

**Recenzja**  
**dorobku naukowego oraz rozprawy habilitacyjnej**  
**Dr Marcina BIAŁASA**  
**Tytuł rozprawy: MECHANICAL MODELLING OF THIN FILMS**  
**Stress Evolution, Degradation, Characterization**

Podstawa opinii: Art. 16 Ustawy z dn. 14 marca 2003r. wraz z Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dn. 22 września 2011 r.  
Zlecenie Rady Naukowej IPPT-PAN opracowania recenzji z dn. 19.10.2012r.

1. **Kandydat** Ur. 1974, studia na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej ukończył w r. 1998. W latach 1998-2002 doktorant w IPPT-PAN. Od r. 2002 zatrudniony w IPPT-PAN najpierw jako asystent, a od 2003r. jako adiunkt. W r. 2003 obronił pracę doktorską nt. „Modelowanie rozwoju uszkodzeń w warstwach kontaktowych materiałów”, której promotorem był prof. Mróz. W latach 2004-2006 oraz w r. 2008 przebywał w Centrum Badawczym Jülich (Niemcy), zaś w okresie 2009-2010 w University of Minnesota w USA. Przewód habilitacyjny wszczęty 11.06.2012 i skierowany przez CK do dalszego postępowania habilitacyjnego w IPPT-PAN pismem z dn. 7.09.br.

**2. Działalność naukowa**

Działalność naukową rozpoczął Kandydat jeszcze w okresie swoich studiów doktoranckich w IPPT-PAN, gdzie zetknął się z tematyką kontaktu, plastyczności oraz mechaniką pękania uprawianą przez prof. Mroza i jego szkołę. Z tego okresu pochodzi pierwsza praca Kandydata, dotycząca modelu zniszczenia warstwy kontaktowej. Modelowanie rozwoju uszkodzeń w warstwach kontaktowych na granicy różnych materiałów było też tematem pracy doktorskiej Kandydata, którą obronił w r. 2003.

Po doktoracie przebywał w ośrodku badawczym w Julich (Forschungszentrum FZJ – Niemcy), gdzie zetknął się z tematyką warstw izolacji termicznej (TBC – Thermal Barrier Coatings). Efektem tego okresu była seria prac dotycząca modelowania i analizy procesów segmentacji szczelin poprzecznych w cienkich warstwach ochronnych pod wpływem obciążeń termicznych. Były to prace współautorskie, w których całość modelowania numerycznego wraz z analizą są autorstwa Kandydata. Rozwój uszkodzeń w cienkich warstwach wywołany obciążeniem termicznym, zarówno monotonicznym jak i cyklicznym, był przedmiotem kolejnych publikacji. Dalsze prace poświęcone były modelowaniu zjawiska delaminacji oraz poślizgu ciernego. Zwłaszcza zagadnienie tarcia dwuwymiarowego są w niewielkim stopniu zbadane i zasługują na szczególną uwagę. W sumie tematyka działalności naukowej Kandydata obejmuje:

- analizę rozwoju uszkodzeń w warstwach kontaktowych na granicy różnych materiałów
- wpływ temperatury na procesy zniszczenia w warstwach TBC
- analizę odspajania warstw cienkich od podłoża
- analizę poślizgu ciernego w warstwach kontaktowych

W ostatnim okresie Kandydat zajął się zastosowaniem metod modelowania warstw cienkich do diagnostyki tkanki biologicznej, jaką jest skóra ludzka. Wykorzystując pomiary fal powierzchniowych za pomocą czujników piezoelektrycznych (przyczepionych do skóry) można wykonać identyfikację parametrów przyjętego modelu lepko-sprężystego warstw skóry. Wyniki te opublikował Kandydat we współautorstwie po pobycie na uniwersytecie stanowym w Minnesocie (USA).

W sumie dorobek Kandydata obejmuje:

- 11 publikacji w czasopismach naukowych (z czego 10 mieści się na liście filadelfijskiej)
- 4 publikacje w materiałach poważnych międzynarodowych konferencji naukowych (m. in. Symp. IU TAM)
- 1 rozdział (67 stron) w książce (nakładem Springer)
- 9 referatów na międzynarodowych konferencjach naukowych
- 9 projektów badawczych (w tym 3 jako główny wykonawca)

Kandydat jest recenzentem publikacji poważnych i licznych czasopism naukowych. Jest to dorobek jakościowo znaczący, zważywszy na rangę pozycji opublikowanych oraz wartość uzyskanych rezultatów.

Prace i wyniki Autora wpisują się w nurt nowoczesnych i aktualnych badań mechaniki materiałów. Choć prace te skupiają się jedynie na modelowaniu skutków stanów naprężeń i deformacji zachodzących w strukturach warstwowych – to wymagają one szerokiej znajomości teorii sprężystości, plastyczności, lepko-sprężystości, tarcia, mechaniki, kompozytów oraz metod numerycznych głównie MES.

Dorobek ten dowodzi, iż Kandydat posiadał w tej dyscyplinie wiedzę i wykazał aktywność w stopniu wskazującym na kompetencje w metodach modelowania konstytutywnego i analizy mechaniki ciała stałego.

### 3. Rozprawa habilitacyjna

Przedmiotem rozprawy jest analiza stanu naprężenia w cienkich warstwach stanowiących trzecie ciało (ang. interface) w zagadnieniach kontaktu dwóch ciał, bądź pokrycie (powłoka ochronna) powierzchni ciała macierzystego. Celem pracy jest modelowanie i analiza procesów degradacji (uszkodzenia, rozwoju spękań, delaminacji), poślizgu ciernego oraz identyfikacji warstw heterostruktur dla różnych przypadków obciążenia i przeznaczenia (funkcji aplikacyjnej) materialnych powierzchni rozdziału. Rozważane są takie rozmiary warstwy, dla których uzasadniony jest opis interakcji w ramach formalizmu mechaniki kontinuum. Praca o objętości 238 stron obejmuje 7 rozdziałów, 3 krótkie dodatki, spis literatury oraz streszczenie w j. polskim. Dwa pierwsze rozdziały tj. Wstęp (rozd. 1) oraz Preliminaria (rozd. 2) mają charakter ogólny i stanowią wprowadzenie do tematyki rozprawy. **Wstęp** zawiera przegląd literatury dotyczącej cienkich filmów i ich zastosowania, określa cel i zakres pracy, omawia metody depozytu filmu, mechanizmy zniszczenia, powłoki termiczne oraz strukturę i własności mechaniczne biotkanki. (naskórek człowieka). **Rozdz. 2** zatytułowany Preliminaria poświęcony jest krótkiej analizie osobliwości oraz kryteriom zniszczenia w procesie propagacji szczeliny na granicy dwóch ciał o różnych własnościach mechanicznych. Rozdziały 3-6 stanowią prezentację wybranych zagadnień modelowania warstw cienkich i mają charakter oryginalnych badań Autora w zakresie mechaniki

powierzchni materialnych tj. ciał o znikomej, nieskończonej małej grubości. Dotyczą one opisu i analizy odrębnych mechanizmów degradacji, jednakże istotnym i nadrzędnym motywem tych analiz jest obecność powierzchni interakcji (interfejsu). I tak **rozd. 3** dotyczy procesu poprzecznego pęknięcia filmu wywołanego rozciąganiem podłoża. Zaproponowano energetyczny model segmentacji tj. procesu rozwoju spękań poprzecznych w warstwie brzegowej (filmie). Efektywność modelu zilustrowano przykładem szczegółowej analizy liczbowej dla warstwy tlenku krzemu na podłożu polimerowym. Podano wykresy naprężeń progowych (granicznych) i resztkowych oraz energii pęknięcia w zależności od grubości filmu. **Rozdz. 4** poświęcony jest omówieniu i analizie warstwy izolacji termicznej (ang. Thermal Barrier Coating, w skrócie TBC). Bazując na wynikach eksperymentu znanego z testu zginania wykonanego przez MAJERUSA w Centrum Badawczym w Jülich (Niemcy) przeprowadzono symulację komputerową testu zginania, stosując MES do warstw powłoki APS TBC (Air Plasma Spray TBC), kleju (BC – Bond Coat) oraz podłoża (belka). Podłoże ze stopu niklu oraz klej BC (ze związkami aluminium) traktowane są jako sprężysto-plastyczne, zaś porowata plazma cyrkonu TBC jako materiał sprężysty. Uzyskano dobrą zgodność wyników analizy numerycznej z eksperymentem (zarówno co do liczby spękań, jak i ich lokalizacji). Ponadto rozpatrzono wielowarstwowy problem izolacji termicznej TBC cylindrycznej próbki w warunkach cyklicznego obciążenia termicznego, podczas którego powstaje dodatkowa warstwa tlenku (TGO – Thermal Growing Oxide) pomiędzy klejem BC a plazmą TBC. Zbadano warunki wzrostu mikropęknięć, a stąd delaminację warstwy ochronnej od podłoża (materiału rurki). Materiał kleju, tlenku i pokrycia przyjęto jako sprężysto-lepki (pełzanie nieliniowe), zaś podłoże jako sprężysto-plastyczne z efektami pełzania. W **rozd. 5** podjęto jedno- i dwuwymiarowy problem delaminacji i poślizgu ciernego warstwy sprężystej na sztywnym podłożu. Zwłaszcza interesujący i złożony jest problem 2D. Stosując pół-analityczną metodę analizy udało się uzyskać rozwiązanie płaskiego problemu brzegowego z ruchomym brzegiem, otrzymując nieznaną kształt obszaru delaminacji oraz wykazując istotny wpływ współczynnika Poissona na przebieg zjawiska odspojenia. **Rozdz. 6** ma odmienny charakter i wskazuje na możliwość zastosowania mechaniki warstw cienkich w diagnostyce skóry. Przedstawia tu Autor zastosowanie wiązki polimerowych piezoelektryków PVDF szczepionych z warstwowym podłożem lepko-sprężystym (model skóry ludzkiej) do identyfikacji parametrycznej podłoża. Stosując zarówno metodę pół-analityczną oraz MES, rozwiązano zadanie odwrotne identyfikacji. **Rozdz. 7** stanowi podsumowanie pracy, w którym zestawiono wnioski końcowe dotyczące poszczególnych oryginalnych rozdziałów rozprawy.

Wartość naukową rozprawy, jej poziom formalny oraz efektywność i niekonwencjonalność modeli oceniam wysoko. Doceniam staranność, dociekliwość i krytycyzm w stosowaniu metod zarówno modelowania, jak i rozwiązywania stawianych problemów. Tam, gdzie było to możliwe stosował Autor metody analityczne, a w pozostałych przypadkach korzystał z MES, opracowując własne kody komputerowe. Analiza numeryczna jest sumienna, z dbałością o krytyczną interpretację i ocenę uzyskanych wyników. Za szczególnie cenne uważam:

1. wyniki dotyczące modelowania i analizy pokrycia TBC z uwzględnieniem procesów fizyko-chemicznych zachodzących w mikro- i nanoskali. Do analizy procesu delaminacji powłoki ochronnej TBC „wyizolowano” komórkę reprezentatywną z pojedynczym asperytem kleju BC pokrytym zmienną warstwą wzrastającego tlenku TGO oraz warstwą plazmy TBC. W wyniku starannej i subtelnej analizy numerycznej złożonego problemu nieliniowego otrzymano interesujące wnioski jakościowe dotyczące eksploatacji elementów konstrukcyjnych, pracujących w ostrym reżimie termicznym.



2. dyskusję dotyczącą modelowania i analizy problemu dwuwymiarowego tarcia i poślizgu ciernego.  
W szczególności na uwagę zasługuje efektywne wyznaczenie obszaru delaminacji.
3. efektywne rozwiązanie problemu identyfikacji parametrycznej skóry z wykorzystaniem piezoelektryków.

Redakcja pracy jest czytelna, koncepcja modelowania mimo różnorodności problemów spójna.

Równocześnie dostrzegam pewne niedostatki rozprawy, do których zaliczam:

1. brak komentarza i odniesienia do formalizmu mechaniki ośrodków z materialną powierzchnią osobliwą (patrz prace W. KOSIŃSKIEGO, M. GURTINA I A. MURDOCHA itp.)
2. brak informacji o koncepcji GODETA trzeciego ciała w problemie ciernym zużycia
3. brak omówienia wpływu anizotropii powierzchni
4. aprobując generalnie zastosowanie opisu kontynualnego do analizy naprężeń w cienkich warstwach omawianych w rozprawie, nie mogę nie wspomnieć o konieczności uwzględnienia (w dalszych badaniach) oddziaływań intermolekularnych na granicy warstw, zwłaszcza w problemie TBC (w szczególności mechanizm powstania i wzrostu warstwy tlenku TGO). Mam tu na myśli modelowanie molekularne, bądź mieszane molekularno-kontynualne.

Uwagi te nie umniejszają znaczenia i wartości pracy, którą uważam za istotną pozycję w literaturze mechaniki cienkich warstw.

#### 4. Konkluzja

Podsumowując całokształt działalności Kandydata stwierdzam, że:

1. Dorobek publikacyjny, choć nie jest imponujący liczbowo, jest wartościowy poznawczo i rozpowszechniony w czasopismach wysokiej rangi
2. Rozprawa habilitacyjna jest dojrzałym opracowaniem na wysokim poziomie i stanowi bezsporny wkład w rozwój mechaniki modelowania w szczególności w rozwój metod modelowania konstytutywnego ośrodków warstwowych
3. Kandydat wykazał się dużą umiejętnością pracy badawczej, o czym świadczą liczne projekty i współpraca międzynarodowa

Zarówno publikacje, jak i przedstawiona rozprawa Kandydata dowodzą Jego dobrej i szerokiej znajomości zarówno warsztatu naukowego, jak i wiedzy z zakresu mechaniki ciała stałego.

W tej sytuacji uważam, że ubieganie się Kandydata o stopień doktora habilitowanego jest w pełni uzasadnione. Wnoszę zatem o pozytywne rozstrzygnięcie postępowania habilitacyjnego i nadanie Dr Marcinowi BIAŁASOWI stopnia naukowego doktora habilitowanego w dyscyplinie MECHANIKA.