyniki swoich prac przed doktoratem opublikował w 4 publikacjach z listy JCR (łącznie IF = 9,601). Po doktoracie opublikował, oprócz 9 prac stanowiących podstawę

zgłoszonego osiągnięcia naukowego, 8 publikacji o łącznym IF = 16,202 oraz 8 publikacji spoza listy JCR. Łączny IF opublikowanych prac po doktoracie wynosi 36,271, indeks Hircha według bazy Web of Science wynosi 6, a ogólna liczba cytowań 134 (bez autocytowań). W większości publikacji wieloautorskich Pan Łukasz Figiel jest pierwszym autorem.

Pan dr Figiel uczestniczył w 19 konferencjach międzynarodowych, w tym w 16 po uzyskaniu stopnia doktora. Brał udział w dwóch komitetach organizacyjnych konferencji międzynarodowych. Wygłosił 5 wykładów na zaproszenie w instytutach zagranicznych. Brał również udział w 6 projektach badawczych, w tym w 2 z nich był kierownikiem. Jest też rozpoznawany na arenie międzynarodowej, o czym świadczą recenzje artykułów naukowych dla czasopism zagranicznych, Jest członkiem towarzystwa Engineering Professors Council od 2015 roku oraz członkiem stowarzyszenia absolwentów Institute of Materials, Minerals and Mining od 2015 roku.

Pan Łukasz Figiel prowadzi również działalność dydaktyczną. Od 2008 roku prowadził liczne wykłady na Uniwersytetach w Oksfordzie, Limerick, Portsmouth i obecnie Warwick. Tematyka wykładów obejmuje zarówno inżynierię materiałową jak i mechanikę. Sprawował opiekę nad dwoma studentami, po jednym w Irlandii i w Wielkiej Brytanii. Sprawował również opiekę naukową nad dwoma doktorantami w Irlandii w roli głównego promotora. Oba doktoraty zostały obronione.

Pan dr Figiel był członkiem zespołu ekspertów w Panelu ST8 w Narodowym Centrum Nauki. W latach 2012-2015 wykonał ok. 20 recenzji dla NCN i jedną dla Canada Foundation for Innovation.

Podsumowując należy stwierdzić, że dorobek naukowy Pana Łukasza Figla jest wartościowy i znajduje się w zakresie inżynierii materiałowej, zaś dorobek dydaktyczny i organizacyjny jest bardzo dobry.

### **Wniosek końcowy**

Podsumowując przedstawiony do oceny cykl 9 publikacji pod wspólnym tytułem „Zbadanie związku przetwarzanie-morfologia-zachowanie mechaniczne dla nanokompozytów polimerowych: modelowanie i eksperymenty” oraz całokształt dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego dr Łukasza Figla w kontekście wniosku o nadanie mu stopnia naukowego doktora habilitowanego należy stwierdzić, że dorobek ten jest istotny oraz spójny. Osiągnięciem Kandydata jest jego wkład w określenie zależności pomiędzy morfologią nanokompozytów polimerowych a ich właściwościami mechanicznymi z wykorzystaniem



zaawansowanych metod modelowania numerycznego w różnych skalach. Opracował komputerowe modele nanokompozytów w oparciu o koncepcję REO, połączoną z procedurą Monte Carlo do rekonstrukcji ich morfologii oraz modele konstytutywne opisujące właściwości mechaniczne zarówno w temperaturze pokojowej jak i nieco powyżej temperatury zeszklenia.

Na podstawie powyższej opinii, jako uzasadniony, uznaję wniosek o nadanie dr Łukaszowi Figłowi stopnia doktora habilitowanego w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

*ABocalska*