



**POLITECHNIKA KOSZALINSKA**  
**WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I GEODEZJI**  
**KATEDRA MECHANIKI BUDOWLI**

AUTOREFERAT

**Opis dorobku i osiągnięć naukowych**

**dr inż. Mirosław Wesołowski**

Koszalin, 2018

## Spis treści

<b>1</b>	<b>Dane habilitanta</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>Wskazanie osiągnięcia wynikającego 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.).</b>	<b>3</b>
4.1	Wprowadzenie do bezinwazyjnych technik odwrotnych . . . . .	4
4.2	Cele przewodnie i zakres pracy . . . . .	6
4.3	Wibrometr laserowy . . . . .	7
4.4	Techniki pomiarowe . . . . .	8
4.5	Metody lokalizacji defektów . . . . .	11
4.5.1	Kwadrat Krzywizny Postaci Drgań . . . . .	12
4.5.2	Ciągła Transformata Falkowa . . . . .	13
4.5.3	Skalogram falkowy . . . . .	14
4.5.4	Podsumowanie metod lokalizacji defektów . . . . .	15
4.6	Model numeryczny . . . . .	16
4.6.1	Modelowanie laminatów warstwowych i belek przekładkowych . . . . .	17
4.6.2	Model tłumienia . . . . .	18
4.6.3	Podsumowanie modelowania numerycznego . . . . .	20
4.7	Identyfikacja . . . . .	21
4.7.1	Techniki odwrotne . . . . .	21
4.7.2	Pośrednia technika odwrotna . . . . .	21
4.7.3	Iteracyjna technika odwrotna . . . . .	23
4.7.4	Funkcja celu . . . . .	23
4.7.5	Parametry identyfikacji . . . . .	24
4.7.6	Metody optymalizacji . . . . .	24
4.7.7	Identyfikacja - podsumowanie . . . . .	24
4.8	Wnioski i dalsze prace . . . . .	25
<b>5</b>	<b>Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych</b>	<b>26</b>
5.1	Modelowanie strefy uszkodzonej . . . . .	26
5.2	Modelowanie koncepcyjne i optymalizacja struktur kompozytowych . . . . .	27
5.3	Metody weryfikacyjne . . . . .	28

## **1 Dane habilitanta**

dr inż. Mirosław Wesołowski  
Politechnika Koszalińska  
Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji  
Katedra Mechaniki Budowli

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

Stopnie naukowe i dyplomy:

- Dr inż., Dziedzina: nauki techniczne; Dyscyplina: mechanika ciała stałego;  
Rozprawa doktorska nt.: "Development and validation of an effective inverse technique for characterisation of advanced composite material properties based on vibration test", Riga Technical University, Faculty of Civil Engineering, Institute of Materials and Structures, Riga, Latvia, 2011.
- Mgr inż., Dziedzina: nauki techniczne; Dyscyplina: budowa i eksploatacja maszyn;  
Praca dyplomowa nt.: "Kinematyczno - dynamiczna analiza MES przedniego podwozia samolotu transportowego", Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2006

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

- 01.09.2012 - obecnie, Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji, Katedra Mechaniki Budowli, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin.  
Stanowisko: Adiunkt (Assistant Professor)

- 01.03.2011 - 31.12.2011, University of Florence, Faculty of Mechanical Engineering and Technology, Italy.  
Stanowisko: Etat typu Postdoc (pełny etat badawczy)
- 01.03.2007 - 01.03.2010, Riga Technical University, Faculty of Civil Engineering, Institute of Materials and Structures, Riga, Latvia.  
Stanowisko: Early Stage Researcher (pełny etat badawczy)

#### **4 Wskazanie osiągnięcia wynikającego 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) Tytuł osiągnięcia naukowego:**

Cykl publikacji powiązanych tematycznie: **"Bezinwazyjna identyfikacja defektów, parametrów sprężystych i tłumienia w strukturach kompozytowych."**

##### **B) Autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy:**

- [1] Barkanov Evgeny, **Wesolowski Mirosław**, Akishin Pavel, M. Mihovski, 2018, Techniques for Non-destructive Material Properties Characterisation, *Chapter in book: Non-destructive Testing and Repair of Pipelines*, Springer International Publishing AG, pp. 191-207, (Web of Science)
- [2] Janeliukstis Rims, Rucevskis Sandris, **Wesolowski Mirosław**, Chate Andris, 2017, Damage identification in beam structure based on thresholded variance of normalized wavelet scalogram, IOP Conference Series-Materials Science and Engineering, Vol. 251, Article Number: 012089, (Web of Science).
- [3] Janeliukstis Rims, Rucevskis Sandris, **Wesolowski Mirosław**, Chate Andris, 2017, Multiple damage identification in beam structure based on wavelet transform, *Procedia Engineering*, Vol. 172, pp. 426-432, (Web of Science).
- [4] Janeliukstis Rims, Rucevskis Sandris, **Wesolowski Mirosław**, Chate Andris, Experimental structural damage localization in beam structure using spatial continuous wavelet transform and mode shape curvature methods, 2017, *Measurement*, Vol. 102, pp. 253-270, (Web of Science).
- [5] **Wesolowski Mirosław**, Barkanov Evgeny, Air damping influence on dynamic parameters of laminated composite plates, 2016, *Measurement*, Vol. 85, pp. 239-248, (Web of Science).
- [6] Janeliukstis Rims, Rucevskis Sandris, **Wesolowski Mirosław**, Chate Andris, 2016, Damage Identification Dependence on Number of Vibration Modes Using Mode

Shape Curvature Squares, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 744, Article number: 012054, (Scopus).

- [7] Janeliukstis Rims, Rucevskis Sandris, **Wesolowski Mirosław**, Kovalovs Andrejs, Chate Andris, Damage Identification in Polymer Composite Beams Based on Spatial Continuous Wavelet Transform, 2016, IOP Conference Series-Materials Science and Engineering, Vol. 111, Article Number: 012005, (Web of Science).
- [8] Janeliukstis Rims, Rucevskis Sandris, **Wesolowski Mirosław**, Kovalovs Andrejs, Chate Andris, Damage Identification in Beam Structure using Spatial Continuous Wavelet Transform, 2015, IOP Conference Series-Materials Science and Engineering, Vol. 96, Article Number: 012058, (Web of Science).
- [9] **Wesolowski Mirosław**, Rucevskis Sandris, Janeliukstis Rims, Polanski Marek, Damping Properties of Sandwich Truss Core Structures by Strain Energy Method, 2015, IOP Conference Series-Materials Science and Engineering, Vol. 96, Article Number: 012022, (Web of Science).
- [10] Barkanov Evgeny, **Wesolowski Mirosław**, Hufenbach Werner, Dannemann Martin, An effectiveness improvement of the inverse technique based on vibration tests, 2015, Computers & Structures, Vol. 146, pp. 152-162, (Web of Science).
- [11] **Wesolowski Mirosław**, Barkanov Evgeny, 2014, Improving an inverse technique for characterisation of laminated plates, SHELL STRUCTURES: THEORY AND APPLICATIONS, Vol. 3, CRC PRESS-TAYLOR & FRANCIS GROUP, pp. 157-160, (Web of Science).
- [12] **Wesolowski Mirosław**, Barkanov Evgeny, 2012, Model errors influence on identified composite material properties, Composite Structures, Vol. 94, Issue 9, pp. 2716-2723, (Web of Science).

**C) Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania:**

#### **4.1 Wprowadzenie do bezinwazyjnych technik odwrotnych**

Materiały kompozytowe stosowane w budownictwie, to struktury złożone co najmniej z dwóch różnych materiałów składowych. Znaczenie kompozytów w obszarze inżynierii lądowej i nie tylko, jest bardzo duże. Wynika to z ich doskonałych właściwości fizycznych i chemicznych, np. mała gęstość właściwa, wysoka wytrzymałość w stosunku do masy, wysoka odporność na korozję, dobre właściwości tłumiące, wysoka odporność termiczna. W związku z tym powstają coraz to nowe zaawansowane struktury kompozytowe mające spełniać z góry założone funkcje dla określonych warunków ich eksploatacji. Pociąga to za sobą potrzebę opracowania metod określenia zachowania się kompozytów na poziomie makroskopowym. To z kolei, wymaga znajomości właściwości sprężystych i dynamicznych (w dalszej części: właściwości materiałowych) materiałów składowych budujących dane struktury kompozytowe. Oszacowanie właściwości materiałowych wspomnianych struktur jest zagadnieniem złożonym z powodu ich anizotropowej natury. Konwencjonalne metody badania właściwości materiałowych, takie jak, statyczna próba rozciągania, ściskania, czy zginania, posiadają pewne ograniczenia gdy zastosowane są do badania

materiałów kompozytowych. Głównymi ograniczeniami jest zawężona liczba wielkości fizycznych możliwa do oszacowania w jednej próbie pomiarowej, tj. jedynie stałe inżynierskie (parametry sprężyste). Ponadto, metody te wymagają dużej ilości próbek pomiarowych, cechują się wysokim kosztem badania oraz lokalną naturą pomiaru. Zgoda odmienny charakter badań mają metody bezinwazyjne lub quasi-inwazyjne bazujące na wykorzystaniu techniki odwrotnej. Metody te podlegają ciągłej ewolucji i modyfikacji tak aby zredukować lub całkowicie wyeliminować ograniczenia metod konwencjonalnych. Technika odwrotna wiąże w jedną całość dwie główne części: badania eksperymentalne (laboratoryjne lub terenowe) i analizę numeryczną.

Część eksperymentalna ma za zadanie dokonanie pomiaru wielkości fizycznej będącej tzw. odpowiedzią badanej struktury. Szukana odpowiedź powinna wykazywać się dużą czułością na zmianę wartości parametrów wejściowych, które w zadaniu techniki odwrotnej, stanowią zbiór wartości poszukiwanych. Spośród wielu możliwych odpowiedzi, te bazujące na pomiarach drgań struktury, znalazły powszechne uznanie w zastosowaniu do techniki odwrotnej. Wykorzystuje się do tego celu eksperymentalną analizę modalną w wyniku, której otrzymujemy charakterystyki dynamiczne badanej struktury. Charakterystyki te to częstości drgań rezonansowych, postacie drgań oraz modalne współczynniki tłumienia. Wymienione charakterystyki są potencjalnymi kandydatami do zdefiniowania ich jako odpowiedzi badanej struktury. Ich pomiar wykonywany jest w większości przypadków przy pomocy wibrometrów laserowych. Główną zaletą wibrometrów laserowych jest bezkontaktowy (bezdotykowy) pomiar drgań. Dodatkowo jeśli zapewni się wzbudzenie drgań przy pomocy głośników modalnych, możemy mówić o bezinwazyjnym pomiarze drgań.

Część numeryczna w technice odwrotnej łączy modelowanie i analizę numeryczną z optymalizacją. Połączenie to może mieć charakter bezpośredni lub pośredni. W przypadku pośredniego związku modelowania i optymalizacji, zasadniczą rolę odgrywa, tzw. metoda powierzchni odpowiedzi (z ang. Response Surface Methodology - RSM). Modelowanie badanej struktury wykonywane jest przeważnie metodą elementów skończonych (MES). W przypadku materiałów kompozytowych modelowanie oparte jest na teoriach laminatów pierwszego lub wyższego rzędu. Ostatnim krokiem techniki odwrotnej jest optymalizacja. W procesie optymalizacji wykonywana jest minimalizacja funkcji celu, która wyrażona jest jako różnica pomiędzy zmierzoną eksperymentalnie i obliczoną numerycznie odpowiedzią struktury. Zbiór parametrów wejściowych, spełniających zdefiniowane normy optymalizacji jest traktowany jako ostateczne rozwiązanie.

Bardzo istotnym zadaniem w procesie eksploatacji struktur kompozytowych jest zapewnienie spójności pomiędzy materiałami ich budującymi lub też połączenia pomiędzy kilkoma strukturami. Jest to istotne dla coraz to bardziej złożonych konstrukcji zarówno w kontekście ilości rodzajów materiałów składowych, jak również rozmiarów konstrukcji. Dotyczy to szczególnie mostów, wieżowców, tuneli, stadionów, itp. Dodatkowo konstrukcje te poddawane są często oddziaływaniu agresywnych czynników środowiskowych. Dlatego też, w celu szybkiej diagnostyki prewencyjnej oraz zapobiegania propagacji defektów w strukturach kompozytowych, coraz częściej stosuje się diagnostykę strukturalną. Diagnostyka ta ma za zadanie alarmować o możliwym występowaniu defektów, lokalizować defekty oraz określać nośność struktury z uwzględnieniem defektu. Jednym z możliwych rozwiązań jest oparcie tejże diagnostyki na badaniach drgań, a w szczególności na analizie zmian w postaciach drgań własnych badanej struktury. Bardzo przydatnym narzędziem w tym przypadku jest czujnik laserowy posiadający opcję wielopunktowego pomiaru drgań, tzw. skanowanie. W efekcie otrzymuje się bardzo dokładne

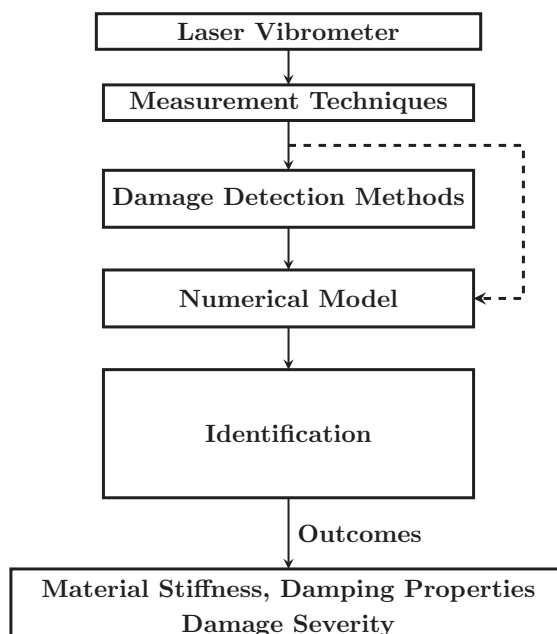
postacie drgań własnych, które poddane dalszej analizie numerycznej umożliwiają lokalizację defektów. W konsekwencji, posiadane informacje na temat lokalizacji defektu, użyte są do oszacowania redukcji sztywności struktury korzystając z techniki odwrotnej.

## 4.2 Cele przewodnie i zakres pracy

Prezentowany cykl publikacji powiązanych tematycznie stanowi wkład naukowy habilitanta w rozwój dziedziny bezinwazyjnej lub quasi-inwazyjnej identyfikacji właściwości materiałowych i defektów w strukturach kompozytowych. Identyfikacja ta opiera się na budowaniu techniki odwrotnej bazując na pomiarach drgań i dotyczy głównie laminatów warstwowych, takich jak: płyty, belki. Część prac poświęcona jest również analizie belek przekładkowych z wypełnieniem kratownicowym. Aktywność badawcza zawarta w przedstawionym cyklu publikacji skupiała się głównie na doskonaleniu technik pomiarowych, modelowaniu numerycznym, modelowaniu tłumienia oraz optymalizacji. Niniejszy autoreferat podsumowuje całokształt aktywności badawczej habilitanta począwszy od momentu uzyskania stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

Identyfikacja właściwości materiałowych i defektów na podstawie techniki odwrotnej jest procesem, który musi być zaplanowany poprawnie metodycznie. Proces ten zaczyna się od zaplanowania pomiarów laboratoryjnych. Następnie przechodzi się do modelowania numerycznego i optymalizacji. Opcjonalnie mogą być zastosowane metody lokalizowania defektów bazując na postaciach drgań pozyskanych w procesie analizy modalnej. Z powyższego wynika, że cały proces identyfikacji obejmuje swoim zakresem kilka dyscyplin naukowych. Dlatego też zakres prac prezentowany w cyklu publikacji ma na celu zapewnienie powiązań i wzajemnych relacji między tymi dyscyplinami. To z kolei narzuca zdefiniowanie celów przewodnich i zakresu prac pozwalających na osiągnięcie wyżej wspomnianych relacji. Zakres pracy oraz cele przewodnie zostały schematycznie przedstawione na Rys. 4.1. Aby przedstawić wkład habilitanta w rozwój techniki odwrotnej, niniejszy autoreferat został podzielony na rozdziały i paragrafy. Najważniejsze osiągnięcia habilitanta w kontekście bezinwazyjnej identyfikacji opisano w paragrafach Rozdziału 4. W paragrafie **Wibrometr laserowy** i **Techniki pomiarowe** opisano główne założenia zastosowania wibrometrów laserowych oraz wykazano udoskonalenia w pomiarach drgań wiązką laserową. W paragrafie **Metody lokalizacji defektów** wykazano udoskonalenia metod i nowe osiągnięcia w procesie lokalizacji defektów. W paragrafie **Model numeryczny** przedstawiono główne założenia modelowania laminatów warstwowych. Ponadto, wykazano też możliwości modelowania tłumienia z zastosowaniem do laminatów warstwowych oraz belek przekładkowych. W paragrafie **Identyfikacja** przedstawiono proces budowania zadania optymalizacji wraz z kilkoma metodami ich rozwiązania. Dodatkowo, zaprezentowano udoskonalenia w zakresie identyfikacji właściwości materiałowych. Wnioski końcowe oraz założenia dla dalszych badań przedstawiono w paragrafie **Wnioski i dalsze prace**.

Wszelkie odniesienia do literatury podane jako [Cyfra arabska] są powiązane tylko z przedstawionym cyklem publikacji. Dodatkowe odniesienia do literatury użyte z tekście są przedstawione jako [A.cyfra] i znajdują się na końcu autoreferatu.



**Rysunek 4.1:** Cele główne badań w procesie wdrażania techniki odwrotnej.

### 4.3 Wibrometr laserowy

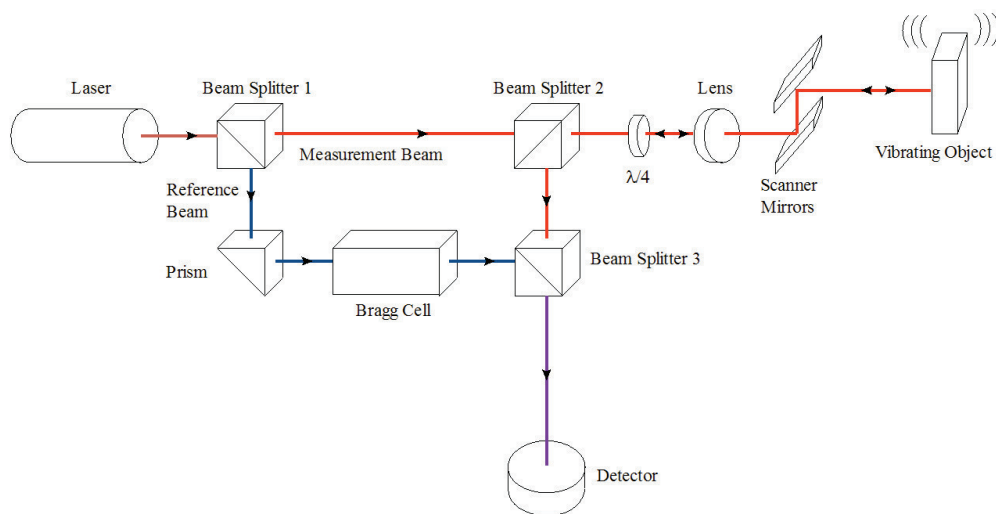
W ramach niniejszej pracy do pomiarów drgań użyto laserowego systemu skanującego POLYTEC PSV-400-B. PSV-400-B działa na zasadzie efektu Dopplera, mierząc zmiany częstotliwości fali światła lasera odbitego od drgającego obiektu. Jeśli fala jest odbijana przez drgający obiekt i wykryta przez wibrometr laserowy, zmianę częstotliwości fali można opisać jako:

$$f_D = \frac{2 \cdot v}{\lambda} \quad (4.1)$$

gdzie  $v$  prędkość w ruchu drgającym badanego obiektu a  $\lambda = 633nm$  jest długością emitowanej fali świetlnej.

Ścieżka optyczna światła laserowego podczas pomiaru jest pokazana schematycznie na Rys. 4.2. Wiązka lasera helowo - neonowego jest dzielona przez dzielnik wiązki 1 (Beam Splitter 1) na wiązkę odniesienia i wiązkę pomiarową. Po przejściu przez drugi dzielnik wiązki (Beam Splitter 2), wiązka pomiarowa jest skupiona na badanym obiekcie, od którego zostaje odbita. Odbita wiązka jest teraz odchylana w dół przez Beam Splitter 2 i jest sprzężana z wiązką odniesienia przez trzeci dzielnik wiązki (Beam Splitter 3). Następnie, sprzężona wiązka kierowana jest na foto detektor, który w swoim działaniu wykorzystuje efekt Dopplera. Ogólny układ systemu PSV-400-B składa się z następujących podzespołów: głowicy skanującej PSV-I-400 LR (w której znajdują się ścieżka optyczna wiązki laserowej); kontroler OFV-5000 (z wewnętrznym generatorem sygnału), skrzynka przyłączeniowa PSV-E-400 (z systemem kondycjonowania sygnału), komputer z kartą pomiarową i oprogramowaniem PSV, oraz wzmacniacz Bruel & Kjaer 2732. Opcjonalnie system może zostać rozszerzony o osprzęt dodatkowy niezbędny do przeprowadzenia konkretnego pomiaru. W przypadku testów dynamicznych wykonywanych na potrzeby bieżącej pracy, użyto dodatkowo wzbudnika piezoelektrycznego (PZT) w postaci nisko-masowego dysku oraz głośnika modalnego do bezinwazyjnego wzbudzania drgań. Ponadto zastosowano komorę próżniową w celu zawężenia przedziału niepewności wyników identyfikacji właściwości materiałowych. Przykład jednej z zastosowanych





**Rysunek 4.2:** Ścieżka optyczna wiązki lasera.

konfiguracji systemu PSV-400-B z komorą próżniową przedstawiono na Rys. 4.3.

System PSV-400-B ma możliwość pomiarów wielopunktowych (procedura skanowania). Umożliwia to uzyskanie średniej transmitancji widmowej (z ang. Frequency Response Function). Dodatkowo umożliwia również uzyskanie wysokiej jakości postaci drgań własnych badanej próbki. Procedura skanowania przebiega następująco. Próbka jest wzbudzana w ruch drgający za pomocą PZT lub głośnika modalnego w zakresie częstotliwości sygnału generowanego przez wewnętrzny generator. Kontroler wibrometru automatycznie przesuwa wiązkę lasera pomiarowego (za pomocą zwierciadeł skanera) do każdego punktu zdefiniowanej siatki skanowania. Fotodetektor (bardzo czuły cyfrowy dekodery VD-07) mierzy zależną od czasu prędkość drgań i weryfikuje pomiary w odniesieniu do stosunku sygnału do szumu. Po wykonaniu pomiarów w każdym punkcie, uzyskuje się uśrednioną odpowiedź czasową, która jest poddana szybkiej transformacji Fouriera. W następstwie uzyskuje się uśrednioną transmitancję widmową (FRF). Otrzymaną FRF wykorzystuje się do określenia parametrów modalnych.

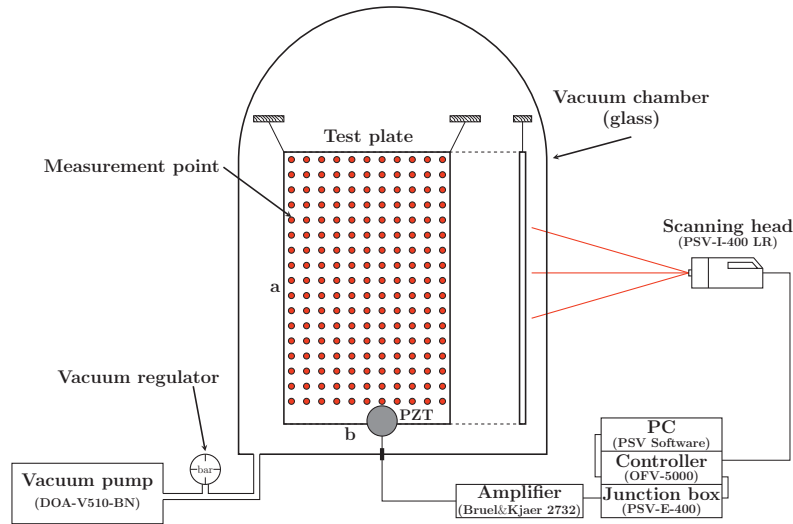
## 4.4 Techniki pomiarowe

Największym wyzwaniem, z punktu widzenia techniki odwrotnej, jest odpowiednie przeprowadzenie badania laboratoryjnego. Wiąże się to z koniecznością zbudowania stanowiska pomiarowego, w taki sposób aby maksymalnie zredukować wpływ osprzętu pomiarowego na mierzone parametry modalne. Można to osiągnąć poprzez dokładną analizę źródeł błędów eksperymentalnych i ich wpływu na parametry modalne. Analiza taka pozwoli na wykluczenie pewnych aranżacji stanowiska pomiarowego i zawęzi tym samym grupę aranżacji adekwatnych do pomiarów drgań na użytek identyfikacji właściwości materiałowych oraz lokalizacji defektów.

Dąży się do tego, aby zbudować jedno stanowisko pomiarowe, które zapewni rejestrowanie danych pomiarowych w sposób bezinwazyjny lub quasi-inwazyjny, i które użyte zostanie zarówno do celów identyfikacji właściwości materiałowych, jak i defektów. W

niniejszym paragrafie przedstawiony zostanie dorobek habilitanta w kontekście zastosowania wibrometru laserowego do pomiarów drgań. Zaproponowane zostaną stanowiska pomiarowe zalecane do pomiarów drgań na potrzeby techniki odwrotnej oraz lokalizacji defektów.

Eksperymentalnie pomierzone parametry modalne są w większości przypadków zaburzone poprzez błędy spowodowane źle symulowanymi warunkami brzegowymi, zbyt dużą masą urządzeń wzbudzających drgania i sensorów drgań, oraz szumem pomiarowym. Główną zaletą zastosowania wibrometru laserowego jest to, że eliminuje się jakąkolwiek interakcję pomiędzy badanym obiektem a sensorami drgań. Pozwala to na wykonanie pomiaru w sposób całkowicie bezkontaktowy. Analogiczna sytuacja ma miejsce w odniesieniu do wzbudników drgań. Wzbudzenie drgań może być realizowane na dwa sposoby: bezinwazyjnie za pomocą głośnika modalnego lub quasi-inwazyjnie przy użyciu lekkich, płaskich wzbudników piezoelektrycznych (PZT). W pracy [10] habilitant wykazał, że te dwie metody wzbudzania nie zaburzają parametrów modalnych wykorzystywanych do identyfikacji parametrów materiałowych. Co więcej, zastosowanie wyżej wymienionych technik wzbudzania drgań, nie powodowało zniekształceń i zaburzeń pomierzonych postaci drgań. Skutkowało to podniesieniem efektywności lokalizacji defektów, co przedstawiono w pracach [8, 7]. Dodatkowo, w kontekście lokalizacji defektów, znaczącą poprawę efektywności proponowanych metod osiągnięto poprzez rozbudowę systemu PSV-400-B o dekoder cyfrowy wysokiej rozdzielczości VD-07. Dekoder VD-07 zapewnia doskonałą weryfikację poziomu szumu do sygnału oraz bardzo wysoką dokładność wykrywania prędkości drgań, co znacznie eliminuje niepożądany szum z danych pomiarowych [4]. Zastosowanie dekodera VD-07 zapewniło pomiar ugięć w zakresie  $nm$  (uzyskanych z całkowania widma prędkościowego), dzięki czemu możliwe było uchwycenie nawet niewielkich zmian w postaciach drgań. Istotnym z punktu widzenia przebiegu identyfikacji metodą techniki odwrotnej, jest praktyczna realizacja warunków brzegowych dla obiektu badań. Wynika to z dwóch kwestii. Po pierwsze, warunki brzegowe mają decydujący wpływ na wszystkie parametry modalne. Po drugie, w części numerycznej całego procesu należy zamodelować takie same lub zbliżone warunki brzegowe modelu, jakie zastosowano w czasie pomiarów laboratoryjnych. Jak wykazano w pracy [10], najbardziej pożądanymi warunkami brzegowymi są warunki całkowicie swobodne (bez ograniczeń przemieszczeń) a optymalna realizacja takich warunków brzegowych w praktyce, polega na podwieszaniu badanego obiektu na cienkich bawełnianych niciach. Sporo uwagi poświęcono, też na realizację warunków brzegowych w pomiarach drgań na potrzeby lokalizacji defektów. W pracach [7, 6] wykazano, iż w przypadku analizowania belek, zarówno warunki całkowicie swobodne, jak i obustronne utwierdzenie belek, pozwalają na skuteczną lokalizację defektów. Kolejną zaletą laserowego systemu pomiarowego jest zdolność penetracji wiązki laserowej przez szkło. Zaletę tą wykorzystano dla potrzeb niniejszej pracy rozbudowując system PSV-400-B o szklaną komorę próżniową (Rys. 4.3). Celem takiego działania było wyeliminowanie tłumienia aerodynamicznego. W warunkach bliskich próżni dokonano pomiarów tłumienia modalnego oraz wykazano, że zastosowanie szklanej komory próżniowej nie ma żadnego wpływu na jakość transmitancji widmowej (FRF) oraz postaci drgań [5]. Stwierdzono, że zmiana wartości podciśnienia wpływa nieznacznie na wartości częstotliwości rezonansowych natomiast w istotnym stopniu obniża wartości tłumienia modalnego. Pożądane poziomy podciśnienia utrzymywano jako stałe za pomocą regulatora podciśnienia zintegrowanego z pompą próżniową. Pompa próżniowa była w stanie obniżyć ciśnienie do 80% ciśnienia atmosferycznego, więc pomiary przeprowadzono w zakresie  $0 \div 80\%$ , gdzie 0 odnosi się



**Rysunek 4.3:** Schemat stanowiska pomiarowego z użyciem lasera skanującego oraz szklanej komory próżniowej.

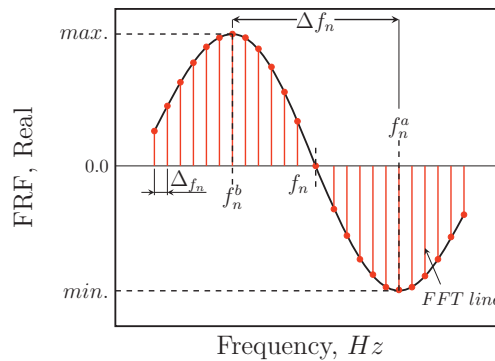
do warunków ciśnienia atmosferycznego a 100% odnosi się do stanu próżni. Dodatkowo w pracy [A.1] wykorzystano pomiary z użyciem komory próżniowej do identyfikacji parametrów tłumienia dla laminatu warstwowego. Wykazano zdecydowaną czułość wyników identyfikacji na zmiany wartości podciśnienia panujące podczas pomiarów.

W zakresie przedstawionej pracy, oszacowanie tłumienia modalnego oparte było na podstawie zależności:

$$\eta_n = \frac{1 - (f_n^b / f_n^a)^2}{1 + (f_n^b / f_n^a)^2} \quad (4.2)$$

gdzie  $\eta_n$  jest modalnym współczynnikiem strat,  $n$  jest numerem odpowiadającym kolejnej częstotliwości drgań rezonansowych;  $f_n^a$  and  $f_n^b$  są częstotliwościami odczytanymi z części rzeczywistej (Real) FRF (Rys. 4.4). Oszacowanie modalnego współczynnika strat wg Rów. 4.2, jest bardzo czułe na poprawny odczyt częstotliwości  $f_n^a$  i  $f_n^b$ . Ze względu na to, że wartość  $\eta_n$  zmienia się dla poszczególnych częstotliwości rezonansowych, przedział częstotliwości  $\Delta f_n$  zawarty pomiędzy  $f_n^a$  i  $f_n^b$  również się zmienia. Stały przyrost częstotliwości  $\Delta f$  utrzymywany w całym zakresie częstotliwości wzbudzenia, może powodować zbyt duże błędy oszacowania  $\eta_n$ . Zjawisko to, jest tym bardziej istotne dla małych wartości  $\eta_n$ , dla których przedział  $\Delta f_n$  jest wąski. Może to powodować, że niewystarczająca ilość prążków Fouriera (FFT lines) zostanie zawarta w przedziale  $\Delta f_n$ . Natomiast, przyjęcie bardzo małej wartości  $\Delta f$  dla całego zakresu częstotliwości znacznie wydłużyłoby czas pomiaru. W pracy [5] zaproponowano więc, zastosowanie zmiennych wartości  $\Delta f_n$  dla konkretnych częstotliwości rezonansowych. Przyjęta w ten sposób metodyka pomiaru zapewnia dokładniejsze oszacowanie  $\eta_n$  w stosunkowo krótkim czasie pomiaru. Aby wdrożyć powyższe założenie zmienności  $\Delta f_n$  opracowano dwustopniową procedurę pomiarową. Wdrożona procedura wykorzystuje system POLYTEC PSV-400-B i oprogramowanie PSV sprzężone z Visual Basic. Szczegóły procedury zawarto w pracy [5].

Podsumowując, wykazano, że zastosowanie wibrometru laserowego zdecydowanie poprawia oszacowanie parametrów modalnych, głównie poprzez wyeliminowanie sensorów drgań. Ponadto stwierdzono, że niewłaściwie realizowane warunki brzegowe podczas



**Rysunek 4.4:** Metoda "Peek Picking" przy oszacowaniu modalnego współczynnika strat.

miaru, mogą mieć znaczący wpływ na pomierzone parametry modalne. Podobnie, zbyt duża masa wzbudników, zaburza pomiar rzeczywistych wartości parametrów modalnych. Dlatego najbardziej korzystnym rozwiązaniem jest symulowanie całkowicie swobodnych warunków brzegowych i dokonywanie wzbudzenia drgań metodą bezdotykową przy pomocy głośnika modalnego. Stosując głośnik modalny oraz wibrometr laserowy, osiągamy bezinwazyjne stanowisko do pomiarów drgań. W sytuacji braku możliwości zastosowania głośnika modalnego, dopuszczalne jest zastosowanie wzbudników nisko-masowych w postaci piezoelektrycznych dysków. Ponadto, stosując dekodery o wysokiej rozdzielczości uzyskujemy dokładną postać drgań rezonansowych oraz znaczną redukcję szumów pomiarowych. Tym samym, przyczynia się to do poprawy skuteczności lokalizacji defektów. Dużą zaletą jest również zastosowanie szklanej komory próżniowej do pomiarów tłumienia modalnego. Pozwala ona na wyeliminowanie wpływu tłumienia aerodynamicznego na pomierzone wartości tłumienia.

## 4.5 Metody lokalizacji defektów

Jedną z najczęściej wykorzystywanych metod do identyfikacji defektów są metody oparte na analizie drgań. Metody te bazują na zaburzeniach parametrów modalnych danej struktury będących efektem pojawienia się defektów. Grupa defektów rozważanych w niniejszej pracy powoduje lokalne zmiany w sztywności belek. Przy czym rozważane są warstwowe belki kompozytowe oraz belki izotropowe. Zaznaczyć należy, iż termin identyfikacja odnosi się do całości procesu, służącego do ujawnienia defektu, zlokalizowania defektu, określenia wielkości obszaru defektu oraz redukcji sztywności struktury poprzez defekt. Dlatego, też identyfikację defektów sklasyfikować można na czterech poziomach:

- Poziom 1. Ujawnienia defektu w badanej strukturze.
- Poziom 2. Lokalizacja defektu w badanej strukturze.
- Poziom 3. Oszacowanie redukcji sztywności struktury w wyniku istnienia defektu.
- Poziom 4. Oszacowanie wpływu defektu a resurs struktury.

W zakresie niniejszej pracy wykazane zostanie zrealizowanie identyfikacji defektów na poziomie 2. Poziom ten został osiągnięty poprzez numeryczne przetwarzanie postaci

drgań rezonansowych pomierzonych za pomocą systemu PSV-400-B. Do zrealizowania tego celu zaproponowano kilka metod lokalizacji uszkodzeń w oparciu o zmiany postaci drgań spowodowane defektem. Metody te oparte są na kwadracie krzywizny postaci drgań (MSCS) [4, 6], ciągłej transformacie falkowej (CWT) [3, 4, 7, 8] i skalogramie falkowym (WS) [2]. Opracowane metody wykazały się dużą skutecznością w lokalizowaniu pojedynczych i wielokrotnych defektów [3]. Ponadto wyeliminowano potrzebę wykorzystania postaci drgań belek wolnych od defektów. Przykłady zastosowania metod zostały zaprezentowane na belkach izotropowych oraz na warstwowych belkach laminatowych. W przypadku belek izotropowych defekt wprowadzono jako ubytek grubości belki w jednej lub dwóch strefach rozłożonych na długości belki. Redukcję grubości wykonywano za pomocą frezowania. W przypadku warstwowych belek kompozytowych strefę defektu zadawano przy pomocy nisko-prędkościowego uderzenia o z góry zadanej energii. W wyniku uderzenia otrzymano strefy defektu w postaci delaminacji kompozytu.

#### 4.5.1 Kwadrat Krzywizny Postaci Drgań

Wskaźnik lokalizacji defektu o nazwie kwadrat krzywizny postaci drgań (z ang. mode shape curvature square - MSCS) został zaproponowany do lokalizacji defektów w belkach [4]. Wskaźnik MSCS jest uważany za metodę identyfikacji defektów na poziomie 2. Za nowatorstwo metody uznaje się wyeliminowanie potrzeby wykorzystania postaci drgań belek wolnych od defektów. Wiąże się to z brakiem konieczności porównywania postaci drgań belek uszkodzonych z belkami nieuszkodzonymi.

Zależność pomiędzy krzywizną funkcji ugięcia a sztywnością na zginanie dla izotropowej belki pryzmatycznej wg teorii Eulera-Bernoulliego jest:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(x) = \frac{M(x)}{EI} \quad (4.3)$$

gdzie  $w(x)$  jest funkcją ugięcia poprzecznego,  $x$  jest współrzędną pokrywającą się ze wzdłużną osią belki,  $EI$  jest sztywnością na zginanie,  $M$  jest wartością momentu przekrojowego. Natomiast w przypadku symetrycznie laminowanej warstwowej belki kompozytowej, zależność pomiędzy krzywizną funkcji ugięcia a sztywnością na zginanie wyraża się następująco:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(x) = D_{11}^* M_{xx} \quad (4.4)$$

gdzie  $D_{11}^*$  jest sztywnością na zginanie [A.2],  $M_{xx}$  jest wartością momentu przekrojowego.

W przypadku układów dyskretnych o skończonej liczbie stopni swobody, krzywizna może być aproksymowana korzystając z metody różnic skończonych - ilorazu centralnego drugiej pochodnej:

$$v_i''^d = \frac{(v_{i+1}^d - 2v_i^d + v_{i-1}^d)}{h^2} \quad (4.5)$$

gdzie  $i$  wskazuje na punkty pomiarowe rozłożone wzdłuż osi belki,  $v^d$  jest przemieszczeniem poprzecznym belki uszkodzonej,  $h$  odległość pomiędzy punktami pomiaru. W sytuacji pojawienia się defektu, sztywność na zginanie ulega lokalnemu zmniejszeniu i powoduje lokalny przyrost wartości krzywizny. Ten nagły wzrost wartości jest traktowany jako wskaźnik lokalizacji defektu. Lokalizacja strefy uszkodzonej oparta jest na podstawie największych wartości kwadratu krzywizny postaci drgań. W celu zwiększenia skuteczności metody opartej na wskaźniku MSCS, zaleca się używanie od kilku do

kilkunastu postaci drgań [6]. W tym celu, użyto uśrednionego wskaźnika defektów opartego na wielu postaciach drgań [A.3, A.4]:

$$MSCSM_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[ (v_i)''^d \right]_n^2 \quad (4.6)$$

gdzie  $v_i''^d$  jest wartością krzywizny w punkcie  $i$  dla  $n$ -tej postaci drgań belki z defektem,  $N$  jest liczbą użytych postaci drgań. Przykłady zastosowania wskaźnika MSCSM pokazano na Rys. 4.5a,b.

Dalsze prace badawcze, pozwoliły na zmodyfikowanie uśrednionego wskaźnika MSCSM do zagadnienia dwuwymiarowego lokalizowania defektów. Modyfikacje te szczegółowo opisano w pracy [4], a przykład lokalizacji defektu w warstwowej belce kompozytowej pokazano na Rys. 4.6.

#### 4.5.2 Ciągła Transformata Falkowa

Kontynuacja prac badawczych nad lokalizacją defektów skutkowałą zastosowaniem transformaty falkowej w celu określenia strefy uszkodzenia. Falki są specjalnymi funkcjami o małych oscylacjach i ze średnią całkową równą zeru. Transformata falkowa (z ang. wavelet transform - **WT**) jest techniką przetwarzania sygnałów niestacjonarnych, zdolną do analizy czasowo-częstotliwościowej. **WT** polega na rozkładzie badanej funkcji na liniową kombinację falek. W procesie lokalizacji defektów, zmienną czasową zastępuje się zmienną przestrzenną. W niniejszej pracy zastosowano ciągłą transformatę falkową w celu zlokalizowania strefy uszkodzenia. Rozważając przypadek jednowymiarowy, jeśli  $\psi(x)$  jest falką podstawową, to kolejne falki, tworzące rodzinę falek i oznaczone jako  $\psi_{s,b}(x)$ , powstają przez skalowanie (parametrem  $s$ ) i przesunięcie (parametrem  $b$ ) falki podstawowej  $\psi(x)$ :

$$\psi_{s,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \cdot \psi\left(\frac{x-b}{s}\right) \quad (4.7)$$

gdzie  $s > 0$  to parametr skali,  $b$  to parametr przesunięcia. Falka jest wydłużana dla  $0 < s < 1$  a zwężana dla  $s > 1$ . Dla funkcji  $f(x)$  reprezentującej jednowymiarową postać drgań belki, ciągła transformata falkowa jest iloczynem skalarnym funkcji  $f(x)$  i rodziny falek:

$$W(s, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{s,b}^*(x) dx \quad (4.8)$$

gdzie  $W(s, b)$  to współczynnik falkowy określający miarę zmienności funkcji  $f(x)$  w otoczeniu  $b$  o rozmiarze proporcjonalnym do  $s$ ; asterisk oznacza sprzężenie zespolone. Lokalnie obniżona sztywność powoduje osobliwości sygnału  $f(x)$ , przez co wywołuje lokalny i gwałtowny przyrost wartości współczynników falkowych. Przyrost tych wartości traktowany jest jako wskaźnik lokalizacji defektu.

Dla sytuacji dwuwymiarowej ciągła transformata falkowa jest rozbudowana do postaci:

$$W(s, a, b) = \frac{1}{s \cdot s} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \cdot \psi^*\left(\frac{x-a}{s}, \frac{y-b}{s}\right) dx dy \quad (4.9)$$

gdzie całkowanie odbywa się po dwóch współrzędnych przestrzennych, a parametry  $a$  i  $b$

reprezentują odpowiednio przesunięcie w kierunku osi  $x$  i  $y$ .

Rów. 4.8 stanowi podstawę do zdefiniowania wskaźnika obszaru występowania defektu (DI):

$$DI_w(s, i \cdot p^{-1}, n) = \int_L w(i \cdot p^{-1}, n) \cdot \psi_{s,i}^*(x) dx \quad (4.10)$$

gdzie całkowanie odbywa się po całej długości belki  $L$ ,  $w(i \cdot p^{-1}, n)$  jest funkcją opisującą zginaną postać drgań (przemieszczenia poprzeczne),  $n$  jest numerem postaci drgań,  $i \cdot p^{-1}$  opisuje punkt pomiaru drgań podzielony przez współczynnik  $p$  przyjmujący wartości całkowite w zakresie  $1 \div 6$ . Dzielenie to wykonuje się w celu zapewnienia skutecznego lokalizowania defektów w przypadku zróżnicowanej gęstości rozłożenia punktów pomiarowych [6, 8]. W przypadku użycia  $N$  postaci drgań, wskaźnik  $DI_w$  wyraża się jako wartość średnia i dodatkowo skaluje się przez największą uzyskaną wartość  $DI_w$  z Rów. 4.10:

$$DI_w(s, i \cdot p^{-1}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{DI_w(s, i \cdot p^{-1}, n)}{\max(DI_w(s, i \cdot p^{-1}, n))} \quad (4.11)$$

Dodatkowo, zastosowano metodę weryfikacji hipotez statystycznych, w celu określenia obszarów belki jako uszkodzone lub nieuszkodzone. W tym celu, wskaźnik  $DI_w$  opisany Rów. 4.11 poddano normalizacji jako:

$$SDI_w(s, i \cdot p^{-1}) = \frac{DI_w(s, i \cdot p^{-1}) - \mu_{DI}(s)}{\sigma_{DI}(s)} \quad (4.12)$$

gdzie  $\mu_{DI}$  i  $\sigma_{DI}$  są, odpowiednio, zależną od skali wartością średnią i odchyleniem standardowym wskaźników obliczonych na podstawie Rów. 4.11. Decyzja o stwierdzeniu występowania defektu podejmowana jest na podstawie założonego poziomu ufności [4].

Ważnym elementem w obszarze badań nad defektami, jest ocena efektywności lokalizacji defektów przez poszczególne funkcje falkowe. Jako miarę tej efektywności proponowano wskaźnik skuteczności oszacowania (DER), którego rola polega na procentowej ocenie funkcji falkowych pod względem skuteczności wskazania lokalizacji defektu [4, 7, 8]. Dla przypadku jednowymiarowej belki, wskaźnik DER jest obliczany poprzez wydzielenie na całej długości belki dwóch rodzajów stref: strefa **a** obejmująca odcinek belki z defektem (strefa uszkodzona); strefa **b** pozostałe odcinki belki (strefy nieuszkodzone). Określenie powyższych stref bazuje na z góry założonych strefach uszkodzenia belki. Wskaźnik DER wyrażony jest wobec powyższego jako:

$$DER_s = \frac{(\overline{SDI_{i,s}})_a}{(\overline{SDI_{i,s}})_b} \cdot 100\% \quad (4.13)$$

gdzie  $(\overline{SDI_{i,s}})_a$  i  $(\overline{SDI_{i,s}})_b$  są, odpowiednio, uśrednionymi wartościami wskaźnika znormalizowanego (Rów. 4.12) w strefie **a** i w strefach **b**. Wskaźniki uśrednione obliczane są poprzez zsumowanie wartości wskaźników uzyskanych z Rów. 4.12 dla każdej ze stref i podzielenia tej sumy przez liczbę punktów pomiarowych znajdujących się w każdej ze stref.

### 4.5.3 Skalogram falkowy

W większości przypadków obecność uszkodzenia zaburza funkcję opisującą postać drgań, w taki sposób, że część funkcji dotkniętej uszkodzeniem ma stosunkowo więk-

szą energię niż jej inne części. W związku z tym wykrycie zmian energetycznych części sygnału może ujawnić lokalizację defektu. Jedną z najbardziej skutecznych technik używanych do tego celu jest budowa skalogramów falkowych, które przedstawiają energię obliczonych współczynników falkowych (Rów. 4.8). Skalogramy stanowią więc graficzne wyrażenie wartości współczynników ciągłej transformaty falkowej w odniesieniu do parametru skali i wymiaru badanej struktury - belki w bieżącym opracowaniu. W niniejszym opracowaniu skalogram służy do prezentacji współczynników transformaty falkowej dla różnych wartości parametru skali i wyraża się zależnością:

$$DS(s, i \cdot p^{-1}) = |DI_w(s, i \cdot p^{-1})|^2 \quad (4.14)$$

gdzie  $DI_w(s, i \cdot p^{-1})$  opisane jest Rów. 4.11.

W celu zintensyfikowania lokalizacji współczynników o największej wartości, dokonuje się normalizacji Rów. 4.14 względem parametru skali:

$$NDS(s, i \cdot p^{-1}) = \left| \frac{DI_w(s, i \cdot p^{-1})}{s^2} \right|^2 \quad (4.15)$$

Następnie oblicza się wariancję Rów. 4.15 wzdłuż osi belki uzyskując gwałtowne przyrosty ich wartości w strefach występowania defektu:

$$S(i \cdot p^{-1}) = \sigma^2 \left( \left| \frac{DI_w(s, i \cdot p^{-1})}{s^2} \right|^2, s \right) \quad (4.16)$$

gdzie  $\sigma$  jest odchyleniem standardowym Rów. 4.15. Jako zabieg końcowy, zastosowano metodę z ang. "universal threshold" w celu filtracji szumów Rów. 4.16:

$$T = \sigma \sqrt{2 \cdot \ln(I)} \quad (4.17)$$

gdzie  $I$  jest całkowitą ilością punktów pomiarowych,  $\sigma$  jest odchyleniem standardowym wyrażenia 4.16.

Proponowana metodyka bazująca na skalogramie falkowym, wyróżnia się brakiem potrzeby selekcji najbardziej odpowiedniego parametru skali funkcji falkowej. Ponadto, nie jest wymagane pozyskiwanie danych pomiarowych dla belki nieuszkodzonej. Rezultaty z zastosowania powyższej metodyki sugerują, że jest ona efektywną metodą lokalizacji defektów, zarówno dla belek izotropowych jak i warstwowych belek kompozytowych [2].

#### 4.5.4 Podsumowanie metod lokalizacji defektów

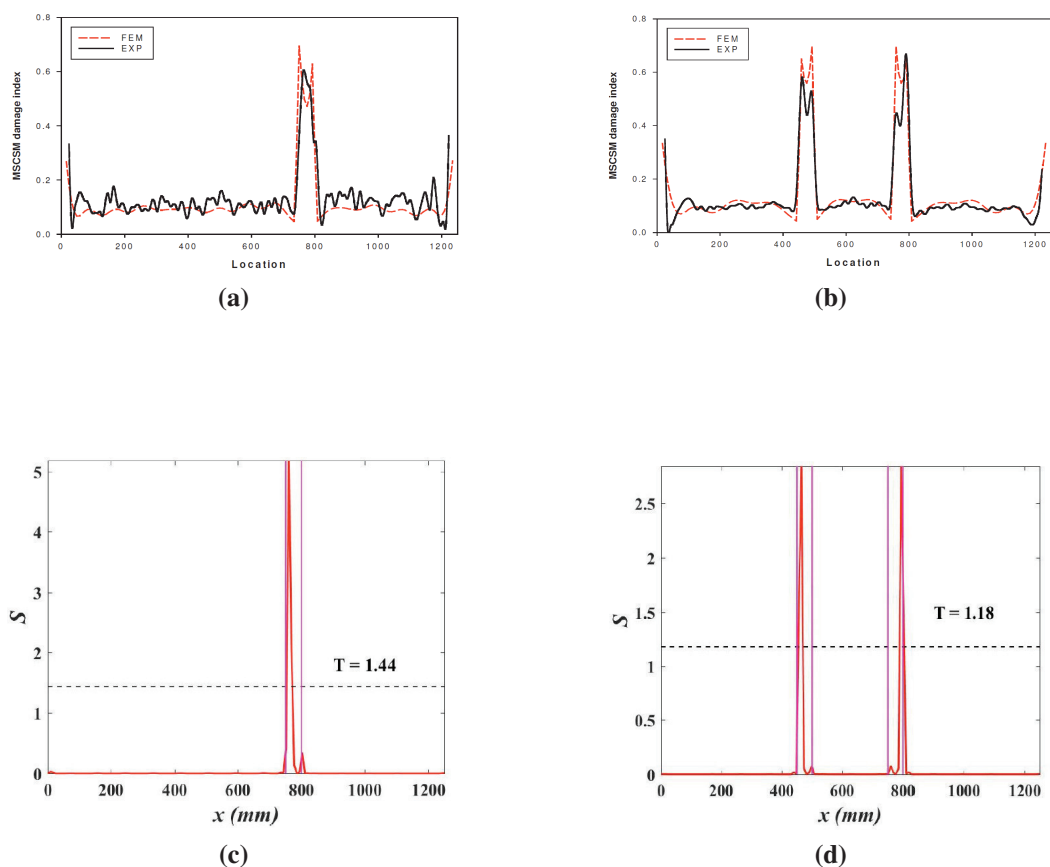
Wyniki badań przedstawione w powyższych paragrafach pokazują, że opracowane metody stanowią skuteczne podejście do lokalizacji defektów w belkach izotropowych oraz w belkach laminatowych. Metody te oparto na eksperymentalnie pomierzonych postaciach drgań belek. Postęp w lokalizacji defektów przedstawiono za pomocą kilku metod przetwarzania danych pomiarowych. Przykłady lokalizacji defektów w belkach aluminiowych i laminatowych przedstawiono na Rys. 4.5 i Rys. 4.6. Proponowane metody lokalizacji defektów przedstawiono w bieżącym opracowaniu w sposób ogólny, natomiast ich kompleksowy opis przedstawiono w szeregu publikacji, w których znaczący wkład miał habilitant [2, 3, 4, 6, 7, 8]. Efektem naukowym powyższych badań jest roz-



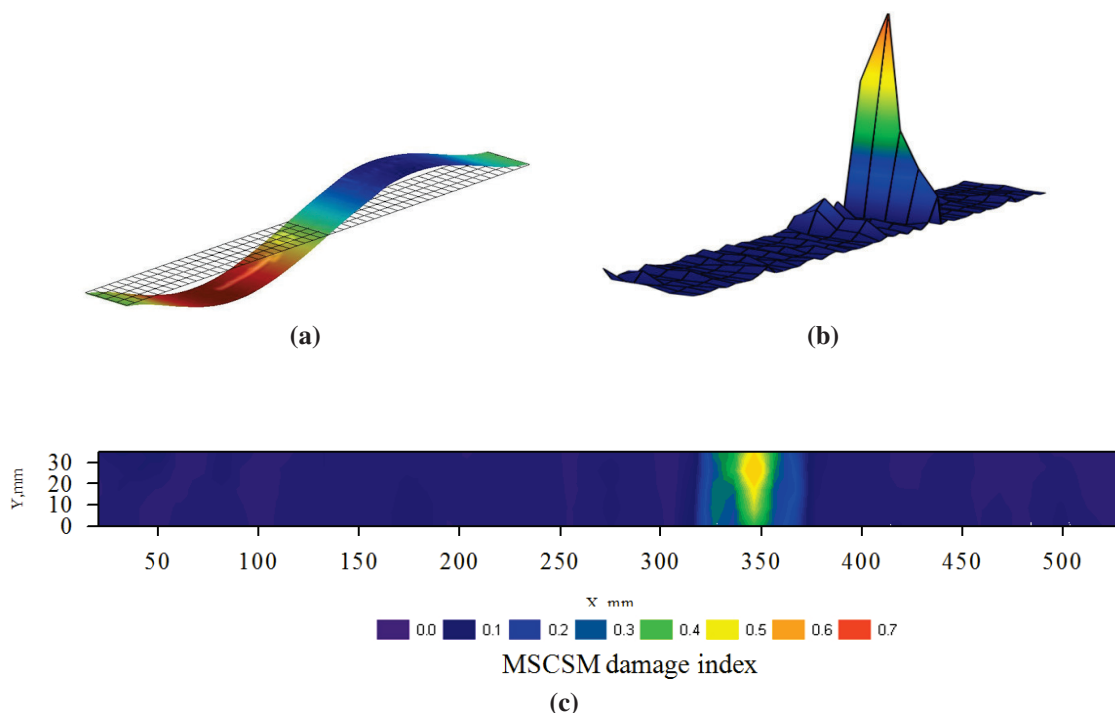
prawa doktorska pana mgr. inż. Rimasa Janeliukstisa, który jest obecnie doktorantem na Politechnice Ryskiej na Łotwie. Planowany termin obrony pracy doktorskiej to grudzień 2018 roku. Habilitant w trakcie realizacji powyższej pracy doktorskiej pełnił rolę konsultanta naukowego.

## 4.6 Model numeryczny

W poniższym paragrafie przedstawiono założenia przyjęte w procesie modelowania numerycznego. W szczególności, skupiono się na zagadnieniu modelowania warstwowych belek kompozytowych, warstwowych płyt kompozytowych, oraz belek przekładkowych (z ang. sandwich) z wypełnieniem (rdzeniem) w postaci aluminiowej kratownicy. W paragrafie opisano również procedurę modelowania tłumienia na potrzeby dynamicznej analizy laminatów warstwowych i belek przekładkowych. Zaproponowany model tłumienia posłużył zarówno do prognozowania modalnego współczynnika strat, jak i do identyfikacji materiałowych parametrów tłumienia poszczególnych warstw laminatu.



**Rysunek 4.5:** Metody lokalizacji defektów: a) Belka aluminiowa z defektem pojedynczym (1-D MSCSM); b) Belka aluminiowa z defektem wielokrotnym (1-D MSCSM); c) Belka aluminiowa z defektem pojedynczym (1-D  $S(i \cdot p^{-1})$ ); d) Belka aluminiowa z defektem wielokrotnym (1-D  $S(i \cdot p^{-1})$ ).



**Rysunek 4.6:** Metody lokalizacji defektów: a) Postać drgań belki kompozytowej z defektem w postaci miejscowej delaminacji; b),c) 2-D lokalizacja strefy uszkodzenia w warstwowej belce kompozytowej.

#### 4.6.1 Modelowanie laminatów warstwowych i belek przekładkowych

Do opracowania modelu numerycznego warstwowych belek lub płyt laminatowych wykorzystano metodę elementów skończonych (MES). W przypadku belki i płyty zakłada się ich skończoną szerokość  $b$  (Rys. 4.7a). Model MES belki i płyty warstwowej oparto na ekwiwalentnej teorii laminatów pierwszego rzędu (FSDT). W teorii tej zakłada się, że linia prosta i prostopadła do powierzchni środkowej nie pozostaje prostopadła do tej powierzchni po odkształceniu. Dodatkowo zakłada się, iż prosta prostopadła nie zmienia swojej długości po odkształceniu. Ponadto, uwzględnia się odkształcenia wywołane siłą tnącą. Pole przemieszczeń wg FSDT ma następującą postać [A.2]:

$$\begin{aligned}
 u(x, y, z, t) &= u_0(x, y, t) + z\phi_x(x, y, t) \\
 v(x, y, z, t) &= v_0(x, y, t) + z\phi_y(x, y, t) \\
 w(x, y, z, t) &= w_0(x, y, t)
 \end{aligned}
 \tag{4.18}$$

gdzie  $(u, v, w)$  oznaczają przemieszczenia odpowiednio kierunku osi  $x, y, z$ ,  $t$  oznacza zmienną czasową,  $(u_0, v_0, w_0)$  oznaczają przemieszczenia płaszczyzny środkowej odpowiednio kierunku osi  $(x, y, z)$ ,  $\phi_x = \frac{\partial u}{\partial z}$  i  $\phi_y = \frac{\partial v}{\partial z}$  oznaczają rotacje linii prostej prostopadłej do powierzchni środkowej odpowiednio względem osi  $y$  i  $x$ .

Obszerny opis badań nad skutkami odstępstw rzeczywistej płyty laminatowej od założeń teorii FSDT, zaprezentowany został przez habilitanta w pracach [10, 11, 12]. W przypadku belek przekładkowych z wypełnieniem kratownicowym, modelowanie okładzin zewnętrznych przebiegało w sposób opisany dla laminatów warstwowych. Do modelowania aluminiowej kratownicy użyto sprężystych elementów przestrzennych (Rys. 4.7b). W niniejszym opracowaniu zagadnienie problemu własnego dla drgań swo-

bodnych nietłumionych przedstawiono jako:

$$(\mathbf{K} - \omega_n^2 \mathbf{M}) \Psi_n = 0 \quad (4.19)$$

gdzie  $\mathbf{K}$  i  $\mathbf{M}$  są odpowiednio macierzą sztywności i macierzą mas dla płyty lub belki,  $\Psi_n$  są wektorami własnymi (postacie drgań) korespondujące z wartościami własnymi  $\omega_n = 2\pi f_n$  - gdzie  $f_n$  to częstotliwości drgań własnych. Rozwiązanie zagadnienia własnego przeprowadzono metodą Lanczos'a w celu uzyskania wektorów i wartości własnych.

#### 4.6.2 Model tłumienia

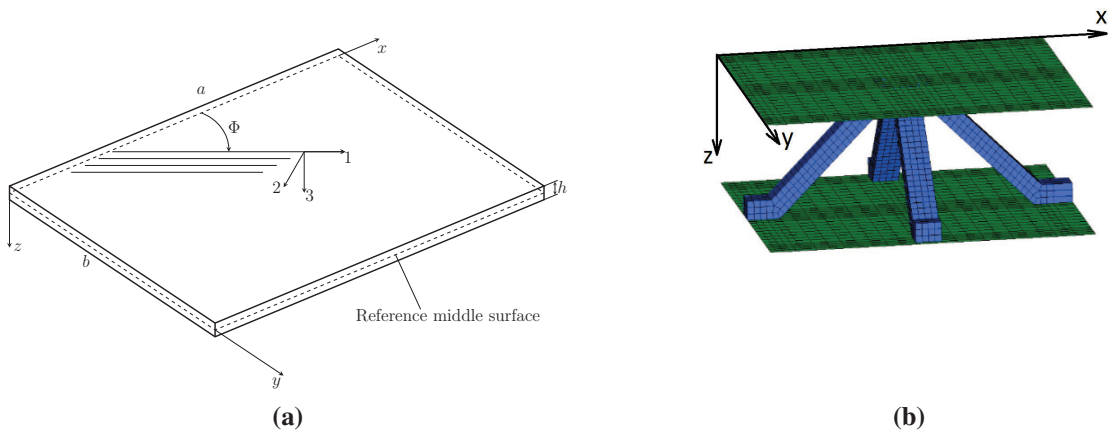
Zaproponowany model tłumienia oparty jest na energii odkształcenia sprężystego postaci drgań. Model ten został użyty w procesie identyfikacji materiałowych parametrów tłumienia warstwowej płyty laminatowej oraz do prognozowania wartości modalnego współczynnika strat dla belki przekładkowej z wypełnieniem kratownicowym. Belka przekładkowa składa się dwóch rodzajów składników rodzimych: laminatowych taśm użytych jako okładziny zewnętrzne, oraz aluminiowego rdzenia w postaci piramidalnej kratownicy. Jak miarę tłumienia wprowadza się współczynnik strat (SDC)  $\psi_n$  dla belki przekładkowej. Współczynnik ten zdefiniowany jest jako stosunek całkowitej energii rozproszonej  $\Delta U_n$  do maksymalnej energii odkształcenia sprężystego  $U_n$  zmagazynowanej w belce podczas jednego cyklu naprężenia dla  $n$ -tej postaci drgań:

$$\psi_n = \frac{\Delta U_n}{U_n} = 2\pi\eta_n \quad (4.20)$$

gdzie  $\eta$  oznacza modalny współczynnik strat.

#### Energia odkształcenia sprężystego

W bieżącej pracy zakłada się, iż całkowity współczynnik strat belki przekładkowej stanowi sumę współczynników strat dla poszczególnych składników rodzimych belki. W celu implementacji założonego modelu tłumienia użyto metody elementów skończonych (MES). Całkowitą energię odkształcenia sprężystego zmagazynowaną w belce przekładkowej dla danej postaci drgań, można zapisać jako (indeks postaci drgań pominięto dla



Rysunek 4.7: Struktury kompozytowe.

przejrzystości zapisu):

$${}^sU = {}^lU + {}^cU \quad (4.21)$$

gdzie  ${}^lU$  i  ${}^cU$  są energiami odkształcenia zmagazynowanymi odpowiednio w laminatowych okładzinach zewnętrznych i aluminiowej kratownicy. Energia odkształcenia zmagazynowana w pojedynczym elemencie skończonym  $e$  cienkiej laminatowej okładziny zewnętrznej, jest sumą składowych energii zmagazynowanych na poszczególnych kierunkach odkształcenia (Rys. 4.7)

$${}^lU^e = {}^lU_{11}^e + {}^lU_{22}^e + {}^lU_{12}^e \quad (4.22)$$

Dla elementu skończonego złożonego z  $r$  warstw, jego składowe energie wyrażone są jako:

$${}^lU_{11}^e = \sum_{k=1}^r {}^lU_{11,k}^e; \quad {}^lU_{22}^e = \sum_{k=1}^r {}^lU_{22,k}^e; \quad {}^lU_{12}^e = \sum_{k=1}^r {}^lU_{12,k}^e \quad (4.23)$$

gdzie  ${}^lU_{ij,k}^e$  ( $ij = 11, 22, 12$ ) jest energią zmagazynowaną w warstwie  $k$  elementu  $e$ , i wiąże składowe odkształcenia i naprężenia wyrażeniem:

$${}^lU_{ij,k}^e = \frac{1}{2} \int_{V_k^e} \varepsilon_{ij,k}^e \cdot \sigma_{ij,k}^e \cdot dV_k^e \quad (4.24)$$

gdzie  $V_k^e$  jest objętością elementu  $e$  dla warstwy  $k$ . Całkowita energia odkształcenia zmagazynowana w laminatowych okładzinach zewnętrznych, zbudowanych z  $M$  elementów skończonych wyrażona jest jako:

$${}^lU = {}^lU_{11} + {}^lU_{22} + {}^lU_{12} \quad (4.25)$$

gdzie:

$${}^lU_{11} = \sum_{e=1}^M {}^lU_{11}^e; \quad {}^lU_{22} = \sum_{e=1}^M {}^lU_{22}^e; \quad {}^lU_{12} = \sum_{e=1}^M {}^lU_{12}^e \quad (4.26)$$

Aluminiowa kratownica piramidalna jest głównie poddana działaniu naprężenia stycznego. Dlatego, energia odkształcenia zmagazynowana w elemencie skończonym  $p$  kratownicy, wyrażona jest jako:

$${}^cU^p = {}^cU_{xz}^p + {}^cU_{yz}^p \quad (4.27)$$

Całkowita energia odkształcenia postaciowego zmagazynowana w kratownicy zbudowanej z  $J$  elementów wyrażona jest jako:

$${}^cU = {}^cU_{xz} + {}^cU_{yz} \quad (4.28)$$

gdzie

$${}^cU_{xz} = \sum_{p=1}^J {}^cU_{xz}^p; \quad {}^cU_{yz} = \sum_{p=1}^J {}^cU_{yz}^p \quad (4.29)$$

Stąd, całkowita energia odkształcenia zmagazynowana w całej belce przekładkowej wyrażona jest jako:

$${}^sU = {}^lU_{11} + {}^lU_{22} + {}^lU_{12} + {}^cU_{xz} + {}^cU_{yz} \quad (4.30)$$

## Energia rozproszona

Energia rozproszona przez  $k$ -tą warstwę elementu skończonego  $e$  wyrażona jest jako:

$$\Delta^l U_k^e = \psi_{11,k}^l U_{11,k}^e + \psi_{22,k}^l U_{22,k}^e + \psi_{12,k}^l U_{12,k}^e \quad (4.31)$$

gdzie  $\psi_{ij,k}$  ( $ij = 11, 22, 12$ ) są parametrami tłumienia (parametry SDC) materiału poszczególnej warstwy  $k$  laminatu. Energia rozpraszana przez element  $e$  jest równa:

$$\Delta^l U^e = \sum_{k=1}^r \Delta^l U_k^e \quad (4.32)$$

Całkowita energia rozpraszana przez laminatowe okładziny zewnętrzne jest wyrażona jako:

$$\Delta^l U = \sum_{e=1}^M \Delta^l U^e \quad (4.33)$$

Analogicznie, energia rozproszona przez element  $p$  aluminiowej kratownicy obliczana jest jako:

$$\Delta^c U^p = \psi_{xz}^c U_{xz}^p + \psi_{yz}^c U_{yz}^p \quad (4.34)$$

Dla materiałów izotropowych  $\psi_{xz} = \psi_{yz} = \psi_G$ , więc Rów. 4.34 upraszcza się do:

$$\Delta^c U^p = \psi_G ({}^c U_{xz}^p + {}^c U_{yz}^p) \quad (4.35)$$

Całkowita energia rozproszona przez aluminiową kratownicę jest równa:

$$\Delta^c U = \sum_{p=1}^J \Delta^c U^p \quad (4.36)$$

Stąd, całkowita energia rozproszona przez belkę przekładkową jest równa:

$$\Delta^s U = \Delta^c U + \Delta^l U \quad (4.37)$$

Współczynnik strat dla belki przekładkowej odkształconej wg postaci drgań  $n$  ma następującą postać:

$${}^s \psi_n = \frac{\Delta^s U_n}{{}^s U_n} \quad (4.38)$$

Szczegółowy opis implementacji powyższego modelu tłumienia w belkach przekładkowych, habilitant zawarł w pracy [9]. Analogiczna procedura implementacji modelu tłumienia może zostać użyta dla warstwowych płyt laminatowych. W takim przypadku cały proces upraszcza się, jak do sytuacji pojedynczej okładziny zewnętrznej i przyjmuje się  ${}^c U = 0$  w Rów. 4.21. Przykład zastosowania powyższej procedury dla płyt laminatowych został opisany przez habilitanta w pracy [A.1].

### 4.6.3 Podsumowanie modelowania numerycznego

Głównym wkładem modelowania numerycznego w rozwój badań bezinwazyjnych jest skuteczna implementacja modelu tłumienia, zarówno do prognozowania wartości modalnych współczynników strat, jak i do identyfikacji materiałowych parametrów tłu-

mienia SDC. Zaproponowany model tłumienia zweryfikowany został na złożonych strukturach kompozytowych, jakimi są belki przekładkowe [9] oraz warstwowe płyty laminatowe. Modelowanie numeryczne wykonano przy pomocy oprogramowania ABAQUS.

## 4.7 Identyfikacja

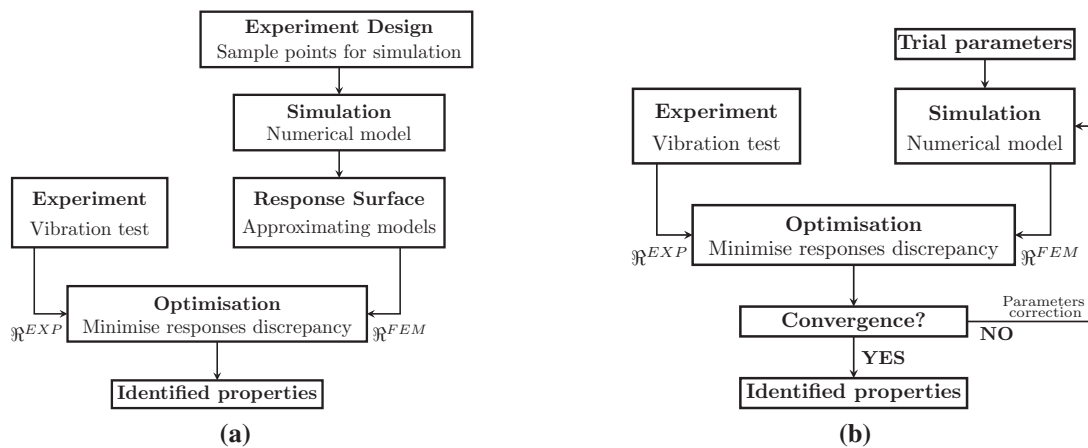
Ostatnią fazą procesu bezinwazyjnej identyfikacji jest opracowanie techniki odwrotnej. Polega to na wzajemnym sprzężeniu wszelkich osiągnięć badawczych w zakresie badań eksperymentalnych, lokalizacji defektów i modelowania numerycznego, poprzez zdefiniowanie zagadnienia optymalizacji. Proces techniki odwrotnej może być budowany dwojako: jako metoda pośrednia lub jako metoda iteracyjna. Na Rys. 4.8 schematycznie przedstawiono przebieg obu metod, które mają dwie wspólne cechy. Po pierwsze, obie metody wymagają eksperymentalnie pomierzonej wielkości stanowiącej odpowiedź struktury (płyty w bieżącym opracowaniu) oraz tożsamą wielkość obliczoną na podstawie modelu numerycznego, odpowiednio oznaczone jako  $\mathfrak{R}^{EXP}$  and  $\mathfrak{R}^{FEM}$ . Odpowiedź tą nazywamy zmienną wyjściową. Po drugie, problem optymalizacji należy zdefiniować w oparciu o funkcję celu. Jednak sama funkcja celu określona jest w inny sposób dla obu metod. W poniższych paragrafach podsumowano główne założenia i cele obu wymienionych metod oraz wykazano wkład habilitanta w rozwój bezinwazyjnej techniki odwrotnej.

### 4.7.1 Techniki odwrotne

Wyznaczanie właściwości sprężystych (tzw. stałych inżynierskich) kompozytów warstwowych (płyt lub belek) jest zadaniem skomplikowanym ze względu na anizotropowy charakter kompozytów. W najprostszym przypadku, takim jak płyta ortotropowa będąca w płaskim stanie naprężenia, wymagane są cztery niezależne stałe inżynierskie w celu opisania zależności naprężenie-odkształcenie. Co następuje, cztery konwencjonalne testy statyczne są niezbędne do wyznaczenia wartości stałych inżynierskich. Zdecydowanie odmienna sytuacja ma miejsce przy zastosowaniu techniki odwrotnej, gdyż pozwala ona na wyznaczenie wielu nieznanymi właściwościami materiałowymi bazując na zmiennej wyjściowej lub zbiorze zmiennych wyjściowych (np. częstotliwości rezonansowe) pomierzonych w jednym teście fizycznym. Zmienna wyjściowa musi być czuła na zmiany zmiennych wejściowych, które stanowią poszukiwane właściwości materiałowe będące przedmiotem optymalizacji. Zśród wielu możliwości wyboru zmiennej wyjściowej, uznaje się, że parametry modalne stanowią najbardziej adekwatną grupę zmiennych wyjściowych do zastosowania w bezinwazyjnej technice odwrotnej. Parametrami modalnymi są częstotliwości rezonansowe, modalne współczynniki strat oraz postacie drgań własnych. Ich zaletą jest fakt, że mogą być użyte do wyznaczania właściwości sprężystych i dynamicznych oraz do identyfikacji defektów. Zmienne wyjściowe oznaczone jako  $\mathfrak{R}$  stanowią częstotliwości rezonansowe w przypadku identyfikacji stałych inżynierskich oraz defektów. W przypadku identyfikacji parametrów tłumienia zmiennymi wyjściowymi są modalne współczynniki strat.

### 4.7.2 Pośrednia technika odwrotna

Motywacją do opracowania pośredniej techniki odwrotnej była konieczność skrócenia czasu obliczeń dla coraz większych modeli numerycznych. Osiągnięto to poprzez



Rysunek 4.8: Techniki odwrotne: a) pośrednia; b) iteracyjna.

generowanie planu doświadczeń DoE (z ang. design of experiments) i wykonanie obliczeń MES jedynie w punktach próbnym planu. Cała procedura przebiega następująco (Rys. 4.8a). W pierwszym kroku generowany jest plan doświadczeń w zależności od liczby zmiennych wejściowych  $l$  (parametry identyfikacji) i liczby prób  $p$ . Następnie wykonuje się analizy numeryczne w punktach próbnym planu w celu obliczenia pożądanych zmiennych wyjściowych badanej struktury. W trzecim kroku, wyniki obliczeń ze wszystkich punktów próbnym użyte są do wyprowadzenia prostych funkcji wielomianowych za pomocą metody powierzchni odpowiedzi RSM (z ang. response surface methodology). Funkcje te, za zdanie mają oszacowanie wartości zmiennej wyjściowej poprzez zmianę parametrów wejściowych. Eliminuje to potrzebę wykonywania obliczeń numerycznych po każdej zmianie wartości parametrów wejściowych. Równolegle wykonywany jest pomiar laboratoryjny w celu pozyskania zmiennej wyjściowej rzeczywistej struktury będącej przedmiotem identyfikacji. Wyznaczenie wartości poszukiwanych zmiennych wejściowych jest wykonywane w ostatnim kroku w procesie optymalizacji. W tym celu minimalizuje się funkcję celu wyrażoną, jako błąd względny pomiędzy zmiennymi wyjściowymi pomierzonymi laboratoryjnie i odpowiadającymi im zmiennymi wyjściowymi obliczonymi numerycznie.

### Metoda powierzchni odpowiedzi

Metoda powierzchni odpowiedzi RSM stanowi kombinację metod matematycznych i statystycznych w celu zbudowania modelu empirycznego [A.5]. Poprzez precyzyjne wygenerowanie planu doświadczeń, celem RSM jest oszacowanie płaszczyzny odpowiedzi, na której wartość wpływa zbiór niezależnych zmiennych (zmiennie wejściowe). Plan doświadczeń stanowi serię analiz, zwanych próbami, w których dokonuje się zmian wartości zmiennych wejściowych w celu określenia charakteru zmian płaszczyzny odpowiedzi. Zmiennie wejściowe oznaczone są jako  $x_1, x_2, \dots, x_l$ . Zakłada się, iż płaszczyzna odpowiedzi oznaczona jako  $y$ , stanowi zmienną losową. Początkowy związek pomiędzy płaszczyzną odpowiedzi a zmiennymi wejściowymi nie jest znany, lecz zakłada się jego aproksymację jako:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_l) \quad (4.39)$$

Pierwszym krokiem w metodzie RSM jest założenie odpowiedniej funkcji  $y$ , aproksymującej obliczone w punktach próbnym wartości zmiennej wyjściowej. Najbardziej pożą-

danymi funkcjami aproksymującymi są wielomiany pierwszego i drugiego rzędu, których dziedzinę zawęża się do zamkniętego zbioru wartości parametrów wejściowych. Zastosowanie RSM wraz ze szczegółowym opisem metody zostało przedstawione przez habilitanta w publikacjach [10, 11, 12], [A.1].

### Plan doświadczeń

Istotną rolę w metodzie RSM pełni generowanie planu doświadczeń (DoE). Celem DoE jest wyselekcjonowanie punktów próbnych, w których zostanie obliczona odpowiedź. Podstawą jest wygenerowanie macierzy punktów w formie [A.6]:

$$\mathbf{X}^p = \left( x_j^{(i)} \right)_{i=1 \dots p, j=1 \dots l} \quad (4.40)$$

gdzie  $p$  oznacza liczbę prób a  $l$  oznacza liczbę zmiennych wejściowych. Początkową informacją do wygenerowania planu doświadczeń jest liczba zmiennych wejściowych  $l$  (wielkości fizyczne będące przedmiotem identyfikacji) i liczba prób  $p$ . Punkty próbne planu doświadczeń są rozmieszczone w ograniczonej przestrzeni  $l$  wymiarowej w sposób jak najbardziej regularny. Do tego celu habilitant wykorzystał metodę Audze-Eglais oraz metodę Latin Hypercube Technique i przedstawił wyniki ich zastosowania odpowiednio w pracach [12, 11] oraz [A.1]

#### 4.7.3 Iteracyjna technika odwrotna

W metodzie iteracyjnej techniki odwrotnej poszukuje się optymalnego zbioru zmiennych wejściowych w sposób iteracyjny. Metoda ta przebiega w sposób następujący (Rys. 4.8b). W pierwszym kroku przeprowadza się pomiar laboratoryjny wielkości fizycznej stanowiącej zmienną wyjściową. W drugim kroku opracowuje się model numeryczny badanej struktury. Następnie zakłada się wartości zmiennych wejściowych stanowiących wartości początkowe i dla tych wartości obliczane są numeryczne zmienne wyjściowe. Następnie tworzona jest funkcja celu. Uaktualniony zbiór zmiennych wejściowych używany jest z procedury optymalizacji funkcji celu, a następnie użyty jest w kolejnym cyklu obliczeń. Optymalny zbiór zmiennych wejściowych stanowią zmienne wyjściowe spełniające określoną normę.

#### 4.7.4 Funkcja celu

Funkcja celu wyrażona jest jako błąd względny między pomierzonymi zmiennymi wyjściowymi  $\mathfrak{R}^{EXP}$  i ich odpowiednikami obliczonymi numerycznie  $\mathfrak{R}^{FEM}$ :

$$\Theta(\mathbf{x}) = \sum_{n=1}^I w_n \cdot \left[ \frac{(\mathfrak{R}^{EXP})^2 - (\mathfrak{R}^{FEM}(\mathbf{x}))^2}{(\mathfrak{R}^{EXP})^2} \right]^2 \quad (4.41)$$

gdzie  $\mathbf{x}$  stanowi wektor poszukiwanych zmiennych wejściowych;  $I$  jest całkowitą liczbą zmiennych wyjściowych;  $w_n$  liczbą całkowitą przyjmującą wartości 1 lub 0 i jest używana w celu selekcji zmiennych wyjściowych użytych do zbudowania funkcji celu. Przy czym w zastosowaniu do pośredniej techniki odwrotnej wartości  $\mathfrak{R}^{FEM}(\mathbf{x})$  uzyskiwane są z wielomianów aproksymujących. Natomiast dla iteracyjnej techniki odwrotnej wartości  $\mathfrak{R}^{FEM}(\mathbf{x})$  uzyskiwane są z kolejnej analizy numerycznej. Znacząca poprawa skuteczności identyfikacji może być osiągnięta poprzez odpowiednią selekcję zmiennych wyjściowych



wchodzących w skład funkcji celu. Zjawisko to zostało opisane przez habilitanta w pracach [12], [A.1].

#### 4.7.5 Parametry identyfikacji

Zmienne wejściowe stanowią poszukiwane właściwości materiałowe, które należy wyznaczyć w procesie identyfikacji. Parametry te tworzą wektor niewiadomych  $\mathbf{x}$ . Wektor  $\mathbf{x}$  ma rozmiar  $l$  i jest zapisany ogólnie jako:  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_l]$ . Rozmiar  $l$  zależy od problemu do rozwiązania:

- W przypadku identyfikacji stałych inżynierskich wektor  $\mathbf{x}$  ma rozmiar  $l = 4$  i zapisany jest w postaci  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4] = [E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}]$ , co zostało zdefiniowane przez habilitanta w pracach [1, 10, 11, 12]. Wielkości  $E_1, E_2, G_{12}$ , i  $\nu_{12}$  są stałymi inżynierskimi pojedynczej warstwy płyty laminatowej
- W przypadku identyfikacji materiałowych parametrów tłumienia wektor  $\mathbf{x}$  ma rozmiar  $l = 3$  i zapisany jest w postaci  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3] = [\psi_{11}, \psi_{12}, \psi_{22}]$ , gdzie wielkości  $\psi_{11}, \psi_{12}, \psi_{22}$ , są parametrami tłumienia materiału użytego na pojedynczą warstwę laminatu, jak zdefiniowano przez habilitanta w pracach [A.1], [9].

#### 4.7.6 Metody optymalizacji

W celu zminimalizowania funkcji celu, należy zbudować następujące zadanie optymalizacji:

$$\min \Theta(\mathbf{x}) \quad (4.42)$$

Z narzuconymi ograniczeniami w postaci:

$$g_j(\mathbf{x}) > 0, \quad j = 1, \dots, l \quad (4.43)$$

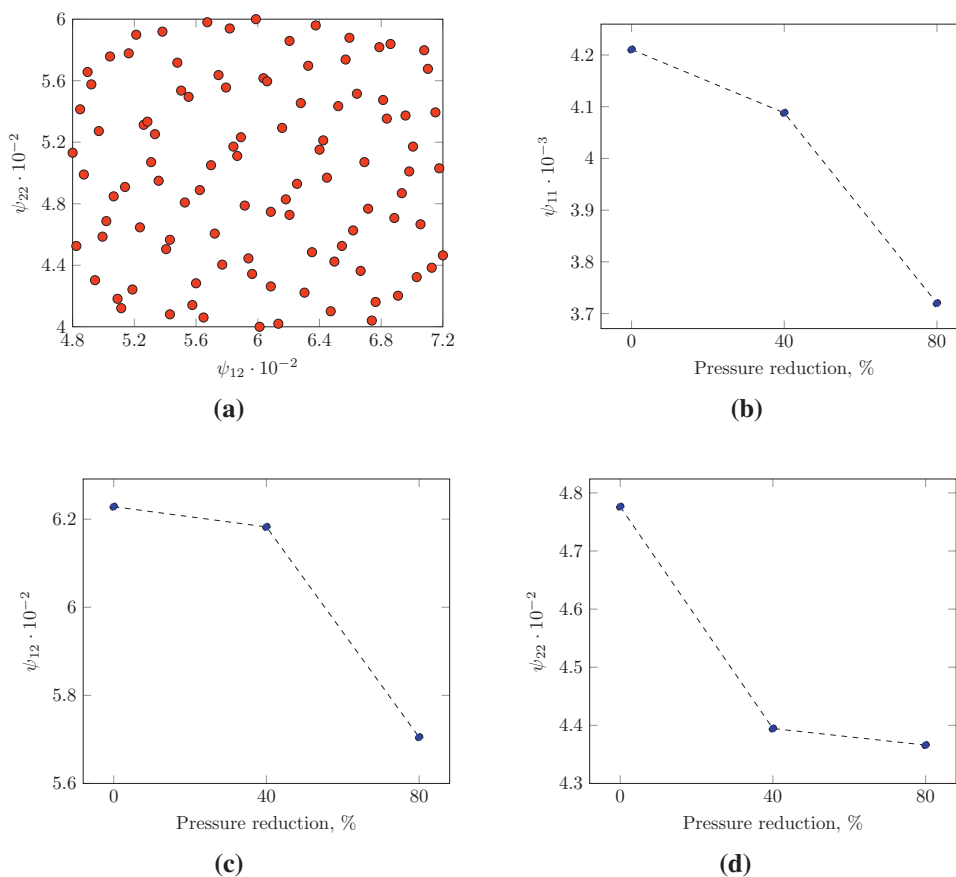
$$\mathbf{x}_i^L \leq \mathbf{x}_i \leq \mathbf{x}_i^U, \quad i = 1, \dots, l \quad (4.44)$$

gdzie  $\mathbf{x}_i^L$  i  $\mathbf{x}_i^U$  są dolną i górną granicą wartości parametrów optymalizacji. Dodatkowe ograniczenia  $g_j$  mogą zastać zdefiniowane dla konkretnych przypadków.

Rozwiązanie zadania optymalizacji może być wykonane z wykorzystaniem wielu dostępnych metod. Habilitant zastosował metody losowego poszukiwania minimum globalnego [1, 10, 11, 12], lokalną metodę gradientową [12], oraz metodę Hooke-Jeeves [A.1]. Wybrane rezultaty będące efektem prac habilitanta nad procesem identyfikacji zaprezentowano na Rys. 4.9.

#### 4.7.7 Identyfikacja - podsumowanie

Zaproponowana bezinwazyjna technika odwrotna posłużyła do skutecznej identyfikacji stałych inżynierskich oraz parametrów tłumienia warstwowej płyty laminatowej. Powyższe dotyczy zarówno techniki odwrotnej pośredniej, jak i iteracyjnej. W przypadku techniki odwrotnej pośredniej zastosowano dwie metody planowania doświadczeń w procedurze poszukiwania płaszczyzny odpowiedzi. Zdefiniowane zadania optymalizacji, rozwiązano metodami gradientowymi oraz bez gradientowymi. W wyniku badań poświęconych technice odwrotnej i identyfikacji, opublikowano 10 artykułów naukowych, w tym 7 z nich jest indeksowanych w bazie Web of Science.



**Rysunek 4.9:** Wybrane wyniki identyfikacji: a) DoE; b) ÷ d) zidentyfikowane materiałowe parametry tłumienia SDC w zależności od wartości podciśnienia.

## 4.8 Wnioski i dalsze prace

Wkład habilitanta w rozwój bez inwazyjnej techniki odwrotnej w procesie identyfikacji właściwości sprężystych, parametrów tłumienia oraz defektów, przedstawiono w Rozdziale 4. Główny nacisk położono na analizę warstwowych belek i płyt laminatowych. Z punktu widzenia przeprowadzenia testów laboratoryjnych, ustalono spójną konfigurację stanowiska pomiarowego do przeprowadzenia pomiarów na użytek identyfikacji właściwości materiałowych oraz defektów. Wykazano, że najbardziej efektywna konfiguracja, składa się z wibrometru laserowego, szklanej komory próżniowej oraz piezoelektrycznego dysku o małej masie lub głośnika modalnego do wzbudzania wibracji.

W odniesieniu do badań poświęconych metodom identyfikacji defektów, przedstawiono kilka metod opartych na analizie zmian w postaciach drgań własnych belek. Do tego celu zastosowano analizę krzywizny postaci drgań oraz transformatę falkową. Metody te zostały z powodzeniem zastosowane do lokalizacji strefy uszkodzenia w izotropowych i laminatowych belek warstwowych. Ponadto, zaproponowano wskaźnik skuteczności lokalizacji uszkodzeń dla określonej grupy funkcji falkowych.

W obszarze prac badawczych poświęconych modelowaniu numerycznemu, wdrożono model tłumienia do analizy dynamicznej laminatowych płyt kompozytowych oraz belek przekładkowych z wypełnieniem kratownicowym. Model tłumienia bazuje na zmianach energii sprężystej odkształcenia. Powyższy model zaimplementowany został przy użyciu oprogramowania ABAQUS. Pozwoliło to z powodzeniem przewidzieć modalne współ-

czynniki strat zarówno dla płyt laminatowych, jak i dla belek przekładkowych. Model tłumienia zastosowano również w procedurze identyfikacji do oszacowania parametrów tłumienia pojedynczej warstwy płyty laminatowej.

Osiągnięcia badawcze i naukowe habilitanta w zakresie pomiarów laboratoryjnych oraz modelowania numerycznego wykorzystano do zbudowania bezinwazyjnej techniki odwrotnej. Korzystając z techniki odwrotnej wykonano identyfikację stałych inżynierskich (parametry sprężyste) oraz parametrów tłumienia warstwowej płyty laminatowej. Do wykonania powyższego, użyto zarówno techniki odwrotnej pośredniej, jak i iteracyjnej. Jako wiodący wkład habilitanta w rozwój bezinwazyjnych metod identyfikacji uznaje się skuteczną identyfikację parametrów tłumienia w warunkach zbliżonych do próżni. W rezultacie znacznie zmniejszono wpływ tłumienia aerodynamicznego na oszacowane parametry tłumienia materiału.

Habilitant planuje dalsze prace badawcze w zakresie bezinwazyjnych technik odwrotnych. W szczególności, na uwagę zasługuje zagadnienie ekwiwalentnego modelowania struktur przekładkowych z wypełnieniem kratownicowym. W tym celu planuje się zastosowanie tzw. metod modelowania koncepcyjnego, które również wymagają rozwiązania zadania optymalizacji. Planowana jest również kontynuacja prac badawczych nad identyfikacją defektów w strukturach kompozytowych. W szczególności zakłada się rozwój procedury techniki odwrotnej w procesie identyfikacji redukcji sztywności w wyniku ujawnienia defektu.

## 5 Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

### 5.1 Modelowanie strefy uszkodzonej

W obszarze badań naukowych habilitanta znajdują się zagadnienie identyfikacji redukcji sztywności wybranych elementów konstrukcji (np. belek, płyt) w wyniku ujawnienia defektu. W tym celu należy określić sposób modelowania defektu a następnie w oparciu o zlokalizowany obszar uszkodzenia zbudować procedurę techniki odwrotnej. W wyniku powyższego osiąga się poziom 3 identyfikacji defektów. Dotychczasowe osiągnięcia habilitanta pozwoliły na skuteczne oszacowanie redukcji sztywności w belkach izotropowych i warstwowych belkach laminatowych [A.7].

W przypadku belek izotropowych strefa uszkodzona symulowana jest jako redukcja grubości przekroju. Z tego względu w modelu numerycznym belek nieuszkodzonych (wolnych od defektu) zakładano stałą wartość sztywności na zginanie  $EI$  we wszystkich elementach skończonych. W belkach uszkodzonych natomiast, w obszarze zlokalizowanego uprzednio defektu, obniżano wartość sztywności na zginanie dla elementów znajdujących w strefie uszkodzenia. Redukcja sztywności polegała na zmniejszaniu grubości  $h$  elementów skończonych. Grubość  $h$  stanowiła następnie parametr wejściowy w procesie identyfikacji rzeczywistej redukcji sztywności, przy czym założono, że zmiana grubości elementów jest jednakowa dla wszystkich elementów w strefie uszkodzenia.

W przypadku warstwowych belek laminatowych strefa uszkodzenia uzyskiwana była za pomocą nisko-prędkościowego uderzenia o zadanej energii. W ten sposób otrzymano strefę uszkodzoną w postaci delaminacji warstw laminatu i tym samym degradacji

macierzy sztywności laminatu. Z tego względu wprowadzono współczynnik redukcji sztywności  $K$ . W belkach nieuszkodzonych sztywność na zginanie wyrażona jest jako  $D_{11}^* \cdot K$  (dla  $K = 1$ ), podczas gdy w belkach uszkodzonych, obniżona sztywność określona jest jako  $D_{11}^* \cdot K$  (dla  $K < 1$ ). Współczynnik  $K$  stanowił następnie parametr wejściowy w procesie identyfikacji rzeczywistej redukcji sztywności.

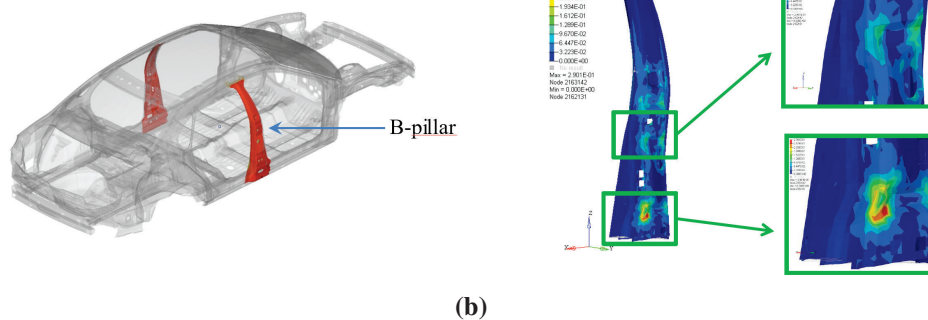
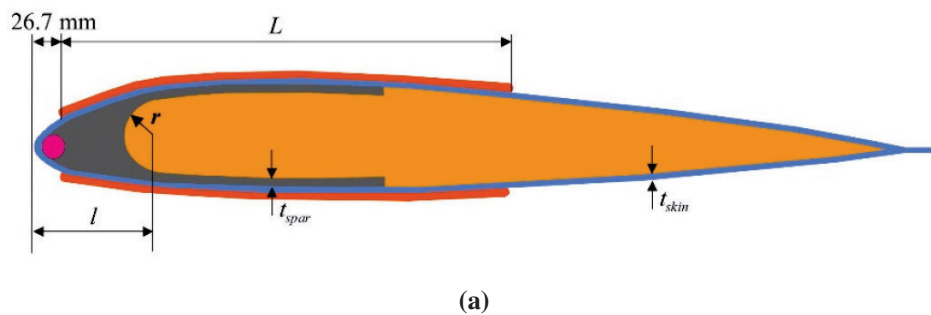
W odniesieniu do procedury techniki odwrotnej (patrz paragraf 4.7.5) można następnie zdefiniować parametry identyfikacyjne jako:

- W przypadku identyfikacji redukcji sztywności poprzez ujawnienie defektu w belkach izotropowych, wektor  $\mathbf{x}$  ma rozmiar  $l = 1$  i zapisany jest w postaci  $\mathbf{x} = [x_1] = [h]$ , gdzie  $h$  jest grubością belki w miejscu występowania defektu, jak zdefiniowano przez habilitanta w pracy [A.4]. W przypadku warstwowych belek laminatowych wektor  $\mathbf{x}$  zapisany jest w postaci  $\mathbf{x} = [x_1] = [K]$ , gdzie  $K$  jest współczynnikiem redukcji sztywności, jak zdefiniowano przez habilitanta w pracy [A.7].

## 5.2 Modelowanie koncepcyjne i optymalizacja struktur kompozytowych

Dodatkowa działalność naukowa i badawcza habilitanta jest powiązana z zagadnieniami mechaniki laminatów warstwowych oraz optymalizacją. W obszarze tym, habilitant skupia się nad metodami optymalizacji w procesie projektowania konstrukcji kompozytowych. W tym celu użyte zostały metody optymalizacji pośredniej do zaprojektowania kompozytowej łopaty śmigłowca poddanej aktywnej redukcji drgań [A.10,A.11].

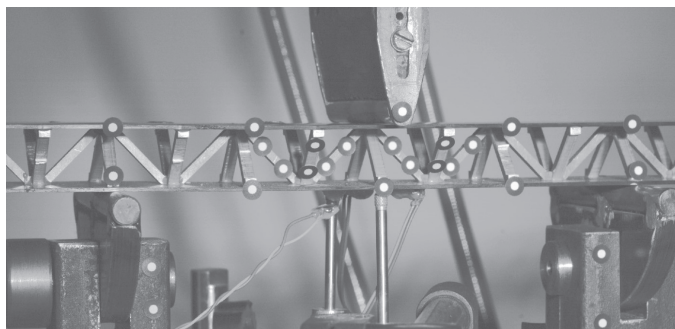
Ponadto, będąc zatrudnionym na Uniwersytecie Florenckim, na wydziale Inżynierii Mechanicznej i Technologii (na okres 9 miesięcy), głównym celem badawczym habilitanta była implementacja metod modelowania koncepcyjnego z uwzględnieniem struktur laminatowych. W fazie koncepcyjnej procesu projektowania konstrukcji lub pojazdów, szybkie i niezawodne techniki modelowania mają zasadnicze znaczenie dla całościowego oszacowania odpowiedzi statycznej i dynamicznej analizowanej konstrukcji (Rys. 5.1). Przy pomocy takich metod wczesne oszacowanie wpływu np. hałasu, drgań i innych niedogodności (np. przyspieszeń) danej konstrukcji na otoczenie, może ujawnić wiele alternatyw projektowych, a także przyczynić się do lepszego wyboru założeń początkowych projektu. Metody modelowania koncepcyjnego są uznawane za ważną część procesu analizy strukturalnej w inżynierii lądowej (np. w projektowaniu mostów) oraz w branży motoryzacyjnej. Metody te powinny być w stanie zapewnić naukowcom i konstruktorom skrócenie czasu projektowania, niezależnie od rodzaju zastosowanego materiału. Aktualnie istniejące metody modelowania koncepcyjnego są bardzo efektywne w zastosowaniu do materiałów izotropowych. Trudności pojawiają się, gdy postawione wymagania obejmują analizę laminatów warstwowych. Ich anizotropowe zachowanie sprawia, że analiza strukturalna i proces optymalizacji są trudniejsze niż w przypadku materiałów izotropowych. Zdanie jest to jest tym trudniejsze, iż analizowaną konstrukcję należy zredukować do zagadnienia jednowymiarowego. Aby rozwiązać ten problem, należy np. zdefiniować multidyscyplinarne zadanie optymalizacji. Dodatkowo uwzględnić należy modelowanie jednowymiarowe elementów konstrukcji wykonanych z laminatów warstwowych. Do tego celu wykorzystać można modelowanie z zastosowaniem wariacyjnej metody asymptycznej (z ang. Variational Asymptotic Method) [A.9].



**Rysunek 5.1:** Wybrane przykłady dodatkowych osiągnięć habilitanta: a) optymalizacja przekroju łopaty śmigłowca; b) modelowanie koncepcyjne.

### 5.3 Metody weryfikacyjne

Osobne działania badawcze, będące w obszarze zainteresowań habilitanta, to poszukiwanie odpowiednich metod weryfikacyjnych dla wyników otrzymywanych metodami bezinwazyjnymi. W szczególności, poszukuje się takich metod analizy statycznej konstrukcji aby pozwalały one na wyznaczenie właściwości sprężystych w sposób nieniszczący ze zredukowaną ilością czujników pomiarowych. Na chwilę obecną zrealizowano pomiary modułu sprężystości postaciowej belki przekładkowej z wypełnieniem kratownicowym (Rys. 5.2). Do tego celu użyto optycznego systemu pomiarowego Aramis. Rezultaty pomiarów habilitant przedstawił w pracy [A.8].



**Rysunek 5.2:** Wybrane przykłady dodatkowych osiągnięć habilitanta: badania statyczne belki przekładkowej z wypełnieniem kratownicowym.

### **Dodatkowe pozycje bibliograficzne:**

- A.1 Wesolowski Miroslaw**, Barkanov Evgeny, 2018, Damping properties identification of a laminated plate in a vacuum chamber, *Journal of Sound and Vibration*, in review (submission number *JSV – D – 18 – 01770*).
- A.2 Reddy J.N.**, *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells. Theory and Analysis. Second Edition*, CRC Press LLC, 2004.
- A.3 Rucevskis Sandris**, **Wesolowski Miroslaw**, 2010, Identification of damage in a beam structure by using mode shape curvature squares *Shock and Vibration*, Vol. 17, Issue 4-5, pp.601-610, (WoS).
- A.4 Rucevskis Sandris**, **Wesolowski Miroslaw**, Chate Andris, 2009, Vibration-based damage detection in a beam structure with multiple damage locations, *Aviation*, Vol. 13, Issue 3, pp. 61-71, (Scopus).
- A.5 Toropov V. V.**, **Filatov A. A.**, **Polynkin A. A.**, 1993 Multiparameter structural optimization using fem and multipoint explicit approximations, *Structural Optimisation*, Vol. 6, pp.7-14.
- A.6 M.**, **Iooss B.**, **Asserin O.**, **Loredo A.**, 2010, Latin hypercube sampling with inequality constraints, *Advances in Statistical Analysis*, Vol. 94, pp.325-339.
- A.7 Rucevskis Sandris**, **Wesolowski Miroslaw**, Chate Andris, 2009, Vibration-based damage identification in laminated composite beams, *Scientific Proceedings of Riga Technical University, Section "Construction Science"*, series 2, Vol. 10: ISSN 1407-7329 , pp.100-113.
- A.8 Wesolowski Miroslaw**, Ludewicz Jakub, Domski Jacek, Zakrzewski Mateusz, 2017, Shear properties evaluation of a truss core of sandwich beams, *IOP Conference Series-Materials Science and Engineering*, Vol. 251, Article Number: 012085, (WoS).
- A.9 Wesolowski Miroslaw**, Mihaylova Pavlina, Pratellesi Alessandro, 2011, Laminated composites optimization in a NVH analysis of vehicles, Poster presentation and Book of Abstracts of the 22nd SICOMP Conference on Manufacturing and Design of Composites, Gothenburg, Sweden.
- A.10 Kovalovs Andrejs**, Barkanov Evgeny, Rucevskis Sandris, **Wesolowski Miroslaw**, Modeling and Design of a Full-Scale Rotor Blade with Embedded Piezocomposite Actuators, 2017, *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 53, Issue 2, pp. 179-192, (WoS).
- A.11 Kovalovs Andrejs**, Barkanov Evgeny, Rucevskis Sandris, **Wesolowski Miroslaw**, Optimisation Methodology of a Full-Scale Active Twist Rotor Blade, 2017, *Procedia Engineering*, Vol. 178, pp. 85-95, (WoS).

*Wesolowski*