


AUTOREFERAT

Opis osiągnięć naukowych będących podstawą do ubiegania się o tytuł doktora habilitowanego zgodnie 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.

**Dr inż. Jan Turant
Katedra Mechaniki i Informatyki Technicznej
Wydział Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów
Politechnika Łódzka**

Łódź, 2017

Podpis habilitanta


1. Imię i nazwisko: Jan Turant

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe:

- Dyplom magistra inżyniera mechanika, specjalność Dynamika i Automatyka Maszyn, wydany przez Wydział Mechaniczny Politechniki Łódzkiej, 12.10.1990r.
- Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskany na Wydziale Włókienniczym Politechniki Łódzkiej, Łódź 29.11.1999r.

Temat pracy: Wrażliwość i optymalne projektowanie konstrukcji z dyskretnymi włóknami i przekładkami.

Promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Dęms

Recenzenci: dr hab. inż. Waldemar Kobza – prof. nadzw. PŁ,
prof. dr hab. inż. Tadeusz Burczyński

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

06.12.1990r.-30.09.1999r.	asystent w Zakładzie Mechaniki Technicznej Instytutu Maszyn i Urządzeń Włókienniczych Politechniki Łódzkiej
01.10.1999r.-31.12.1999r.	specjalista w Katedrze Mechaniki Technicznej
01.10.2001r.-30.09.2016r.	adiunkt w Katedrze Inżynierskich Zastosowań Informatyki Wyższej Szkoły Informatyki i Umiejętności
01.01.2000r. do chwili obecnej	adiunkt w Katedrze Mechaniki i Informatyki Technicznej Politechniki Łódzkiej

4. Charakterystyka naukowa habilitanta

4.1 Praca naukowa przed doktoratem

Prace badawcze z tego okresu poświęcone były analizie wrażliwości konstrukcji z nieciągłościami statycznymi i kinematycznymi. Badania obejmowały analizę wrażliwości metodą bezpośrednią i układów sprzężonych dla konstrukcji belkowych, tarczowych i płytowych. Analiza wrażliwości była wykorzystywana dla optymalnego projektowania konstrukcji tego typu. Analizę zachowania badanej konstrukcji wykonywałem przy użyciu metody elementów skończonych zaimplementowanej w autorskich programach. Zwieńczeniem tych prac był doktorat wyróżniony przez Radę Wydziału Włókienniczego Politechniki Łódzkiej.

4.2 Praca naukowa po doktoracie

Ten okres pracy w dużej mierze bazował na doświadczeniach i wiedzy zdobytej przed doktoratem. W okresie tym zajmowałem się optymalizacją i identyfikacją własności konstrukcji ze względu na ich materiałowe i konstrukcyjne parametry mechaniczne i termiczne. W trakcie tych prac rozwijana była biblioteka autorskich procedur optymalizacyjnych i metody elementów skończonych. W szczególności prace moje były poświęcone identyfikacji uszkodzeń konstrukcji, wykorzystując ich własności termiczne i dynamiczne, w ramach których analizowałem istnienie niejednorodności w ich obszarach. Identyfikacje niejednorodności bazowały na porównywaniu zachowania się konstrukcji rzeczywistej i modelowej i minimalizowaniu miar ich zachowań w celu ustalenia parametrów niejednorodności. Zachowanie termiczne konstrukcji określane było przez znajomość

Podpis habilitanta



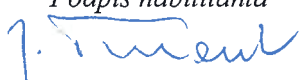
rozkładów temperatur na wybranych częściach konstrukcji a dynamiczne zachowanie przez znajomość częstości i postaci drgań własnych.

Ciekawym epizodem naukowym były badania mające na celu wskazania możliwości sterowania rozplywem ciepła w wałach kalandrow. W ramach tych prac przeprowadziłem badania symulacyjne różnych rozwiązań konstrukcyjnych wału mające na celu wyrównanie temperatury powierzchni roboczej i zmniejszenie temperatury czopów łożyskowych. Stosując techniki optymalizacji jedno i wielokryterialnej jako projektowane parametry wału wybierałem rozkład mocy grzałek wzdłuż powierzchni roboczej wału oraz topologiczne i materiałowe własności elementów wału umieszczanych pomiędzy grzałkami i płaszczem wału.

Innym nurtem mojej pracy badawczej było optymalne sterowanie własnościami mechanicznymi i termicznymi konstrukcji wykonanych z kompozytów włóknistych. W ramach prac wykazywałem istotność kształtu linii włókien wypełniających na mechaniczne i termiczne własności elementów konstrukcyjnych. Prace te związane były z optymalizacją kształtu linii włókien w celu osiągnięcia założonych termicznych bądź mechanicznych własności elementów konstrukcyjnych.

Zadania identyfikacyjne i optymalizacyjne wykonywane były z wykorzystaniem technik deterministycznych, stochastycznych i hybrydowych. Na szczególne wyróżnienie zasługują tutaj algorytmy ewolucyjne, które w rozpatrywanych problemach okazały się prostym i efektywnym narzędziem rozwiązywania postawionych problemów optymalizacyjnych bez ograniczeń lub z ograniczeniami, w których metoda prostego odrzucania rozwiązań niedopuszczalnych była skuteczną metodą realizacji ograniczeń.

Podstawą badania i sterowania własnościami termicznymi był model komórki kompozytu włóknistego, który pozwala uwzględnić kształt przekroju poprzecznego włókna. W ramach tych prac przebadano wpływ kształtu przekroju poprzecznego włókien na zastępcze współczynniki przewodzenia ciepła kompozytów włóknistych, wpływ gęstości rozłożenia włókien w przekroju poprzecznym kompozytu (włókniste kompozyty gradientowe) na te same współczynniki oraz wpływ kształtu linii włókien wypełniających na własności kompozytów włóknistych. Ten obszar badań wskazuję jako mój wkład w rozwój wiedzy dotyczącej włóknistych materiałów kompozytowych i przedstawię szerzej w niniejszym autoreferacie.

Podpis habilitanta


5. Wskazanie osiągnięcia naukowego, uzyskanego po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiącego znaczny wkład w rozwój dyscypliny Włókiennictwo zgodnie 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.

Jako osiągnięcie naukowe wynikające z Ustawy z dnia 18 marca 2011 r. o zmianie ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym, ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz o zmianie niektórych innych ustaw, art. 16.1 punkt. 2.1 przedkładałam jednotematyczny cykl publikacji.

5.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

„Estymacja i sterowanie termicznymi własnościami włóknistych materiałów kompozytowych”

5.2 Wykaz prac naukowych stanowiących podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego - cykl jednotematycznych publikacji

1. Dems K., Radaszewska E., Turant J.: Modeling of fiber reinforced composite material subjected to thermal load, Journal of Thermal Stresses, 35, pp. 579-595, 2012, DOI: 10.1080/01495739.2012.674786
(IF:0,734; punktacja MNiSW:20)
Mój wkład to: weryfikacja założeń teoretycznych, stworzenie algorytmu programów obliczeniowych i ich kodów, przeprowadzenie symulacji numerycznych, opracowanie graficzne i części tekstu artykułu.
Mój udział: 60%
2. Turant J., Radaszewska E., Thermal Properties of Functionally Graded Fibre Material, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe 2016; Vol 24, No 4(118), pp. 68-73, DOI: 10.5604/12303666.1201133
(IF:0,566; punktacja MNiSW:25)
Mój wkład to: postawienie problemu i naszkicowanie procesu jego rozwiązania, stworzenie algorytmu programów obliczeniowych i ich kodów, przeprowadzenie symulacji numerycznych, opracowanie graficzne i części tekstu artykułu.
Mój udział: 90%
3. Dems K., Turant J., Radaszewska E., Optimal design of thermal loaded composites filled with curvilinear fibers, Structural and Multidisciplinary Optimization, 2016 (in print) DOI: 10.1007/s00158-016-1555-6
(IF:2,208; punktacja MNiSW:35)
Mój wkład to: zaproponowanie realizacji mechanizmów tworzenia rodziny włókien wypełniających, stworzenie algorytmu programów obliczeniowych i ich kodów, przeprowadzenie symulacji numerycznych, opracowanie graficzne i części tekstu artykułu.
Mój udział: 70%
4. Turant J., Modeling and numerical evaluation of effective thermal conductivities of fibre functionally graded materials, Composite Structures 159 (2017) pp. 240–245, DOI: j.compstruct.2016.09.068
(IF:3,853; punktacja MNiSW:35)
Mój udział: 100%


Podpis habilitanta

5.3 Omówienie celu naukowego pracy i osiągniętych wyników i ich wykorzystanie

Włókniste materiały kompozytowe są aktualnie jednymi z bardziej typowych materiałów konstrukcyjnych, których znaczenie i wykorzystanie wciąż rośnie. Swój sukces zawdzięczają przede wszystkim wysokiemu stosunkowi wytrzymałości do masy i łatwości ich kształtowania. W niektórych przypadkach wyparły one tradycyjne materiały konstrukcyjne i często są zasadniczym budulcem takich konstrukcji jak jachty, samoloty, śmigłowce czy inne urządzenia lub ich części, dla których lekkość przy jednocześnie wysokiej wytrzymałości jest istotną cechą. Olbrzymią zaletą włóknistych materiałów kompozytowych jest zdolność do kształtowania ich własności poprzez cechy tekstylnych materiałów będących ich wypełnieniem. Taki proces kształtowania własności kompozytu prowadzi do zagadnień inżynierii materiałowej, w których projektowanie wewnętrznej struktury wypełnień tekstylnych pozwala na budowanie materiałów o cechach dedykowanych konkretnym zastosowaniom praktycznym. Ocena mechaniczno-termicznych własności takich struktur kompozytów włóknistych powinna zapewniać wystarczająco dobrą dokładność i szybkość ich estymacji tak, aby można ją było efektywnie wykorzystać w projektowaniu wewnętrznej struktury kompozytu.

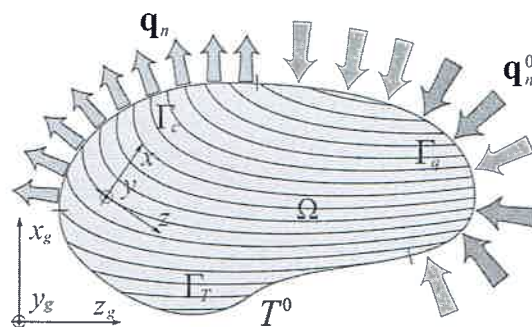
Problemy zastępczych współczynników przewodzenia ciepła dla włóknistych materiałów kompozytowych są dosyć rzadko dyskutowane w literaturze. Można wyróżnić dwa zasadnicze trendy estymacji takich współczynników. Pierwszy z nich bazuje na pracach Maxwell'a i Rayleigh'a pochodzących z początku XX wieku. Prace te były dalej kontynuowane przez Bruggeman'a, który dał początek teorii EMA (*effective medium approximation*) pozwalającej ocenić wiele zastępczych własności materiałów kompozytowych. Otrzymywane wzory na zastępcze współczynniki przewodzenia ciepła dedykowane są konkretnym kształtom wtrąceń i przekrojów włókien a jakość ich estymacji zależy od gęstości nasycenia wtrąceniami macierzy kompozytu. Drugi z trendów bazuje na rozwiązaniu równań przewodnictwa cieplnego dla powtarzalnego elementu struktury kompozytu zwanego częściej reprezentatywnym elementem objętościowym - RVE (*Representative Volume Element*). Różnorodność metod w tym przypadku zależy w dużej mierze od wybranej metody rozwiązania zagadnienia przewodzenia ciepła w elemencie RVE. Typową metodą obliczeniową jest tutaj metoda elementów skończonych ze standardowymi lub dedykowanymi elementami skończonymi. Metody tego typu charakteryzują się dużą dokładnością obliczeniową (w klasie przyjętych uproszczeń modelu fizycznego powtarzalnego elementu materiału) i relatywnie dużą czasochłonnością.

Problem czasochłonności oszacowania własności materiałów kompozytowych odgrywa istotną rolę i jest jednym z wiodących kierunków prac prowadzonych w dziedzinie włóknistych materiałów kompozytowych. W cyklu prac dedykowanym termicznym własnościom włóknistych materiałów kompozytowych skupiłem się na efektywności wyznaczania zastępczych współczynników przewodzenia ciepła dla kompozytów jedno i wielowarstwowych oraz gradientowych kompozytów włóknistych, które mogłyby być wypełnione długimi włóknami o dowolnym przekroju poprzecznym. Otrzymane wyniki zastosowałem do projektowania wewnętrznej struktury kompozytu tak, aby realizowała ona założone zachowania termiczne.

Podpis habilitanta


Typowe włókniste materiały kompozytowe są materiałami ortotropowymi lub w szczególnych przypadkach poprzeczno-izotropowymi. Zastępcze współczynniki przewodzenia ciepła takich materiałów zależą od właściwości materiałów składowych, gęstości nasycenia włóknami macierzy, kształtu przekroju włókna i jego linii środkowej.

W celu opisanie cieplnego zachowania się konstrukcji wykonanej z włóknistego materiału kompozytowego rozpatrzmy tarczę pokazaną na rysunku 1, której materiał wypełniony jest długimi, w ogólności krzywoliniowymi włóknami.



Rysunek 1. Konstrukcja kompozytowa poddana obciążeniu cieplnemu

Zachowanie się takiej konstrukcji w stanie ustalonego przepływu ciepła można opisać typowymi równaniami:

$$\operatorname{div} \mathbf{q} + f = 0, \mathbf{q} = -\lambda \nabla T \text{ w } \Omega \quad (1)$$

gdzie \mathbf{q} i f oznaczają odpowiednio intensywność strumienia i źródła ciepła, λ jest macierzą współczynników przewodzenia ciepła a ∇T jest gradientem temperatury. Równania (1) muszą być uzupełnione warunkami brzegowymi opisującymi np. temperaturę T^0 na brzegu Γ_T , normalny strumień ciepła q_n^0 na brzegu Γ_q , czy strumień ciepła konwekcji q_n na brzegu Γ_c :

$$T = T^0 \text{ na } \Gamma_T,$$

$$q_n = \mathbf{q} \mathbf{n} = q_n^0 \text{ na } \Gamma_q, \quad (2)$$

$$q_n = h(T - T_\infty) \text{ na } \Gamma_c$$

gdzie h jest współczynnikiem konwekcji, T_∞ temperaturą otoczenia, a \mathbf{n} jest wektorem normalnym do brzegu konstrukcji.

Macierz współczynników przewodzenia ciepła λ w globalnym układzie współrzędnych x_g - y_g - z_g (rys. 1) może być wyrażona w funkcji macierzy współczynników przewodzenia ciepła λ_e w lokalnym układzie osi ortotropii x - y - z w klasyczny sposób:

$$\lambda = \mathbf{L} \cdot \lambda_e \cdot \mathbf{L}^T \quad (3)$$

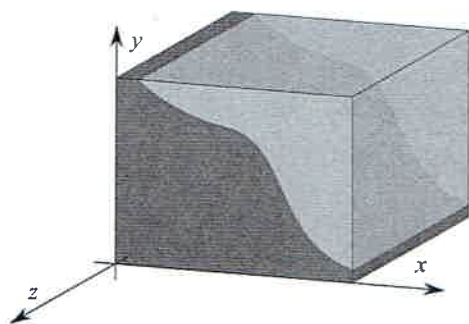
gdzie \mathbf{L} jest macierzą transformacji między lokalnym i globalnym układem współrzędnych. Elementy diagonalnej macierzy λ_e dla włóknistego materiału kompozytowego można oszacować w różny sposób przy czym większość precyzyjnych metod oparta jest o koncepcję elementu RVE.

Podpis habilitanta

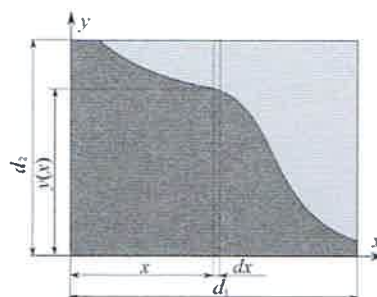
Jan Turant

Koncepcję takiego powtarzalnego elementu można wykorzystać również przy uproszczonym szacowaniu zastępczych współczynników przewodzenia ciepła, który został zaproponowany w artykule (1).

Aby ustalić przewodność cieplną materiału, będącego mieszaniną dwóch materiałów, przeanalizowałem wraz ze współautorami przepływ strumienia ciepła przez element zajęty przez te dwa materiały (rysunek 2a). Założyłem tutaj, że rozkład materiałów wzdłuż osi z jest stały – tak jak to jest wzdłuż osi włókna. Zasadniczym zadaniem było wyznaczenie zastępczych współczynników przewodzenia ciepła w płaszczyźnie x - y prostopadłej do kierunku osi włókna. W tym celu rozpatrzyłem dalej tylko jeden przekrój równoległy do płaszczyzny x - y (rysunek 2b).

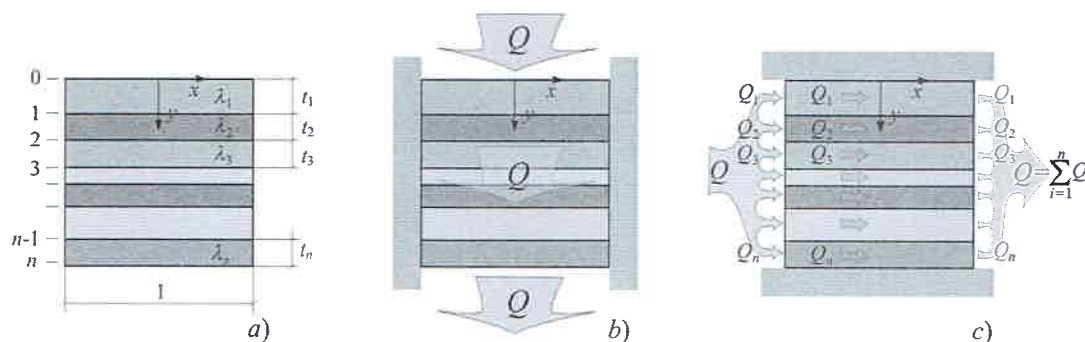


Rysunek 2a. 3D element



Rysunek 2b. 2D element

W trakcie przeprowadzonej analizy wykorzystałem znany schemat jednokierunkowego ustalonego przepływu ciepła przez materiał kompozytowy składający się ze stosu n warstw materiałów o różnej grubości i współczynnikach przewodzenia ciepła (rysunek 3a). Wzory na zastępcze współczynniki przewodzenia ciepła w kierunku prostopadłym (rysunek 3b) i równoległym (rysunek 3c) do warstw są łatwe do określenia.



Rysunek 3. a) warstwowa struktura kompozytu, b) przepływ strumienia ciepła przez elementy połączone szeregowo, c) przepływ strumienia ciepła przez elementy połączone równolegle

Zakładając, że strumień ciepła przechodzący przez materiał niejednorodny jest taki sam jak przez materiał zhomogenizowany oraz, że całkowity strumień ciepła Q jest taki sam we wszystkich warstwach przy przepływie prostopadłym do kierunku warstw i jest sumą częściowych strumieni przechodzących przez warstwy w trakcie przepływu w kierunku stycznym do warstw $Q = \sum_{i=1}^n Q_i$, możemy zapisać zastępcze współczynniki przewodzenia ciepła dla zhomogenizowanego materiału w znany sposób:

Podpis habilitanta

J. Turant

$$\lambda_{ay} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n \frac{t_i}{\lambda_i}}, \quad \lambda_{ax} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (4)$$

gdzie t_i i λ_i oznaczają odpowiednio grubość i -tej warstwy i jej współczynnik przewodzenia ciepła. Wzory (4) były podstawą do wyznaczenia zastępczych współczynników przewodzenia ciepła elementu 2D pokazanego na rysunku 2b.

W celu wyznaczenia zastępczego współczynnika przewodzenia ciepła wyodrębniłem nieskończenie małej szerokości wycinek dx (rysunek 2b), przez który przechodzi elementarny strumień ciepła – taki sam w obu materiałach co jest konsekwencją założonego tutaj jednokierunkowego przepływu ciepła. Zhomogenizowany materiał dla wspomnianego wycinka musi zapewnić transport takiej samej ilości ciepła co odcinek dwufazowego kompozytu. Pozwala to konsekwentnie określić zastępczy współczynnik przewodzenia ciepła, podobnie jak jest to pokazane we wzorze (4₁) i zapisać go w postaci:

$$\lambda_{ay} = \frac{d_2}{y(x)/\lambda_w + (d_2 - y(x))/\lambda_m} = \frac{d_2 \lambda_w \lambda_m}{y(x)(\lambda_m - \lambda_w) + d_2 \lambda_w} \quad (5)$$

gdzie $y(x)$ opisuje zmiany kształty przekroju poprzecznego włókna w badanym elemencie w kierunku x , d_1 i d_2 są wymiarami RVE, a λ_w i λ_m oznaczają współczynniki przewodzenia ciepła dla materiału włókna i macierzy. Zastępczy współczynnik przewodzenia ciepła dla badanego elementu uzyskałem zakładając, że ilość ciepła transportowana przez element wykonany ze zhomogenizowanego materiału jest taka sama jak dla materiału dwufazowego a temperatura na każdym brzegu jest stała:

$$\lambda_{sy} = \frac{1}{d_1} \int_0^{d_1} \lambda_{ay} dx = \frac{d_2}{d_1} \int_0^{d_1} \frac{\lambda_w \lambda_m}{y(x)(\lambda_m - \lambda_w) + d_2 \lambda_w} dx \quad (6)$$

W zupełnie analogiczny sposób wyznaczyłem zastępczy współczynnik przewodzenia ciepła w kierunku x :

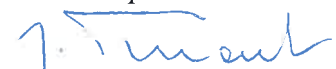
$$\lambda_{sx} = \frac{d_1}{d_2} \int_0^{d_2} \frac{\lambda_w \lambda_m}{x(y)(\lambda_m - \lambda_w) + d_1 \lambda_w} dy \quad (7)$$

gdzie $x(y)$ opisuje zmiany kształty przekroju poprzecznego włókna w badanym elemencie w kierunku y . Zastępczy współczynnik przewodzenia ciepła dla kierunku z może być określony regułą mieszanin wynikającą ze wzoru (4₂):

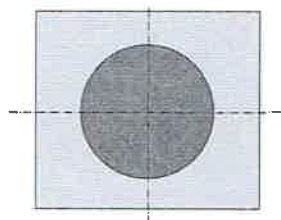
$$\lambda_{sz} = (A_w \lambda_w + A_m \lambda_m) / (A_w + A_m) \quad (8)$$

gdzie A_w i A_m oznaczają odpowiednio pole przekroju poprzecznego włókna i macierzy elementu w płaszczyźnie x - y . Całki występujące we wzorach (6) i (7) tylko w ograniczonych przypadkach kształtów przekrojów poprzecznych dają się określić w sposób analityczny. W ogólności wartości tych całek muszą być obliczane w sposób numeryczny, co nie wiąże się z dużymi nakładami obliczeniowymi.

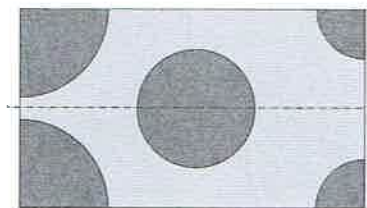
Podpis habilitanta



Mając tak określone zastępcze współczynniki przewodzenia ciepła mogłem określić zastępcze współczynniki przewodzenia ciepła dla dowolnego powtarzalnego elementu kompozytu włóknistego. W moich i współautorów pracach rozważałem dwa rodzaje RVE pokazane na rysunkach 4a i 4b.



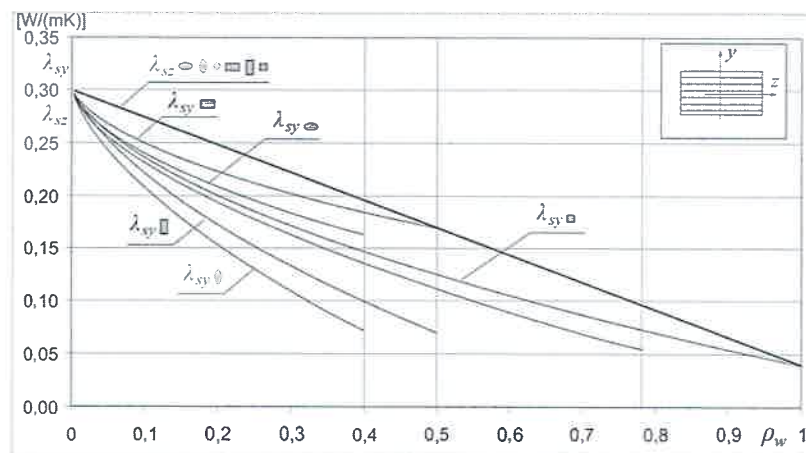
Rysunek 4a. RVE 1



Rysunek 4b. RVE 2

Drugi typ elementu (RVE 2) daje możliwość łatwego uwzględniania zmian przekrojów włókien w kompozycie, a tym samym rozpatrywanie kompozytów włóknistych ze zmienną gęstością nasycenia włóknami. Zastępcze współczynniki przewodzenia ciepła wyznaczone dla pojedynczego powtarzalnego elementu (przy założeniu tej samej średnicy przekrojów poprzecznych wszystkich włókien) są równocześnie zastępczymi współczynnikami przewodzenia ciepła kompozytu włóknistego zbudowanego z dowolnej liczby warstw. Pierwszy rodzaj komórki RVE był podstawą artykułów 1, 3 i 4, a drugi rodzaj RVE był podstawą moich rozważań w artykule 2.

W pracy 1 przebadalem wpływ kształtu przekroju włókna oraz gęstości ułożenia włókien na wartość zastępczego współczynnika przewodzenia ciepła. Badaniu podlegały materiały kompozytowe wypełnione włóknami o przekroju eliptycznym i prostokątnym dla różnych proporcji wymiarów poprzecznych. Otrzymane wartości zastępczych współczynników przewodzenia ciepła w funkcji gęstości nasycenia kompozytu włóknami ρ_w , dla różnych przekrojów poprzecznych włókien wypełniających i współczynników przewodzenia ciepła $\lambda_w=0,04$ [W/(mK)] i $\lambda_m=0,3$ [W/(mK)], zamieściłem na rysunku 5.



Rysunek 5. Zastępczy współczynnik przewodzenia ciepła dla wybranych przekrojów włókien

W artykule 1 były badane ponadto cieplne zachowania się prostych konstrukcji tarczowych jedno i wielowarstwowych, do analizy których wykorzystałem przedstawiony sposób homogenizacji. Dla kompozytów jednowarstwowych porównywałem zachowanie się tarcz wykonanych z kompozytu traktowanego jako kontinuum powstałe po procesie homogenizacji

Podpis habilitanta

z kompozytem zbudowanym z na przemian ułożonych materiałów macierzy i włókna. Symulacje numeryczne przeprowadzone w tym przypadku miały odpowiedzieć na pytanie jak zachowanie zhomogenizowanego materiału odpowiada zachowaniu rzeczywistej dyskretnej struktury kompozytu. Obliczenia przeprowadzane były przy założeniu takiego samego udziału objętościowego materiałów włókien i macierzy natomiast przy zmieniającej się liczbie włókien.

Za miary spójności zachowania się konstrukcji wykonanych ze zhomogenizowanego jednorodnego materiału i materiału niejednorodnego obrałem funkcjonal całkowitego strumienia ciepła na wybranym brzegu konstrukcji

$$Q = \int_{\Gamma} q_n d\Gamma \quad (9)$$

oraz funkcjonal będący miarą różnic temperatur porównywanych konstrukcji na tym samym brzegu

$$\Delta T_{av} = \sqrt{\frac{1}{A} \int_{\Omega} (T_d - T_h)^2 d\Omega} \quad (10)$$

gdzie A oznacza całkowite pole obszaru konstrukcji a T_d i T_h są odpowiednio temperaturami konstrukcji dyskretnej (niejednorodnej) i zhomogenizowanej (jednorodnej).

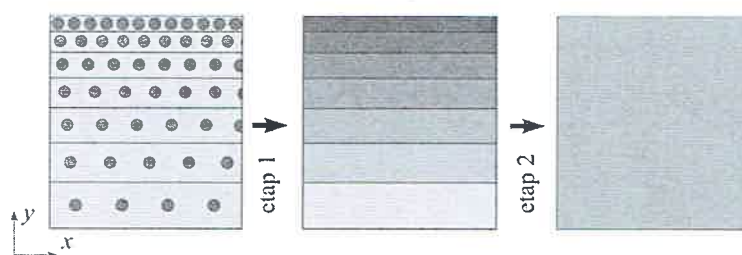
Obliczenia wykazały poprawiającą się wraz z liczbą włókien zbieżność zachowań się konstrukcji wykonanych z materiału jednorodnego i niejednorodnego – dla 128 włókien wypełniających średnia różnica temperatur na monitorowanym brzegu wynosiła około 1[°C], a względna różnica strumienia ciepła przechodzącego przez wspomniany brzeg około 1%. W przypadku konstrukcji wielowarstwowych badane były ich zachowania przy założeniu takiej samej gęstości nasycenia włóknami wszystkich warstw kompozytu a zmiennym kącie orientacji prostoliniowych włókien.

Zmiany gęstości nasycenia włóknami macierzy kompozytu powodują lokalne zmiany własności cieplnych zhomogenizowanego materiału. Zmiany takie mogą być związane z różną liczbą włókien wzmacniających w obszarach o różnym stopniu wyężenia lub mogą być konsekwencją, zamierzonej lub nie, zmiany odległości między włóknami.

Zmiany gęstości lokalnego nasycenia macierzy kompozytu włóknami, w modelu kompozytu włóknistego, można uzyskać poprzez zmianę średnicy włókien dla tych samych wymiarów komórki typu 2 lub zmiany wielkości komórki typu 1, przy założeniu stałości średnic włókien wypełniających. Określenie zastępczych współczynników przewodzenia ciepła w takich przypadkach było moim kolejnym zadaniem, a zajmowałem się tym problemem w artykułach 2 i 4. Ogólny schemat homogenizacji tego typu kompozytów włóknistych pokazałem na rysunku 6.

Podpis habilitanta





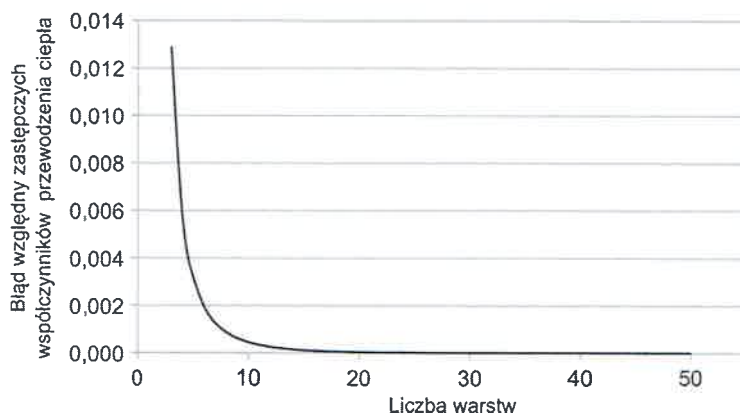
Rysunek 6. Schemat homogenizacji

Realizacja etapu 1 (pokazanego na rysunku 6) jest przeprowadzana zgodnie z omówionym wcześniej schematem. Idea realizacji etapu 2 jest identyczna z zaprezentowaną wcześniej – wielkość strumienia ciepła przechodzącego przez kompozytowy materiał niejednorodny musi być taka sama jak dla materiału zhomogenizowanego. Etap 2 homogenizacji może być zrealizowany w dwojaki sposób – warstwowa struktura kompozytu otrzymana po etapie 1 może być traktowana jako dyskretna (dla małej liczby warstw) lub jako ciągła (dla dużej liczby warstw). Uwzględniając model ciągły dla warstwy o całkowitej grubości t oraz model dyskretny zastępczy współczynnik przewodzenia ciepła w przykładowym kierunku y można zapisać odpowiednio wzorami:

$$\lambda_{ey}^{cia} = \frac{t}{\int_0^t \lambda_{sy}^{-1} dy}, \quad \lambda_{ey}^{dys} = \frac{t}{\sum_{i=1}^n \frac{t_i}{\lambda_{sy}^i}} \quad (11)$$

gdzie n oznacza liczbę warstw, t_i grubość i -tej warstwy, a λ_{sy}^i jest zastępczym współczynnikiem przewodzenia ciepła materiału i -tej warstwy.

Pytaniem, na które między innymi starałem się odpowiedzieć, w artykułach 2 i 4, było: jaka liczba warstw materiału kompozytowego jest wystarczająco duża, aby można było korzystać z ciągłego podejścia? W tym celu wykonałem obliczenia zastępczych współczynników przewodzenia ciepła dla warstwowego kompozytu składającego się ze skończonej liczby warstw porównując wyniki otrzymane zgodnie z zależnościami (11). Błąd względny zastępczego współczynnika przewodzenia ciepła, otrzymanego wykorzystując podejścia ciągłe i dyskretnie, dla pierwszego typu RVE (rys. 4a, artykuł 4) pokazałem na rysunku 7.



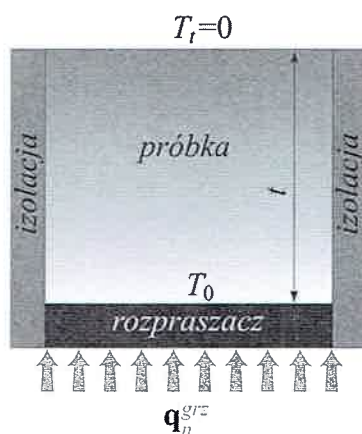
Rysunek 7. Błąd względny zastępczego współczynnika przewodzenia ciepła

Porównanie takie (dla obu typów komórek, artykuł 2 i 4) wykazało, że już dla trzech warstw błąd jest mniejszy niż 1,5% co świadczy o tym, że nawet kompozyty złożone ze stosunkowo

Podpis habilitanta

niewielkiej liczby warstw (większej od 3) mogą być z dobrą dokładnością traktowane jako ciągłe. Spostrzeżenie to jest słuszne tylko dla badanego zjawiska i w żaden sposób nie może być przenoszone na inne własności kompozytów włóknistych. Dla tego typu materiałów praktycznie istotna jest znajomość zmian gęstości nasycenia włóknami macierzy kompozytu, a powstały tak materiał może być traktowany jako gradientowy kompozyt włóknisty.

Przyjęty model fizyczny komórki i zjawiska przewodzenia ciepła ma największy wpływ na dokładność symulacji matematycznych. Najistotniejszymi upraszczającymi założeniami przyjętymi w moich rozważaniach była równomierność rozłożenia włókien i stałość temperatury na ściankach powtarzalnego elementu. Nie badałem również potencjalnych zmian własności macierzy na granicy włókno-macierz. W celu weryfikacji wpływu przyjętego uproszczenia dotyczącego stałości temperatur na brzegach RVE stworzyłem, z wykorzystaniem systemu ADINA metody elementów skończonych, wirtualne stanowisko badawcze do pomiarów współczynnika przewodzenia ciepła (artykuł 4). Schemat stanowiska pokazałem na rysunku 8.



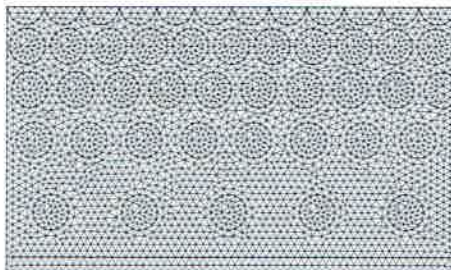
Rysunek 8. Schemat wirtualnego stanowiska badawczego

Izolacja była zdefiniowana przez zerowy strumień ciepła na odpowiednich brzegach. W celu uproszczenia obliczeń wprowadziłem do układu dodatkową warstwę materiału rozpraszacza, którego zadaniem było wyrównanie temperatury T_0 na brzegu próbki ze strony strumienia ciepła \mathbf{q}_n^{grz} pochodzącego od wirtualnej grzałki. Koncepcja rozpraszacza związana jest z fizycznymi realizacjami tego typu urządzeń badawczych gdy badana próbka umieszczana jest pomiędzy płytami wykonanymi z materiałów bardzo dobrze przewodzących ciepło. W świecie numerycznego eksperymentu materiał rozpraszacza może charakteryzować się współczynnikiem przewodzenia ciepła o praktycznie dowolnej wysokości, co daje duże potencjalne możliwości w realizacji jego zadania – wyrównanie temperatury na brzegu próbki. Jedynym ograniczeniem co do wysokości współczynnika przewodzenia ciepła przypisanego do materiału rozpraszacza jest stabilność numeryczna procesu rozwiązującego problem. W praktyce, współczynnik przewodzenia ciepła materiału rozpraszacza powinien być o kilka (np. 5) rzędów wyższy od współczynników przewodzenia ciepła komponentów kompozytu. Odpowiedni dobór współczynnika przewodzenia ciepła materiału rozpraszacza wymaga przeprowadzenia eksperymentu numerycznego tak, aby temperatury na brzegu próbki były takie same z dokładnością do np. 4 cyfr znaczących.

Podpis habilitanta

J. Turant

Badaniu poddawałem tutaj próbki materiału kompozytowego w postaci ich modelu metody elementów skończonych. Przykładową próbkę materiału wraz z obszarem rozpraszacza pokazałem na rysunku 9. Prezentowana próbka zbudowana była z czterech i pół warstw zakładając liniową zmienność gęstości nasycenia włóknami macierzy od 0 w dolnej części do maksymalnej gęstości w części górnej.



Rysunek 9. Dyskretyzacja obszaru próbki i rozpraszacza

W wyniku przeprowadzonego eksperymentu można obliczyć współczynnik przewodzenia ciepła, w kierunku przepływu strumienia ciepła, korzystając z prostej zależności:

$$\lambda_e = \frac{q_n^{grz} t}{T_0} \quad (12)$$

Przedstawiony sposób weryfikacji wielkości zastępczych współczynników ciepła wykorzystałem do badania wielowarstwowych materiałów kompozytowych o zmiennej gęstości nasycenia włóknami macierzy. Wyniki testów numerycznych wykazały różnicę względną otrzymywanych wielkości zastępczych współczynników ciepła (uzyskanych zgodnie ze schematem przedstawionym wcześniej) w stosunku do otrzymanych w wyniku numerycznego testu przeprowadzonego metodą elementów skończonych około 6%. Warto zauważyć, że otrzymany błąd estymacji współczynnika przewodzenia ciepła jest błędem wielkości rzeczywistego pomiaru takich współczynników. Czasochłonność oszacowania zastępczych współczynników przewodzenia ciepła jest równoważna czasowi wykonania kilkudziesięciu operacji zmiennoprzecinkowych takich jak mnożenie i dodawanie.

Szybki i stosunkowo dokładny sposób estymacji zastępczych współczynników przewodzenia ciepła wykorzystałem dalej do optymalnego sterowania rozplływem ciepła w elementach konstrukcyjnych wykonanych z wielowarstwowych włóknistych materiałów kompozytowych (artykuł 3). Do badania jakości konstrukcji wykorzystałem szczególne formy ogólnego funkcjonału danego w postaci:

$$F(\mathbf{b}) = \left\{ \int_{\Omega} (f_1(T, \nabla T, \mathbf{q}, \mathbf{b}))^p d\Omega + \int_{\Gamma} (f_2(T, \nabla T, \mathbf{q}, \mathbf{b}))^p d\Gamma \right\}^{\frac{1}{p}} \quad (13)$$

gdzie f_1 i f_2 są funkcjami opisanymi odpowiednio w obszarze i na brzegu projektowanej konstrukcji, T i ∇T są temperaturą i jej gradientem, \mathbf{q} jest strumieniem ciepła, a \mathbf{b} jest wektorem zmiennych decyzyjnych. Współczynnik p jest naturalną parzystą liczbą mającą tą własność, że dla $p \rightarrow \infty$ tworzy z funkcjonału F globalną miarę lokalnych wielkości opisanych funkcjami f_1 i f_2 . W szczególności wykorzystałem takie funkcjonały jak (9):

Podpis habilitanta

Jan Turant

$$F_1(\mathbf{b}) = \int_{\Gamma} q_n d\Gamma \quad (14)$$

oraz:

$$F_2(\mathbf{b}) = \left[\int_{\Gamma} q_n^p d\Gamma \right]^{\frac{1}{p}} \quad (15)$$

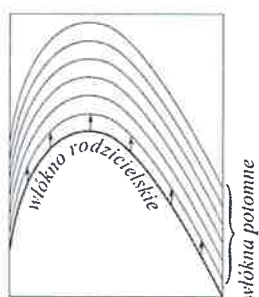
$$F_3(\mathbf{b}) = \left[\int_{\Omega} T^p d\Omega \right]^{\frac{1}{p}}$$

Funkcjonał F_1 jest miarą całkowitego strumienia ciepła na brzegu Γ , funkcyjonał F_2 dla dużych p jest miarą strumienia ciepła w nieznanach punktach brzegu Γ i może być wykorzystywany w celu wyrównywania strumienia ciepła na badanym brzegu, a funkcyjonał F_3 jest tego typu miarą temperatury w obszarze konstrukcji Ω .

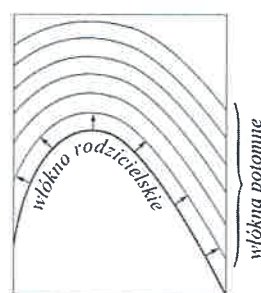
Budowane zadania optymalizacyjne miały na celu określenie kształtu linii włókien wypełniających tak, aby zachowanie cieplne konstrukcji było najlepsze z danego punktu widzenia określonego funkcyjonałami (14,15).

Konsekwentnie, wektor zmiennych decyzyjnych zawierał parametry opisujące kształt linii włókna rodzicielskiego, na bazie którego była budowana cała rodzina wypełniających włókien potomnych.

Rozważyłem dwa sposoby budowania rodziny włókien wypełniających. W pierwszym z nich kształt linii włókna rodzicielskiego był powielany przez włókna potomne, które powstawały przez translacje włókna rodzicielskiego w wybranym kierunku (rysunek 10a), a w drugim rodzina włókien wypełniających powstawała przez przesunięcie linii włókna rodzicielskiego w kierunkach normalnych do jego linii (rysunek 10b).



Rysunek 10a. Translacja w wybranym kierunku



Rysunek 10b. Translacja w kierunkach normalnych

W pierwszym realizowanym sposobie budowania rodziny włókien wypełniających lokalna gęstość nasycenia macierzy włóknami może być zmienna (różne odległości włókien mierzone wzdłuż kierunku normalnego do włókna) podczas gdy wspomniana gęstość nasycenia dla drugiego przypadku jest stała. W przypadku zmiennej gęstości nasycenia włóknami macierzy kompozytu konieczne było wprowadzenie ograniczeń mających na celu niedoprowadzenie do kolizji włókien. Dodatkowo wprowadzałem tutaj ograniczenia na całkowitą objętość włókien wypełniających. Ograniczenia na dopuszczalną zawartość włókien wypełniających były

Podpis habilitanta

stosowane do całkowitej zawartości włókien we wszystkich warstwach jak i w każdej z osobna. Pierwsze podejście pozwalało swobodniej dystrybuować materiał włókien pomiędzy warstwami kompozytu i często prowadziło do różnych kształtów linii włókien wypełniających w różnych warstwach. W przypadku translacji w kierunkach normalnych niebanalnym zadaniem było określenie kierunków włókien w wybranych punktach obszaru, a kształt włókna rodzicielskiego musiał zapewniać niezapętlanie się włókien potomnych.

Analizę zachowania pracy elementu konstrukcyjnego przeprowadziłem wykorzystując metodę elementów skończonych, dla której zastępcze współczynniki przewodzenia ciepła wyliczyłem zgodnie z przedstawionym schematem (bazując na wzorach 4, 6-8). Ze względu na spodziewany wielomodalny charakter badanych problemów na etapie syntezy procesu optymalizacyjnego zastosowałem zmiennoprzecinkowy algorytm ewolucyjny, w którym wykorzystałem takie operatory jak: selekcja turniejowa, krzyżowanie heurystyczne i niejednorodna mutacja gaussowska. Realizację ograniczeń przeprowadziłem wykorzystując proste odrzucanie rozwiązań niedopuszczalnych. Wszystkie komponenty sytemu napisałem w języku FORTRAN. Wybrany schemat optymalizacyjny okazał się bardzo skutecznym narzędziem w rozwiązywaniu problemów o wielomodalnym charakterze.

Przeprowadzone rozważania teoretyczne i symulacje numeryczne mogą być podstawą szybkiej oceny zastępczych współczynników przewodzenia ciepła wielowarstwowych kompozytów włóknistych wypełnionych włóknami o dowolnym przekroju poprzecznym. Ze względu na mało czasochłonne obliczeniowo procedury estymacji wspomnianych współczynników procedury te mogą być wykorzystane na etapie optymalnego projektowania ułożenia włókien w macierzy kompozytu.

Podsumowanie

W pracach prowadzonych nad zagadnieniami przepływu ciepła przez włókniste materiały kompozytowe rozwijałem model homogenizacji kompozytów włóknistych stworzony w Katedrze Mechaniki i Informatyki Technicznej. Zaproponowałem prosty model homogenizacji dla włóknistych materiałów gradientowych wykazując równocześnie, że nawet kompozyty zbudowane z niewielkiej ilości warstw o różnej gęstości nasycenia włóknami mogą być traktowane z bardzo dobrym przybliżeniem jako materiały ciągłe, dla których praktycznie istotna jest znajomość funkcji opisującej zmianę gęstości nasycenia włóknami macierzy a nie liczba warstw kompozytu. Spostrzeżenie takie przyspiesza ocenę współczynników przewodzenia ciepła dla wielowarstwowych włóknistych materiałów kompozytowych o zmiennej gęstości nasycenia włóknami.

Na potrzeby weryfikacji otrzymanych wyników stworzyłem wirtualne stanowisko pomiarowe wykorzystując metodę elementów skończonych. Zaproponowany schemat realizacji stanowiska umożliwi bardzo prostą ocenę współczynników przewodzenia ciepła dla materiałów o dowolnej strukturze. Zaprojektowane stanowisko pomiarowe może być podstawą do badań nad statystyczną oceną wartości współczynników przewodzenia ciepła ze względu na zmiany położenia włókien, ich kształtów przekrojów i materiałowych parametrów kompozytów włóknistych. Badania takie mogą dać pełniejszą odpowiedź na temat spodziewanych wartości współczynników przewodzenia ciepła.

Podpis habilitanta

Wykazałem możliwości sterowania własnościami cieplnymi kompozytów przez zmiany kształtu linii włókna rodzicielskiego, na podstawie którego tworzona jest cała rodzina włókien wypełniających. Zaproponowałem dwa możliwe scenariusze budowy rodziny krzywoliniowych włókien wypełniających i wskazałem ich wady i zalety. Poprzez kształtowanie linii włókien rodzicielskich sterowałem strumieniem ciepła na wybranym brzegu konstrukcji i wpływałem na rozkład lokalnych temperatur w wybranym jej obszarze wskazując na nie wykorzystywane do tej pory możliwości takiego wykorzystania włókien wypełniających.

Warto zauważyć złożoność analiz podjętych w trakcie optymalnego sterowania kształtem linii włókien wypełniających. Wymagały one ode mnie interdyscyplinarnej wiedzy związanej z modelowaniem kompozytów włóknistych, zagadnieniami przepływu ciepła, metodami numerycznymi (w tym w szczególności metodą elementów skończonych), językami programowania, metodami optymalizacji z wykorzystaniem algorytmów ewolucyjnych i metod deterministycznych.

6. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

6.1 Publikacje z list JCR (Journal Citation Reports)

Jestem współautorem 5 artykułów w czasopismach z listy JCR z czego po doktoracie 4 artykułów – szczegóły w załączniku 4.

6.2 Publikacje w czasopismach spoza listy JCR

Jestem autorem lub współautorem 17 recenzowanych artykułów naukowych opublikowanych w wydawnictwach krajowych i międzynarodowych z czego po doktoracie powstało 14 artykułów – szczegóły w załączniku 4.

6.3 Wygłoszone referaty na międzynarodowych i krajowych konferencjach

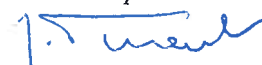
Jestem autorem lub współautorem 29 referatów z czego 23 zostały wygłoszone po doktoracie. Ogółem 22 z 29 referatów zostało zrecenzowanych i opublikowanych w materiałach konferencyjnych (po doktoracie 17 z 23). 13 referatów wygłoszonych na konferencjach międzynarodowych oraz 16 referatów na konferencjach krajowych – szczegóły w załączniku 4.

6.4 Udział w projektach badawczych

W trakcie mojej pracy zawodowej brałem udział w 3 krajowych projektach badawczych:

1. Modelowanie ciągłych i dyskretnych struktur kompozytowych wykonanych z reologicznych materiałów włókienniczych, grant KBN nr 7T08E 092 14, okres trwania: 1997-2000 r., wykonawca, Politechnika Łódzka
2. Modelowanie i identyfikacja uszkodzeń w materiałach i warstwach kontaktowych, grant KBN nr 8T07A 022 20, okres trwania: 2001-2004 r., wykonawca, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Podpis habilitanta



oraz w jednym międzynarodowym:

1. Development of a rapid configuration system for textile production machinery based on the physical behavior simulation of precision textile structures – MODSIMTex, European Commission Community Research 7th Framework Programme, 2009-2012, wykonawca

Ponadto w roku 2006 składałem, jako kierownik projektu, wniosek do Komitetu Badań Naukowych o finansowanie projektu badawczego „Identyfikacja uszkodzeń rozłożonych dyskretnie i ciągle włókien wzmacniających w elementach konstrukcyjnych” – finansowanie nie zostało przyznane.

6.5 Opracowania zbiorowe, dokumentacja prac badawczych

Jestem autorem 26 opracowań do sprawozdań z Działalności Statutowej prowadzonych w jednostkach naukowych Politechniki Łódzkiej, w których byłem zatrudniony. W ramach projektu MODSIMTex byłem współautorem raportów rocznych 2009, 2010, 2011, 2012.

6.6 Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową

1. Nagrody JM Rektora Politechniki Łódzkiej za osiągnięcia naukowo-badawcze, 1998
2. Wyróżnienie Rady Wydziału Włókienniczego za pracę doktorską „Wrażliwość i optymalne projektowanie konstrukcji z dyskretnymi włóknami i przekładkami”, 1999
3. Nagrody JM Rektora Politechniki Łódzkiej za osiągnięcia naukowo-badawcze, 2002
4. Nagrody JM Rektora Politechniki Łódzkiej za osiągnięcia w działalności naukowej, 2010

6.7 Syntetyczne ujęcie całego dorobku naukowego

Tabela 1. Sumaryczny dorobek naukowy

Forma publikacji	Liczba		Punktacja MNiSW	
	razem	po doktor.	razem	po doktor.
Publikacje naukowe w czasopismach z listy JCR	9	8	210	195
Publikacje naukowe w czasopismach spoza listy JCR	17	14	22	22
Publikacje w materiałach konferencyjnych	22	17	0	0
Wygłoszone referaty na konferencjach	29	23	0	0
Suma	77	62	232	217

Podpis habilitanta

Tabela 2. Wykaz czasopism z listy JCR dla publikacji powstałych po doktoracie, impact factor i liczba punktów

Nazwa czasopisma	Rok publikacji	Liczba publikacji	Impact factor	Punktacja MNiSW/lista
FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe	2001	2	0,185	15/A
Engineering Optimization	2009	1	0,966	20/A
Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences	2011	1	0,966	30/A
Journal of Thermal Stresses	2012	1	0,734	20/A
FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe	2016	1	0,566	25/A
Structural and Multidisciplinary Optimization	2016	1	2,208	35/A
Composite Structures	2017	1	3,853	35/A
Razem		8	9,663	195

Uwaga: dla publikacji z przed roku 2004, ze względu na inną, wyraźnie niższą punktację KBN, przypisałem czasopismom najmniejszą aktualnie obowiązującą liczbę punktów przyznawaną czasopismom z listy JCR.

Tabela 3. Liczba cytowań publikacji i indeks Hirscha

Nazwa bazy	Liczba cytowań	Liczba cytowani bez autocytowań	Index Hirscha
Web of Science	23	18	3
Scopus	27	20	3
Google Scholar	49	27	4

Szczegółowe omówienie wskaźników dokonań naukowych znajduje się w załączniku 4.

Podpis habilitanta