

Gliwice, 8.06.2016 r.

Dr hab. inż. Piotr Fedeliński
Profesor nzw. w Politechnice Śląskiej
Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Politechnika Śląska
44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 18A
Tel. 32 2371635, Fax: 32 2371282
E-mail: Piotr.Fedelinski@polsl.pl

Recenzja

**w postępowaniu habilitacyjnym dra inż. Łukasza Figla
w dziedzinie Nauk Technicznych, w dyscyplinie naukowej Inżynieria Materiałowa
Tytuł osiągnięcia naukowego
„Zbadanie związku przetwarzanie - morfologia - zachowanie mechaniczne
dla nanokompozytów polimerowych: modelowanie i eksperymenty”**

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę do opracowania recenzji stanowi pismo Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN, dra hab. inż. Zbigniewa Ranachowskiego, Prof. IPPT PAN z dnia 27 kwietnia 2016 r., skierowane do mnie w wyniku decyzji Nr BCK-VI-L-8519/15 Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów z dnia 11 marca 2016r. powołującej mnie na recenzenta w postępowaniu habilitacyjnym dra inż. Łukasza Figla w dziedzinie Nauk Technicznych, w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.

Recenzję opracowałem na podstawie dostarczonych 9 publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe oraz dokumentacji postępowania habilitacyjnego obejmującej autoreferat, wykaz publikacji, informacje o działalności naukowej, dydaktycznej i organizacyjnej.

2. Informacje ogólne

Dr inż. Łukasz Figiel, ur. 25.01.1975 r. w Łodzi, uzyskał tytuł magistra inżyniera na Wydziale Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Politechniki Łódzkiej w 1999 r. Stopień doktora inżyniera otrzymał na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Technicznego w Dreźnie w 2004 r. Promotorami rozprawy doktorskiej p.t. „*Sensitivity analysis of interface fatigue crack propagation in elastic composite laminates*” byli dr hab. Bernd Lauke i Prof. dr hab. G. Heinrich z Instytutu Badań nad Polimerami na Uniwersytecie Technicznym w Dreźnie.

Dr inż. Łukasz Figiel był zatrudniony jako pracownik naukowy: w latach 2000-2004 w Instytucie Badań nad Polimerami w Dreźnie, w latach 2005-2006 w Instytucie Badań nad Materiałami w Niemieckim Centrum Lotnictwa/Kosmonautyki w Kolonii, w latach 2006-2009 na Wydziale Nauk Inżynierskich Uniwersytetu w Oxfordzie. Wykładał na Wydziale Mechanicznym, Lotniczym i Biomedycznym Uniwersytetu Limerick w Irlandii w latach

2009-2012. Był zatrudniony jako specjalista w Centrum Badań Molekularnych i Makromolekularnych PAN w Łodzi w latach 2012-2013. Następnie w latach 2013-2014 wykładał na Wydziale Inżynierii Uniwersytetu w Portsmouth. Od 2014 r. jest zatrudniony na stanowisku adiunkta w Warwick Manufacturing Group Uniwersytetu Warwick w Wielkiej Brytanii.

Jako wyróżniającą należy ocenić wyjątkową mobilność Habilitanta, umiejętność współpracy naukowej z różnymi grupami badawczymi i pozycję naukową, której wyrazem jest zatrudnianie Kandydata na stanowiskach naukowych i dydaktycznych w renomowanych instytutach i uniwersytetach zagranicznych.

3. Ocena osiągnięcia naukowego

Jednym z ważnych zastosowań nanotechnologii jest inżynieria materiałowa. Rozwój tej dziedziny nauki pozwolił na stworzenie nowego rodzaju kompozytów zwanych nanokompozytami, zbudowanych z polimerowej osnowy z nanonapełniaczami w postaci nanopłytek, nanorurek lub nanoczastek. Materiały cechują się pożądanymi własnościami mechanicznymi - sztywność i wytrzymałość, a także własnościami fizycznymi, np. przewodność cieplna i elektryczna, nieprzepuszczalność gazów i pary itp. Bardzo dobre własności mechaniczne nanokompozytów wynikają z dużej sztywności i wytrzymałości nanonapełniaczy, a także ich cech geometrycznych - duże stosunki charakterystycznych wymiarów i powierzchni do objętości.

Na własności nanokompozytów wpływa ich skład i sposób wytwarzania. Strukturę i własności fizyczne można badać metodami eksperymentalnymi. W przypadku nanokompozytów wymagają one czasochłonnych badań oraz specjalistycznej i drogiej aparatury. Alternatywą lub uzupełnieniem dla badań doświadczalnych jest modelowanie komputerowe procesów przetwarzania i badania własności fizycznych.

Wśród analiz teoretycznych nanokompozytów można wyróżnić metody dynamiki molekularnej, pozwalające na określenie np. oddziaływań pomiędzy osnową i nanonapełniaczem, własności mechanicznych nanonapełniacza, itp. Popularną metodą analizy jest zastosowanie metod mechaniki ośrodków ciągłych i koncepcji reprezentatywnego elementu objętościowego (ang. RVE - representative volume element). Analiza metodami komputerowymi, np. metodą elementów skończonych (MES) RVE umożliwia uwzględnienie dużych odkształceń i prędkości odkształcenia, nieliniowości materiału, wpływu temperatury, koniecznych przy modelowaniu przetwarzania nanokompozytów. Ze względu na złożoność analizy mała liczba prac w literaturze światowej dotyczy metod przetwarzania nanokompozytów oraz porównania wyników modelowania komputerowego z rezultatami badań doświadczalnych.

Celem badań stanowiących osiągnięcie naukowe była komputerowa analiza przetwarzania i własności mechanicznych nanokompozytów polimerowych z wykorzystaniem metody elementów skończonych i reprezentatywnego elementu objętościowego. Badano wpływ wielkości i prędkości odkształcenia, temperatury, stopnia eksfoliacji i zorientowania nanonapełniacza, własności interfazy i interfejsu na wybrane makroskopowe własności mechaniczne (moduł Younga, granica plastyczności, wytrzymałość, itp.). Analizie poddano nanokompozyty z nanonapełniaczami w postaci nanorurek węglowych i nanopłytek glinki

i osnowie polimerowej termoplastycznej lub termoutwardzalnej. Wyniki modelowania komputerowego porównano z własnymi badaniami doświadczalnymi Habilitanta lub wynikami zaczerpniętymi z literatury.

Osiągnięcie naukowe pt. „*Zbadanie związku przetwarzanie – morfologia - zachowanie mechaniczne dla nanokompozytów polimerowych: modelowanie i eksperymenty*” stanowi cykl 9 publikacji w renomowanych czasopismach, z których jedna jest samodzielna, a pozostałe współautorskie. Artykuły ukazały się w czasopismach: *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, *Composite Science and Technology*, *Computational Materials Science*, *Polymer Testing* i w książce *Structural Nanocomposites*. Wkład Habilitanta w wymienionych publikacjach wynosił od 45 do 100% i polegał między innymi na: opracowaniu koncepcji badań, kierowaniu badaniami, wykonaniu eksperymentów komputerowych, analizie wyników oraz redakcji tekstów publikacji. Udział współautorów jest potwierdzony pisemnie i polegał na opracowaniu wyników badań, ich dyskusji oraz współredakcji artykułów.

Lista publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe przedstawiona jest poniżej.

- [1] **Ł. Figiel**, F.P.E. Dunne, C.P. Buckley, Computational modelling of large deformations in layered-silicate/PET nanocomposites near the glass transition, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 18, 21 pp., 2010.
- [2] C. Pisano, **Ł. Figiel**, Modelling of morphology evolution in intercalated PET-clay nanocomposites during semi-solid state processing, *Composites Science and Technology*, 75, 35-41, 2013.
- [3] **Ł. Figiel**, Effect of the interphase on large deformation behaviour of polymer-clay nanocomposites near the glass transition: 2D RVE computational modeling, *Computational Materials Science*, 84, 244-254, 2014.
- [4] M. Stępień, **Ł. Figiel**, Morphology evolution and macroscopic behaviour of PLA-organoclay nanocomposites during extensional rheology: experimental study, *Polymer Testing*, 42, 79-88, 2015.
- [5] **Ł. Figiel**, C.P. Buckley, Elastic constants for an intercalated layered-silicate/polymer nanocomposite using the effective particle concept - a parametric study using numerical and analytical continuum approaches, *Computational Materials Science*, 44, 1332-1343, 2009.
- [6] C. Pisano, P. Priolo, **Ł. Figiel**, Prediction of strength in intercalated epoxy-clay nanocomposites via finite element modeling, *Computational Materials Science*, 55, 10-16, 2012.
- [7] D. Weidt, **Ł. Figiel**, Predictions of energy absorption characteristics of aligned CNT-epoxy nanocomposites, In: J. Njuguna (ed.), *Structural Nanocomposites*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
- [8] D. Weidt, **Ł. Figiel**, Finite strain compressive behaviour of CNT/epoxy nanocomposites: 2D versus 3D RVE-based modeling, *Computational Materials Science*, 82, 298-30, 2014.
- [9] D. Weidt, **Ł. Figiel**, Effect of CNT waviness and van der Waals interaction on the nonlinear compressive behaviour of epoxy/CNT nanocomposites, *Composites Science and Technology*, 115, 52-59, 2015.

W pracy [1] badano rozwarstwione nanoglinki w osnowie PET. Własności osnowy określono na podstawie badań doświadczalnych i założono, że opisane są za pomocą nieliniowego modelu konstytutywnego. Własności nanopłytek zbadano metodami dynamiki molekularnej i przyjęto model liniowosprężysty. Stwierdzono wpływ udziału nanonapełniacza na zastępczy moduł Younga nanokompozytu. Przy dużych odkształceniach następuje zmiana

orientacji nanoglinek i spowodowane tym wzmocnienie kompozytu. Wzmocnienie następuje dodatkowo pod wpływem zmiany kierunków łańcuchów polimerowych w osnowie i krystalizacji osnowy. Zauważono wpływ prędkości odkształcenia i temperatury na strukturę kompozytu.

W pracy [2] badano wpływ aglomeracji nanopłytek glinki i własności mechanicznych warstw pomiędzy płytkami. Założono znacznie większą wytrzymałość warstwy rozdzielającej płytki w kierunku normalnym niż stycznym oraz nieliniową zależność między naprężeniem stycznym i odkształceniem postaciowym. Moduł Younga wzrasta z rozproszeniem płytek. Stwierdzono zmianę orientacji nanonapełniacza w zależności od wielkości odkształcenia. Badano wzajemny poślizg płytek. Określono wpływ temperatury na początek wzmocnienia materiału.

W pracy [3] uwzględniono specyficzne własności osnowy (mniejsza lepkość) w pobliżu nanoglinki w temperaturach bliskich zeszkleniu. Stwierdzono wpływ interfazy na zależność naprężeń od odkształceń. O wielkości wpływu decydowały temperatury i odkształcenie. Zauważono mały wpływ uwzględnienia interfazy na reorientacje nanonapełniacza w trakcie odkształcania oraz osłabienie wzmocnienia materiału w wyższej temperaturze.

W pracy [4] badano strukturę nanokompozytu składającego się z polilaktydu z nanoglinką na podstawie zdjęć mikroskopowych. Na podstawie badań ustalono wydłużanie się i zmniejszenie grubości aglomeratów nanoglinek ze wzrostem odkształcenia i prędkości odkształcenia. Następował wzrost naprężeń ze wzrostem prędkości odkształcenia.

W kolejnych pracach badano związek między strukturą nanokompozytu, a jego własnościami mechanicznymi (moduł Younga, granica plastyczności, wytrzymałość i możliwość absorpcji energii mechanicznej).

W pracy [5] badano wpływ orientacji i stopnia eksfoliacji nanoglinek na moduły sprężyste w kierunku równoległym, prostopadłym i moduł poprzeczny w temperaturze pokojowej. Pominięto zjawiska reologiczne i uplastycznienie materiału. Badano moduły sprężyste dla różnego stopnia eksfoliacji i udziału objętościowego. Stwierdzono początkowy wzrost modułu Younga ze wzrostem stopnia eksfoliacji i mały wpływ na moduł poprzeczny. Obliczenia przeprowadzono metodą Mori-Tanaki i metodą elementów skończonych. Jednokierunkowe ułożenie nanoglinek powoduje wzrost modułu Younga w kierunku równoległym oraz spadek w kierunku prostopadłym i zmniejszenie się modułu poprzecznego.

W pracy [6] badano wpływ warstwy otaczającej aglomerat nanoglinek i materiału pomiędzy płytkami na własności wytrzymałościowe nanokompozytu. Na podstawie badań stwierdzono, że w przypadku doskonałego połączenia aglomeratu z osnową ze wzrostem udziału nanoglinki zmniejsza się wytrzymałość. Wytrzymałość również maleje ze zmniejszeniem liczby płytek w aglomeracie. Uzyskano większą wytrzymałość przy losowo zorientowanych nanoglinkach.

W ostatniej grupie prac badano żywice epoksydowe z nanorurkami węglowymi, które cechują się podwyższoną odpornością na obciążenia dynamiczne. Jest to spowodowane hamowaniem wzrostu pęknięć przez nanorurki i dużymi odkształceniami plastycznymi przy naprężeniach ściskających.

W pracy [7] opracowano osiowosymetryczny model komórki jednostkowej zawierającej dwuścienną nanorurkę z warstwami pośrednimi i pęknięcie znajdujące się w liniowosprężystej osnowie. Komórkę poddano rozciąganiu wzdłuż nanorurki. Stwierdzono,

że nanorurka zwiększa odporność osnowy na pękanie. W dalszej części pracy badano komórkę jednostkową zawierającą jednościenną nanorurkę w osnowie modelowanej jako materiał sprężysto-lepko-plastyczny, którą poddano ścisłaniu z różnymi prędkościami. Badano absorpcję energii dla różnej proporcji wymiarów nanorurki i udziału objętościowego. Na absorpcję energii ma wpływ zjawisko wzmocnienia materiału zależne od udziału objętościowego nanorurek.

W pracy [8] opracowano modele trójwymiarowe nanokompozytu składającego się z osnowy epoksydowej i jednościennych nanorurek węglowych. Badano wpływ udziału objętościowego nanorurek i ich geometrii przy różnych prędkościach ścisłania. Założono model nieliniowy osnowy i idealne połączenie między osnową i nanorurkami. Badano wpływ orientacji nanorurek na wzmocnienie kompozytu. Wzrost udziału objętościowego nanorurek i proporcji ich wymiarów powoduje podwyższenie granicy plastyczności i przyspieszenie wzmocnienia materiału. W pracy porównano także wyniki modelowania nanokompozytu jako układu dwu- i trójwymiarowego.

W pracy [9] opracowano bardziej złożony model trójwymiarowy kompozytu. Uwzględniono zakrzywienie wielościennych nanorurek i niedoskonałe połączenie między nanorurkami i osnową (siły van der Waalsa). Nanorurki modelowano jako liniowosprężyste, a osnowę jako nieliniową. Badano próbki przy statycznym ścisłaniu. Stwierdzono, że niedoskonałe połączenie osnowy i nanorurek powoduje znaczne zmniejszenie modułu Younga i granicy plastyczności. Zakrzywienie nanorurek powoduje także zmniejszenie modułu Younga i granicy plastyczności. Wyniki modelowania komputerowego potwierdzono doświadczalnie.

Obliczenia metodą elementów skończonych prowadzono z wykorzystaniem programu komputerowego ABAQUS z dołączonymi własnymi procedurami obliczeniowymi.

Przedstawiony spójny tematycznie cykl 9 publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe dotyczy różnych aspektów modelowania komputerowego przetwarzania i badania własności mechanicznych nanokompozytów. Jest to tematyka aktualnie rozwijana na świecie i dotycząca nowoczesnych materiałów inżynierskich. Do analizy nanokompozytów wykorzystano metody analityczne i komputerową metodę elementów skończonych. Habilitant opracował modele dwu- i trójwymiarowe nanokompozytów o osnowie polimerowej i epoksydowej zawierające nanonapełniacze w postaci nanoglinek i nanorurek. W obliczeniach uwzględniono duże deformacje i prędkości deformacji, wpływ temperatury, własności sprężysto-lepko-plastyczne osnowy i własności warstw pośrednich otaczających nanonapełniacze. Wyniki obliczeń porównano z wynikami własnych badań doświadczalnych i zaczerpniętych z literatury. Z przeprowadzonych obliczeń wynikają praktyczne wnioski dotyczące przetwarzania nanokompozytów oraz wpływu struktury i własności elementów składowych kompozytu na jego własności mechaniczne.

Biorąc pod uwagę złożoność opracowanych modeli komputerowych nanokompozytów, wszechstronność przeprowadzonych badań, opublikowanie wyników badań w renomowanych czasopismach wydawnictw Elsevier i Springer Verlag oraz dużą cytowalność prac należy ocenić osiągnięcie naukowe jako wnoszące istotny wkład do dyscypliny naukowej Inżynieria Materiałowa w zakresie komputerowego modelowania materiałów.

4. Ocena istotnej aktywności naukowej

Dr inż. Łukasz Figiel jest dodatkowo współautorem 12 publikacji w czasopismach znajdujących się w bazie JCR: *Nanotechnology*, *International Journal of Nonlinear Mechanics*, *Applied Mathematics and Computation*, *Plastics, Rubber and Composites*, *International Journal of Fatigue*, *International Journal of Fracture*, *Advances in Space Research*, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *Engineering Fracture Mechanics*, *Composites Science & Technology*, *Computers and Structures*, *Computational Materials Science*. Wymienione publikacje dotyczą własności mechanicznych różnych kompozytów. Habilitant jest autorem lub współautorem 8 publikacji w czasopismach nie znajdujących się w bazie JCR. Sumaryczny współczynnik wpływu czasopism wynosi 33.67, liczba cytowań bez autocytowań wynosi 134 (158), a indeks Hirscha 6 (7) wg bazy Web of Science (w nawiasach podano liczbę cytowań w czasie opracowywania recenzji).

Habilitant nie jest autorem patentów krajowych i zagranicznych.

Dr inż. Łukasz Figiel był kierownikiem dwóch projektów badawczych - w latach 2011-2014 kierował projektem finansowanym przez Narodowe Centrum Nauki, a w latach 2010-2014 projektem Irish Research Council. Był głównym wykonawcą w czterech projektach - w latach 2006-2009 projektu Engineering and Physical Sciences Research Council oraz od 2000 do 2005 trzech projektów finansowanych przez German Research Foundation. Projekty dotyczyły własności mechanicznych kompozytów.

W 2001 r. otrzymał stypendium naukowe Maxa Buchnera, Niemcy, w 2003 r. stypendium konferencyjne im. Marii Skłodowskiej-Curie, w 2008 r. stypendium konferencyjne Royal Academy of Engineering, Wielka Brytania, w 2009 roku otrzymał nagrodę Composite Award przyznaną przez Institute of Materials, Minerals and Mining w Londynie.

Z przedstawionego przeglądu pozostałej działalności naukowej, nie wliczającej się do osiągnięcia naukowego, można stwierdzić, że dotyczy ona również badania własności kompozytów i mieści się w dyscyplinie naukowej Inżynieria Materiałowa. Jest wynikiem realizacji projektów krajowych i zagranicznych oraz jest prowadzona na wysokim poziomie, o czym świadczą publikacje w czasopismach o zasięgu światowym.

5. Działalność dydaktyczna i popularyzatorska oraz współpraca międzynarodowa

Habilitant uczestniczył aktywnie w 19 znaczących konferencjach krajowych i zagranicznych, w tym w światowych kongresach. Prezentował wyniki badań na konferencjach organizowanych w Holandii, Hiszpanii, Wielkiej Brytanii, Irlandii, Australii, Włoszech, Danii, Francji, Japonii i Niemczech. Był członkiem komitetu naukowego międzynarodowej konferencji organizowanej w Wielkiej Brytanii oraz członkiem komitetu organizacyjnego konferencji, która odbyła się w Irlandii.

Jest członkiem Institute of Materials, Minerals and Mining oraz Engineering Professors Council w Wielkiej Brytanii od 2015 r.

Prowadził zajęcia dydaktyczne w formie ćwiczeń, laboratoriów i wykładów na uniwersytetach w Oxfordzie, Limerick, Portsmouth i Warwick. Zajęcia dotyczyły między innymi: metod matematycznych, mechaniki, własności materiałów, mechaniki ciała stałego,

metody elementów skończonych, itp. Był promotorem 6 prac magisterskich i 4 licencjackich. Pełnił funkcję głównego promotora w dwóch przewodach doktorskich prowadzonych na uniwersytecie Limerick w Irlandii.

Prowadził na zaproszenie uniwersytetów w Niemczech i Wielkiej Brytanii pięć wykładów dotyczących modelowania nanokompozytów.

Był recenzentem około 20 projektów finansowanych przez Narodowe Centrum Nauki w latach 2012-2015. Recenzował jeden projekt finansowany przez Canada Foundation for Innovation w 2011 r.. Recenzował 25 artykułów dla czasopism o zasięgu międzynarodowym: *Computational Materials Science, Polymer, Philosophical Magazine, European Journal of Mechanics-A/Solids, Modelling & Simulation in Materials Science & Engineering, Composites Part B: Engineering, Polymer Testing, Composite Science and Technology.*

Uwzględniając udział Habilitanta w licznych konferencjach krajowych i zagranicznych, prowadzenie zajęć dydaktycznych na uczelniach zagranicznych oraz recenzowanie artykułów oraz projektów badawczych oceniam działalność dydaktyczną i organizacyjną w obszarze nauki jako bardzo dobrą.

6. Wniosek końcowy

Na podstawie dokonanej oceny osiągnięcia naukowego, stanowiącego cykl publikacji pt. *„Zbadanie związku przetwarzanie - morfologia - zachowanie mechaniczne dla nanokompozytów polimerowych: modelowanie i eksperymenty”* oraz dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego, przedstawionego w dokumentacji postępowania habilitacyjnego dra inż. Łukasza Figla, stwierdzam, że dorobek naukowy Habilitanta osiągnięty po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych dowodzi jego znacznego wkładu do dziedziny Nauki Techniczne, dyscypliny naukowej Inżynieria Materiałowa. W mojej opinii dorobek spełnia w stopniu bardzo dobrym wymagania określone w *Ustawie o Stopniach i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki* z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65 z dnia 16.04.2003 r. poz. 595 ze zmianami z dnia 18.03.2011 r.) oraz w *Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego* z dnia 1 września 2011 r. w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego (Dz. U. nr 196, poz. 1165).

Wnioskuje do Komisji Habilitacyjnej powołanej przez Centralną Komisję ds. Stopni i Tytułów oraz Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie o nadanie dr inż. Łukaszowi Figlowi stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie Nauki Techniczne, w dyscyplinie naukowej Inżynieria Materiałowa.

Piotr Fedeliński