

## **Autoreferat**

przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych

### **1. Imię i Nazwisko**

Marcin Białas

### **2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.**

- 1998 rok – tytuł zawodowy magistra inżyniera budownictwa uzyskany na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej; tytuł pracy magisterskiej „Modele konstytutywne warstw kontaktowych”; opiekunowie naukowci: prof. dr hab. inż. Zenon Mróz, prof. dr hab. inż. Wiesław Wojewódzki;
- 2003 rok – stopień doktora nauk technicznych, dyscyplina mechanika, uzyskany w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk; tytuł rozprawy doktorskiej: „Modelowanie rozwoju uszkodzeń w warstwach kontaktowych”; promotor dysertacji prof. dr hab. inż. Zenon Mróz.

### **3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.**

- 1998-2002 doktorant w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie;
- 2002-2003 asystent w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie;
- od 2003 adiunkt w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie.

Będąc pracownikiem Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN odbyłem staże zawodowe w następujących jednostkach naukowych:

- 2004-2006, 2008 Centrum Badawcze Jülich (Forschungszentrum Jülich), Jülich, Niemcy;
- 2009-2010 Uniwersytet Stanowy w Minnesocie (University of Minnesota), Minneapolis, USA.

### **4. Osiągnięcie wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.).**

#### **a) Autor, rok wydania, tytuł publikacji, nazwa wydawnictwa.**

Białas M., 2012, Mechanical Modelling of Thin Films, IPPT Reports on Fundamental Technological Research, 1/2012, Warszawa, ISSN 0208-5058, ISBN 978-83-89687-72-2.

#### **b) Omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.**

#### Wprowadzenie

Cienkie warstwy znajdują zastosowanie w wielu gałęziach techniki. Odnajdujemy je w układach scalonych, czyli w każdym komputerze, gdzie przewodzenie ładunków elektrycznych jest w dużej mierze zależne od rodzaju powierzchni kontaktowych na granicy cienkich warstw materiałów o różnych własnościach elektrycznych i mechanicznych (Freund

i Suresh, 2003; Lu i współpracownicy, 1998). Innym przykładem zastosowania cienkich warstw są pokrycia na elementach turbin gazowych, na przykład na ich łopatkach (Evans i współpracownicy, 2001(a,b)). Izolacja wykonana z bardzo porowatej ceramiki o małej przewodności cieplnej odgrywa tutaj istotną rolę, chroniąc właściwy materiał łopatki przed temperaturami znacznie przewyższającymi jego temperaturę topnienia oraz zapewniając ochronę przed czynnikami korozyjnymi. Wiąże się z tym istotny aspekt ekonomiczny, zastosowanie warstw izolacji termicznej pozwala bowiem na wydłużenie całkowitego okresu pracy turbiny oraz prowadzi do zwiększenia jej wydajności. Szczególnie materiały o zmieniających się właściwościach mechanicznych i termicznych po grubości pokrycia odgrywają coraz ważniejszą rolę w tego rodzaju zastosowaniach. Należy wymienić tutaj pokrycia wielowarstwowe (po angielsku *multi-layered*), gdzie zmiana cech mechaniczno-termicznych jest skokowa po grubości oraz te, gdzie jest ona ciągła (Pindera i współpracownicy 2000, 2002). Te drugie noszą raczej niefortunną w języku polskim nazwę materiałów gradientowych (po angielsku *graded materials*). Cienką warstwą jest także ludzka skóra, dlatego mechanika cienkich warstw znajduje również swoje zastosowanie w tych dziedzinach techniki lub nauki, których nazwa zaczyna się przedrostkiem bio- (Białas i Guzina, 2011). W szczególności odgrywa rolę w diagnostyce komórek nowotworowych (w sensie mechanicznym są one sztywniejsze od komórek zdrowych) oraz przy produkcji sztucznej skóry (Wagner i współpracownicy, 2004).

Czas użytkowania elementów maszyn lub konstrukcji szczególnie narażonych na ścieranie w wyniku kontaktu z otoczeniem może być znacznie zwiększony właśnie poprzez zastosowanie na nich cienkich pokryć. Należy tutaj wymienić dyski komputerowe wykorzystujące zjawisko magnetyzmu lub sztuczne implanty bioder lub kolan (Freund i Suresh, 2003). Niewielka grubość cienkich warstw odgrywa istotne znaczenie w innych gałęziach techniki. Polimerowe filmy wykorzystuje się przy produkcji laminowanych szyb – łączą one ze sobą elementy szklane (Ivanov, 2006; Muralidhar i współpracownicy, 2000). Polimerowe warstwy dodatkowo zbrojone włóknami metalowymi, wykorzystuje się w budownictwie do wzmocnienia uszkodzonych elementów konstrukcyjnych (Cottone i Giambanco, 2009).

Pierwszym wnioskiem jaki nasuwa się po przejrzaniu powyższej listy jest stwierdzenie, że rolą cienkich warstw nie jest przenoszenie dużych obciążeń, powiedzielibyśmy, że nie pełnią one roli nośnej. W większości przypadków tak rzeczywiście jest, spełniają one jedynie zadanie ochronne. Mimo to, w wielu sytuacjach sam sposób ich produkcji powoduje wytworzenie dużych naprężeń początkowych, które w połączeniu z tymi, które wywołuje obciążona konstrukcja, mogą prowadzić do uszkodzenia warstwy. Najczęściej spotykane rodzaje uszkodzeń to pęknięcia po grubości lub odspajanie warstwy. Ich obecność może oznaczać całkowitą bezużyteczność elementu, który warstwa ma chronić.

Konstrukcja, której rozmiar w jednym kierunku jest znacznie mniejszy niż w dwóch pozostałych to w mechanice konstrukcji płyta lub powłoka. Najważniejsza różnica, która pojawia się jednak, gdy mamy na myśli cienką warstwę polega na tym, że nie możemy tutaj pominąć materiału, który znajduje się pod nią i efektu, który on wywołuje. W wielu przypadkach nie jest nawet możliwe aby wykonać eksperyment z samą cienką warstwą, a trudności związane są najczęściej z jej znikomą grubością. Chcąc modelować mechaniczne zachowanie się warstwy, wykorzystujemy pojęcie powierzchni kontaktowej, to jest powierzchni łączącej warstwę z podłożem. Dla tego obszaru definiujemy cechy mechaniczne, które oddają specyficzny charakter połączenia dwóch różnych materiałów warstwy i podłoża.

Celem rozprawy habilitacyjnej jest opracowanie różnych metod mechanicznej analizy cienkich warstw ze szczególnym uwzględnieniem opisu stanu naprężenia, wywołanego nim rozwoju uszkodzeń (pękanie po grubości warstwy oraz jej odspajanie) oraz identyfikacji cech mechanicznych warstwy. Przyjęte modelowanie opiera się o mechanikę kontynualną ciała stałego i nie uwzględnia efektów wywołanych *explicite* analizą ziaren, dyslokacji lub wtrąceń obecnych w cienkim filmie. Typowy rząd grubości warstw omawianych w pracy to 0.5  $\mu\text{m}$  – 2 mm. Jedynie proces pękania segmentacyjnego opisany w Rozdziale 3 dotyczy warstw znacznie cieńszych, o grubości 30 – 660 nm.

Oryginalne aspekty prezentowanej rozprawy to:

- zastosowanie energetycznego modelu pękania segmentacyjnego do opisu zjawisk zachodzących w warstwie tlenku krzemu na podłożu polimerowym;
- wyjaśnienie wpływu naprężeń wstępnych na proces pękania segmentacyjnego w tym przypadku;
- ilościowa analiza procesu rozwoju spękań po grubości warstwy izolacji termicznej;
- wykazanie istotności wielkości kroku obciążenia w analizie metodą elementów skończonych procesu rozwoju dużej liczby nie połączonych ze sobą spękań; sformułowanie wskazówek praktycznych zezwalających na uniknięcie problemów ze zbieżnością obliczeń;
- analiza głównych czynników decydujących o rozwoju stanu naprężenia w warstwach izolacji termicznej i podanie hipotetycznego scenariusza opisującego proces delaminacji tych warstw;
- sformułowanie metody pozwalającej na pół-analityczne oszacowanie procesu dwuwymiarowego poślizgu ciernego warstwy na sztywnym podłożu;
- wyprowadzenie prostych wzorów opisujących kształt strefy zdelaminowanej oraz proces delaminacji sztywnej warstwy ze sztywnego podłoża;
- koncepcyjne sformułowanie zasad działania czujnika piezoelektrycznego pozwalającego na pomiar zespolonych modułów sprężystych wielowarstwowego materiału;
- sformułowanie praktycznych wskazówek służących zwiększeniu efektywności działania zaproponowanego czujnika.

#### Opis segmentacyjnego pękania po grubości warstwy.

Pękanie cienkiej warstwy po jej grubości na skutek rozciągania podłoża to jeden z rodzajów uszkodzeń typowych dla tego typu konstrukcji. Szczególnym przypadkiem są sytuacje, gdy spękania mają kształt prostych, równoległych linii. Eksperymentalne badania pokazują, że ich liczba początkowo wzrasta, aby ostatecznie się ustabilizować i nie zwiększać, mimo rozciągania podłoża. Zjawisko to nazywane jest pękaniem segmentacyjnym, a maksymalna gęstość spękań może służyć do określenia cech mechanicznych warstwy lub powierzchni kontaktowej pomiędzy warstwą a podłożem.

Rozdział 3 przedstawionej monografii zawiera mechaniczny model tego zjawiska. Opiera się on na prostym opisie jednowymiarowym, pozwalającym na uzyskanie analitycznych wyników. Mimo swojej prostoty uwzględnia naprężenia początkowe wynikające, na przykład, ze sposobu produkcji cienkiej warstwy, oraz plastyczny poślizg na granicy warstwa/podłoże, przy założeniu stałej wartości naprężenia stycznego na powierzchni kontaktowej. Bezpośrednią konsekwencją powstałych naprężeń resztkowych jest względny poślizg pomiędzy filmem a podłożem, obserwowany na obydwu krańcach rozważanej próbki. Dodatkowo, model analityczny wskazuje na dwuetapowy proces uplastycznienia się

powierzchni kontaktowej, zachodzący podczas rozciągania podłoża. Na etapie pierwszym długość obszaru uplastycznionego nie zwiększa się i przyjmuje wartość równą wywołanej jedynie naprężeniami wstępnymi. Monotonicznie wzrastające odkształcenie podłoża na tym etapie skutkuje zmianą kierunków poślizgów względnych pomiędzy warstwą a podłożem w obszarach już uplastycznionych. Na etapie drugim uplastycznieniu ulega poprzednio niezniszczony obszar powierzchni kontaktowej. Charakterystyczne dla obydwu etapów jest wytworzenie obszaru wewnątrz cienkiego filmu, w którym występuje naprężenie rozciągające o stałej wartości, tak jak w przypadku rozciąganego pręta. W takiej sytuacji powstanie pęknięć po grubości warstwy silnie zależy od znajdujących się w niej mikrouszkodzeń, wywołujących koncentrację naprężeń. Aby opisać rozwój uszkodzenia i przejście do stanu z ustabilizowaną i nie wzrastającą liczbą spękań, w Rozdziale 3 użyto model energetyczny, bazujący na topologicznej transformacji pomiędzy stanem początkowym, bez spękań, a stanem końcowym, odpowiadającym maksymalnie popękanej warstwie. Warunek przejścia pomiędzy tymi stanami jest warunkiem energetycznym, zakładającym osiągnięcie minimalnej wartości energii potencjalnej układu oraz energii rozproszonej na utworzenie spękań i uplastycznienie powierzchni kontaktowej. Użyte podejście nie uwzględnia śledzenia całego procesu jako funkcji czasu. Pozwala na jednoznaczne określenie gęstości spękań w stanie ustabilizowanym. Pokazano, że przeprowadzona analiza może zostać znacznie uproszczona, gdy warstwa jest znacznie cieńsza od podłoża, przy założeniu podobnych wartości ich modułów sprężystych. W takim wypadku, w warunku energetycznym transformacji można pominąć człony odpowiadające energii podłoża. W literaturze znanych jest wiele podejść, gdzie pękanie segmentacyjne opisane jest w oparciu o kryteria naprężeniowe (na przykład prace Białas i Mroza, 2006(a,b); Hsueha, 2001; Yanaki i współpracowników, 1998, 1999). Model przedstawiony w monografii korzysta z energii powierzchniowej dla cienkiej warstwy, która odgrywa taką samą rolę, jak naprężenie krytyczne w wymienionych pracach. Jednym z kluczowych założeń jest przyjęcie identycznej odległości pomiędzy spękaniami w warstwie. W rzeczywistości sytuacja jest o wiele bardziej skomplikowana. Badania eksperymentalne wykazują rozrzut tej wielkości wokół wartości średniej. Agrawal i Raj (1989) pokazali, że odległość maksymalna powinna różnić się od minimalnej co najwyżej dwa razy. Tych efektów nie można opisać stosując zaproponowane podejście. Wykorzystując je nie da się również uwzględnić procesów związanych z historią procesu, na przykład zależności pomiędzy przyłożoną siłą a ilością spękań. Do ich opisu stosuje się modele oparte o kryterium naprężeniowe, tak jak przedstawili to między innymi Białas i Mróz (2006).

Zaproponowany model energetyczny został sformułowany dla drugiego etapu obciążenia. Możemy więc stwierdzić, że dla spękań zachodzących na tym etapie naprężenia początkowe nie mają żadnego wpływu na ten proces. Podczas tego etapu początkowe obszary uplastycznienia powierzchni kontaktowej są już zastąpione strefami o przeciwnym kierunku poślizgu względnego między warstwą a podłożem i nie mają żadnego wpływu na energetyczny warunek pęknięcia. Zaproponowane podejście wykazuje jednak, że należy uwzględnić naprężenia początkowe adoptując kryterium energetyczne dla spękań zachodzących na pierwszym etapie obciążenia.

### Mechaniczna analiza warstw izolacji termicznej

Warstwy izolacji termicznej (po angielsku *Thermal Barrier Coating*, w skrócie *TBC*) odgrywają ważną rolę ochronną na elementach turbin gazowych, chroniąc znajdujący się pod nimi materiał przed działaniem agresywnego środowiska zewnętrznego. Ich grubość to zazwyczaj około 300  $\mu\text{m}$ , lecz różnica temperatury na grubości warstwy sięga 200°C. Te

doskonałe własności izolacyjne warstwa zawdzięcza swojej porowatej strukturze (Evans i współpracownicy, 2001(a,b)).

Pomiędzy warstwą izolacji termicznej a materiałem podłoża znajduje się dodatkowa warstwa kleju (po angielsku *Bond Coat*, w skrócie *BC*), której głównym zadaniem jest zapewnienie przyczepności izolacji do materiału konstrukcyjnego. W trakcie użytkowania turbiny, pomiędzy warstwą TBC a warstwą BC wytwarza się dodatkowy materiał. Jest to tlenek  $Al_2O_3$ , powstający na skutek utlenienia aluminium, będącego jednym ze składników warstwy BC. Tak więc rozpatrując rozwój naprężeń oraz uszkodzeń w warstwach izolacji termicznej musimy w zasadzie uwzględnić warstwy trzech różnych materiałów: TBC, tlenku  $Al_2O_3$  (*Thermally Grown Oxide, TGO*) oraz BC. Zjawisko przyrostu grubości warstwy TGO oraz efekty reologiczne, które uaktywniają się w wysokich temperaturach, sprawiają, że modelowanie mechaniczne jest tu niezwykle skomplikowane i zadowalające rezultaty jesteśmy w stanie uzyskać w zasadzie jedynie korzystając z metody elementów skończonych. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że wśród warstw TBC wyróżniamy dwa ich rodzaje: warstwy powstałe poprzez fizyczne osadzanie z fazy gazowej (z angielskiego *Physical Vapour Deposition, PVD*) oraz poprzez osadzanie specjalnych proszków roztopionych wcześniej do stanu plazmy (*Air Plasma Sprayed, APS*). Różnią się one strukturą oraz własnościami termiczno-mechanicznymi. Modelowanie przedstawione w Rozdziale 4 monografii dotyczy warstwy APS TBC.

#### *Numeryczne modelowanie pęknięcia warstwy izolacji termicznej w teście zginania.*

Pierwsza część Rozdziału 4 dotyczy pęknięcia warstwy izolacji termicznej po jej grubości w testach zginania. Eksperymenty przedstawione przez Majerusa (2004) służą jako punkt wyjścia do stworzenia modelu numerycznego omawianego zjawiska. Pozwala on na śledzenie procesu w funkcji czasu, bez uwzględnienia zniszczenia powierzchni kontaktowej oraz bez przeskoku od razu do stanu nasyconego, jak ma to miejsce dla modelu energetycznego opisanego w Rozdziale 3. Podejście pokazuje, że malejąca wartość energii krytycznej  $G_I$  powoduje zwiększenie liczby spękań. Z kolei, pęknięcie warstwy po jej grubości prowadzi do zmniejszenia się wartości energii uwalnianej dla spękań delaminacyjnych pomiędzy warstwą a podłożem. Jest to ważny wniosek w przypadku pokryć elementów turbin gazowych, gdzie spękania po grubości są dopuszczalne, natomiast odpadanie warstwy i narażenie elementu turbiny na działanie wysokiej temperatury jest zjawiskiem niepożądanym. Tym samym, przedstawione wyniki mogą służyć do odpowiedniego projektowania pokryć, tak aby wartość  $G_I$  dla spękań po grubości była jak najniższa. W ten sposób chronimy warstwę przed delaminacją kosztem spękań po jej grubości. W tej części monografii pokazano, iż aby w trakcie obliczeń MES uzyskać lokalizację uszkodzeń w postaci dużej liczby spękań po grubości warstwy, należy zwracać uwagę na to, aby krok obciążenia podczas obliczeń był dostatecznie mały. Warunkiem na jego długość jest spełnienie kryterium zniszczenia dla wszystkich elementów kohezyjnych jedynie w jednym punkcie całkowania podczas zadanego kroku obciążenia. Standardowo elementy kohezyjne wykorzystuje się do opisu zjawiska delaminacji na z góry zadanej powierzchni. W takim przypadku kryterium zniszczenia może być spełnione od razu w kilku punktach całkowania bez wpływu na zbieżność obliczeń. W przedstawionym modelu elementów skończonych proces spękania nie jest przypisany do z góry założonej powierzchni. Nieznana jest także liczba spękań. W takiej sytuacji spełnienie warunku zniszczenia tylko w jednym punkcie całkowania podczas kroku obciążenia pozwoliło na uzyskanie wyników zgodnych z uzyskanymi eksperymentalnie, zarówno co do liczby spękań oraz ich lokalizacji.

*Modelowanie stanu naprężenia oraz procesu delaminacji w warstwach izolacji termicznej.*

Kluczowym dla warstw izolacji termicznej jest problem ich delaminacji oraz odrywania od podłoża. Temu zagadnieniu poświęcona jest druga część Rozdziału 4 monografii. Mechaniczne modelowanie polega na rozpatrzeniu pewnego elementu reprezentatywnego zawierającego warstwy TBC, BC oraz TGO ze znajdującym się pod nimi materiałem podłoża. Rozmiary elementu reprezentatywnego są tak dobrane, aby zawierał on nierówność na granicy wymienionych materiałów, która powstaje na skutek procesu produkcji pokryć APS TBC. Nierówność ta wywołuje koncentracje naprężeń i w rezultacie sprzyja rozwojowi mikropęknięć. Ich kolejne łączenie powoduje powstanie makrorysy i delaminację izolacji. Tak więc analiza reprezentatywnego elementu pozwala na ocenę zachowania się całego pokrycia przy założeniu, że zjawiska jakie w nim zachodzą uogólnimy dla całej warstwy.

Pierwszym krokiem w analizie numerycznej było stworzenie odpowiedniego modelu elementów skończonych, który uwzględnia zjawiska relaksacji oraz utleniania w wysokich temperaturach. Obliczenia wykonane z jego pomocą pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- dla obciążeń termicznych efekty lepkie w materiale CMSX-4 z którego wykonuje się łopatki mogą zostać pominięte, ponieważ nie mają one żadnego wpływu na koncentracje naprężeń w miejscach wokół nierówności;
- mikropęknięcia wokół nierówności mogą formować się głównie podczas chłodzenia łopatki;
- przy założeniu, że modelowane materiały zachowują się w sposób sprężysto-lepki, efekt obciążeń cyklicznych jest pomijalny; nie prowadzi do dużych różnic w stanie naprężenia w porównaniu z obciążeniami monotonicznymi;
- rozwój spękania na powierzchni pomiędzy warstwami TGO oraz BC wywołuje powstanie strefy rozciąganej wewnątrz TBC;
- gdy grubość warstwy tlenku przekracza pewną krytyczną wartość pojawia się w nim naprężenie rozciągające.

Na podstawie wymienionych spostrzeżeń możemy sformułować następującą hipotezę opisującą proces delaminacji izolacji termicznej. Podczas chłodzenia łopatki powstają mikropęknięcia na granicy warstw TGO oraz BC. Ich obecność ma istotny wpływ na stan naprężenia wewnątrz warstwy TBC, wywołując w niej powstanie naprężeń rozciągających oraz mikrospękań. Przyrost grubości warstwy tlenku na skutek utleniania aluminium w wysokich temperaturach, zwiększa obszar działania naprężeń rozciągających w TBC i sprzyja przyrostowi długości mikrospękań w tym materiale. Gdy grubość warstwy tlenku przekracza krytyczną wartość, także w nim pojawia się strefa rozciągana i mikropęknięcia powstałe wewnątrz TBC mogą powiększyć się, penetrując warstwę TGO. Łączenie się tak powstałych uszkodzeń generowanych przez pojedyncze nierówności, powoduje powstanie makrorysy i odpadnięcie izolacji.

Sformułowana hipoteza nie odbiega zasadniczo od scenariusza zaproponowanego przez Changa i współpracowników (1987) oraz Freborga i współpracowników (1998). Dodatkowo, zwraca uwagę na istotny proces przyrostu grubości warstwy tlenku, jak gdyby katalizujący rozwój makrouszkodzenia.

Poślizg cierny

Problemowi poślizgu ciernego pomiędzy warstwą a podłożem poświęcony jest Rozdział 5 monografii. Zjawisko to należy traktować jako efekt delaminacji warstwy od podłoża, a sama analiza próbuje odejść od jednowymiarowych modeli paska znanych w literaturze (Białas i Mróz, 2006(a,b); Schreyer i Peffer, 2000; Timm i współpracownicy, 2003) w kierunku zagadnienia dwuwymiarowego. W ten sposób możliwe jest uwzględnienie zjawisk nie opisanych przez podejście jednowymiarowe: dokładnego opisu kształtu strefy zdelaminowanej, wpływu współczynnika Poissona na sam proces. Założenie, że materiał sprężystej warstwy ślizga się w sposób cierny po sztywnym podłożu, pozwoliło na uzyskanie przybliżonych rozwiązań pół-analitycznych. W szczególnym przypadku delaminacji sztywnego filmu na sztywnym podłożu otrzymujemy rozwiązanie ścisłe, które dodatkowo opisane jest w sposób analityczny. W kontekście przyjętych przybliżeń można stwierdzić, że proces poślizgu opisany jest poprzez rozwiązanie fundamentalne dla sprężystej, nieskończonej tarczy obciążonej siłą skupioną działającą w jej płaszczyźnie. To właśnie rozwiązanie pozwala na określenie rozkładu naprężeń ciernych na powierzchni kontaktowej pomiędzy warstwą a podłożem. Dodatkowo, na jego podstawie, wyznaczamy kształt strefy zdelaminowanej. Odpowiada on obszarowi w rozwiązaniu fundamentalnym, gdzie jedna ze składowych wektorów przemieszczeń tarczy pokrywa się z kierunkiem działania siły skupionej.

Zaproponowany sposób rozumowania może zostać wykorzystany w celu uzyskania oszacowań dla podobnych zagadnień poślizgu. Wymienić można tutaj półprzestrzeń sprężystą spoczywającą w sposób cierny na sztywnym podłożu i obciążoną na swoim brzegu siłą skupioną  $P$ , działającą w jej płaszczyźnie. Algorytm postępowania jest następujący:

- uzyskaj rozwiązanie dla zagadnienia podstawowego, w którym obciążenie pochodzi jedynie od siły skupionej;
- przybliż rozkład naprężeń stycznych na powierzchni kontaktowej wykorzystując pole przemieszczeń pochodzące z rozwiązania zagadnienia podstawowego;
- warunek  $\delta P=0$  pozwala na określenie obszaru zdelaminowanego;
- skorzystaj z zasady superpozycji, aby otrzymać poszukiwane pole naprężeń.

Założenie, że naprężenie styczne na powierzchni kontaktowej ma wartość stałą  $\tau^f$  jest dość restrykcyjne. Bardziej realistyczne jest przyjęcie, że osiąga ono najpierw wartość maksymalną  $\tau^{\text{peak}}$  a następnie maleje do  $\tau^f$ . Taka analiza została przeprowadzona przez Palmera i Rice'a (1973), którzy rozpatrywali poślizg w zagęszczonych gruntach. Sytuacja rozważana w Rozdziale 5 opisana jest jednak poprzez płaski stan naprężenia, który dyktuje zakres stosowalności rozwiązania. Jest ono słuszne, gdy charakterystyczna długość strefy poślizgu jest znacznie większa od grubości warstwy. W tym przypadku wartość naprężenia stycznego na powierzchni kontaktowej jest większa niż  $\tau^f$  jedynie w pobliżu brzegu tej strefy i z dobrym przybliżeniem można przyjąć, że w większości tego obszaru osiąga wartość rezydualną  $\tau^f$ .

#### Charakterystyka cech mechanicznych cienkich warstw

W Rozdziale 6 monografii sformułowane zostały teoretyczne podstawy działania czujnika piezoelektrycznego, służącego określaniu parametrów lepko-sprężystych cienkich warstw. W swoim założeniu ma on służyć do charakterystyki mechanicznej wielowarstwowego układu skóry ludzkiej. Koncepcja opiera się na stosowanej w geotektonice analizie fal powierzchniowych (po angielsku *multi-channel analysis of surface waves*, Park i współpracownicy, 1999, 2007), która pozwala na badanie profili geologicznych. Zaproponowany czujnik składa się z szeregu równoległych, bardzo cienkich pasków wykonanych z piezoelektryku PVDF, przyczepianych do naskórka. Drgająca skóra wywołuje



odkształcenia sensora, które z kolei generują ładunki elektryczne. Ich wartości, zmierzone dla każdego z pasków PVDF, niosą w sobie informację o charakterze fal powierzchniowych rozchodzących się w warstwach skóry. Wykonanie analizy odwrotnej pozwala na obliczenie zespolonych modułów sprężystych dla każdej z warstw tworzących skórę. W Rozdziale 6 zaprezentowano efektywność działania teoretycznego modelu sensora, ze zwróceniem uwagi na wpływ błędów pomiarowych. Wykazano, że dla jakości obliczeń kluczowa jest liczba częstotliwości drgań, z jaką pobudza się tkankę podczas eksperymentu, a nie liczba pasków PVDF, tworzących czujnik.

Należy wymienić dwa istotne aspekty zastosowania zaproponowanego czujnika. Po pierwsze, zezwala on na bezinwazyjne i tanie, w porównaniu do innych metod, określenie lepko-sprężystych parametrów skóry. Po drugie, w trakcie analizy jesteśmy w stanie rozróżnić pomiędzy wieloma warstwami, z których zbudowana jest skóra. Szczególnie cenne wydaje się potencjalne zastosowanie czujnika do diagnostyki komórek nowotworowych.

### Literatura

Agrawal D., Raj R., (1989): Measurement of the ultimate shear strength of a metal/ceramic interface. *Acta Metallurgica*, 37(4):1265–1270.

Białas M., Guzina B. B., (2011): On the viscoelastic characterization of thin tissues via surface-wave sensing. *International Journal of Solids and Structures*, 48(14-15):2209–2217.

Białas M., Mróz Z., (2006): Crack patterns in thin layers under temperature loading. Part I: Monotonic loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 73(7):917–938.

Białas M., Mróz Z., (2006): Crack patterns in thin layers under temperature loading. Part II: Cyclic loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 73(7):939–952.

Chang G. C., Phucharoen W., Miller R. A., (1987): Behavior of thermal barrier coatings for advanced gas turbine blades. *Surface and Coatings Technology*, 30(1):13–28.

Cottone A., Giambanco G., (2009): Minimum bond length and size effects in FRP-substrate bonded joints. *Engineering Fracture Mechanics*, 76(13):1957–1976.

Evans A. G., He M. Y., Hutchinson J. W., (2001): Mechanics-based scaling laws for the durability of thermal barrier coatings. *Progress in Materials Science*, 46(3-4):249–271.

Evans A. G., Mumm D. R., Hutchinson J. W., Meier G. H., Petit F. S., (2001): Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings. *Progress in Materials Science*, 46(5):505–553.

Freborg A. M., Ferguson B., Brindley W., Petrus G., (1998): Modeling oxidation induced stresses in thermal barrier coatings. *Materials Science and Engineering: A*, 245(2):182–190.

Freund L. B., Suresh S., (2003): *Thin film materials: stress, defect formation, and surface evolution*. Cambridge University Press.

Hsueh C.-H., (2001): Analyses of multiple film cracking in film/substrate systems. *Journal of the American Ceramic Society*, 84(12):2955–2961.

- Ivanov I. V., (2006): Analysis, modelling, and optimization of laminated glasses as plane beam. *International Journal of Solids and Structures*, 43(22-23):6887–6907.
- Lu T. J., Evans A. G., Hutchinson, J. W., (1998): The effects of material properties on heat dissipation in high power electronics. *Journal of Electronic Packaging*, 120(3):280–289.
- P. Majerus, (2004): *Neue Verfahren zur Analyse des Verformungs- und Schädigungsverhaltens von MCrAlY-Schichten im Wärmedämmschichtsystem, Schriften des Forschungszentrum Jülich, tom 34 Reihe Energietechnik*. Forschungszentrum Jülich, Germany.
- Muralidhar S., Jagota A., Dennison S. J., Saigal S., (2000): Mechanical behaviour in tension of cracked glass bridged by an elastomeric ligament. *Acta Materialia*, 48(18-19):4577–4588.
- Palmer A. C., Rice J. R., (1973): The growth of slip surfaces in the progressive failure of over-consolidated clay. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 332(1591):527–548.
- Park C. B., Miller R. D., Xia J., (1999): Multichannel analysis of surface waves (MASW). *Geophysics*, 64(3):800–808.
- Park C. B., Miller R. D., Xia J., Ivanov J., (2007): Multichannel analysis of surfach waves (MASW)—active and passive methods. *The Leading Edge*, 26(1):60–64.
- Pindera M.-J., Aboudi J., Arnold S. M., (2000): The effect of interface roughness and oxide film thickness on the inelastic response of thermal barrier coatings to thermal cycling. *Materials Science and Engineering: A*, 284(1-2):158–175.
- Pindera M.-J., Aboudi J., Arnold S. M., (2002): Analysis of spallation mechanizm in thermal barrier coatings with graded bond coats using the higher-order theory for FGMs. *Engineering Fracture Mechanics*, 69(14-16):1587–1606.
- Schreyer H. L. , Peffer A., (2000): Fiber pullout based on a one-dimensional model of decohesion. *Mechanics of Materials*, 32(12):821–836.
- Timm D. H., Guzina B. B., Voller V. R., (2003): Prediction of thermal crack spacing. *International Journal of Solids and Structures*, 40(1):125–142.
- Wagner S., Lacour S. P., Jones J., Hsu P.-H. I., Sturm J. C., Li T., Suo Z., (2004): Electronic skin: architecture and components. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 25(2-3):326–334.
- Yanaka M., Kato Y., Tsukahara Y., Takeda N., (1999): Effects of temperature on the multiple cracking progress of sub-micron thick glass films deposited on a polimer substrate. *Thin Solid Films*, 355-356:337–342.
- Yanaka M., Miyamoto T., Tsukahara Y., Takeda N., (1998): In situ observation and analysis of multiple cracking phenomena in thin glass layers deposited on polimer films. *Composite Interfaces*, 6(5):409–424.

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych.

### Zainteresowania naukowe.

Obszarem moich zainteresowań naukowych są aspekty mechaniki pękania związane z rozwojem uszkodzeń na granicy różnych materiałów. Ten dział mechaniki był intensywnie rozwijany w ramach liniowej teorii sprężystości pod koniec lat 80-tych ubiegłego stulecia między innymi przez Evansa, Hutchinsona i Rice'a. Podsumowanie osiągnięć i zestawienie najważniejszych wyników uzyskanych w tamtym okresie można znaleźć w pracy Hutchinsona i Suo (1992). Duże możliwości do opisu zniszczenia na granicy materiałów dają modele kohezyjne pękania, które pojawiają się po raz pierwszy w pracach Barenblatt (1962) i Dugdale'a (1960). W ogólności można rozumieć je jako wprowadzenie do rozważanego układu mechanicznego dodatkowego obszaru (w szczególności nieskończenie cienkiego), dla którego postuluje się prawo konstytutywne łączące wektor naprężenia na danej płaszczyźnie ze względnym przemieszczeniem wzdłuż tej płaszczyzny. Takie podejście ma oczywiste zalety, w porównaniu z opartym jedynie na liniowej teorii sprężystości:

- eliminuje nierzeczywiste osobliwości i oscylacje w stanie naprężenia (charakterystyczne dla rozwiązania liniowej teorii sprężystości);
- pozwala na opis rozwoju uszkodzenia, a nie tylko naprężenia materiału;
- strefy kohezyjne dają możliwość opisu zjawisk wykraczających poza ograniczenia teorii sprężystości, np. rozwoju mikro uszkodzeń lub odkształceń plastycznych w obszarze uszkodzonym.

Tematyce modeli konstytutywnych dla warstw kontaktowych poświęcona była moja praca doktorska, a kierunki badań prowadzonych w tamtym okresie w naturalny sposób rzutowały na dalszą ścieżkę naukową. W doktoracie przedstawiłem model opisujący rozwój uszkodzenia w strefie kohezyjnej w oparciu o formalizm stosowany w teorii plastyczności. W odniesieniu do połączenia poddanego naprężeniom ściskającym przyjąłem powierzchnię zniszczenia opartą o prawo tarcia Coulomba, natomiast naprężeniom rozciągającym odpowiadała powierzchnia o kształcie elipsy. W celu wyeliminowania zjawiska dylatacji, to jest przyrostu wysokości połączenia na skutek oddziaływań ścinających, zastosowałem niestowarzyszone prawo płynięcia. Rozwój uszkodzenia w obszarze połączenia w zaproponowanym sformułowaniu polega na izotropowej ewolucji powierzchni zniszczenia, natomiast charakter osłabienia materiału opisany jest trzema rodzajami funkcji: nieciągłą, malejącą liniowo oraz malejącą w sposób wykładniczy.

W swojej pracy badawczej staram się opisać zachowanie się różnych konstrukcji lub układów mechanicznych pod wpływem rozwijającego się w nich uszkodzenia. Uzyskane wyniki rozważań teoretycznych i aplikacyjnych mają za główne cele:

- lepsze zrozumienie i matematyczny opis złożonych zjawisk towarzyszących rozwojowi spękania w materiale (np. wpływ naprężeń ciernych, wpływ obciążeń cyklicznych); wymienić należy tu prace Mroza i Białasa (2005) lub Białasa i Mroza (2006a);
- dostarczenie rozwiązań analitycznych dla zagadnień rozwoju zniszczenia; stanowią one wyniki porównawcze dla bardziej złożonych problemów analizowanych, na przykład, metodą elementów skończonych; za takie uważam rozważania zaprezentowane w pracy Białasa i Mroza (2005);
- w zakresie aplikacyjnym mogą wpływać z nich praktyczne zalecenia dla inżyniera projektanta; takie zalecenia znajdują się na przykład w pracy Białasa i Mroza,

2006(b), gdzie podano wytyczne dla prawidłowego rozmieszczenia linii dylatacyjnych w popękanyim paśmie betonowym.

Prosty model zjawiska antypłaskiego ścinania bloku skalnego jest tematem pracy Mroza i Białasa (2005) oraz Białasa i Mroza (2005). Pozwala on na analityczne badanie ścieżek równowagi odpowiadających monotonicznemu rozwojowi uszkodzenia na powierzchni kontaktowej. Otrzymane rezultaty mają dużą wartość dla sprawdzenia procedur numerycznych, których celem jest poszukiwaniu ścieżek równowagi w zjawiskach utraty przez konstrukcję stabilności, rozumianej jako zejście z quasi-statycznej ścieżki równowagi. Są to między innymi zjawiska określane po angielsku jako *snap-through* lub *snap-back*. Dodatkowo, na podstawie zagadnienia anty-płaskiego ścinania płyty, analizowałem wpływ obciążeń cyklicznych na rozwój obszarów uszkodzonych na powierzchni kontaktowej. Okazuje się, że możliwe jest przystosowanie się konstrukcji do obciążeń cyklicznych, w czym decydujące znaczenie odgrywają siły tarcia.

Zjawiska zniszczenia na powierzchniach kontaktowych w naturalny sposób znajdujemy w szerokiej tematyce zagadnień związanych z cienkimi warstwami. W mojej pracy badawczej interesują mnie dwa ważne aspekty: odspajanie warstw od podłoża oraz problem pękania po grubości warstwy. Aparat matematyczny wykorzystywany w opisie stref kohezyjnych można z powodzeniem stosować do opisu delaminacji cienkiej warstwy, natomiast zjawisko pękania po grubości daje się przedstawić poprzez zastosowanie kryterium naprężeniowego (Białas i Mróz, 2006(a,b)) lub energetycznego (Białas i Mróz, 2007). Zaproponowane modele cechują się zadowalającą zgodnością przewidywanej liczby rys w pokryciu w porównaniu z maksymalną gęstością spękań poprzecznych warstwy, obserwowaną podczas zjawiska pękania segmentacyjnego. Zjawisko to polega na ustabilizowaniu się liczby spękań warstwy, wywołanych rozciąganiem podłoża do którego jest ona przymocowana. Pomimo dalszego wydłużania podłoża liczba spękań w warstwie od pewnego momentu już nie przyrasta. Zaproponowane modele zostały zweryfikowane poprzez zastosowanie do opisu spękań betonowego pasma płytowego oraz cienkiej warstwy tlenku krzemu.

Wymienione powyżej modele zjawisk delaminacji i pękania poprzecznego warstwy opierają się na jednowymiarowym sformułowaniu sprężystego paska oddziałującego z podłożem. Oczywiście zaletą takiego podejścia jest jego prostota, która pozwala na uzyskanie analitycznych lub pół-analitycznych rozwiązań. Z drugiej strony jednak, nie uwzględnia ono całej gamy efektów obserwowanych dla rzeczywistej warstwy, np. takich jak kształt obszaru odspojonego lub odkształcenia wywołane przez niezerową wartość współczynnika Poissona. Próba wyjścia poza model paska zawarta jest w pracy Białasa (Journal of Elasticity, praca przyjęta do publikacji), dotyczącej poślizgu ciernego warstwy traktowanej jako dwuwymiarowa tarcza. Poślizg cierny można w zaproponowanym sformułowaniu traktować jako ostatnie stadium delaminacji lub też przyjąć, że przedstawione rozważania dotyczą poślizgu na skutek uplastycznienia strefy połączenia warstwy z podłożem. Rozważania przedstawione przez Białasa (Journal of Elasticity, praca przyjęta do publikacji) są jednymi z nielicznych w literaturze, gdzie podjęto próbę analitycznego opisu zjawiska delaminacji dla układu dwuwymiarowego. W tym kontekście uzyskane proste wzory opisujące kształt strefy zniszczonej zasługują na uwagę.

Modelowanie warstw izolacji termicznej (po angielsku *Thermal Barrier Coating*, w skrócie *TBC*) to kolejny obszar mojej działalności naukowej. Ma on duże zastosowanie praktyczne, ponieważ ze względów aplikacyjnych potrzebne jest opracowanie odpowiednich wytycznych, pozwalających na przewidywanie czasu użytkowania pokryć izolacji termicznych w

stacjonarnych turbinach gazowych. Aby osiągnąć ten cel, należy jednak najpierw poznać sam mechanizm zniszczenia. Ze względu na skomplikowany charakter zjawisk mu towarzyszących, aż do tej pory nie powstał powszechnie akceptowany i opisujący wszystkie aspekty opis procesu zniszczenia. Na złożoność zjawisk towarzyszących zniszczeniu składają się procesy relaksacyjne w materiałach pokrycia aktywujące się w wysokich temperaturach, zjawisko utleniania aluminium i powstawanie dodatkowej warstwy tlenku w układzie, silna niejednorodność warstwy TBC, charakteryzującej się dużą porowatością. Ogólnie punktem wyjścia do modelowania rozważanych zagadnień jest modelownie wieloskalowe, w którym przyjmuje się komórkę reprezentatywną zawierającą w sobie pojedynczą nierówność, generującą koncentrację naprężeń w pobliżu połączenia izolacji z podłożem. Te zwiększone naprężenia prowadzą w rezultacie do powstania mikro uszkodzeń, które łączą się ze sobą formując makroskopową rysę. Symulacje numeryczne zjawisk zniszczenia w warstwach izolacji termicznej przedstawiłem w serii prac (Białas i współpracownicy, 2005; Białas i współpracownicy, 2006; Białas, 2008; Beck i współpracownicy, 2010) oraz sformułowałem hipotezę scenariusza rozwoju uszkodzenia w pokryciu zgodną z obserwowalnymi eksperymentalnie typami uszkodzenia warstwy.

W polu moich zainteresowań naukowych znajduje się też diagnostyka cech mechanicznych warstw skóry z wykorzystaniem rozchodzących się w nich fal harmonicznym. Przy potwierdzonym eksperymentalnie założeniu, że mechaniczne zachowanie się skóry można opisać modelami lepko-sprężystymi, skonstruowałem teoretyczne podstawy funkcjonowania czujnika piezoelektrycznego pozwalającego na drodze analizy odwrotnej na rekonstrukcję modułów zespolonych lepko-sprężystego medium. Mimo że czujnik w swoim zamyśle ma być używany do diagnostyki komórek nowotworowych naskórka, to zasadę jego działania można też wykorzystać do identyfikacji uszkodzeń w betonie.

Mimo, że nie jest to głównym celem moich badań naukowych, interesuję się też metodą elementów skończonych, a głównie tymi jej aspektami, które dotyczą modelowania rozwoju uszkodzeń w materiałach. W tym miejscu chciałbym nadmienić, że jeszcze jako doktorant w roku 1999 miałem okazję odbyć kilkumiesięczny staż w firmie Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc. w USA (obecnie Simulia), rozwijającej jeden z bardziej popularnych pakietów do obliczeń metodą elementów skończonych, ABAQUS. W swojej pracy naukowej (Białas i Mróz, 2005) przedstawiłem dwuwymiarowy element skończony pozwalający na opis zjawiska delaminacji i poślizgu ciernego. W pracy Białas i współpracowników (2005) analizowałem metodą elementów skończonych proces pęknięcia po grubości warstwy TBC, która to analiza także wymagała skonstruowania odpowiedniego rodzaju elementu skończonego. Dodatkowo, w pracy tej wykazałem przyczynę problemów numerycznych towarzyszących quasi-statycznej symulacji testu trójpunktowego zginania i podałem sposób pozwalający na ich ominięcie: kontrolowanie długości kroku obciążenia, tak aby dla zadanego kroku rozwój uszkodzenia zachodził jedynie w jednym punkcie całkowania dla wszystkich elementów kohezyjnych w konstrukcji.

Barenblatt G., (1962): *The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture*, volumen 7 *Advances in Applied Mechanics*. Academic Press, New York.

Beck T., Białas M., Bednarz P., Singheiser L., Bobzin K., Bagcivan N., Parkot D., Kaszko T., Petković J., Hallstedt B., Nemna S., Schneider J. M., (2010): Modeling of Coating Process, Phase Changes, and Damage of Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings on Ni-Base Superalloys. *Advanced Engineering Materials*, 12(3): 110-126.

Białas M., (2008): Finite element analysis of stress distribution in thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 202(24):6002–6010.

Białas M.: Progressive frictional delamination of an infinite elastic film on a rigid substrate due to in-plane point loading. *Journal of Elasticity*, Accepted. DOI: 10.1007/s10659-011-9360-3.

Białas M., Bednarz P., Herzog R., (2006): Numerical simulation of TBC delamination under thermal cyclic loading, w: J. Lecomte-Beckers, M. Carton, F. Schubert, P.J. Ennis (redaktorzy) *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Liège Conference: Materials for Advanced Power Engineering*, Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energietechnik/Energy Technology, Wolumen 53, część II, strony 747-756, ISBN 3-89336-436-6.

Białas M., Majerus P., Herzog R., Mróz Z., (2005): Numerical simulation of segmentation cracking in thermal barrier coatings by means of cohesive zone elements. *Materials Science and Engineering: A*, 412(1-2):241–251

Białas M., Mróz Z., (2005): Modelling of progressive interface failure under combined normal compression and shear stress. *International Journal of Solids and Structures*, 42(15):4436–4467.

Białas M., Mróz Z., (2006): Crack patterns in thin layers under temperature loading. Part I: Monotonic loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 73(7):917–938.

Białas M., Mróz Z., (2006): Crack patterns in thin layers under temperature loading. Part II: Cyclic loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 73(7):939–952.

Białas M., Mróz Z., (2007): An energy model of segmentation cracking of thin films. *Mechanics of Materials*, 39(9):845–864.

Dudale D. S., (1960): Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8(2):100–104.

Hutchinson J. W., Suo Z., (1991): Mixed mode cracking in layered materials. wolumen 29 *Advances in Applied Mechanics*, strony 63–191. Elsevier.

Mróz Z., Białas M., (2005): A simplified analysis of interface failure under compressive normal stress and monotonic or cyclic shear loading. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 29(4):337–368.

### Projekty

Jako główny wykonawca (3 projekty) lub podwykonawca (6 projektów) byłem lub wciąż jestem uczestnikiem następujących projektów badawczych:

- projekt KBN o numerze 8T07A00721, grant promotorski, główny wykonawca;
- projekt KBN o numerze T07A 022 20;
- projekt KBN o numerze 3 T08C 021 29;
- indywidualne stypendium Marie Curie Intra-European Fellowship, MEIF-CT-2003-501636 (TBC MODELLING), finansowane przez Komisję Europejską; w ramach

stypendium prowadziłem badania w Centrum Badawczym Jülich (Niemcy) w latach 2004-2006, główny wykonawca;

- indywidualne stypendium Marie Curie European Reintegration Grant, MERG-CT-2006-036548 (TBC FAILURE) finansowane przez Komisję Europejską; projekt poświęcony symulacji rozwoju naprężeń w warstwach TBC, główny wykonawca;
- projekt Transferbereich 63 „Applied modeling tools“ finansowany przez Niemiecką Fundację na Rzecz Nauki (German Research Foundation); moje badania dotyczyły modelowania rozwoju uszkodzeń w warstwach TBC;
- projekt poświęcony określaniu modułów lepko-sprężystych skóry finansowany przez amerykańską National Science Foundation; numer projektu CMMI-0726884;
- projekt „Micro and Nanocrystalline Functionally Graded Materiale for Transport Applications” (MATRANS) finansowany przez Komisję Europejską (projekt w realizacji);
- projekt „Kompozyty i nanokompozyty ceramiczno-metalowe dla przemysłu lotniczego i samochodowego” (KomCerMet) finansowany w ramach funduszy strukturalnych (projekt w realizacji).

### Pozostałe

Wyniki swoich prac prezentowałem na dziewięciu konferencjach międzynarodowych:

- Solid Mechanics Conference (SOLMECH 2000), Zakopane, Polska, 2000;
- Solid Mechanics Conference (SOLMECH 2002), Zakopane, Polska, 2002;
- 5<sup>th</sup> EUROMECH Solid Mechanics Conference, Thessaloniki, Grecja, 2003;
- IUTAM Symposium on Multiscale Modelling of Damage and Fracture Processes in Composite Materials, Kazimierz Dolny, Polska, 2005, (udział w wyniku zaproszenia organizatorów);
- 15<sup>th</sup> International Workshop on Computational Mechanics of Materials, Düsseldorf, Niemcy, 2005;
- 16<sup>th</sup> International Workshop on Computational Mechanics of Materials, Lublin, Polska, 2006;
- 8<sup>th</sup> Liège Conference: Materials for Advanced Power Engineering, Liège, Belgia, 2006;
- 31<sup>st</sup> International Conference on Advanced Ceramics and Composites, Daytona Beach, Floryda, USA, 2007;
- New Congress: Materials Science and Engineering, Nürnberg, Niemcy, 2008.

Liczba cytowań publikacji moich lub mojego współautorstwa podawana przez bazę ISI Web of Knowledge w dniu 06.06.2012 wynosiła 51. Indeks Hirscha miał wartość 4. Wszystkie czasopisma w których publikowałem po otrzymaniu doktoratu znajdują się na Liście Filadelfijskiej. Średni Impact Factor dla nich wynosi 1.67 (stan na rok 2012).

Jestem recenzentem artykułów publikowanych w następujących czasopismach: *Materials Science and Engineering A*, *Engineering Fracture Mechanics*, *Surface & Coatings Technology*, *An International Journal of Mechanics Based Design of Structures and Machines*, *Archives of Mechanics*, *Journal of Engineering Mechanics ASCE*.