



---

**POLITECHNIKA POZNAŃSKA**

---

ROZPRAWA DOKTORSKA

**Nieniszczące metody oceny połączeń hybrydowych  
kompozytów polimerowych**

**mgr inż. Jagoda NOWAK-GRZEBYTA**

Promotor:  
**prof. dr hab. Ewa STACHOWSKA**

Promotor pomocniczy:  
**dr inż. Monika KNITTER**

Poznań, 2023



Rozprawa doktorska została zrealizowana w ramach uczestnictwa w projekcie *Interdyscyplinarne Studia Doktoranckie „NanoBioTech”*, realizowanym wspólnie przez trzy jednostki:

- Politechnikę Poznańską,
- Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego w Poznaniu,
- Instytut Chemii Bioorganicznej Polskiej Akademii Nauk,

w ramach Umowy o dofinansowanie nr POWR.03.02.00-00-I011/16.

Projekt *Interdyscyplinarne Studia Doktoranckie „NanoBioTech”* jest współfinansowany przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach Programu Operacyjnego Wiedza Edukacja Rozwój 2014 – 2020.



## *Podziękowania*

*Moje serdeczne podziękowania kieruję do prof. dr hab. Ewy Stachowskiej oraz dr Fransa Meijera za propozycję tematu pracy, opiekę i współpracę naukową oraz okazaną pomoc na wszystkich etapach powstawania pracy.*

*Osobne podziękowania składam: prof. dr hab. inż. Tomaszowi Sterzyńskiemu za wsparcie, cenne wskazówki oraz dyskusje, Koleżankom i Kolegom z Zakładu Tworzyw Sztucznych, a także wszystkim pozostałym osobom, które przyczyniły się do powstania tej pracy.*

### *Podziękowania za pomoc w przygotowaniu próbek*

*Wypraski polimerowe opisane w podrozdziale 8.2 oraz próbki opisane w podrozdziale 8.1 zostały wykonane przez dr hab. inż. Karola Bułę z Zakładu Tworzyw Sztucznych na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej.*

*Prefabrykaty do produkcji próbek opisanych w podrozdziale 8.3 zostały przygotowane przez dr inż. Oliwię Trzaską z Katedry Inżynierii Elementów Lekkich, Odlewnictwa i Automatyki Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej.*

*Granulat wykorzystany do produkcji jednego z rodzajów próbek opisanych w rozdziale 8.4 otrzymano od dr hab. inż. Doroty Czarneckiej-Komorowskiej z Zakładu Tworzyw Sztucznych na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej.*

## Streszczenie

W niniejszej pracy analizowano możliwość zastosowania nieniszczącej metody badawczej cyfrowej laserowej wibrometrii holograficznej do wykrywania defektów w połączeniach polimer-metal wyłącznie adhezyjnych, adhezyjnych i mechanicznych oraz adhezyjnych z warstwą pośrednią.

Ocenie poddano połączenia polimerów z metalami, w których częścią metalową – dobrze przenoszącą drgania – była stal DC04 lub aluminium AW-6061 albo AW-5754, a częścią polimerową poliamid 6 (PA6), poliamid 6 z 10-procentowym dodatkiem miki (PA6/10M) lub talku (PA6/10T) (Tarnamid T-27, Grupa Azoty; Mica 30, Talc Extra 10, Aurum Chemicals, Katowice, Polska), polilaktyd (PLA, Ingeo Biopolymer 6400D), polifluorek winylidenu (PVDF, Arkema Kynar Flex 3312 C), poliwęglan (PC, Lotte Advanced Materials Infino S.C.-1220UR) lub mieszanina polietylenu i poliamidu (LDPE/PA6) z różnym udziałem kompatybilizatora PE-g-MAH.

Połączenie obu materiałów było realizowane poprzez złącze adhezyjne uzyskane poprzez proces wtryskiwania lub prasowanie na gorąco przy użyciu prasy hydraulicznej. Badaniom poddano także połączenia z warstwą pośrednią w postaci kleju epoksydowego. Oceniano również połączenie adhezyjno-mechaniczne uzyskane poprzez nawiercenie otworów w stalowej płycie wypełnionych tworzywem polimerowym w procesie wtryskiwania.

W standardowych badaniach wibrometrycznych podczas pomiaru widoczna jest tylko jedna strona próbki. Na potrzeby badań prowadzonych w ramach pracy doktorskiej, skonstruowano stanowisko pomiarowe umożliwiające jednoczesną obserwację obu stron złącza (polimerowej i metalowej) w trakcie rejestracji drgań w czasie rzeczywistym.

Zaobserwowano istotne różnice w uzyskanych rozkładach drgań mierzonych z nanometryczną osiową zdolnością rozdzielczą dla połączeń bez i z defektem. Wady połączeń uwidaczniały się poprzez lokalną zmianę amplitudy i fazy drgań w miejscu występowania rozwarstwienia. Umożliwiało to wykrycie i lokalizację ukrytych defektów złącza. Amplituda wzbudzonych drgań, nieprzekraczająca 40 nm, gwarantowała nieniszczący charakter badań.

Określono również prędkość fal Lamba propagujących się w części metalowej i polimerowej badanych próbek w zakresie niskich częstotliwości ultradźwiękowych. W przypadku częstotliwości wzbudzenia do 30 kHz, zaobserwowano propagacje wyłącznie antysymetrycznych fal Lamba zerowego rzędu  $A_0$ .

Zbadano również właściwości transmisyjne połączeń dla niskich częstotliwości wzbudzenia pod kątem: zakresu częstotliwości, dla którego możliwa była obserwacja regularnych fal Lamba, wartości amplitud fal Lamba oraz prędkości ich propagacji w zależności od częstotliwości wzbudzenia. Wykazano, że właściwości te zmieniają się w przypadku wystąpienia defektu połączenia. Nawet jeśli defektu nie można było zlokalizować za pomocą cyfrowej wibrometrii holograficznej, nadal na podstawie różnic krzywych dyspersyjnych możliwe było stwierdzenie, czy połączenie polimer-metal było uszkodzone.

Potwierdzenia poprawności tego, dotąd niestosowanego podejścia, dokonano za pomocą innej, niezależnej metody, jaką jest szerografia.

Wyniki badań pokazały, że użycie cyfrowej laserowej wibrometrii holograficznej pozwala na skuteczne wykrywanie ukrytych defektów złączy polimer-metal. Na ich podstawie uzyskuje się również informacje o podatności próbek z połączeniem polimer-metal na wymuszenie drgań w danym zakresie częstotliwości wzbudzenia. Nieniszczący charakter metody, umożliwia ponadto poddanie próbek kolejnym badaniom. Pomiar wibrometryczny są krótkie, a podstawowe wyniki uzyskuje się w czasie rzeczywistym, co jest ważnym czynnikiem przy rutynowym testowaniu komponentów i ewentualnym zastosowaniu tej metody w kontroli produkcji.

## Abstract

In the paper, the possibility of using digital holographic vibrometry (DHV) as a non-destructive research method to detect debonding areas in polymer-metal laminates connected only adhesively, adhesively with additional mechanical interlocks or with glue layer was examined.

Polymer-metal laminates made of various kinds of polymers and metals were tested – as a metal part: DC04 steel, aluminum AW-6061 or AW-5754 were used; as a polymer part: polyamide 6 (PA6), polyamide 6 with the 10% addition of mica (PA6/10M) or talc (PA6/10T) (Tarnamid T-27, Grupa Azoty; Mica 30, Talc Extra 10, Aurum Chemicals, Katowice, Poland), polylactide (PLA, Ingeo Biopolymer 6400D), polyvinylidene fluoride (PVDF, Arkema Kynar Flex 3312 C), polycarbonate (PC, Lotte Advanced Materials Infino S.C.-1220UR) or a polyethylene/polyamide blends (LDPE/PA6) with different value of PE-g-MAH compatibilizer.

Samples with the connection provided by pure adhesion or adhesion reinforced by mechanical interlocks (two or three holes drilled in the steel plates) made resp. by compression molding and by injection molding, as well as the one made with an epoxy glue interlayer were studied.

In the standard holographic vibrometric set-up only one side of the sample can be seen during a measurement. For the purpose of this study the set-up was improved to enable real-time vibration observation of both sides of the sample simultaneously.

Clear differences could be observed in the phase of vibration patterns and amplitudes, registered with nanometric axial resolution, between a correct and a defective adhesive connection. Connection defects could be detected by a local change of the vibration amplitude and/or phase, even when hidden from view for the observer. The amplitudes of the oscillations excited in the samples were up to 40 nm providing non-destructive nature of the tests.

To detect the possible defects of the joints, the velocity of the Lamb waves was simultaneously determined on the metal and the polymer side of the samples by means of digital holographic vibrometry. At low frequencies (up to 30 kHz), only antisymmetric  $A_0$  Lamb waves were excited and the amplitude and the phase patterns of the vibration of the sample were registered. Based on these patterns debonding areas in laminates were localized.

The transmission properties at low frequencies excitations were also studied in terms of: the frequency range for which regular Lamb waves have been observed, Lamb wave amplitudes and Lamb wave propagation velocity depending on the excitation frequency. It has been shown that these properties also change when a defect occurs in the laminate. Even when the defect could not be localize by means of DHV, it was still possible to detect the defect, if a sample was damaged based on the obtained dispersion curves.

While it was not always possible to localize perfectly the position of defects with holographic vibrometry, the second independent non-destructive testing method, shearography, was used as a confirmation of the correctness of this previously unused approach.

DHV method proved to be a non-destructive test method, allowing detection of invisible defects in polymer-metal connections. Based on that method, information about response of such connections to a vibration in specific range of frequency can be obtained. Non-destructive nature of this method, allows further (re)use of the samples after testing, or being studied with other test methods. Measurements are fast and preliminary results are obtained in real-time, which is an important factor for routine testing of components in an industrial production environment.

## SPIS TREŚCI

Wprowadzenie .....	1
1. Cel pracy i postawione zadania .....	6
2. Połączenia polimer-metal .....	8
3. Fale sprężyste w ciele stałym.....	13
3.1. Fale Lamba .....	14
3.2. Fale stojące .....	18
4. Holografia .....	21
4.1. Rekonstrukcja hologramu.....	22
4.2. Interferometria plamkowa .....	24
5. Wibrometria holograficzna .....	25
5.1. Funkcja Bessela .....	27
5.2. Warunki rejestracji hologramu .....	28
6. Szerografia .....	29
7. Stanowisko pomiarowe i metody badań .....	33
7.1. Układ pomiarowy .....	34
7.2. Układ mocowania obiektu badanego i zwierciadeł .....	36
7.3. Wzbudnik drgań .....	39
7.4. Zbieranie i archiwizacja obrazów .....	40
7.5. Metoda i parametry badań .....	41
8. Obiekty badane .....	43
8.1. Próbki z połączeniem adhezyjnym oraz adhezyjnym i mechanicznym wytworzonym w procesie wtryskiwania .....	46
8.2. Próbki z połączeniem adhezyjnym z warstwą pośrednią .....	47
8.3. Próbki z połączeniem adhezyjnym bez warstwy pośredniej wytworzonym poza formą wtryskową.....	48
8.4. Próbki z połączeniem adhezyjnym polimer-metal wytworzonym za pomocą prasowania przy użyciu prasy hydraulicznej.....	49
9. Wyniki badań.....	52
9.1. Wyniki badań dla próbek z połączeniem adhezyjnym oraz adhezyjnym i mechanicznym.....	53
9.1.1. Wyniki badań dla próbek z połączeniem adhezyjnym .....	55
9.1.2. Wyniki badań dla próbek z połączeniem adhezyjnym i mechanicznym ..	58



9.2.	Wyniki badań dla próbek z połączeniem adhezyjnym z warstwą pośrednią ...	63
9.3.	Wyniki badań dla próbek z połączeniem adhezyjnym bez warstwy pośredniej, wytworzonym poza formą wtryskową .....	68
9.4.	Wyniki badań dla próbek z połączeniem adhezyjnym polimer-metal wytworzonym za pomocą prasowania przy użyciu prasy hydraulicznej .....	73
9.4.1.	Połączenie aluminium z polilaktydem, poli(fluorkiem winylidenu) lub poliwęglanem.....	74
9.4.2.	Połączenie aluminium z mieszaniną polietylenu i poliamidu z różnym procentowym udziałem kompatybilizatora PE-g-MAH.....	82
9.5.	Zestawienie wniosków z wykonanych pomiarów .....	89
10.	Podsumowanie .....	92
	Literatura.....	95
	Spis tabel.....	105
	Spis ilustracji.....	106
	Dodatek A .....	111

## WYKAZ OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

$A$	amplituda fali
$c_L$	prędkość fali podłużnej
$c_T$	prędkość fali poprzecznej
$E$	moduł Younga, moduł sprężystości wzdłużnej
$G$	moduł Kirchhoffa, moduł sprężystości poprzecznej
$J_0$	funkcja Bessela zerowego rzędu pierwszego rodzaju
$S_0, A_0$	symetryczny i antysymetryczny mod fali Lamba 0-ego rzędu
$t_v, b_v$	wyniki dla powierzchni górnej próbki (ang. <i>top view</i> ), wyniki dla powierzchni dolnej próbki (ang. <i>bottom view</i> )
$\beta$	współczynnik tłumienia
$\lambda$	długość fali
$\lambda, \mu$	parametry Lamégo
$\nu$	liczba Poissona
$\rho$	gęstość
$v$	prędkość fazowa fali
$\varphi$	faza fali
$\omega$	częstość kołowa
CCD	matryca CCD (ang. <i>Charge-Coupled Device</i> )
CMOS	matryca CMOS (ang. <i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i> )
DHV	cyfrowa wibrometria holograficzna (ang. <i>Digital Holographic Vibrometry</i> )
DLR	Niemiecka Agencja Kosmiczna (niem. <i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i> )
DSPI	cyfrowa interferometria plamkowa (ang. <i>Digital Speckle Pattern Interferometry</i> )
ESPI	interferometria plamkowa (ang. <i>Electronic Speckle Pattern Interferometry</i> )
GF	włókno szklane (ang. <i>Glass Fiber</i> )
LDR	lokalny rezonans defektu (ang. <i>Local Defect Resonance</i> )
LFOR	zakres częstotliwości wzbudzenia umożliwiający obserwację fal Lamba (ang. <i>Lamb-wave Frequency Observation Range</i> )
NDT	badania nieniszczące (ang. <i>Non-destructive testing</i> )

PA	poliamid (ang. <i>polyamide</i> )
PC	poliwęglan (ang. <i>polycarbonate</i> )
LDPE	polietylen małej gęstości (ang. <i>low-density polyethylene</i> )
PE-g-MAH	polietylen szczepiony bezwodnikiem maleinowym (ang. <i>polyethylene-graft-maleic anhydride</i> )
PLA	polilaktyd, poli(kwas mlekowy) (ang. <i>polylactic acid</i> )
PVDF	poli(fluorek winylidenu), polifluorek winylidenu (ang. <i>polyvinylidene fluoride</i> )

## WPROWADZENIE

Materiały kompozytowe z hybrydowym połączeniem polimer-metal są obecnie szeroko stosowane w wielu dziedzinach przemysłu, a o ich potencjalnym zastosowaniu i właściwościach decyduje jakość uzyskanego połączenia. Odpowiednie zespolenie adhezyjne pomiędzy metalem a polimerem możliwe jest poprzez dobór łączonych materiałów oraz właściwe przygotowanie powierzchni łączonych.

W tego typu połączeniach bardzo istotna jest możliwie mała różnica współczynnika rozszerzalności cieplnej zastosowanych materiałów, a także – szczególnie w przypadku złączy polimer-metal stosowanych np. w przemyśle samochodowym, przemyśle gospodarstwa domowego i wytwarzaniu aparatury pomiarowej – stosunkowo mała gęstość. Metale najczęściej stosowane w tych połączeniach to stal, aluminium i stopy miedzi [1–3].

Znajomość materiałów i ich inżynierskiego wykorzystania podczas projektowania i wytwarzania połączeń adhezyjnych, stanowi istotny i interesujący aspekt inżynierii materiałowej.

Ważnym celem badań przemysłowych złączy polimer-metal jest obniżanie kosztów produkcyjnych i zmniejszenie szkodliwego wpływu na środowisko, np. poprzez redukcję masy pojazdów, a co za tym idzie zmniejszenie zużycia paliwa i emisji szkodliwych gazów w czasie eksploatacji środków transportu [3–7]. Dodatkowo dyrektywa Komisji Europejskiej 2000/53/WE wymaga, aby od 2015 roku co najmniej 85% wag. materiału w złomowanym pojeździe było ponownie użyte lub poddane recyklingowi [8]. Warunek ten może być spełniony poprzez większość elementów polimerowo-metalowych, o ile zapewniona zostanie możliwość rozdzielnia tych materiałów po zakończeniu ich okresu eksploatacji. Coraz więcej elementów w branży motoryzacyjnej wykonywanych jest z materiałów polimerowych, konieczne jest więc poszukiwanie nowych, bardziej przyjaznych środowisku, rozwiązań. Z tego powodu prowadzone są badania dotyczące ponownego zastosowania materiałów polimerowych używanych do produkcji elementów wyposażenia samochodów, modyfikacji materiałów polimerowych poprzez wprowadzenie napełniaczy pochodzenia naturalnego, a także produkcji materiałów polimerowych z wykorzystaniem materiałów odpadowych [9–16].

Ze względu na ich mniejszą gęstość elementy powstałe w wyniku połączenia polimerów z aluminium lub stopami miedzi uzyskują coraz większą popularność w produkcji wyrobów technicznych. Na przykład wymiana stalowego elementu przedniego Audi TT

na aluminiowy pozwoliła na zmniejszenie ciężaru struktury hybrydowej o 15% [17]. Niestety ze względu na cenę, stopy stali nadal są konkurencyjnym rozwiązaniem w porównaniu z innymi materiałami [1].

W przemyśle motoryzacyjnym, ze względu na odpowiednie właściwości wytrzymałościowe stosowany jest poliamid wzmacniany krótkimi włóknami szklanymi np. PA6 z 30% mas. włókien szklanych – PA6GF30 [1,17,18].

Pierwszy publicznie zgłoszony przypadek (rok 2006.) wprowadzenia materiału ze złączem polimer-metal w praktyce produkcji motoryzacyjnej to przód samochodu Audi A6 AVANT [19]. Komponent ten wyprodukowano metodą obtrysku blachy o kształcie krzyżowo-żebrowym modyfikowanym poliamidem (PA6GF30, Durethan BKV 130 firmy Bayer). Testy mechaniczne elementu ze złączem polimer-metal wykazały synergistyczne działanie materiałów składowych złącza. Oprócz zastosowania w przemyśle samochodowym, połączenia polimer-metal są również stosowane w urządzeniach domowych, aparaturze kontrolno-pomiarowej, ramach rowerowych i elementach innych środków transportu [18,20,21].

Głównym problemem, jaki należy rozwiązać w łączeniu materiałów polimerowych i metalowych, jest ich odmienny charakter fizyczny i chemiczny. Ze względu na słabą przyczepność (lub zwilżalność materiałów metalowych przez polimer) stosowane są rozwiązania mechaniczne lub chemiczne. Poprawę przyczepności materiału polimerowego do powierzchni metalu uzyskuje się poprzez modyfikację elementu metalowego (np. zmianę tekstury i chropowatości powierzchni), dodanie promotorów adhezji lub wprowadzenie pośrednich warstw adhezyjnych. Należy zaznaczyć, że wszystkie te rozwiązania wymagają podjęcia dodatkowych kroków przed utworzeniem złącza polimer-metal, co wydłuża proces produkcyjny i podwyższa cenę produktu końcowego [1,18,20,22–26]. Z tego powodu warto poszukiwać i badać połączenia polimeru z metalem, które nie wymagają podejmowania ww. kroków.

Podczas procesu wytwarzania złącz polimerowo-metalowych mogą powstawać wady w postaci braku adhezji między częścią polimerową i metalową (łączone materiały nie przylegają do siebie na całej powierzchni styku). W przypadku gdy polimer nie jest przezroczysty, wady połączenia mogą być niewidoczne w trakcie wizualnej oceny jakości elementu, a defekty tego typu mogą decydować o wytrzymałości całego elementu.

Klasyczne metody badania połączeń w kompozytach polegają na rozciąganiu, zginaniu i ściskaniu próbki, aż do momentu jej zniszczenia. Użycie metod niszczących wymaga założenia, że wyniki uzyskane dla ograniczonej liczby próbek są reprezentatywne dla wszystkich pozostałych produktów.

Prowadzone w ramach pracy doktorskiej badania miały na celu analizę możliwości wykrywania ukrytych defektów połączeń adhezyjnych w kompozytach polimerowo-metalowych z zastosowaniem metod nieniszczących (ang. *Non-destructive testing* – NDT). Obecnie powszechnie stosowanymi metodami badań nieniszczących są pomiary ultradźwiękowe [27–29] (w tym wibrometria ultradźwiękowa [30]), radiografia [31–33], skaningowa, laserowa wibrometria dopplerowska [34,35] i szerografia<sup>1</sup> (ang. *shearography*) [36,37]. Metody ultradźwiękowe, w porównaniu do technik laserowych i radiograficznych, charakteryzują się zdecydowanie gorszą zdolnością rozdzielczą.

Tomografia komputerowa do odwzorowania obiektu w trzech wymiarach wymaga długotrwałego naświetlania promieniami rentgenowskimi pod różnymi kątami i jest techniką kosztowną. Z kolei skanowanie punkt po punkcie jest wymagane w technice skaningowej laserowej wibrometrii dopplerowskiej, co uniemożliwia zebranie informacji o całej badanej powierzchni w czasie rzeczywistym. Laserowa szerografia stwarza możliwość pomiarów w czasie rzeczywistym, które jednak nie dają bezpośredniej informacji o odkształceniach lecz jedynie o pochodnej przemieszczenia powierzchni. Ta technika oferuje natomiast wysoką osiową zdolność rozdzielczą (w zakresie nanometrycznym).

Zastosowana w niniejszej pracy cyfrowa laserowa wibrometria holograficzna posiada te same zalety co szerografia, ale pozwala dodatkowo bezpośrednio rejestrować w czasie rzeczywistym w trzech wymiarach odkształcenie powierzchni obiektu podczas drgań.

Ponadto należy zauważyć, że metody laserowe i radiograficzne nie wymagają kontaktu z powierzchnią obiektu, co pozwala na badanie łatwo odkształcalnych przedmiotów i powłok bez ryzyka ich uszkodzenia, posiadając przy tym zdolność rozdzielczą przewyższającą przynajmniej o rząd wielkości możliwości metod stykowych.

Za zastosowaniem holografii [38–41] do badania defektów przemawia również fakt, że duża liczba punktów (do  $640 \times 480$  pikseli, px w przypadku układu zastosowanego do pomiarów w ramach realizowanej pracy doktorskiej), może być obserwowana jednocześnie i synchronicznie. Natomiast w przypadku standardowych metod wykorzystujących zjawisko lokalnego rezonansu defektu, liczba obserwowanych punktów wynosi jedynie

---

<sup>1</sup> Ze względu na brak polskiego odpowiednika angielskiej nazwy metody *shearography*, w tej pracy przyjęto nazwę szerografia, która coraz bardziej rozpowszechnia się w źródłach komercyjnych.

około 100 [29,42]. Obserwacja wielu położonych blisko siebie punktów obiektu stanowi przewagę zastosowanej techniki holograficznej, szczególnie ze względu na możliwość badania w tej pracy zdecydowanie mniejszych obiektów niż omawianych w większości publikacji [43–47]. Wymogiem badań prowadzonych w ramach pracy doktorskiej było stosowanie próbek o wymiarach odpowiadających typowym kształtkom stosowanym do testowania klasycznymi metodami niszczącymi (np. pomiary prowadzone za pomocą maszyny wytrzymałościowej). Kształt takich próbek powoduje, że wymuszone w nich nadrgania propagowane są w postaci fal płytowych nazywanych falami Lamba.

Fale Lamba są jednym z rodzajów sprężystych fal rozchodzących się wzdłuż powierzchni podłoża sprężystego w ośrodku ograniczonym dwoma równoległymi powierzchniami. Fale te rozchodzą się od miejsca wzbudzenia we wszystkich kierunkach, jednak ich długość i prędkość fali są ściśle związane z właściwościami materiału w jakim się propagują oraz z grubością płyty [47,48]. Fale Lamba, wzbudzane wysokimi częstotliwościami, okazały się być niezwykle przydatne do wykrywania defektów w cienkich blachach czy rurach i obecnie stosowane są w inspekcji elementów w przemyśle lotniczym i transportowym. Ich generowanie odbywa się poprzez m.in. przetworniki stykowe, elektromagnetyczne czy przetworniki ze sprężonym powietrzem [43–50]. Propagacja fal Lamba w ośrodku izotropowym jest dobrze zdefiniowana dla częstotliwości powyżej 100 kHz. Nie dotyczy to jednak materiałów kompozytowych oraz rozchodzenia się fal o stosunkowo niskiej częstotliwości (do 30 kHz). Tymczasem wibracje z zakresu niskich częstotliwości występują w życiu codziennym, generowane są przez powszechnie używane urządzenia m.in. AGD czy ultradźwiękowe urządzenia odstraszające zwierzęta [51,52]. Można się również z nimi spotkać w miejscach publicznych, takich jak dworce kolejowe, a nawet biblioteki (wibracje generowane przez alarmy dźwiękowe i transport wewnątrz budynku) [52–55]. Na wibracje te narażone są zarówno duże obiekty, jak i takie o wymiarach porównywalnych z badanymi w tej pracy. Występowanie defektów połączeń w kompozytach może wówczas być wyjątkowo niekorzystne.

Z tego powodu praca koncentruje się na opracowaniu nieniszczącej metody wykrywania defektów w połączeniu hybrydowym polimer-metal dla typowych kształtek testowych za pomocą cyfrowego laserowego wibrometru holograficznego, która wykorzystuje następujące zjawiska:

- lokalny rezonans defektu [29,42],

- propagacje fal Lamba, ze szczególnym uwzględnieniem zależności dyspersyjnych w zakresie częstotliwości słyszalnych i niskich częstotliwości ultradźwiękowych (do 30 kHz).

W niniejszej pracy drgania belek testowych były generowane przez wzbudnik piezoelektryczny, a ich amplituda nie przekraczała kilkunastu nanometrów i nie zmieniała się w czasie. Podejście to różni się od typowej defektoskopii, gdzie standardowo stosuje się częstotliwości fal ultradźwiękowych, dochodzących nawet do 20 MHz, dla których zakłada się, że prędkość rozchodzenia się fal podłużnych i poprzecznych jest niezależna od częstotliwości [56,57].

W celu realizacji wymienionego powyżej zadania postanowiono zbudować stanowisko pomiarowe, które umożliwiło badania wibrometryczne różnych próbek o wymiarach stosowanych np. w badaniach wytrzymałościowych.

W niniejszej pracy po przedstawieniu celu prowadzonych badań i postawionych zadań, w początkowych rozdziałach omówiono połączenia polimer-metal oraz podstawy fizyczne w zakresie niezbędnym do zrozumienia rozważanych problemów dotyczące propagacji fal mechanicznych w ciele stałym, w tym fal Lamba. Kolejne rozdziały tłumaczą najważniejsze zagadnienia dotyczące rekonstrukcji obrazu w holografii, interferometrii plamkowej oraz wibrometrii holograficznej i szerografii.

Rozdziały od siódmego do dziesiątego stanowią eksperymentalną część pracy, w której przedstawione zostało stanowisko pomiarowe i obiekty badane, wyniki badań oraz wnioski płynące z licznych analiz danych pomiarowych.



## 1. CEL PRACY I POSTAWIONE ZADANIA

W niniejszej pracy jako cel eksperymentalny obrano opracowanie i doświadczalne zweryfikowanie metody badania połączeń polimer-metal w zdefiniowanych obiektach testowych z materiałów kompozytowych z użyciem cyfrowej laserowej wibrometrii holograficznej. Celem użytkowym pracy jest ocena możliwości wykrywania defektów wewnętrznych i wpływu tych defektów na propagację drgań w próbkach z połączeniem polimer-metal, co przyczyni się do pogłębienia stanu wiedzy w zakresie badań nieniszczących.

Do realizacji celów pracy sformułowano następujące zadania:

- a) dobór materiałów umożliwiających wytworzenie trwałego połączenia adhezyjnego między metalem i polimerem,
- b) opracowanie metod wytwarzania próbek z wybranych materiałów, które umożliwiają uzyskanie połączeń bez defektów oraz z defektami o założonych wcześniej wymiarach i lokalizacji,
- c) określenie zadawanych warunków pomiarów:
  - zakresu częstotliwości wzbudzenia, przy których dochodzi do nieniszczących drgań obiektu o amplitudzie w skali nanometrycznej umożliwiających wykrywanie defektów złącza polimer-metal,
  - sposobu mocowania próbki i miejsca przyłożenia piezoelektrycznego wzbudnika drgań, gwarantującego transfer energii drgań do obu materiałów składających się na warstwy złącza polimer-metal, zapewniającego jednocześnie minimalizację wpływu zewnętrznych zakłóceń mechanicznych,
- d) zaprojektowanie i wykonanie dotąd nieproponowanego układu pomiarowego do jednoczesnej rejestracji drgań obu stron próbki w trakcie pojedynczego pomiaru,
- e) przeprowadzenie badań wstępnych służących dobraniu warunków pomiarowych dla wzbudnika i wibrometru, które umożliwiają:
  - uzyskanie drgania próbki w jednym modzie wzdłużnym o płaskim czole fali i mierzalnej przez wibrometr amplitudzie, tworzącej (o ile to możliwe), falę stojącą, bez charakteru torsyjnego,

- określenie zakresów częstotliwości rezonansowych wzbudzenia w zależności od wymiarów oraz kształtów próbek i ich złączy, materiałów i sposobu ich połączenia, które umożliwią obserwację różnic w drganiach próbek bez i z defektem połączenia,
- f) wykonanie badań zasadniczych polegających na:
- jednoczesnym pomiarze drgań obu stron próbki ze złączami polimer-metal i rejestracji hologramów,
  - dokonanie rekonstrukcji trójwymiarowej wzbudzonych w próbkach fal – wstępnie za pomocą oprogramowania wibrometru oraz ostatecznie za pomocą pakietów programów utworzonych na potrzeby tej pracy,
- g) analiza uzyskanych wyników pomiarów umożliwiających:
- lokalizację niewidocznych defektów złącza i oszacowanie ich wymiarów,
  - wyznaczenie prędkości fal Lamba w warstwach polimerowych i metalowych oraz wykreślenie dla nich odpowiednich krzywych dyspersyjnych, pod kątem sprawdzenia przydatności tych danych w wykrywaniu ukrytych defektów złącza,
  - ilościowe i jakościowe porównanie wymuszonych fal Lamba w wybranych polimerowych materiałach semikrystalicznych i amorficznych – analiza amplitudy drgań, prędkości fal Lamba, a także zakresów częstotliwości transmisji bądź tłumienia drgań.

## 2. POŁĄCZENIA POLIMER-METAL

Obecnie szeroko stosowane są kompozyty polimerowo-metalowe. Oferują one obniżoną masę przy zachowaniu właściwości mechanicznych, takich jak moduł sprężystości czy wytrzymałość na rozciąganie, a także zdecydowanie mniejsze koszty produkcyjne w porównaniu z innymi materiałami konstrukcyjnymi. Kompozyty tego rodzaju znajdują zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu, m.in. lotnictwie, przemyśle motoryzacyjnym, produkcji sprzętu medycznego, AGD i innych. Charakteryzuje je połączenie właściwości fizykochemicznych i stosunkowo niewielkiej masy tworzywa sztucznego z wytrzymałością metalu, a także łatwość w tworzeniu złożonych kształtów w czasie formowania dzięki komponentowi polimerowemu [58,59]. Obecnie stosowane są różnego rodzaju metody tworzenia elementów polimer-metal, takie jak: mechaniczne zaciskanie, tworzenie połączeń w trakcie procesów przetwórczych w stanie stopionym, łączenie laserowe lub ultradźwiękowe, technologie wytwarzania przyrostowego i inne [22–26,60–68].

Dobór materiałów składowych kompozytu polimerowo-metalowego powinien opierać się na takich właściwościach, jak możliwie nieznaczna różnica w rozszerzalności cieplnej łączonych materiałów, kompatybilność z warunkami środowiskowymi, czy zdolność tłumienia drgań konstrukcji [69].

Popularne techniki stosowane w celu łączenia materiałów o tak zróżnicowanej budowie i właściwościach, jak metale i tworzywa sztuczne to łączenie spawane, mechaniczne i adhezyjne. Różnica w temperaturach topnienia materiałów metalowych i polimerowych wyklucza stosowanie konwencjonalnych metod spawania w celu ich połączenia. Możliwe jest przeprowadzenie takiego zabiegu jedną ze specjalistycznych metod spawania takich jak spawanie laserowe czy ultradźwiękowe. Ograniczenie stanowi tutaj również rodzaj tworzywa, które może zostać poddane takiemu zabiegowi – wyłącznie polimery termoplastyczne mogą być poddawane spawaniu<sup>2</sup> [58,70].

Połączenia mechaniczne najczęściej wymagają zastosowania dodatkowych elementów złącznych (np. śruby lub nity) lub profilowanych powierzchni łączonych w sposób blokujący ruch komponentów względem siebie, bez trwałego połączenia ich powierzchni. W wielu przypadkach konieczne jest odpowiednie przygotowanie łączonych elementów lub łączników poprzez wytworzenie otworów pod śruby lub nity. Takie operacje mogą

---

<sup>2</sup> W pozostałych tworzywach polimerowych pod wpływem temperatury dochodzi do nieodwracalnej degradacji sieci krystalicznej [58].

prowadzić do zmian geometrycznych wpływających na wytrzymałość danego elementu, a także powodować wydłużenie procesu produkcyjnego [58,71]. Jeżeli mowa o właściwościach mechanicznych, połączenia nitopodobne złączy polimer-metal realizowane w procesie wtryskiwania poprzez wypełnienie polimerem otworów wykonanych w płycie metalowej pozwalają na osiągnięcie obiecujących wyników. W tego typu połączeniach istotną rolę odgrywa zarówno liczba otworów, jak i ich położenie [72,73].

Odmienny rodzaj połączenia opiera się na zjawisku adhezji (z łac. *adhaesio* – przyleganie), które polega na łączeniu ze sobą powierzchniowych warstw fizycznych lub faz. Według teorii fizyczno-chemicznej adhezji, zjawisko to wynika z oddziaływań międzycząsteczkowych (sił van der Waalsa<sup>3</sup>, dyspersyjnych, dipolowych lub indukcyjnych) występujących między ciałami będącymi w bezpośrednim kontakcie. Innymi teoriami adhezji są m.in. teoria elektrostatyczna – zakładająca, że wiązania między dwoma ciałami będącymi w bezpośrednim kontakcie powstają na skutek przepływu strumienia elektronów – czy teoria chemiczna – według której, adsorpcja chemiczna poprzez oddziaływanie grup funkcyjnych prowadzi do utworzenia się wiązań chemicznych między materiałami łączonymi [74–77].

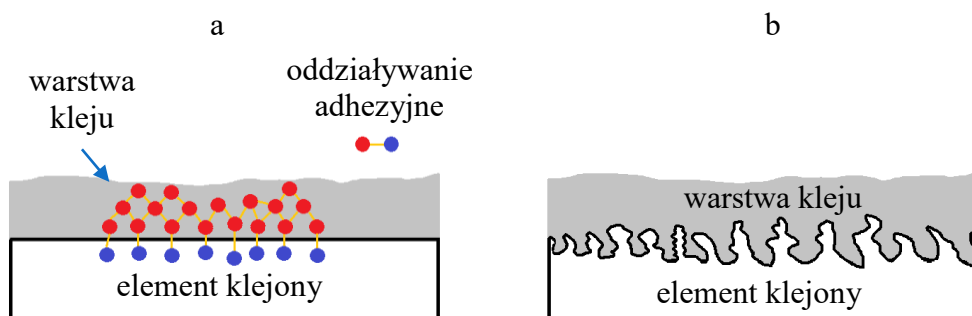
Miarę adhezji wyraża się poprzez pracę jaką należy wykonać w celu rozłączenia stykających się ciał, przypadającą na jednostkę powierzchni kontaktu [71,74–76,78].

Adhezję podzielić można na [71,74–78]:

- a) właściwą (rys. 2.1a) – w skali makro można ją opisać jako odwracalny proces termodynamiczny zachodzący w warstwie łączących się materiałów, który wynika z różnicy wartości ich napięć powierzchniowych. W skali mikro jest ona wynikiem oddziaływań międzycząsteczkowych w zakresie mniejszym niż 1  $\mu\text{m}$ .
- b) mechaniczną (rys. 2.1b) – na wytrzymałość otrzymanego złącza wpływają parametry wytrzymałościowe elementów łączonych lub kleju, a nie zjawiska zachodzące na granicy faz. Wzrost siły adhezji uzależniony jest od zwiększenia penetracji powierzchni ciała stałego przez ciecz.

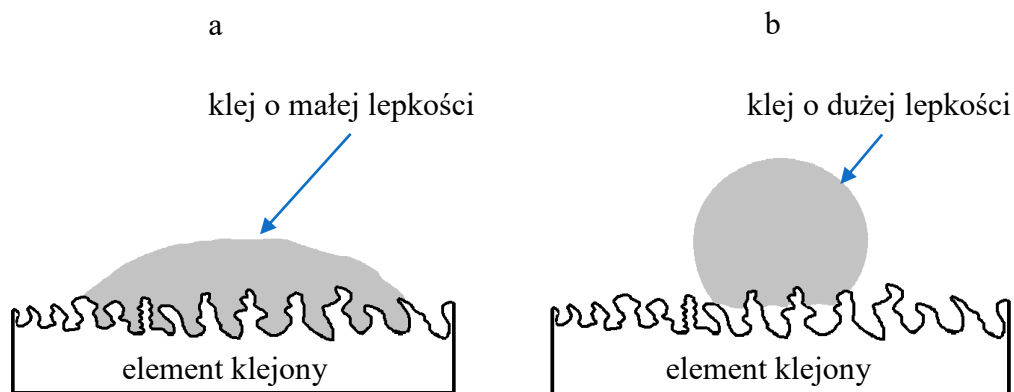
---

<sup>3</sup> Oddziaływanie to ma kluczowe znaczenie, ze względu na możliwość występowania między dowolnymi cząsteczkami, dzięki czemu pomimo, iż zaliczane jest do grupy oddziaływań słabych jego zsumowana wartość jest stosunkowo duża [74,75].



Rys. 2.1. Adhezja: a – właściwa, b – mechaniczna

Klejenie jest jedną z technik łączenia adhezyjnego, w którym klej stanowi warstwę pośrednią. Mała lepkość kleju sprzyja penetracji nierówności powierzchni, pozwalając na jego zakotwiczenie we wgłębieniach chropowatej powierzchni materiału klejonego, a także w niektórych przypadkach jego absorpcje przez podłoże w czasie procesu nanoszenia (rys. 2.2). Na stopień penetracji wpływają głównie lepkość kleju (im mniejsza lepkość kleju, tym łatwiejsze jest jego wnikanie w nierówności powierzchni, co sprzyja utworzeniu mocnego połączenia), temperatura, czas wnikania, ciśnienie ale również kształt przekroju i głębokość chropowatości powierzchni klejonej



Rys. 2.2. Schemat przedstawiający zwilżanie powierzchni klejami: a – o małej lepkości, b – o dużej lepkości

Prawidłowe zaprojektowanie i wykonanie połączenia klejowego powinno zapewnić, iż w przybliżeniu wartości siły adhezji będą równe siłą kohezji<sup>4</sup>. Otrzymane w ten sposób

<sup>4</sup> Kohezja (z łac. *cohaesio* – spójność) – stan ciała fizycznego, w którym wewnętrzne oddziaływania międzycząsteczkowe przeciwstawiają się jego rozdzielaniu na części [74–76].

połączenie charakteryzuje się wysoką wytrzymałością na obciążenia statyczne i dynamiczne, oddziaływania międzycząsteczkowe pomiędzy materiałem klejonym, a klejem powstają w wyniku przemian chemicznych lub fizycznych. Pozwala to na obniżenie masy konstrukcji, natomiast ewentualny demontaż wiąże się trwałym uszkodzeniem elementów składowych. Takie rozwiązanie wymaga również, podobnie jak w przypadku spawania i łączenia mechanicznego, wykonania w pierwszej kolejności elementów tworzywowych i metalowych w osobnych procesach [59,69,74,75].

Opisane wcześniej metody łączenia tworzyw sztucznych z metalami wymagają nie tylko przeprowadzania oddzielnych procesów technologicznych celem wyprodukowania osobnej części metalowej i polimerowej, ale również przeprowadzania w kolejnym kroku procesu tworzenia złącza. Alternatywę stanowią metody bazujące na wytworzeniu bezpośredniego połączenia poprzez oddziaływanie adhezyjne pomiędzy tworzywem sztucznym, a metalem np. z wykorzystaniem technologii wtryskiwania. W takim przypadku konieczne jest odpowiednie przygotowanie powierzchni metalowej. Idealna powierzchnia elementu przeznaczonego do łączenia wyłącznie adhezyjnego powinna być czysta, sucha, wolna od zanieczyszczeń pyłowych, o odpowiedniej topografii powierzchni, zwilżalna (o wysokiej energii powierzchniowej) i polarna, a także powinna odwzorowywać uformowanie powierzchni drugiego elementu łączonego [71,78,79].

Metodami tworzenia połączeń adhezyjnych polimer-metal bez warstwy pośredniej są m.in. [71,79]:

- a) technika Insert – polega na produkcji elementów polimerowych z metalowymi zapraskami metodą obtryskiwania. Na ich powierzchni wykonywane są występy w kierunku prostopadłym do kierunku obciążenia, których zadaniem jest przeniesienie naprężeń na granicy złącza polimer-metal [70].
- b) Outsert – nieskomplikowane części metalowe mające stanowić konstrukcje nośną finalnego elementu umieszcza się w matrycy, a następnie dotryskiwane jest tworzywo, co pozwala na uzyskanie skomplikowanych kształtów o niskiej masie i wysokiej wytrzymałości [70,80].
- c) MOM (ang. *metal over molding*) – wytwarzanie uźebrowań polimerowych w wielkogabarytowych cienkościennych wyrobach metalowych metodą wtryskiwania. Element hybrydowy uzyskiwany w jednej operacji technologicznej łączony jest np. poprzez wtryskiwanie komponentu w kształcie klamry. Jakość uzyskanego połączenia zależy będzie od czynników takich jak wstępne przygotowanie powierzchni metalowej czy skurcz polimeru [70,81].

- d) Metal–Waim (ang. *metal-water assisted injection molding*) i Metal–Gaim (ang. *metal-gas assisted injection molding*) – pozwalają na uzyskanie elementów hybrydowych zamkniętych, a płynny rdzeń pochodzący z wtryskiwanego tworzywa usuwany jest odpowiednio przy pomocy wody lub gazu, podawanych pod odpowiednim ciśnieniem [80,82].

Skrócenie cyklu produkcyjnego, uzyskanie wyrobów o lepszej wytrzymałości i sztywności, poprawa jakości i obniżenie kosztów produkcji to tylko kilka z wielu zalet bezpośredniego łączenia wyprasek z elementami metalowymi podczas pojedynczego procesu technologicznego. Celem uzyskania odpowiednich właściwości złącza w warunkach długotrwałej eksploatacji, czy w trudnych warunkach użytkowania w miejscach największego obciążenia mechanicznego stosowane są dodatkowe polimerowe warstwy pośrednie [69,80].

### 3. FALE SPRĘŻYSTE W CIELE STAŁYM

Ze względu na metodykę badawczą stosowaną w niniejszej pracy, w tym rozdziale przedstawiono podstawy fizyczne rozchodzenia się fali sprężystej w ciele stałym. Fale sprężyste podlegające zasadom dynamiki Newtona, rozchodzą się za pośrednictwem zmian ośrodka materialnego. Mogą one mieć charakter fal poprzecznych i podłużnych, w przypadku których zaburzenia ośrodka rozchodzą się w kierunku odpowiednio prostopadłym i równoległym do kierunku rozchodzenia się fali. Dźwięki i ultradźwięki rozchodzące się w ciałach stałych mogą mieć zarówno składową podłużną jak i poprzeczną [83,84].

W formalizmie stosowanym do opisu fal propagujących się w izotropowym i sprężystym ciele stałym o nieograniczonych wymiarach wprowadza się dwa parametry  $\lambda$  i  $\mu$  zależne od materiałów, zdefiniowane za pomocą modułu Younga  $E$  oraz liczby Poissona  $\nu$  [85]. Nazywają się one parametrami Lamégo. Parametry te są wyrażone w paskalach i określone poniższymi wzorami [85]:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} , \quad (3.1)$$

$$\mu = G = \frac{E}{2(1 + \nu)} , \quad (3.2)$$

gdzie:

- $E$  – moduł sprężystości wzdłużnej,
- $G$  – moduł sprężystości poprzecznej,
- $\nu$  – liczba Poissona.

Takie ujęcie umożliwia sformułowanie ogólnego równania w warunkach równowagi statycznej opisującego pole przemieszeń  $\mathbf{u}$  w ciele, zwanego równaniem Lamégo-Naviera [85]:

$$(\lambda + \mu) \text{grad}(\text{div } \mathbf{u}) + \mu \text{grad}(\text{div } \mathbf{u}) = \rho \ddot{\mathbf{u}} , \quad (3.3)$$

gdzie  $\rho$  jest gęstością materiału [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ].



Dokładne rozwiązanie dla powyższego liniowego równania różniczkowego drugiego stopnia można uzyskać tylko w szczególnych wypadkach. Najczęściej otrzymuje się rozwiązanie przybliżone po wykonaniu obliczeń numerycznych.

Podział wielkości  $u$  na część bezwirową i część bezźródłową upraszcza opis i pozwala na obliczenie prędkości fali podłużnej  $c_L$  i fali poprzecznej  $c_T$ , przy użyciu parametrów materiałowych ośrodka [85]:

$$c_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} , \quad (3.4)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1 + \nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} . \quad (3.5)$$

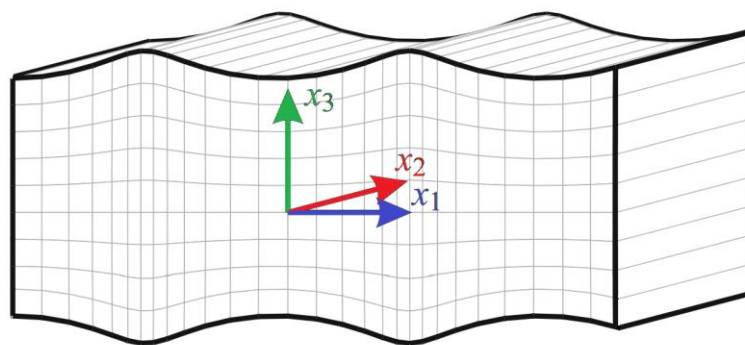
Pomiar prędkości fal mechanicznych wykorzystywany jest do wyznaczania parametrów sprężystych w ciele stałym (tj. modułu Younga i modułu Kirchhoffa).

### 3.1. Fale Lamba

W przypadku propagacji fal w ośrodkach sprężystych o ograniczonych wymiarach, np. w płytach o nieskończonej powierzchni ale skończonej grubości, porównywalnej z długościami tych fal, warunki brzegowe powodują pojawienie się odbić i interferencji, co skutkuje generowaniem się szczególnego rodzaju fal, nazywanych falami Lamba.

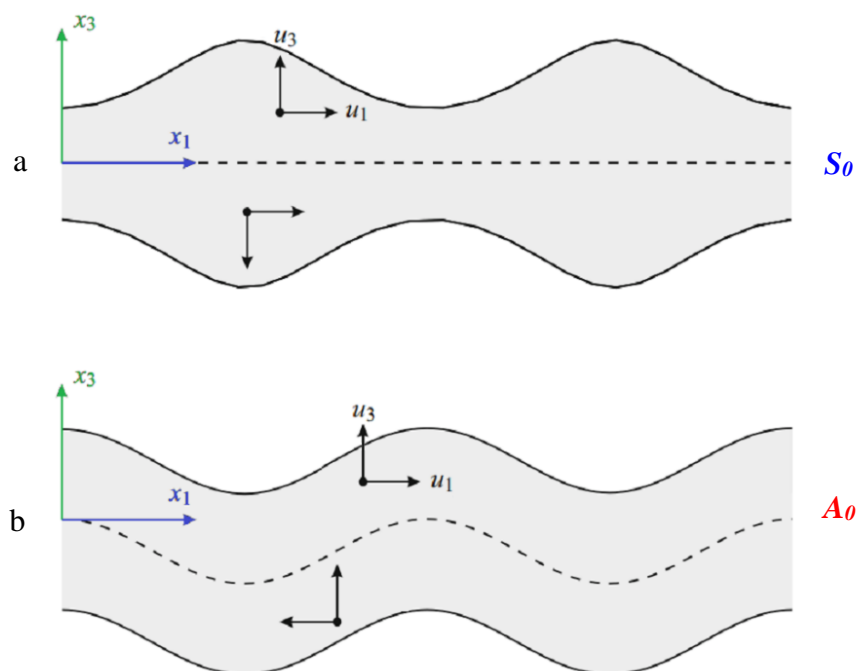
Horace Lamb w 1917 roku opublikował analizę i opis akustycznych fal płytowych o dość złożonych właściwościach, o których istnieniu donosił już w pracy opublikowanej w roku 1881 [86,87]. Pokazał, że w płytach może występować nieskończenie wiele fal, charakteryzujących się jednym z dwóch typów/modów drgań cząstek ośrodka – modem symetrycznym lub antysymetrycznym. Dla określonego modu drgań występuje charakterystyczna dla niego zależność dyspersyjna (zależność prędkości fali od częstotliwości). Pojawia się również relacja między prędkością fali i stosunkiem długości fali do grubości płyty.

Symetryczne i antysymetryczne fale Lamba różnią się co do przemieszczeń cząstek ośrodka występujących w kierunku równoległym ( $x_1$ ) i prostopadłym ( $x_3$ ) do kierunku propagacji fali. Zakłada się przy tym, że nie ma przemieszczeń w kierunku  $x_2$  (rys. 3.1).



Rys. 3.1. Trójwymiarowy model symetrycznego modu fali Lamba  $S_0$  z zaznaczonym układem współrzędnych [85]

Dla fal symetrycznych, zwanych też podłużnymi, przemieszczenia  $u$  w kierunku  $x_3$  względem płaszczyzny przyśrodkowej płyty są symetryczne, a przemieszczenia  $u_1$  są zgodne z kierunkiem i zwrotem rozprzestrzeniania się fali płaskiej (rys. 3.2a). Dla fal antysymetrycznych, nazywanych również zginającymi, przemieszczenia w kierunku  $x_3$  są antysymetryczne, a w kierunku  $x_1$  mają przeciwne zwroty w warstwie powyżej i poniżej płaszczyzny przyśrodkowej płyty (rys. 3.2b) [47,48,85,88].



Rys. 3.2. Symetryczny  $S_0$  (a) i antysymetryczny  $A_0$  (b) mod fali Lamba, oznaczenia w tekście [85]

W formie matematycznej można to wyrazić następująco [85]:

a) dla modów symetrycznych:

$$u_1^{sym} = [ikA_2 \cos(px_3) - qB_1 \cos(qx_3)]e^{i(kx_1 - \omega t)} , \quad (3.6)$$

$$u_3^{sym} = [-pA_2 \cos(px_3) + ikB_1 \cos(qx_3)]e^{i(kx_1 - \omega t)} . \quad (3.7)$$

b) dla modów antysymetrycznych:

$$u_1^{antysym} = [ikA_1 \sin(px_3) - qB_2 \sin(qx_3)]e^{i(kx_1 - \omega t)} , \quad (3.8)$$

$$u_3^{antysym} = [pA_1 \cos(px_3) + ikB_2 \cos(qx_3)]e^{i(kx_1 - \omega t)} , \quad (3.9)$$

gdzie:

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – liczba falowa,

$\omega$  – częstość kołowa,

$t$  – czas,

$A_1, A_2$  – amplitudy w opisie przestrzennej periodyczności części bezwirowej pola przemieszczeń, zależnej od  $c_L$ ,

$B_1, B_2$  – amplitudy w opisie przestrzennej periodyczności części bezźródłowej pola przemieszczeń, zależnej od  $c_T$ .

Parametry  $p$  i  $q$  zdefiniowano jako:

$$p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2 , \quad (3.10)$$

$$q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2 . \quad (3.11)$$

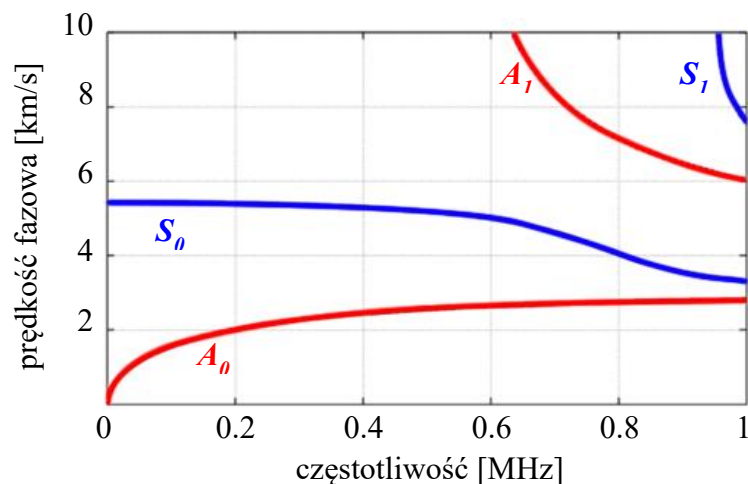
We wzorach (3.6) – (3.9) przyjęto warunki dla płyt rozciągających się do nieskończoności. Jednak w rzeczywistych przypadkach płyt o skończonych wymiarach powierzchni, belek, materiałów anizotropowych, semikrystalicznych, kompozytowych, opis jest dużo bardziej skomplikowany i często bardzo przybliżony, otrzymany na podstawie obliczeń numerycznych.

Większość symulacji numerycznych przeprowadzono dotąd dla płyt o dużych wymiarach (długość i szerokość rzędu przynajmniej kilkudziesięciu centymetrów) wzbudzanych do drgań z wysoką częstotliwością [43–47]. Zapotrzebowanie na informacje o falach powierzchniowych w obiektach jedno- i wielowarstwowych oraz zwiększone możliwości obliczeń numerycznych wpłynęły w ostatnich latach na rozwój metod symulacyjnych. Przykładem jest powstałe w 2018 roku i ciągle udoskonalane, ogólnodostępne oprogramowanie umożliwiające symulacje prędkości fazowych fal Lamba dla wybranych materiałów *Dispersion Calculator*, opracowany przez Niemiecką Agencję Kosmiczną DLR (niem. *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*) [89].

Przykład symulacji krzywych dyspersyjnych prędkości fazowej dwóch najniższych modów, symetrycznych fal Lamba ( $S_0$ ,  $S_1$ ) oraz antysymetrycznych ( $A_0$ ,  $A_1$ ), dla płyty aluminiowej o grubości 3 mm przedstawia rysunek 3.3 [90]. Obrazuje on charakterystyczne dla fal Lamba właściwości, obserwowane dla niskich częstotliwości wzbudzenia:

- występowanie tylko najniższych modów drgań,
- dużo mniejsze prędkości fal antysymetrycznych niż fal symetrycznych.

Natomiast wciąż mało jest danych doświadczalnych o falach Lamba w ośrodkach o bardzo ograniczonych rozmiarach (kilkucentymetrowych lub mniejszych), drgających z niskimi częstotliwościami.



Rys. 3.3. Wykres prędkości fazowej modów  $A_0$ ,  $S_0$  i  $A_1$ ,  $S_1$  fal Lamba dla płyty aluminiowej o grubości 3 mm [45]

Na podstawie Rys. 3.3 rysunku 3.3 można stwierdzić, iż celem łatwej identyfikacji modów fal Lamba należy ograniczyć zakresy stosowanych częstotliwości wzbudzenia do

obszaru występowania wyłącznie modów  $S_0$  i  $A_0$  [44,45,48] – w przypadku płyty aluminiowej jest to zakres poniżej 400 kHz [45]. Porównanie amplitud drgań modów  $S_0$  i  $A_0$  dla niskich częstotliwości wskazuje na wyraźną dominację drgań antysymetrycznych [91] (amplituda drgań modu  $A_0$  jest często o dwa rzędy wielkości większa niż modu  $S_0$  [45]). Stąd w płytach drgających z niską częstotliwością obserwuje się głównie falę  $A_0$ .

### 3.2. Fale stojące

Fala stojąca powstaje w wyniku superpozycji dwóch lub więcej biegnących fal spójnych, które mają ten sam kierunek ale przeciwny zwrot. Obserwowane jest wówczas zjawisko naprzemiennego interferencyjnego wzmacniania i osłabiania – powstaje fala stojąca.

W modelu drgań struny o długości  $L$  zamocowanej na obu końcach, w miejscu mocowań występują węzły, ten warunek brzegowy powoduje, że w strunie generują się drgania o określonej liczbie falowej  $k$ , a przez to o określonej długości fali. Równanie fali wzdłuż kierunku  $x$  wyraża się wzorem:

$$z = 2A \sin\left(\frac{m\pi}{L}x\right) \cos\omega t, \quad (3.12)$$

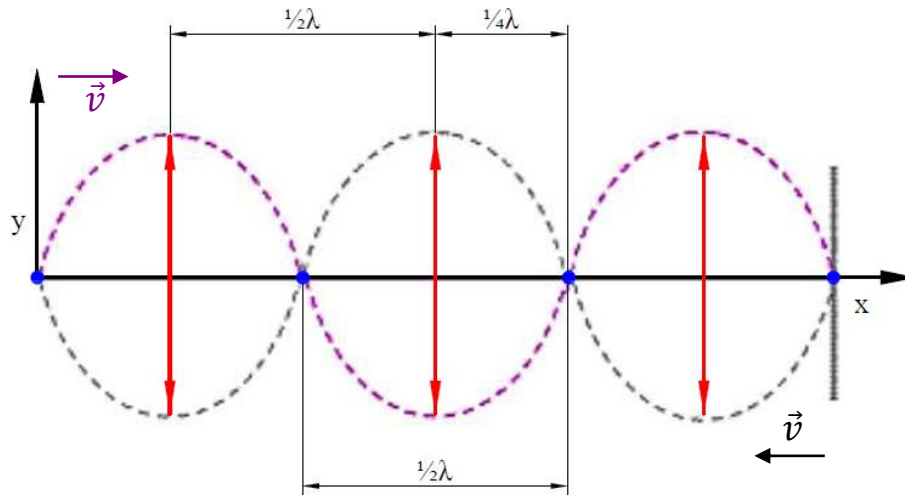
gdzie  $A$  jest amplitudą fali biegnącej lub fali odbitej, a  $m$  liczbą naturalną. Amplituda fali stojącej  $2A \sin\left(\frac{m\pi}{L}x\right)$  zmienia się wraz z położeniem  $x$ .

Wyrażenie  $\frac{m\pi}{\lambda}$  jest liczbą falową  $k_m$  (dla  $m$ -tego przypadku), co pozwala wyznaczyć ściśle określoną długość fali stojącej:

$$\lambda_m = \frac{2\pi}{k_m} = \frac{2L}{m}. \quad (3.13)$$

Ze względu na fakt, iż  $m$  może przyjmować tylko wartości liczb naturalnych ( $m = 1, 2, 3, \dots$ ) najdłuższa fala stojąca ma długość  $2L$  ( $m = 1$ ), dla  $m = 2$ ,  $\lambda_2 = L$ , dla  $m = 3$ ,  $\lambda_3 = \frac{2}{3}L$  itd. Ten ostatni przypadek przedstawiono na rysunku 3.4.

W takiej fali miejsca maksymalnych wychyleń (strzałki – nieparzyste wielokrotności  $\frac{1}{4}\lambda$ ) oraz węzły (punkty w których brak wychyleń – całkowite wielokrotności  $\frac{1}{2}\lambda$ ) nie zmieniają położenia w czasie (rys. 3.4) [83,84].



Rys. 3.4. Fala stojąca – kolorem niebieskim zaznaczono węzły, czerwonym strzałki

Korzystając z definicji na prędkość fazową fali:

$$v = \frac{\omega}{k} , \quad (3.14)$$

można uzyskać związek częstości kołowej  $m$ -tej składowej harmoniczej drgania z częstością drgania podstawowego:

$$\omega_k = k_m v = \frac{m\pi}{L} v = m\omega_0 . \quad (3.15)$$

Amplituda i faza drgań wymuszonych - po ustaleniu się tych drgań - zależy od częstości kołowej drgań wymuszających  $\omega_w$  i własnych  $\omega_0$  układu oraz od współczynnika tłumienia  $\beta$ :

$$A = \sqrt{\frac{f_0^2}{(\omega_0^2 - \omega_w^2) + 2\beta\omega_w}} , \quad (3.16)$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{2\beta\omega_w}{\omega_0^2 - \omega_w^2}\right) . \quad (3.17)$$

gdzie  $f_0$  jest ilorazem siły wymuszającej  $F_0$  i masy.

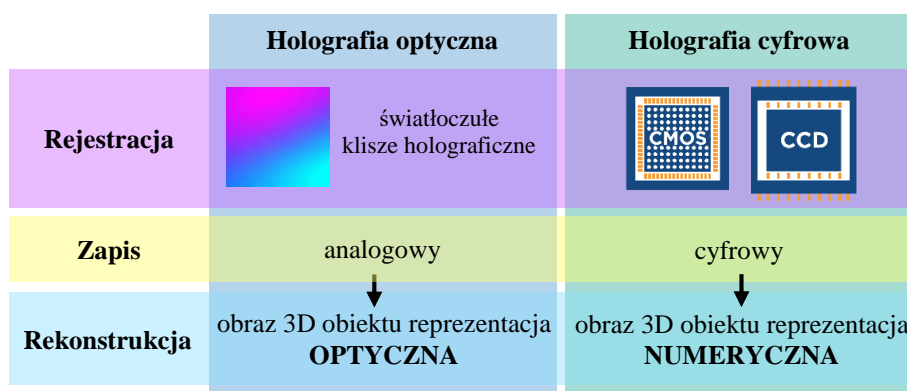
W przypadku fal stojących można spodziewać się wymuszonych drgań układu o różnych częstotliwościach i amplitudach.

Jakościowy opis drgań belki, wymuszonych siłą periodyczną o częstotliwości  $\omega_w$  będzie zbliżony do modelu drgań wymuszonych klasycznego oscylatora harmonicznego. Dla częstości  $\omega_w$  zbliżonych do częstotliwości drgań własnych amplituda wymuszonych drgań będzie znacząco rosła. Wielkość tej amplitudy będzie ponadto zależna od współczynnika tłumienia. Ponadto w obszarze rezonansowym różnica pomiędzy częstościami  $\omega_0 - \omega_w$  będzie rosła wraz ze współczynnikiem tłumienia. Opis rzeczywistych drgań wymuszonych w cienkiej belce, szczególnie złożonej z warstw różnych materiałów, bez punktowego mocowania i wymuszania drgań wymaga wprowadzenia wielu warunków brzegowych, co znacznie komplikuje sposób rozwiązania i wymaga osobnego podejścia do każdego typu takiego obiektu.

## 4. HOLOGRAFIA

Holografia jest techniką wykorzystującą spójne wiązki promieniowania, umożliwiając rejestrację i rekonstrukcję frontów falowych wiązki odbitej od obiektu badanego (lub przechodzącej przez obiekt). U jej podstaw leżą zjawiska interferencji i dyfrakcji. W odróżnieniu od klasycznej fotografii niosącej tylko informację o natężeniu światła biegnącego od obrazowanego przedmiotu, hologram stanowi wynik interferencji wiązki odbitej od przedmiotu (wiązki przedmiotowej) z wiązką referencyjną. W odległościach pomiędzy prążkami interferencyjnymi hologramu jest zakodowana informacja o fazie wiązki przedmiotowej, a kontrast prążków niesie informacje o jej amplitudzie. Efekt ugięcia wiązki referencyjnej na hologramie umożliwia odzyskanie obu powyższych informacji, a przez to rekonstrukcję trójwymiarową czoła fali odbitej od obiektu. Potocznie mówi się tutaj o trójwymiarowej rekonstrukcji obiektów [92,93].

Klasyczne klisze holograficzne wymagały wywołania i utrwalenia (podobnie jak klisze fotograficzne), co wydłużało czas rekonstrukcji trójwymiarowej. Obserwowany od ponad dwudziestu lat postęp w wytwarzaniu detektorów optycznych o wysokiej zdolności rozdzielczej oraz niezwykle dynamiczny wzrost mocy obliczeniowej komputerów umożliwił skrócenie czasu rekonstrukcji i pozwolił na pracę w czasie rzeczywistym. W cyfrowej holografii laserowej klasyczne klisze holograficzne zostały zastąpione cyfrowymi matrycami światłoczułymi w kamerach CCD<sup>5</sup>. Odtworzenie informacji o wiązce obiektowej (o jej amplitudzie i fazie) odbywa się poprzez numeryczną obróbkę danych zarejestrowanych na matrycy światłoczułej (rys. 4.1).



Rys. 4.1. Holografia optyczna i cyfrowa [92]

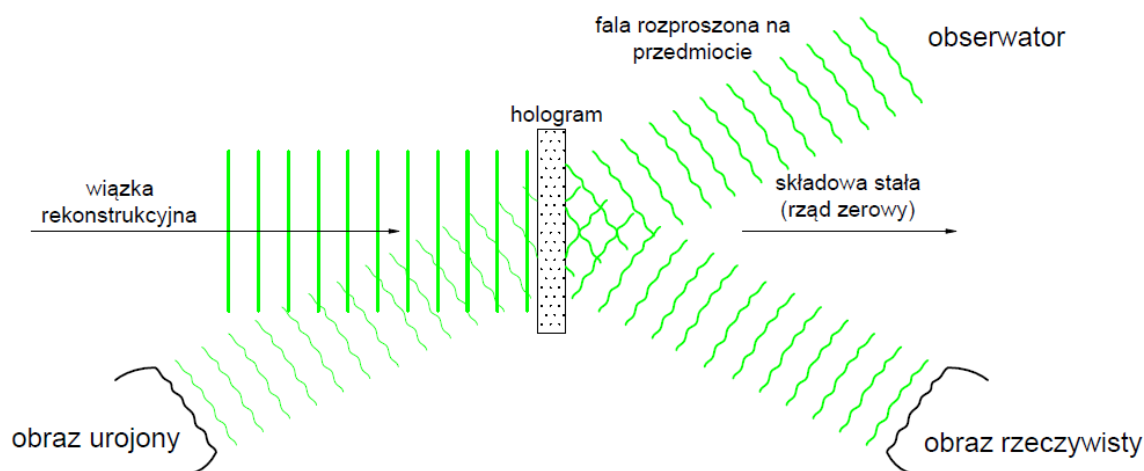
<sup>5</sup> CCD (ang. *Charge-Coupled Device*), czyli układy ze sprzężeniem ładunkowym, cechujące się małymi zniekształceniami obrazu i szybkością działania ale dużą czułością.



Wysokorozdzielczymi detektorami optycznymi są najczęściej matryce CCD lub CMOS<sup>6</sup>. Ich rozdzielczość determinowana jest przez wymiary piksela zależne od typu zastosowanego detektora. Matryce determinują próbkowanie i kwantyzowanie sygnału natężeniowego. Sygnał ten zostaje następnie zapisany w postaci macierzy w pamięci komputera.

#### 4.1. Rekonstrukcja hologramu

W procesie rekonstrukcji ponownie generowana płaska fala referencyjna pada na hologram (rys. 4.2). Każdy punkt hologramu staje się wówczas źródłem elementarnej fali sferycznej (zasada Huygensa), której natężenie zależy od transmitancji hologramu w danym punkcie [94].



Rys. 4.2. Rekonstrukcja hologramu

Stosując przybliżenie Fresnela uzyskuje się wyrażenie na zespoloną amplitudę fali ugiętej w odległości  $d$  odpowiadającej odległości hologramu od płaszczyzny obrazu rzeczywistego rejestrowanego na matrycy światłoczułej (rys. 4.3). Jeśli ta matryca wprowadza próbkowanie rastrem  $M \times N$  punktów z okresami próbkowania  $\Delta x$  i  $\Delta y$ , to dyskretny rozkład funkcji w formie numerycznej przyjmuje postać [94]:

<sup>6</sup> CMOS (ang. *Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*), czyli matryce wykorzystujące fotodiody. Charakteryzują się niższym napięciem zasilania i mniejszym poborem mocy niż matryce CCD, kosztem zmniejszenia powierzchni aktywnej, a w następstwie kosztem obniżenia czułości całego układu.

$$U(m, n; d) = e^{(-i\frac{\pi}{\lambda d}(m^2\Delta\xi^2+n^2\Delta\eta^2)} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} h(k, l) \times \quad (4.1)$$

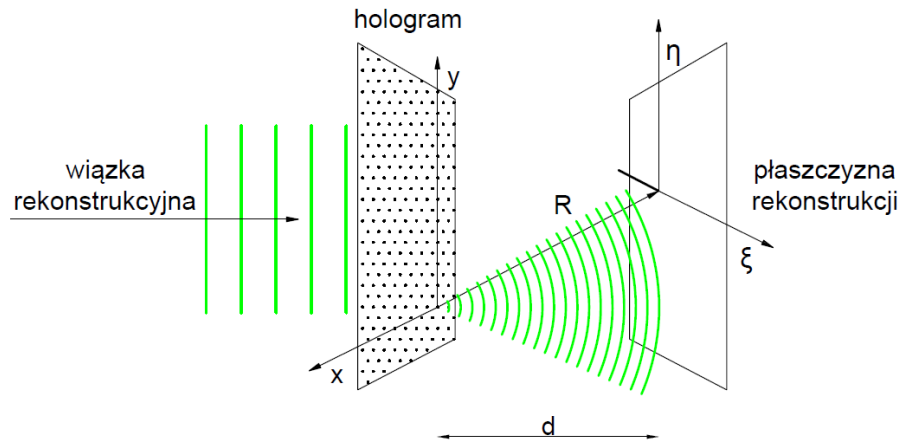
$$e^{(-i\frac{\pi}{\lambda d}(k^2\Delta x^2+l^2\Delta y^2)} e^{(i2\pi(\frac{km}{M}+\frac{ln}{N}))} ,$$

gdzie:

$U(m, n; d)$  – matryca  $M \times N$  punktów z rozkładem amplitud i faz w obrazie rzeczywistym (w odległości  $d$  od hologramu),

$\Delta\xi, \Delta\eta$  – wymiary pikseli w rekonstruowanym obrazie,

$h$  – transmitancja hologramu.



Rys. 4.3. Schemat i oznaczenia stosowane w numerycznym opisie rekonstrukcji hologramu [94]

Korzystając z części rzeczywistej i urojonej powyższej funkcji można wyznaczyć natężenie i fazę wiązki obiektowej, co prowadzi do rekonstrukcji jej frontu falowego i ostatecznie do trójwymiarowej rekonstrukcji obrazu [94]. Natężenie  $I(\xi, \eta; d)$  i faza  $\phi(\xi, \eta; d)$  wyrażone są wówczas wzorami:

$$I(\xi, \eta; d) = Re^2[U(m, n; d)] + Im^2[U(m, n; d)] , \quad (4.2)$$

$$\phi(\xi, \eta; d) = \arctg \frac{Im[U(m, n; d)]}{Re[U(m, n; d)]} , \quad (4.3)$$

gdzie  $Re$  i  $Im$  reprezentują odpowiednio rzeczywistą i urojoną część funkcji  $U(m, n; d)$ .

## 4.2. Interferometria plamkowa

Odmianą interferometrii holograficznej opartej na analizie światła laserowego rozproszonego na optycznie chropowatej powierzchni jest interferometria plamkowa (ang. *Electronic Speckle Pattern Interferometry* – ESPI). Rozwój tej techniki nastąpił na początku lat dziewięćdziesiątych XX wieku, dzięki zastąpieniu kamer wideo matrycami CCD – w ten sposób powstała technika zwana cyfrową interferometrią plamkową (ang. *Digital Speckle Pattern Interferometry* – DSPI)<sup>7</sup>. Struktura plamkowa to obraz składający się z jasnych i ciemnych plamek, zwanych również speklami. Powstaje w wyniku interferencji pomiędzy wieloma, przesuniętymi w fazie wiązkami światła pochodzącymi od rozproszonej na chropowatej powierzchni wiązki przedmiotowej i wiązki referencyjnej<sup>8</sup>, o natężeniu zbliżonym do średniego natężenia światła w obrazie plamkowym,  $I_0$ . Światło laserowe zachowuje spójność w obszarze pojedynczej plamki, oznacza to, że dowolne pole plamkowe o strukturze losowej może brać udział w procesie interferencji, a każda plamka ma określoną fazę i amplitudę. Gęstość rozkładu prawdopodobieństwa natężenia światła w powstającym w ten sposób obrazie plamkowym, o cechach probabilistycznych, można opisać poniższym wzorem [95,96]:

$$p(I) = \left(\frac{2}{I_0}\right) \cdot \exp\left[-\left(1 + \frac{2I}{I_0}\right)\right] \cdot J_0\left(2\sqrt{\frac{2I}{I_0}}\right), \quad (4.4)$$

gdzie:

- $p(I)$  – funkcja gęstości prawdopodobieństwa występowania plamki o natężeniu  $I$ ,
- $I_0$  – średnie natężenie światła w obrazie plamkowym,
- $J_0$  – funkcja Bessela zerowego rzędu [95].

Początkowo plamki (spekle) były uznawane w holografii za szum, który źle wpływał na jakość rejestrowanych i odtwarzanych hologramów. Bardzo szybko zdano sobie jednak sprawę z tego, że ów szum niesie informację o kształcie powierzchni oświetlanej w czasie badania [97]. Uzyskiwany w wyniku pomiaru obraz interferencyjny poddawany jest obróbce komputerowej. Technika ta stosowana jest w celu pomiaru naprężeń i odkształceń, a także do analizy wpływu wibracji na badany obiekt i wizualizacji wad, trudnych do wykrycia innymi metodami [96].

<sup>7</sup> Obecnie nazwy ESPI i DSPI często stosowane są zamiennie.

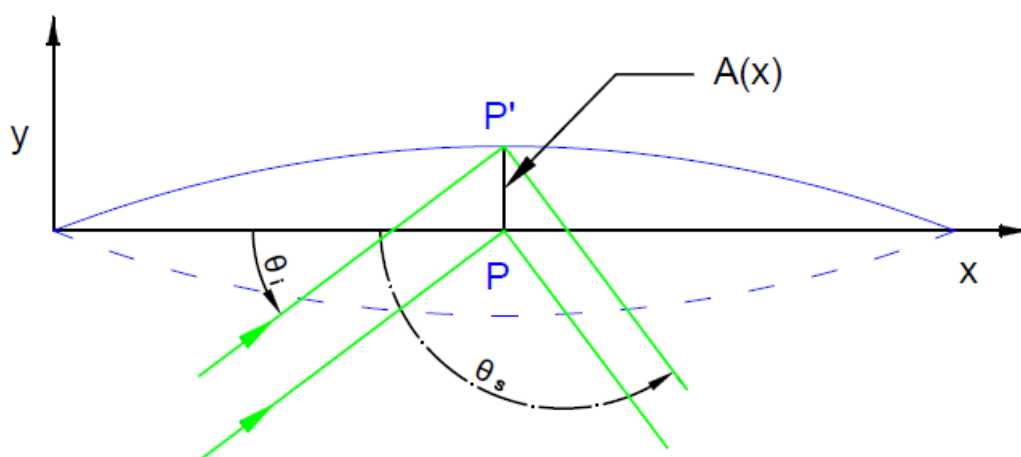
<sup>8</sup> Umożliwia to korelacja fazowa promieni pochodzących z tego samego źródła.

## 5. WIBROMETRIA HOLOGRAFICZNA

Wibrometria holograficzna jest nieniszczącą, bezstykową techniką pomiaru drgań powierzchni badanego obiektu. Wymuszone drgania obiektu o nanometrycznych amplitudach są mierzone z subnanometryczną zdolnością rozdzielczą. Holograficzny charakter pomiaru pozwala na jednoczesną trójwymiarową rejestrację drgań całego badanego obszaru próbki. Podczas pomiaru w obiekcie badanym wzbudzone są drgania o określonej częstotliwości. Światło laserowe rozdzielane jest na wiązkę obiektową i referencyjną. Wiązka obiektowa po odbiciu od drgającego obiektu doznaje przesunięcia fazy oraz deformacji frontu falowego i w takim stanie interferuje z wiązką referencyjną, tworząc hologram. Hologram jest zapisywany na matrycy światłoczułej. Następnie dokonuje się komputerowej trójwymiarowej rekonstrukcji drgań w danym momencie czasowym. Procedurę powtarza się wielokrotnie dla różnych faz drgania w celu zobrazowania pełnego cyklu drgań. Analiza uzyskanych w ten sposób wyników umożliwia nie tylko scharakteryzowanie rozprzestrzeniania się fal mechanicznych w warstwach różnych materiałów [98–100], lecz również może posłużyć do wykrywania defektów połączeń w kompozytach, które nie są ujawniane za pomocą innych metod pomiarowych.

Przemieszczenie punktu  $P$  w funkcji czasu  $t$ , który wykonuje ruch oscylacyjny o amplitudzie  $A(x)$  z częstotliwością  $\omega$  (rys. 5.1), opisuje wzór [101]:

$$y(t) = A(x) \cos(\omega t) \quad . \quad (5.1)$$



Rys. 5.1. Wiązka przedmiotowa ulegająca odbiciu w punkcie  $P$  lub  $P'$  w zależności od fazy drgania

Faza punktu  $P$  w momencie maksymalnego wychylenia (do pozycji  $P'$ ) określona jest wzorem [101]:

$$\delta(x, t) = \left(\frac{2\pi}{\theta}\right) A(x) (\sin\theta_i + \sin\theta_s) \cos(\omega t) , \quad (5.2)$$

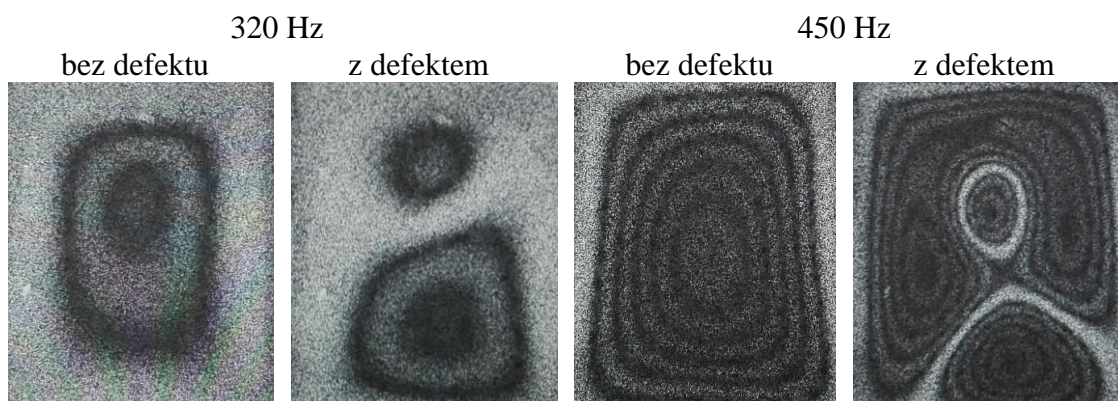
gdzie:

$\theta$  – faza drgania.

Oznaczenia  $\theta_i$  i  $\theta_s$  na rysunku 5.1.

Powyzszą zależność wykorzystuje się w analizie wyników pomiarów wykonywanych metodą wibrometrii laserowej.

Jeśli w obiekcie wymusi się drgania w postaci fali stojącej, to defekt – np. w postaci nierównej grubości ścianki – może zostać wykryty dzięki zmianie rozkładu przestrzennego drgań [96]. Rysunek 5.2 przedstawia przykładowe rozkłady drgań.

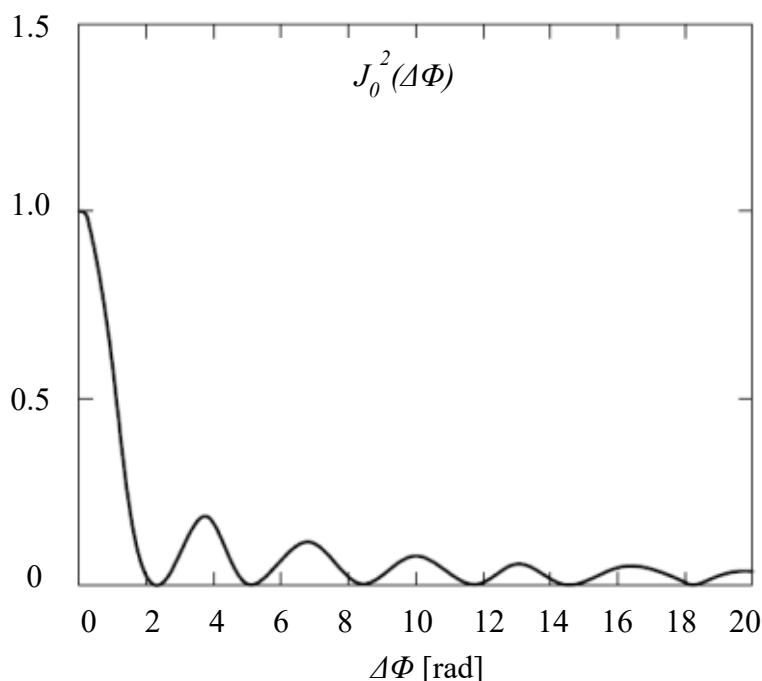


Rys. 5.2. Porównanie obrazów wibrometrycznych metalowego obiektu cienkościennego bez defektu i z defektem dla dwóch różnych częstotliwości wzbudzenia – amplituda drgań proporcjonalna do zaciemnienia obrazu

## 5.1. Funkcja Bessela

W przypadku wibrometrii holograficznej dokonuje się rejestracji uśrednionych w czasie drgań obiektu. Numeryczna analiza hologramów z uśrednieniem czasowym służy ilościowemu wyznaczeniu rozkładu amplitudy i fazy drgań przedmiotu. Korzysta się w niej z formalizmu opisującego dyfrakcję i interferencję holograficzną z wykorzystaniem funkcji Bessela. Rozkład amplitud drgań wynika z kwadratu funkcji Bessela  $J_0^2(\Delta\Phi)$  (o argumentzie mającym postać zmiany fazowej – rys. 5.3), czyli rozkładu intensywności prążków interferencyjnych [102]. Zakres zmian fazy  $\delta(x,t)$ , a zatem również zakres zmian amplitudy drgań  $A(x)$  (patrz równanie (5.2)) jest ograniczony warunkiem mówiącym, że argument funkcji Bessela zerowego rzędu  $J_0(\Delta\Phi)$  (mający postać zmiany fazowej  $\Delta\Phi$ ), jest mniejszy niż argument tej funkcji dla pierwszego minimum [96,101].

W praktyce oznacza to, że na etapie wstępnych pomiarów należy zwiększać wzmocnienie drgań próbki tylko do wartości gwarantującej najlepszy stosunek sygnału do szumu i jednocześnie mieć świadomość, że większe amplitudy drgań próbki będą skutkować spadkiem sygnału, a także mogą w skrajnych przypadkach prowadzić do przekłamań w analizie numerycznej.



Rys. 5.3. Wykres kwadratu funkcji Bessela zerowego rzędu, stosowanej w interferometrii holograficznej dla metody uśredniania w czasie [102]

## 5.2. Warunki rejestracji hologramu

Niekontrolowane drgania układu pomiarowego zwiększają szумы podczas rejestracji hologramów. Ograniczenie tych wibracji stanowi największą praktyczną trudność w zapewnieniu odpowiednich warunków pomiarowych.

Przemieszczanie się, na skutek drgań pochodzących z zewnątrz, przenoszonych przez podłogę czy stół pomiarowy, poszczególnych elementów układu holograficznego w czasie rejestracji hologramu może skutkować zmianą drogi optycznej fali docierającej od obiektu do detektora i interferującej z wiązką referencyjną w interferometrze wibrometru.

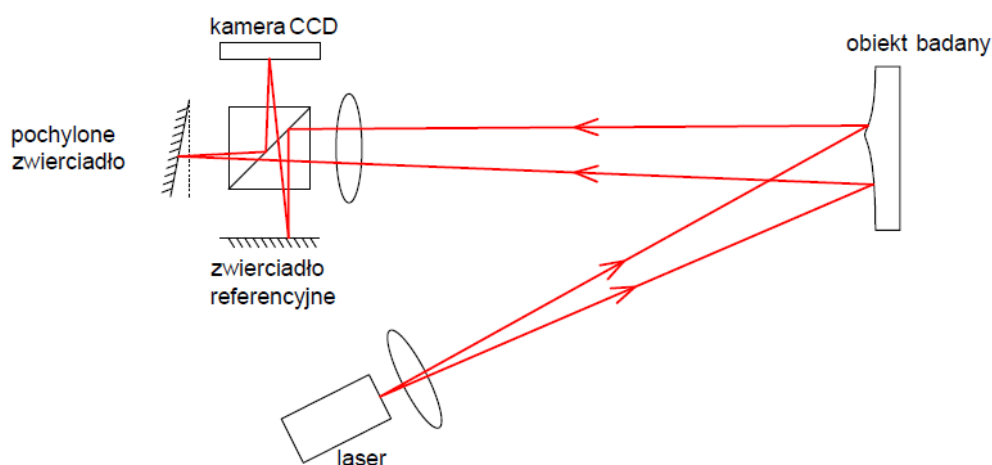
Pomieszczenie pomiarowe powinno być zatem odizolowane od źródeł silnych drgań i hałasu, a stół pomiarowy nie powinien przenosić wibracji otoczenia. W części optycznej wibrometru należy unikać ruchu powietrza podczas pomiaru. Wszystkie elementy układu pomiarowego powinny mieć solidną budowę zapewniającą odpowiednią sztywność oraz być umieszczone na jednej podstawie (za wyjątkiem lasera), tak aby ewentualne niewytłumione drgania wpływały jednakowo na każdy element układu. Przed rozpoczęciem pomiarów należy więc wyeliminować lub zminimalizować możliwość przemieszczania się elementów układu pomiarowego [103].

## 6. SZEROGRAFIA

Pojęcie szerografia jest spolszczeniem angielskiego słowa *shearography* (ang. *shear* – ścinać i *graph* – wykres) [37,104]. Wynika to z braku upowszechnienia tej techniki pomiarowej w Polsce, która na świecie należy do znormalizowanych metod nieniszczących, co szczegółowo opisuje norma ASTM E2581-07 [105].

Szerografia jest szczególnie chętnie stosowana w branży motoryzacyjnej i lotniczej<sup>9</sup>. Badanych obiektów nie trzeba niszczyć podczas badania, a jedynie poddać je odwracalnemu odkształceniom. Szerografia pozwala również na badanie obiektów, które samoczynnie ulegają odkształceniom, takim jak np. rurociągi czy zbiorniki ciśnieniowe [109,110]. Technika ta pozwala na wykrywanie zarówno defektów powierzchniowych jak i wewnętrznych, które powodują zewnętrzną deformację obiektu [111,112].

W skład typowego szerografu wchodzi laser półprzewodnikowy, którego zadaniem jest oświetlenie obiektu badanego światłem spójnym, interferometr Michelsona z pochylonym zwierciadłem oraz układ optyczny, umożliwiający interferencję dwóch promieni światła, odbitych od różnych punktów powierzchni obiektu na jednym pikselu światłoczułym matrycy CCD (rys. 6.1) [36,37]. Dodatkowym elementem systemu może być urządzenie odpowiedzialne za wywołanie naprężenia w badanym obiekcie np. lampa ogrzewająca powierzchnię obiektu, komora próżniowa poddająca powierzchnię obiektu działaniu podciśnienia czy popychacze mechaniczne [111,112].



Rys. 6.1. Schemat szerograficznego układu pomiarowego

<sup>9</sup> W branży lotniczej szerografię wykorzystuje się do wykrywania defektów wirników nośnych helikopterów czy nitów łączących poszycie samolotu [106–108].

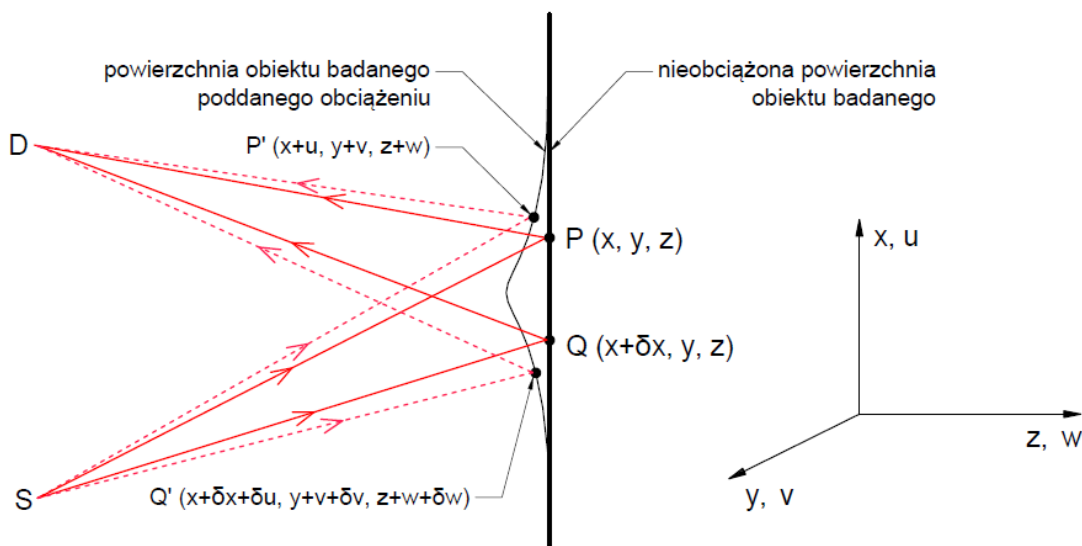


Deformacja obiektu pod wpływem obciążenia prowadzi do zmiany różnicy dróg optycznych wiązek padających w danym miejscu na detektor, a zatem również do zmiany fazy fali wypadkowej. Bieg wiązek laserowych w pomiarach szerograficznych przedstawiono na rysunku 6.2. Związek między różnicą faz i pochodnymi cząstkowymi przemieszczenia odkształconej powierzchni obiektu można zapisać jako [37,113]:

$$\Delta_x = \frac{2\pi}{\lambda} \left( k_x \frac{\partial u}{\partial x} + k_y \frac{\partial v}{\partial x} + k_z \frac{\partial w}{\partial x} \right) \delta x, \quad (6.1)$$

gdzie:

- $\Delta_x$  – zmiana fazy, wynikająca z przemieszczenia między punktami  $Q(x+\delta x, y, z)$  i  $P(x, y, z)$ ,
- $u, v, w$  – wektory przemieszczenia punktu  $P(x, y, z)$ ,
- $k_x, k_y, k_z$  – współrzędne tzw. wektora czułości, definiowanego przez dwusieczną kąta pomiędzy wektorami reprezentującymi kierunek oświetlenia  $S(x_s, y_s, z_s)$  i detekcji  $D(x_d, y_d, z_d)$ ,
- $\delta x$  – przemieszczenie w kierunku  $x$ .



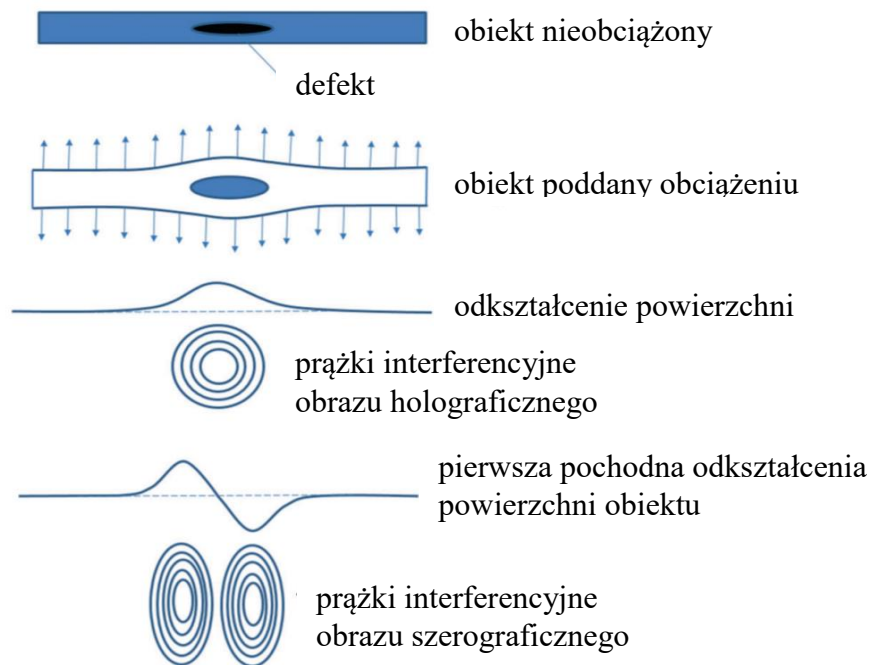
Rys. 6.2. Bieg wiązek w pomiarach szerograficznych:  $S$  – źródło promieniowania laserowego,  $D$  – detektor

Równanie (6.1) oznacza, że wyznaczenie wartości pochodnych przemieszczeń jest możliwe poprzez zastosowanie trzech różnych kątów oświetlenia obiektu. Zakładając,

że  $x_s = y_s = x_D = y_D = 0$ , pochodną przemieszczenia dla przykładowej współrzędnej można obliczyć z wzoru [37,113]:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\Delta_x \lambda}{4\pi \delta x} \quad (6.2)$$

W szerografii odejmowane są od siebie dwa obrazy interferencyjne badanej powierzchni – przed i po obciążeniu obiektu. Powstały w ten sposób szerogram, związany jest z pierwszą pochodną odkształcenia powstałego pod wpływem zadanego obciążenia. Odpowiednie oprogramowanie umożliwia obrazowanie rozkładu punktów obiektu badanego, w którym dochodzi do innego odkształcenia niż w miejscach sąsiadujących. Porównanie szerogramów uzyskanych dla obiektu wzorcowego i obiektu z wadą umożliwia jej wykrycie i lokalizację. Wewnętrzny defekt skutkuje innym rozkładem naprężeń, co po poddaniu obiektu obciążeniom objawia się m.in. deformacją powierzchni – schematycznie obrazuje to rysunek 6.3. Po obciążeniu obiektu występowanie defektu manifestuje się wypiętrzeniem powierzchni [36,37,104].



Rys. 6.3. Porównanie wyników pomiarów holograficznych i szerograficznych [104]

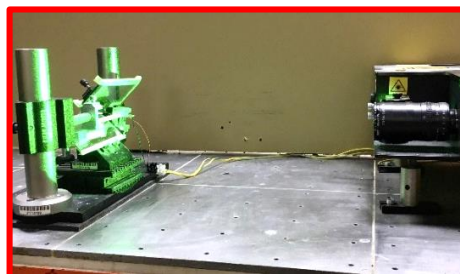
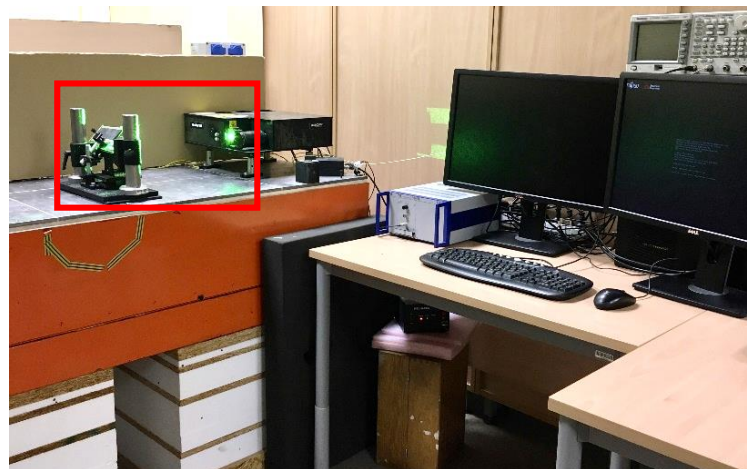
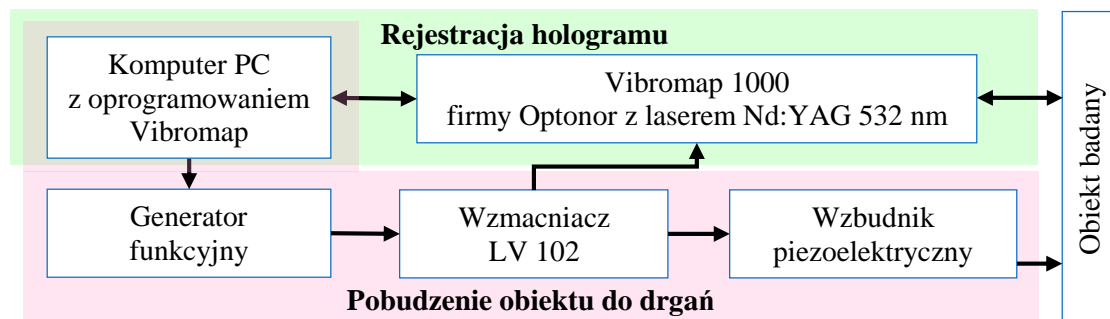
Optyczne metody interferometryczne, w tym szerografia i holografia umożliwiają bezstykowy pomiar bardzo nieznacznych deformacji powierzchni, których wartości często

nie osiągają nawet ułamków mikrometra. Prążki interferencyjne obrazu holograficznego ilustrują rozkład odkształcenia obserwowanej powierzchni, natomiast prążki szerogramu dotyczą pierwszej pochodnej tego odkształcenia (rys. 6.3) [36,104]. Za pomocą obu metod można wyznaczyć rozmiar wypiętrzenia i odtworzyć jego kształt, a przez to wnioskować o defekcie wewnętrznym [36,37,104]. Metoda szerograficzna jest czasami uznawana za mniej intuicyjną. Wymaga ona również lepszego zdefiniowania parametrów pomiarowych, w tym tzw. *shearu* (wektor  $\vec{k}$  w równaniu (6.1) decydującego o zdolności rozdzielczej metody. Odwzorowanie topografii powierzchni jest możliwe dopiero po scałkowaniu sygnału szerograficznego.

## 7. STANOWISKO POMIAROWE I METODY BADAŃ

Badania metodą cyfrowej wibrometrii holograficznej wykonano za pomocą układu pomiarowego zmodyfikowanego na potrzeby pracy doktorskiej, wykorzystując urządzenie Vibromap 1000 firmy Optonor.

Na schemacie blokowym (rys. 7.1) przedstawiono elementy stanowiska pomiarowego, niezbędne do zebrania i analizy danych doświadczalnych – kolorem różowym oznaczono elementy odpowiedzialne za pobudzenie obiektu do drgań, natomiast kolorem zielonym elementy odpowiedzialne za rejestrację hologramów w różnych fazach drgań badanego obiektu.

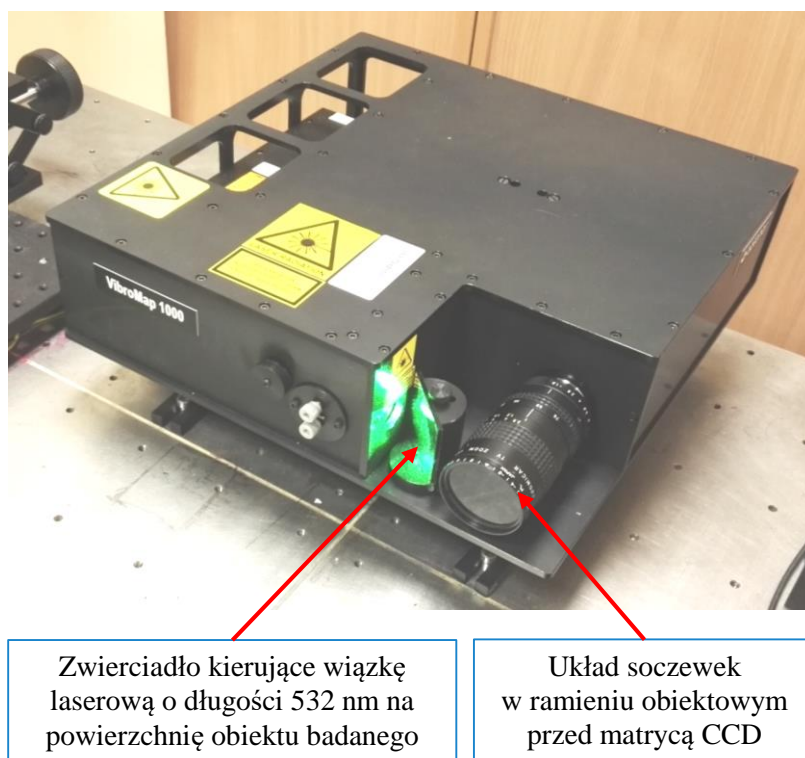


Rys. 7.1. Schemat blokowy i widok stanowiska pomiarowego z cyfrowym wibrometrem holograficznym, w czerwonej ramce wyróżniono część optyczną wibrometru holograficznego oraz układ mocowania próbek

bek

## 7.1. Układ pomiarowy

W badaniach zastosowano cyfrowy wibrometr holograficzny (ang. *Digital Holographic Vibrometer* – DHV) Vibromap 1000, ze źródłem promieniowania laserowego Nd:YAG o długości fali 532 nm i mocy 150 mW, pracujący w trybie ciągłym. Najważniejszym elementem wibrometru laserowego jest jego część optyczna (rys. 7.2) z interferometrem w konfiguracji Michelsona ze światłowodowym ramieniem referencyjnym oraz ramieniem obiektywnym, w którym wiązka laserowa odbija się od powierzchni drgającego obiektu.

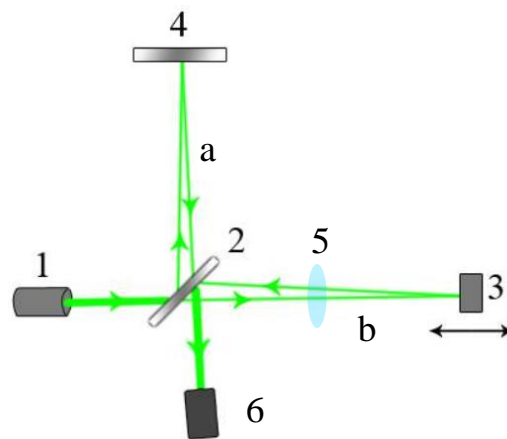


Rys. 7.2. Część optyczna wibrometru holograficznego VibroMap 1000 firmy Optonor

Schemat interferometru przedstawia rysunek 7.3 – podczas pomiaru za pośrednictwem generatora funkcji, wzmacniacza i wzbudnika piezoelektrycznego, będącego w bezpośrednim kontakcie z obiektem badanym wzbudzone są drgania o określonej częstotliwości. Światło laserowe trafia na element światłodzielnący, gdzie jest rozdzielane na wiązkę obiektywną i referencyjną. Wiązka obiektywna oświetla powierzchnię badanego obiektu, która ją odbija w kierunku elementu światłodzielnącego, gdzie spotyka wiązkę referencyjną. Następnie obie interferujące ze sobą wiązki padają na matrycę światłoczułą (kamera CCD, 640 x 480 pikseli), umożliwiając powstanie hologramu. Zastosowany układ optyczny z redukcją szumu plamkowego pozwala na badanie powierzchni obiektowych

od  $1 \text{ cm}^2$  do  $1 \text{ m}^2$ , drgających z amplitudą do kilkunastu mikrometrów, mierzoną z subnanometryczną zdolnością rozdzielczą.

Na kamerze CCD nagrywa się obraz z częstotliwością 60 Hz, natomiast częstotliwość drgań obiektu badanego może być o kilka rzędów wielkości większa. Dlatego w celu rejestracji hologramów obrazujących pełen okres drgań korzysta się z funkcji modulacji fazy, której efektem są hologramy uśrednione w czasie z wielu przebiegów funkcji sinusoidalnej.



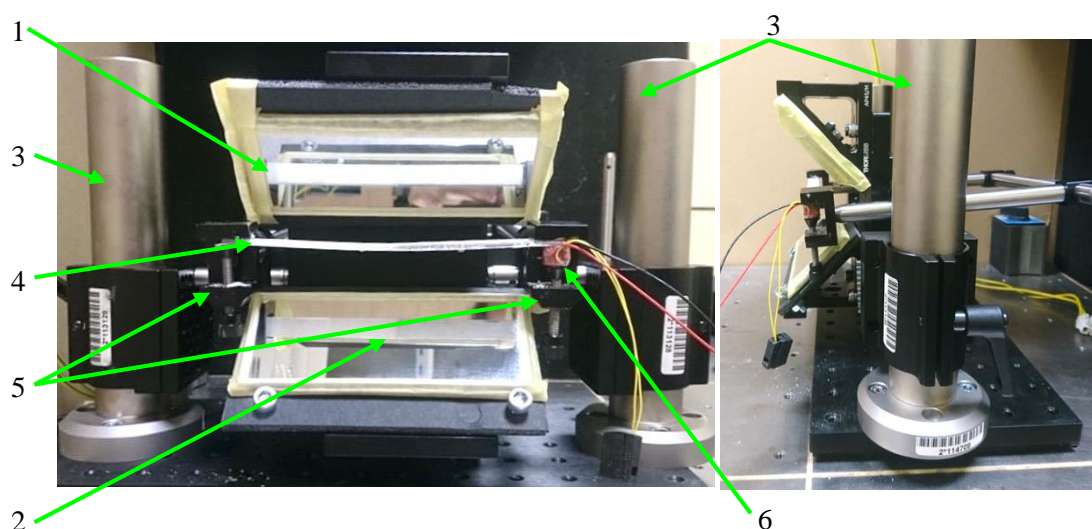
Rys. 7.3. Interferometr Michelsona: a – ramię referencyjne, b – ramię obiektowe,  
 1 – laser Nd:YAG  $\lambda=532 \text{ nm}$ , 2 – element światłodzielnący, 3 – obiekt badany, 4 – zwierciadło referencyjne,  
 5 – układ soczewek formujących wiązkę, 6 – detektor CCD

Program „Vibromap” firmy Optonor steruje pracą generatora funkcyjnego (Tektronix AFG, 3022C), którego sygnał po wzmocnieniu może powodować drgania we wzбудniku piezoelektrycznym o częstotliwości od 30 Hz do 25 MHz. Komputerowy program sterowania umożliwia pracę w różnych trybach nagrywania. Jednym z nich jest tryb pracy w czasie rzeczywistym, który służy do obserwacji hologramów i pozwala na określenie interesujących zakresów częstotliwości wzbudzenia. W trybie numerycznym możliwe jest zapisanie hologramów w pliku Matlab.mat dla określonej częstotliwości wzbudzenia oraz napięcia podawanego na wzbudnik drgań. Plik zawiera wartości amplitudy i fazy hologramu odpowiednio w macierzach  $A_{x,y}$ , i  $\varphi_{x,y}$ , co pozwala na zobrazowanie drgań próbki. Wówczas wzór opisujący zależność położenia poszczególnych punktów na powierzchni obiektu badanego  $\Delta_{x,y}$  od czasu  $t$  przybiera postać  $\Delta_{x,y} = A_{x,y} \cos(\omega t + \varphi_{x,y})$ .



## 7.2. Układ mocowania obiektu badanego i zwierciadeł

Podczas standardowych pomiarów wibrometrycznych stosuje się układ, w którym podczas pomiaru widoczna jest tylko jedna strona próbki. Z uwagi na fakt, że większość prowadzonych badań dotyczyła obserwacji złącz polimer-metal, jednoczesna rejestracja drgań obu stron próbki, umożliwiła analizę wyników uzyskanych w tych samych warunkach pomiarowych dla obu łączonych materiałów. Dlatego, na potrzeby prowadzonych badań zaprojektowano układ umożliwiający równoczesną obserwację dwóch stron próbki podczas pojedynczej rejestracji dzięki zastosowaniu układu dwóch płaskich zwierciadeł, pomiędzy którymi mocowano próbkę (rys. 7.4).



Rys. 7.4. Widok z przodu i z boku systemu mocowania zwierciadeł i próbki umożliwiający jednoczesną obserwację dwóch powierzchni próbki podczas pojedynczego pomiaru wibrometrycznego – zwierciadła i mocowanie próbki umieszczone na filarach tłumiących; 1,2 – odpowiednio górny i dolny obraz powierzchni próbki widoczny w zwierciadłach, 3 – filary tłumiące, 4 – próbka, 5 – mocowanie próbki, 6 – wzбудnik piezoelektryczny.

W zwierciadle górnym odbijała się górna powierzchnia próbki, a w dolnym, dolna powierzchnia próbki (rys. 7.4). Próbka była mocowana za pomocą dwóch uchwytów (po jednym z każdej strony próbki). Wzбудnik piezoelektryczny umieszczony był w uchwycie po prawej stronie obiektu badanego, w bezpośrednim kontakcie z jego dolną powierzchnią. Wzбудnik zawsze znajdował się poza obszarem obrazowanym podczas pomiaru.

Dużą wagę przykładano do izolacji układu pomiarowego od drgań otoczenia. Układ mocowania próbki został zawieszony na filarach tłumiących zamocowanych do płyty

umieszczonej na podkładce z sorbotanu – materiału tłumiącego drgania. Cały układ pomiarowy był ustawiony na stole antywibracyjnym ze styropianowymi podporami (rys. 7.1).

Badania wstępne pozwoliły na wprowadzenie niezbędnych modyfikacji układu mocowania próbek i zwierciadeł. Pierwsza wersja układu zakładała zawieszenie na wspólnym mocowaniu tłumiącym zarówno system mocowania próbki, jak i zwierciadeł. Po przeprowadzeniu badań ustalono jednak, że takie rozwiązanie nie jest odpowiednie. Drgania wzbudnika piezoelektrycznego przekazywane były wówczas również na zwierciadła, co wprowadzało zakłócenia w pomiarach. Dlatego zdecydowano się na rozwiązanie, w którym układ mocowania próbek pozostał na pierwotnych filarach tłumiących, natomiast zwierciadła zostały zamocowane na osobnych filarach, co pozwoliło na odseparowanie od drgań wywołanych przez wzbudnik.

Zastosowane filary tłumiące (rys. 7.5) są wykonane ze stali z niklowanym matowym wykończeniem. Parametry zastosowanych w układzie filarów tłumiących przedstawiono w tabeli 7.1.

Tab. 7.1. Parametry filaru tłumiącego DP8A Thorlabs [114]

Czas tłumienia drgań	[ms]	20
Częstotliwość rezonansowa (teoretyczna)	[Hz]	780
Długość	[mm]	203,2
Masa	[kg]	1,56



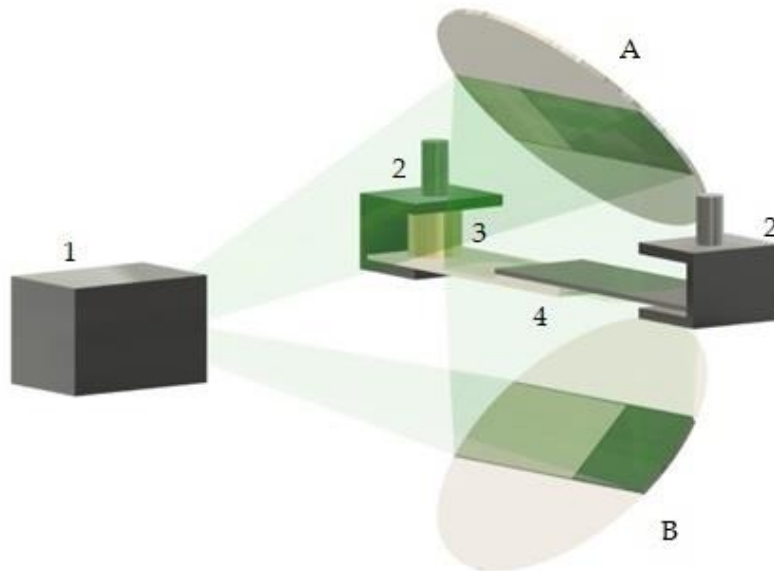
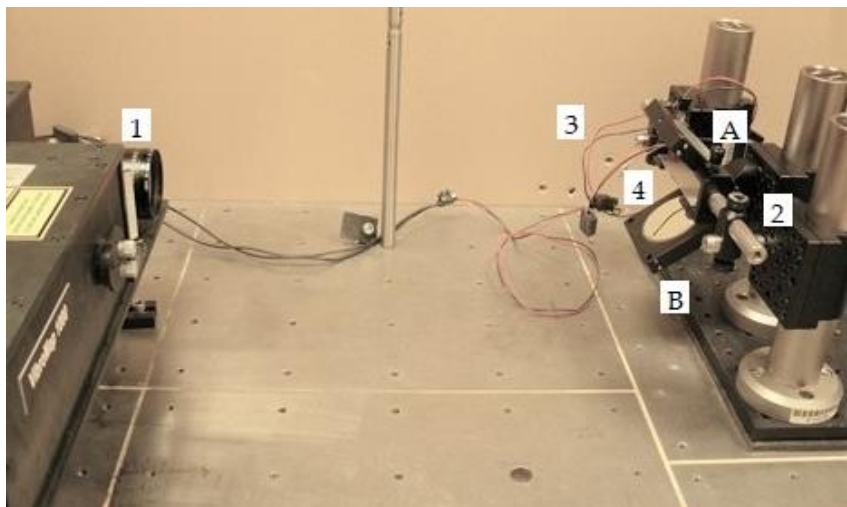
Rys. 7.5. Filar tłumiący DP8A Thorlabs [114]

Wykorzystują one wewnętrzny system pasywnego tłumienia drgań, umożliwiającą niezależny ruch obciążników tłumiących znajdujących się wewnątrz słupka względem



zewnętrznego korpusu. Pozwala to na szybkie pochłanianie oraz rozpraszanie energii drgań przez filar.

Modułowa budowa układu pomiarowego umożliwiała szybką modyfikację układu celem dopasowania do rozmiaru obiektów badanych, ale również do wymagań samego pomiaru – na rysunku 7.6 przedstawiono przykładową modyfikację układu (w stosunku do pokazanego na rysunku 7.4), pozwalającą na bardziej szczegółową obserwację złącza polimer-metal o wymiarach 20 x 20 mm, polegającą na zmianie kształtu i rozmiaru zwierciadeł, kąta ich nachylenia oraz odległości do obiektu badanego.



Rys. 7.6. Zmodyfikowany układ pomiarowy umożliwiający szczegółową obserwację złącza polimer-metal o wymiarach 20 x 20 mm: 1 – źródło promieniowania laserowego, 2 – mocowanie próbki, 3 – wzбудnik piezoelektryczny, 4 – próbka, A, B – odpowiednio górny i dolny obraz powierzchni próbki widoczny w zwierciadłach [115]

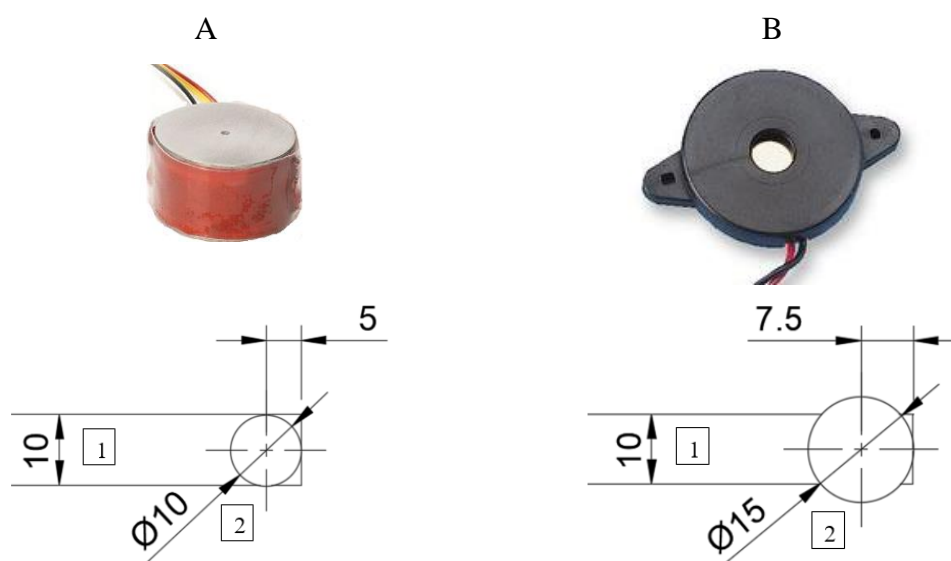
### 7.3. Wzbudnik drgań

W badaniach należało wywołać falę sprężystą w obiekcie o kształcie belki o grubości od 1 mm do 3 mm i wymiarach (długość i szerokość) 150 x 10 mm lub 100 x 10 mm. Obiekt był wzbudzany wibracyjnie sygnałem sinusoidalnym przekazywanym przez przetwornik piezoelektryczny. Wibrometr Vibromap1000 może pracować w szerokim zakresie częstotliwości wzbudzenia, od 30 Hz do 25 MHz. Ograniczenia doświadczalne wiążą się raczej z możliwościami wzbudników piezoelektrycznych oraz zdolnością obiektów badawczych do przenoszenia drgań.

W badaniach stosowano dwa typy wzbudników drgań: PI P-010.00P (o częstotliwości rezonansowej 129 kHz i średnicy zbliżonej do szerokości obiektu badanego) oraz prostszy i nieco większy przetwornik piezoelektryczny KingState KPE-827 pracujący w zakresie częstotliwości 200 Hz – 60 kHz (rys. 7.7) [83,84]. Porównanie podstawowych parametrów zastosowanych piezoelementów przedstawia tabela 7.2.

Tab. 7.2. Podstawowe parametry piezoelementów: PI P-010.00P i KingState KPE-827 [116,117]

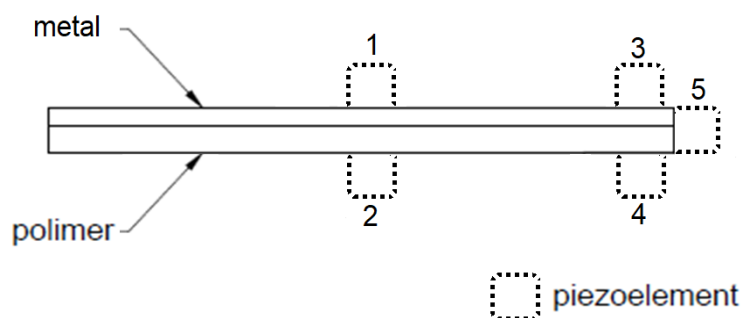
		PI P-010.00P	KingState KPE-827
Zakres pracy wzbudnika	[kHz]	0,2 – 129	0,2 - 60
Wysokość	[mm]	9	1
Średnica	[mm]	10	15
Pojemność elektryczna	[nF]	17	16,5 ( $\pm 30\%$ )



Rys. 7.7. Piezoelementy stosowane w badaniach i ich położenie względem próbki: A - PI P-010.00P, B - KingState KPE-827, 1 – próbka, 2 – piezoelement [116,117]

Przetwornik piezoelektryczny był umieszczony w bezpośrednim kontakcie z powierzchnią próbki dzięki zaciśnięciu go w uchwycie wraz z próbką. Próbkę w trakcie pomiaru wzbudzano w sposób ciągły do drgań harmoniczných o amplitudzie od kilku do pięćdziesięciu nanometrów. Porównanie wyników uzyskanych z użyciem obu typów wzbudników pokazało, że są one zgodne. Zatem typ zastosowanego wzbudnika nie miał zasadniczego wpływu na zachowanie się próbek podczas pomiarów.

Koniecznym było też ustalenie położenia wzbudnika względem próbki, ponieważ istnieje co najmniej pięć różnych możliwości umieszczenia piezoelementu w bezpośrednim kontakcie z powierzchnią próbki – na środku powierzchni polimerowej lub metalowej, od czoła próbki, na krańcu próbki po stronie polimerowej lub metalowej. Na podstawie wykonanych testów ustalono, że położenie wzbudnika dające najlepsze wyniki, obserwacji drgań w każdej części próbki, to kraniec próbki po stronie polimerowej (położenie piezoelementu oznaczone numerem 4 na rysunku 7.8).



Rys. 7.8. Punkty przyłożenia piezoelementu do próbki

#### 7.4. Zbieranie i archiwizacja obrazów

Szczegółowe informacje dotyczące charakteru drgań próbek z plików Matlab.mat, generowanych przez dedykowane oprogramowanie wibrometru – Vibromap (wersja Vibromap\_B4\_nov15), uzyskano za pomocą programów autorstwa F. Meijera [118,119]. Oprogramowanie napisane w języku programowania R<sup>10</sup> pozwala na szybkie i łatwe wyodrębnienie macierzy amplitudowych i fazowych z surowych danych generowanych przez oprogramowanie Vibromap wibrometru, wizualizację tych danych na różne sposoby (rys. 9.11 – 9.13), a także porównanie oscylacji obu stron badanego obiektu. Zastosowano pakiety R „EBImage” i „plot3D”, które były bardzo przydatne w wizualizacji

<sup>10</sup> „R” to język programowania typu *open source*, doskonale nadający się do obliczeń statystycznych i wizualizacji. Ponadto działa on znacznie szybciej niż np. Matlab lub Octave [120].

drgań próbek, natomiast pakiet „pracma” oferował kilka przydatnych procedur matematycznych. Obrazy otrzymane za pomocą oprogramowania napisanego w R pozwalają na wizualizację drgań w postaci zarówno prostych wykresów dwuwymiarowych amplitudy i fazy, jak również trójwymiarowych animacji. Poprzez dalszą analizę kadrów z otrzymanych animacji jest możliwe uzyskanie wykresów drgań uśrednionych dla jednego wymiaru próbki (w pracy – dla szerokości próbki).

W celu zmniejszenia wpływu na wyniki pomiarów ewentualnie występujących szumów, programy umożliwiają filtrowanie wyodrębnionych danych, a także wyodrębnienie odpowiednich części obrazów (górnej i dolnej powierzchni próbki). Ponadto zastosowano zmianę znaku wychylenia dolnej strony próbki, co ułatwiało porównywanie drgań obu stron badanego obiektu<sup>11</sup>.

Dane dostarczone przez wibrometr to wartość wychylenia poszczególnych punktów na powierzchni próbki oraz faza ich oscylacji w określonym (arbitralnym) momencie drgania. Na podstawie tych informacji, możliwe jest zrekonstruowanie fal Lamba widocznych na obu powierzchniach próbki.

Opisane wyżej programy działają na komputerze stacjonarnym z systemem operacyjnym GNU/Linux, co pozwala na bardziej wydajną, niż w przypadku systemu operacyjnego Windows, obsługę dużej ilości uzyskanych danych. Wszystkie programy oferują możliwość podglądu górnej i dolnej powierzchni próbki na jednym obrazie lub animacji, co jest przydatne przy porównywaniu charakteru drgań obu stron badanego obiektu.

## 7.5. Metoda i parametry badań

Wszystkie próbki były badane dla takich samych parametrów wzbudzenia: w zakresie częstotliwości od 200 Hz do 130 000 Hz i napięcia podawanego na wzbudnik od 1 V do 10 V (Tab. 7.3). Przed rozpoczęciem nowej serii pomiarowej każdorazowo wykonywano również badania wstępne sprawdzające:

- a) wpływ: ustawień zwierciadeł, położenia wzbudnika, grubości próbki na odczyt obrazu drgań,
- b) występowanie ewentualnych różnic w drganiach obu stron próbki jedno- i dwuelementowej,

---

<sup>11</sup> Oprogramowanie wibrometru określa dodatnie wychylenie drgań obiektu badanego względem detektora, co w przypadku naszego układu ze zwierciadłami oznacza drgania w kierunku przeciwnym do płaszczyzny symetrii próbki.

- c) odpowiedź próbki na zmianę kierunku zadawania częstotliwości drgań wymuszających – skanowanie zakresu częstotliwości poprzez zwiększanie lub zmniejszanie częstotliwości wzbudzenia,
- d) charakter występujących drgań – rozkład i wartości wychyleń, nakładanie się wyższych harmonicznych drgań,
- e) możliwość wykrycia granicy złącza części polimerowej i metalowej próbki, na podstawie oceny zmiany charakteru drgań powierzchni próbki.

Badania wstępne polegały również na dobraniu takich warunków pomiarowych, które umożliwiają uzyskanie powtarzalnych wyników w przypadku próbek o niewielkich rozmiarach i kształtach. Najważniejszymi zadaniami był wybór parametrów wzbudzenia, poszukiwanie częstotliwości rezonansowych oraz ustalenie położenia wzbudnika drgań (patrz podrozdział 7.3, rys. 7.8).

Należało dobrać parametry wzbudzenia drgań w próbce w taki sposób, aby uzyskać satysfakcjonującą amplitudę drgań. W przypadku, gdy drganie badanego elementu jest drganiem harmonicznym (sinusoidalnym), rozkład modulacji interferogramu, rejestrowanego w czasie dłuższym niż okres drgania obiektu, opisany jest funkcją Bessela zerowego rzędu pierwszego rodzaju  $J_0$  z fazą drgania zakodowaną w jej argumentcie. Maksymalna wartość sygnału dla holografii zależy od funkcji Bessela. Ponieważ rozkład amplitud drgań wynika z jej kwadratu, otrzymanie najlepszych wyników możliwe jest w zakresie pierwszej ćwiartki funkcji (podrozdział 5.1).

Poszukiwanie częstotliwości rezonansowych (tab. 7.3) polegało na skanowaniu zakresu częstotliwości i określeniu dla jakich wartości fala stojąca lub wolno biegnąca utworzy się wzdłuż najdłuższego wymiaru próbki. W badaniach stosowano wartości amplitudy wzbudnika od 1000 do 10 000 mV p-p.

Tab. 7.3. Zakresy skanowania częstotliwości

Krok [Hz]	Zakres częstotliwości [Hz]
10	200 - 20000
100	20000 - 50000
1000	50000 - 130000

## 8. OBIEKTY BADANE

Badania zostały przeprowadzone na różnych grupach próbek polimerowo-metalowych z łącznikiem wyłącznie adhezyjnym, adhezyjnym i mechanicznym, a także adhezyjnym z warstwą pośrednią. Celem zweryfikowania zaproponowanej metody badawczej, w pierwszym kroku wyselekcjonowano materiały umożliwiające wytworzenie trwałego połączenia między polimerem a metalem.

Jak zaleca literatura dobór materiałów składowych tego typu połączenia opierał się na właściwościach takich jak: możliwie niewielka różnica w rozszerzalności cieplnej między komponentami, gęstość, czy zdolność tłumienia drgań konstrukcji. Ponadto wzięto pod uwagę, że część metalowa połączenia dobrze przenosi drgania sprężyste. Finalnie jako obiekty badawcze wytypowano trzy rodzaje materiałów metalowych: stal DC04, stop aluminium AW-6061 i AW-5754 [4]. Stal niestopową jakościową nr 1.0338 (gatunek DC04) EN 10130 charakteryzuje duża, w porównaniu do aluminium, wartość modułu sprężystości. Natomiast stop AW-6061 T6 cechują doskonałe własności wytrzymałościowe i plastyczność, dzięki czemu znalazł zastosowanie w branżach produkcyjnych takich jak lotnictwo czy motoryzacja. Spośród wszystkich stopów aluminium gatunek 6061 charakteryzuje się najwyższą przewodnością cieplną. Stop AW-5754 cechuje nieco niższa wartość przewodności cieplnej niż AW-6061 i znalazł on zastosowanie w przemyśle elektrotechnicznym, chemicznym, transportowym, ale również w produkcji wyrobów ogólnego przeznaczenia (Tab. 8.1) [4].

Tab. 8.1. Wybrane właściwości fizyczne materiałów stalowych/metalowych złącza [121–124]

		<b>DC04</b>	<b>AW-6061</b>	<b>AW-5754</b>
Moduł Younga	[GPa]	193.00	70.00	70.50
Gęstość	[kg/m <sup>3</sup> ]	7750	2700	2680
Współczynnik Poissona	[-]	0.31	0.33	0.33
Przewodność cieplna	[W/mK]	50	166	132
Liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej	[10 <sup>-6</sup> 1/K]	12	23.3	23.8

Materiał zastosowany do badań miał posiadać cechy stosowanego w lekkich konstrukcjach, dlatego zdecydowano się na badanie próbek, w których częścią polimerową był m.in. poliamid 6 (PA6) słabo przenoszący drgania, poliamid 6 z dodatkiem

miki (PA6/10M) lub talku (PA6/10T), a także mieszaniny polietylenu i poliamidu (LDPE/PA6) z różnym udziałem kompatybilizatora PE-g-MAH. Poszukiwano również materiałów, których zakres stosowania ulega obecnie znacznemu rozszerzeniu. Dotyczyło to semikrystalicznego, biodegradowalnego polilaktydu (PLA) oraz semikrystalicznego polifluorka winylidenu (PVDF) niezwykle odpornego na korozję chemiczną. Wyniki dla tych semikrystalicznych materiałów porównano z otrzymanymi dla amorficznego poliwęglanu (PC) (Tab. 8.2).

Tab. 8.2. Wybrane właściwości fizyczne tworzyw polimerowych złącza [121,125–128]

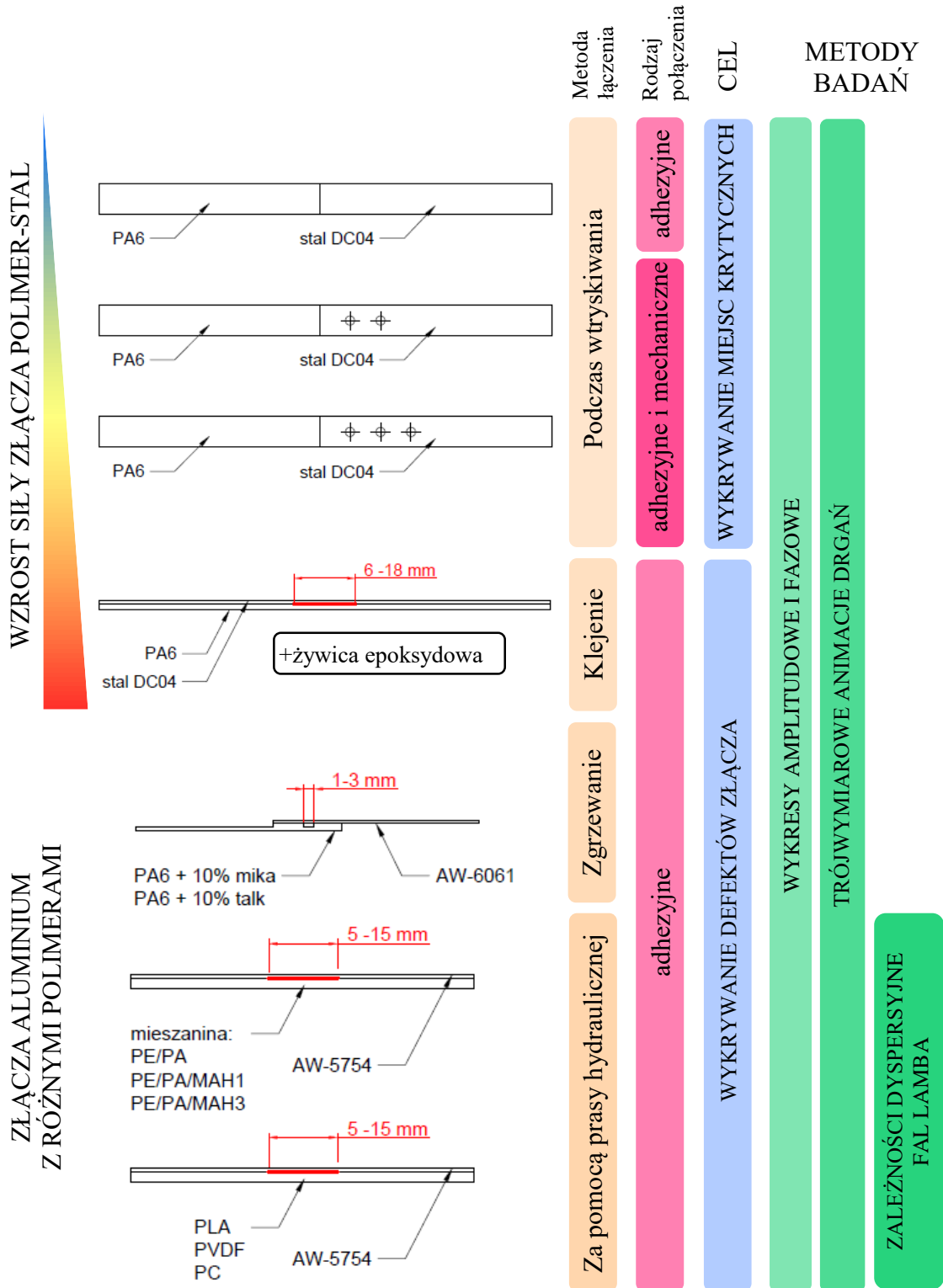
		<b>PA6</b>	<b>PLA</b>	<b>PVDF</b>	<b>PC</b>
Moduł Younga	[GPa]	1.15	3.30	1.00	2.30
Gęstość	[kg/m <sup>3</sup> ]	1140	1240	1780	1200
Współczynnik Poissona	[-]	0.42	0.35	0.40	0.41
Skurcz	[%]	0.5-1.5	0.3-0.5	2.0-4.0	0.7-1.0
Przewodność cieplna	[W/mK]	0.22-0.29	0.11-0.20	0.14	0.10-0.30
Liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej	[10 <sup>-6</sup> 1/K]	70-150	41	128	70

Oprócz materiału bardzo ważnym aspektem wejściowym był dobór metod wytwarzania, które umożliwiłyby uzyskanie trwałych złączy polimer-metal bez i z defektem połączenia o założonych wcześniej wymiarach i lokalizacji. Spośród różnych typów połączeń jako najbardziej reprezentatywne uznano połączenie adhezyjne, adhezyjne i mechaniczne oraz adhezyjne z warstwą pośrednią. Aby osiągnąć ten cel zastosowano cztery techniki łączenia takie jak: technologia wtryskiwana, prasowanie na gorąco, zgrzewanie i klejenie. Kształty i wymiary próbek zostały dobrane tak, aby po badaniach nieniszczących możliwe było poddanie ich testom wytrzymałościowym.

W pracy finalnie użyto trzech materiałów metalowych i dziewięć tworzyw sztucznych. Na rysunku 8.1 w sposób schematyczny zestawiono próbki z różnymi typami złączy polimer-metal oraz metody ich badań.

Próbki opisane w podrozdziałach 8.1 i 8.2 zostały wykonane z poliamidu 6, Tarnamid T-27 (dostarczonego przez Grupę Azoty), o wskaźniku szybkości płynięcia 120 cm<sup>3</sup>/10 min w 275°C. Próbki wtryskiwane wykonano przy użyciu wtryskarki ENGEL 20/80 HLS ze ślimakiem o średnicy 22 mm. Elementem metalowym w tych próbkach była stal niestopowa jakościowa nr 1.0338 (gatunek DC04) EN 10130 o grubości 1 mm. Przed każdym zabiegiem łączenia – klejeniem oraz obtryskiem – powierzchnie

blach były szorstkowane papierem ściernym o granulacji 280 i czyszczone alkoholem etylenowym, a także bibułą bezpyłową w celu usunięcia zanieczyszczeń powierzchniowych.

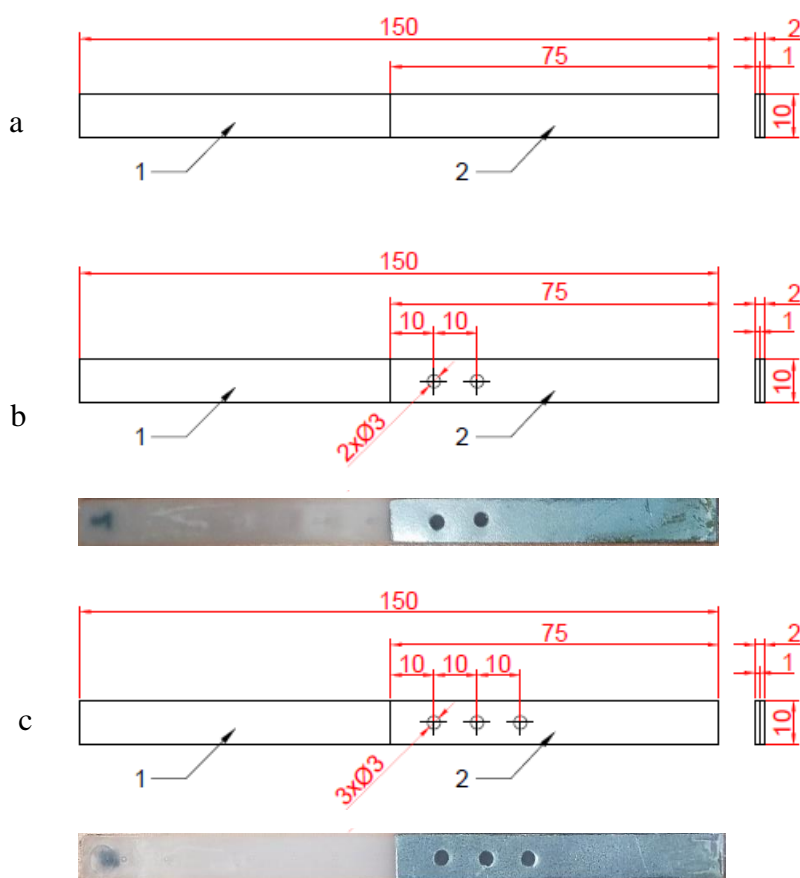


Rys. 8.1. Schemat przedstawiający zestawienie próbek i metod badawczych



## 8.1. Próbki z połączeniem adhezyjnym oraz adhezyjnym i mechanicznym wytworzonym w procesie wtryskiwania

Poniżej opisano próbki z połączeniem adhezyjnym oraz adhezyjnym i mechanicznym poliamidu 6 i stali DC04 wytworzonym w procesie wtryskiwania – serie próbek bez nitów oraz łączonych dwoma i trzema nitami (rys.8.2). Do przygotowania próbek zastosowano formę wtryskową o wymiarach 150 x 10 x 2 mm. Płytki stalowe o wymiarach 75 x 10 x 1 mm zostały umieszczone w pustej wnęce o grubości 2 mm (z otworami przeciwnymi do miejsca wtrysku w przypadku próbek o połączeniu adhezyjnym i mechanicznym).



Rys. 8.2. Próbki z połączeniem: a – adhezyjnym; b i c – adhezyjnym i mechanicznym, 1 – poliamid 6, 2 – stal DC04

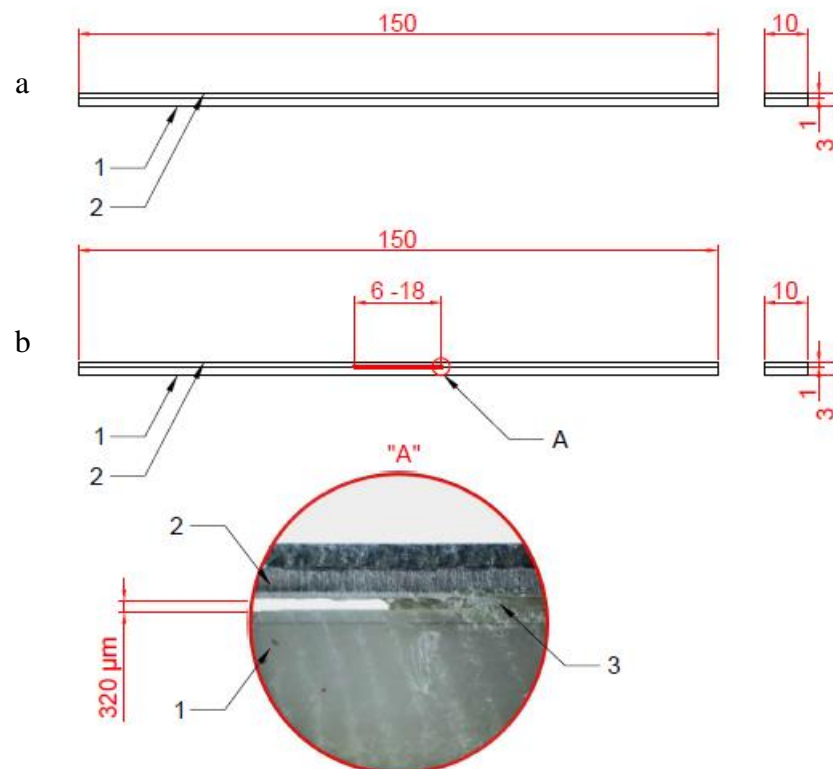
Metalową płytkę ogrzewano w zamkniętej formie przez 30 s, aby osiągnąć temperaturę około 80°C. Następnie formę o tej temperaturze wypełniono PA6 z prędkością wtrysku 90 mm/s<sup>12</sup>. Czoło stopionego polimeru stykało się z krawędzią metalowej płytki w połowie całej odległości przepływu podczas wypełniania wnęki. Dlatego też należało

<sup>12</sup> Profil temperatury wtrysku wynosił 225 – 230 – 240 – 260°C, a ciśnienie wtrysku maszyny 7 MPa.

oczekiwać, że ciśnienie polimeru w obszarze styku polimer-płytki stalowa było nieznacznie mniejsze w porównaniu z początkowym ciśnieniem formowania wtryskowego. W płytkach stalowych zastosowanych w próbkach z połączeniem adhezyjnym i mechanicznym wywiercono otwory o średnicy 3 mm – liczba otworów wynosiła dwa lub trzy. Otwory umieszczono w stałej odległości od siebie i od krawędzi metalowej części próbki.

## 8.2. Próbki z połączeniem adhezyjnym z warstwą pośrednią

Połączenie adhezyjne z warstwą pośrednią wytworzono poza formą wtryskową. W tej grupie znajdują się próbki bez i z defektem połączenia w postaci ubytku warstwy kleju o szerokości od 6 mm do 18 mm. Są to próbki składające się z poliamidu 6 i stali DC04 połączone klejem adhezyjnym w postaci utwardzanej w temperaturze pokojowej żywicy epoksydowej Araldite 2011 (rys. 8.3). W próbkach z defektem ubytek w warstwie żywicy występował na całej szerokości próbki.



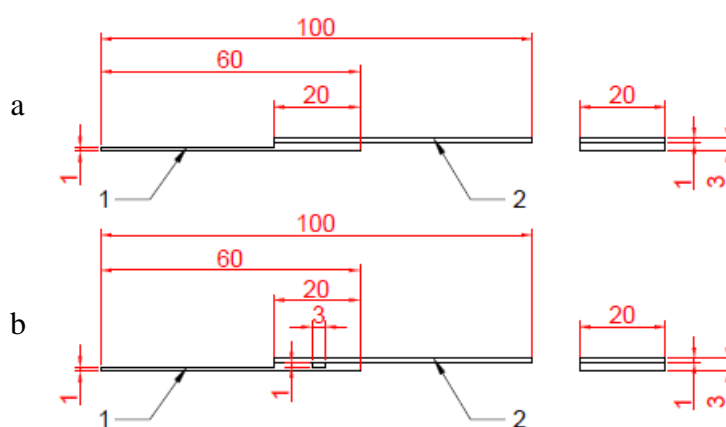
Rys. 8.3. Próbki z połączeniem klejonym polimer-metal: a – próbka bez defektu, b – próbka z defektem połączenia w postaci ubytku warstwy kleju (defekt oznaczono kolorem czerwonym),

1 – poliamid 6, 2 – stal DC04, 3 – klej epoksydowy

### 8.3. Próbkę z połączeniem adhezyjnym bez warstwy pośredniej wytworzonym poza formą wtryskową

Ze względu na geometrię złącza, wymiar 20 x 20 mm, defekty w tych próbkach były znacznie mniejsze niż w przypadku próbek klejonych. Długość powstałego na całej szerokości złącza defektu wynosiła od 1 mm do 3 mm (rys. 8.4).

W tej grupie próbek częścią metalową było aluminium – Al6061 (Metpartner, Żabichy, Polska), natomiast częścią polimerową poliamid 6 – PA6 (produkowany przez Grupę Azoty, Tarnów, Polska) o zawartości 10% mas. miki (Al-PA6-10M) lub 10% mas. talku (Al-PA6-10T)<sup>13</sup>.



Rys. 8.4. Próbkę z połączeniem adhezyjnym: a – próbkę bez defektu, b – próbkę z defektem,  
1 – poliamid 6, 2 – aluminium 6061

Powierzchnia aluminium została najpierw umyta detergentem pod bieżącą wodą, następnie odtłuszczona izopropanolem, a po 2 minutach acetonem. W kolejnym kroku powierzchnię odtłuszczono roztworem alkalicznym ( $\text{NaOH}$  10 g/dm<sup>3</sup> +  $\text{Na}_2\text{CO}$  30 g/dm<sup>3</sup>) przez 5 minut, a następnie spłukiwano wodą destylowaną. Po 20 minutach trawienia chemicznego mieszaniną kwasów ( $\text{H}_3\text{PO}_4$  74% +  $\text{HNO}_3$  4,6% +  $\text{CH}_3\text{COOH}$  4,6%) aluminium przepłukano wodą destylowaną i oczyszczono izopropanolem w myjce ultradźwiękowej przez 10 minut w temperaturze 25°C, a następnie spłukano acetonem. Wymiary (długość i szerokość) pojedynczej płytki metalowej o grubości 1 mm i pojedynczej części polimerowej próbki wynosiły 60 x 20 mm.

<sup>13</sup> Średnie najdłuższe wymiary cząstek wypełniacza wynosiły 8,8 μm dla miki oraz 7,4 μm dla talku. Zarówno Mica 30 jak i Talc Extra 10 użyte do produkcji próbek zostały zakupione od Aurum Chemicals, Katowice, Polska.

Połączenia części metalowej z poliamidem dokonano poprzez dołożenie rozgrzanego do temperatury ok. 320°C aluminium do wypraski polimerowej, a następnie schłodzenie tak powstałej próbki do temperatury otoczenia pod stałym ciśnieniem ok. 12 kPa. Zachodzące na siebie powierzchnie części polimerowych i metalowych miały wymiary 20 x 20 mm. Przed utworzeniem połączenia w niektórych wypraskach PA6 ukształtowano modelowy defekt w postaci rowka na całej szerokości próbki w centralnej części złącza (rys. 8.4).

#### **8.4. Próbki z połączeniem adhezyjnym polimer-metal wytworzonym za pomocą prasowania przy użyciu prasy hydraulicznej**

W tej grupie znalazły się próbki składające się z części metalowej, którą było aluminium oraz z części polimerowej, którą był jeden z poniżej podanych materiałów<sup>14</sup>:

- a) polilaktyd (PLA, Ingeo Biopolymer 6400D),
- b) polifluorek winylidenu (PVDF, Arkema Kynar Flex 3312 C),
- c) poliwęglan (PC, Lotte Advanced Materials Infino S.C.-1220UR),
- d) mieszanina polietylenu i poliamidu z różnym udziałem kompatybilizatora PE-g-MAH [15],

Dodatkowo regranulat zastosowany do produkcji próbek przygotowano z odpadów poużytkowych dwóch tworzyw sztucznych, polietylenu o niskiej gęstości (ang. *Low-density polyethylene* – LDPE, nazwa handlowa Malen, dostarczonego przez Basell Orlen Polyolefines, Płock, Polska) i poliamidu 6 (PA6, Tarnamid T27, dostarczonego przez Grupę Azoty S.A., Tarnów, Polska). Ich mieszanki modyfikowano z użyciem kompatybilizatora w postaci polietylenu szczepionego bezwodnikiem maleinowym (PE-g-MAH, Sigma – Aldrich, St. Louis, MO, USA) [15]. Badaniom poddane zostały trzy rodzaje próbek polimerowo-aluminiowych o różnym składzie granulatu wykorzystanego do utworzenia części polimerowej próbki:

- L1 PE/PA: 80% wag. LDPE, 20% wag. PA6,
- L2 PE/PA/MAH<sub>1</sub>: 80% wag. LDPE, 19% wag. PA6, 1% wag. PE-g-MAH,

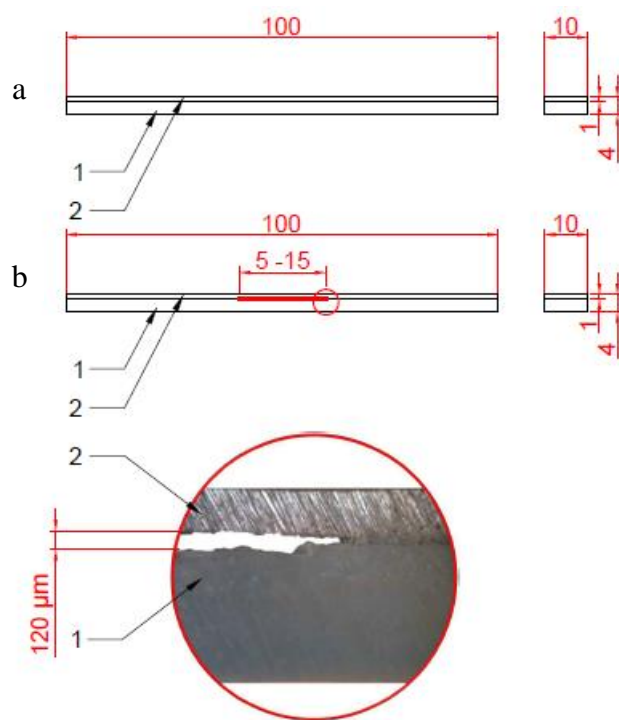
---

<sup>14</sup> Materiały zostały przebadane za pomocą standardowych badań materiałowych: skaningowej kalorymetrii różnicowej (ang. *Thermal Differential Scanning Calorimetry*, DSC) za pomocą urządzenia DSC 204 F1 Phoenix (Netzsch GmbH, Selb, Niemcy), rentgenografii (ang. *X-Ray Diffraction* – XRD) za pomocą urządzenia Tur M62 (Carl Zeiss AG, Jena, Niemcy), oraz spektroskopii w podczerwieni (ang. *Fourier-transform Infrared Spectroscopy* – FTIR), FT/IR-4600 spectrometer (Jasco Europe S.R.L., Cremella, Włochy). Uzyskano wyniki typowe dla danego materiału.

- L3 PE/PA/MAH<sub>3</sub>:80% wag. LDPE, 17% wag. PA6, 3% wag. PE-g-MAH.

Zastosowanie tych mieszanek polimerowych umożliwiło ocenę eksperymentalną wpływu kompatybilizatora na zachowanie próbki podczas drgań.

We wszystkich wymienionych w tym podrozdziale próbkach częścią metalową była płytki aluminiowa (AW-5754) o wymiarach 100 x 10 x 1 mm (rys. 8.5).



Rys. 8.5. Próbkę z połączeniem adhezyjnym: a – próbka bez defektu, b – próbka z defektem,  
1 – część polimerowa, 2 – aluminium AW-5754

Przed procesem łączenia płytki aluminiowe umieszczono w koszyku myjki ultradźwiękowej (Proclean 0.7M, Ulsonix, Niemcy) zanurzonym w acetonie przez 15 minut, a następnie spłukano wodą destylowaną i finalnie oczyszczono alkoholem etylenowym, celem usunięcia zanieczyszczeń powierzchni. Natomiast regranulat polietylenowo-poliamidowy, a także granulaty polilaktydu i poliwęglanu suszono w temperaturze 80°C przez 24 godziny w suszarce szafkowej ULE 500 (Mettler GmbH + Co. KG, Schwabach, Niemcy).

Próbki polimer-metal otrzymano w wyniku prasowania przy użyciu laboratoryjnej prasy hydraulicznej PLHS-7 (ReMi-Plast, Czerwonak, Polska). Do ich przygotowania zastosowano prostokątną formę o wymiarach wnetki 100 x 100 x 4 mm. Płytki aluminiowe zostały umieszczone w formie w odległości 10 mm od siebie. W celu uzyskania

modelowego defektu połączenia bezpośrednio na części metalowej umieszczono teflonowe paski o różnej szerokości (w zależności od planowanej szerokości uzyskanej wady od 5 mm do 15 mm – rys. 8.5b). Pozostałą przestrzeń formy wypełniano granulatem polimerowym. W zależności od stosowanego polimeru próbki były nagrzewane do temperatury:

- 200°C dla PE/PA, PE/PA/MAH<sub>1</sub>, PE/PA/MAH<sub>3</sub> i PLA,
- 230°C dla PVDF,
- 280°C dla PC

i przetrzymane przez 10 minut w formie przy zachowaniu stałej temperatury. Następnie próbki poddawane były naciskowi o wartości ciśnienia około 15 MPa przez 15 minut i schładzane pod zadaniem ciśnieniem aż do pełnego zestalenia (poniżej 100°C). Paski teflonowe stosowane w celu uzyskania wady połączenia były usuwane w trakcie obróbki końcowej próbek.

## 9. WYNIKI BADAŃ

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki pomiarów wibrometrycznych przeprowadzonych na różnych rodzajach próbek opisanych w rozdziale 8. Opis badań wstępnych i zakresy skanowanych częstotliwości podano w podrozdziale 7.5.

Dla wszystkich badanych próbek sprawdzono powtarzalność:

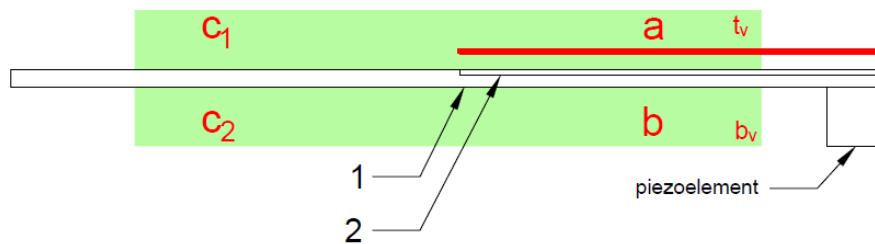
- wartości częstotliwości, dla których w próbkach generowały się regularne fale,
- rozkładów przestrzennych drgań,
- wartości amplitud tych drgań.

Badaniu poddawana była możliwość wykrycia defektu wytworzonego połączenia polimer-metal za pomocą cyfrowej laserowej wibrometrii holograficznej oraz odpowiedź poszczególnych elementów próbek na wymuszenie drgań. Amplitudy wzbudzanych w próbkach drgań miały wartości nanometryczne (maksymalnie około 50 nm), dzięki czemu próbki nie ulegały zniszczeniu i możliwe było przeprowadzanie wielokrotnych pomiarów.

Przeprowadzone badania opierały się na zastosowaniu metody opartej na lokalnym rezonansie defektu (ang. *Local Defect Resonance* – LDR [27,129–131]), ale o znacznie szerszej charakterystyce częstotliwościowej. Umożliwiało to wstępne skanowanie zakresu częstotliwości (200 – 130 000 Hz) z dużymi krokami, w stosunkowo krótkim czasie. Następnie wybrany zakres częstotliwości badano z większą dokładnością poprzez zastosowanie mniejszego kroku.

## 9.1. Wyniki badań dla próbek z połączeniem adhezyjnym oraz adhezyjnym i mechanicznym

Dla grupy badanych próbek z połączeniem adhezyjnym a także adhezyjnym i mechanicznym, realizowanym w procesie wtryskiwania (opis metody wytwarzania tego rodzaju próbek znajduje się w podrozdziale 8.1), wyróżniono cztery obszary obserwacji drgań:  $a$  – część metalową (stal DC04),  $b$  – część polimerową (PA6) przeciwległą do metalu oraz polimer po obu stronach –  $c_1$  i  $c_2$  (rys. 9.1).



Rys. 9.1. Próbka z połączeniem adhezyjnym lub adhezyjnym i mechanicznym z wyodrębnionymi obszarami obserwacji drgań próbki: 1 – część polimerowa (PA6), 2 – część metalowa (stal DC04, oznaczona czerwoną linią),  $a$  – część metalowa,  $b$  – część polimerowa przeciwległa do części metalowej,  $c_1$ ,  $c_2$  – polimer po obu stronach próbki, obszar próbki widoczny w czasie badania zaznaczono kolorem zielonym:  $t_v$  – widok powierzchni górnej próbki,  $b_v$  – widok powierzchni dolnej próbki

Wzbudnik piezoelektryczny przylegał do dolnej powierzchni części  $b$  z jej prawego brzegu. Dla całego zakresu częstotliwości stosowano takie samo napięcie z generatora funkcyjnego wynoszące 5V.

Jednocześnie obserwowano drgania górnej i dolnej powierzchni próbki, pomijając fragment próbki stykającej się ze wzbudnikiem. Sposób zobrazowania wymuszonych drgań próbki przedstawiono na przykładzie próbki z połączeniem adhezyjnym (rys. 9.2 i 9.3 w rozdziale 9.1.1). Wyniki drgań górnej i dolnej powierzchni próbki oznaczono odpowiednio jako  $t_v$  i  $b_v$  (rys. 9.2). Pozyskanie informacji o fazie fali pozwoliło na określenie kierunku chwilowych wychyleń i było wykorzystywane do trójwymiarowej rekonstrukcji drgań próbki dla każdego momentu próbkowania. Przykładowe kadry składające się na trójwymiarową animację drgań przedstawione są na górze rysunku 9.2.

Poniżej na rysunku 9.2 zamieszczono wykresy amplitudowe uśrednione po okresie. Skala kolorystyczna odpowiada wartości amplitudy w nanometrach dla każdego punktu powierzchni próbki, a wymiary rejestrowanego obrazu próbki są podane w pikselach.

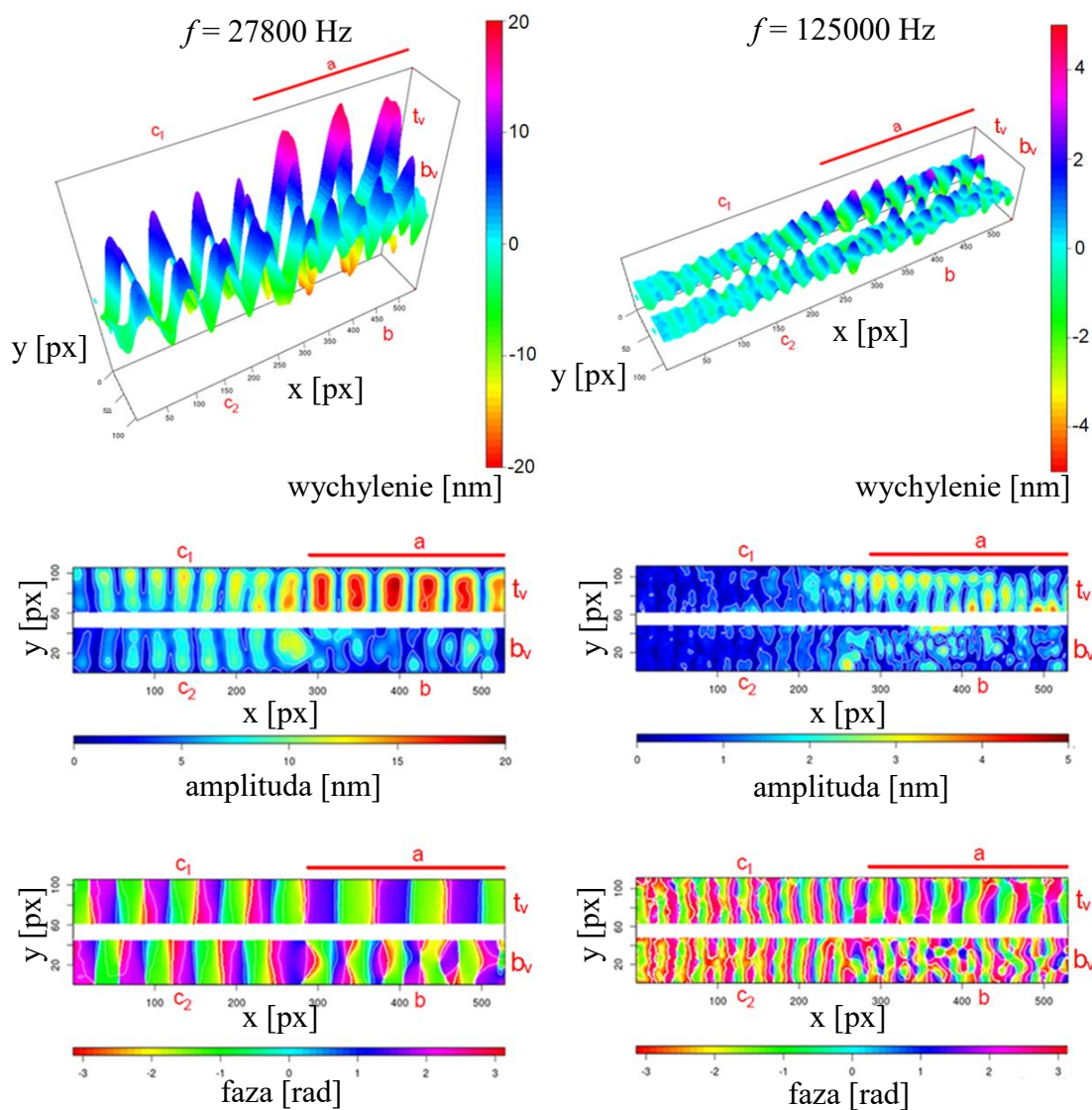


Natomiast dolne wykresy rysunku 9.2 dotyczą fazy wychyleń w wybranym momencie drgania. Każdorazowo wybierano moment, w którym wychylenia próbki były największe. Wymiary obrazów fazowych są takie, jak wykresów amplitudowych. Skala kolorystyczna odpowiada kątom pełnemu (od  $-\pi$  do  $\pi$ , wyrażona w radianach).

Jeżeli dla danej częstotliwości wzbudzenia drgania powierzchni próbki przybierały formę fali płaskiej o czole zorientowanym wzdłuż szerokości próbki, wówczas na podstawie poszczególnych kadrów trójwymiarowej animacji można było wykonać wykresy wychyleń uśrednionych po szerokości próbki (rys. 9.3). Pozwalało to na obliczenie długości obserwowanej fali  $\lambda$ , co przy znanej częstotliwości drgań umożliwiało wyznaczenie prędkości fazowej fali. Ułatwiało to również odczyt amplitudy tej fali.

### 9.1.1. Wyniki badań dla próbek z połączeniem adhezyjnym

We wszystkich czterech obszarach drgań próbki (wyodrębnionych na rysunku 9.1) można było zaobserwować utworzenie się fal różniących się przynajmniej jednym z parametrów: długością, amplitudą lub fazą. Umożliwiło to np. lokalizację końca części metalowej na podstawie animacji trójwymiarowej drgań oraz z wykresów amplitudowych i fazowych obu stron próbki<sup>15</sup> (rys. 9.2, lewy koniec odcinka a).

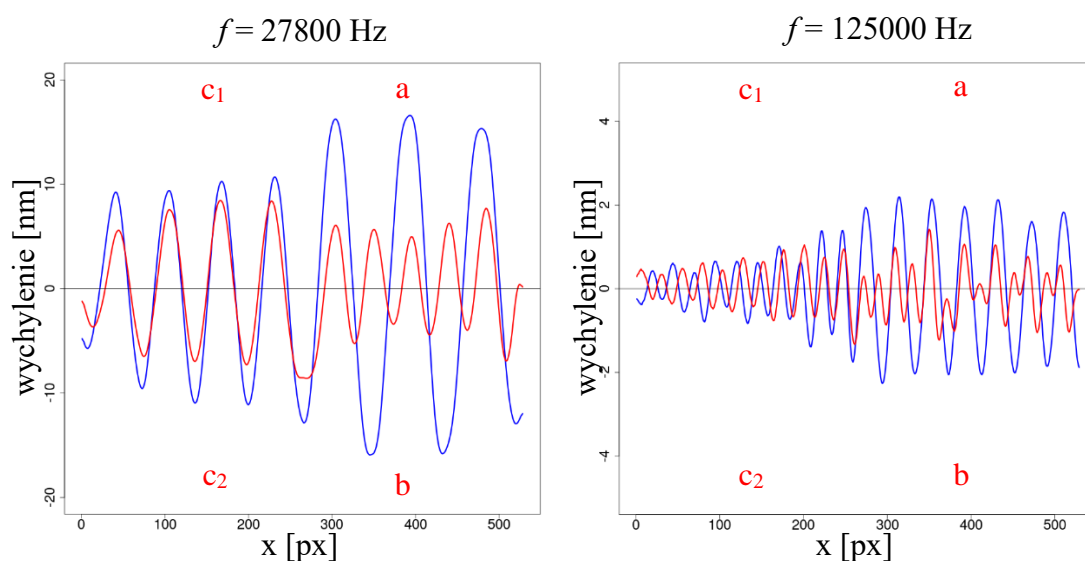


Rys. 9.2. Kadry z trójwymiarowej animacji drgań oraz wykresy amplitudowe i fazowe próbek z połączeniem adhezyjnym realizowanym w procesie wtryskiwania dla dwóch różnych częstotliwości wzbudzenia: wymiary obserwowanej części próbki  $105 \times 10 \text{ mm}$  ( $1 \text{ mm} \approx 5 \text{ px}$ );  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki (część polimerowa i metalowa),  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (część wyłącznie polimerowa), oznaczenia a – c<sub>2</sub> zgodne z rys. 9.1

<sup>15</sup> Opis stosowanych programów komputerowych w podrozdziale 7.4.

Od strony metalu amplituda regularnych drgań była przynajmniej o połowę większa niż w połączonej z metalem warstwie polimeru (część *b*), gdzie słabsze drgania nie wykazywały regularności chociaż wzbudnik piezoelektryczny stykał się właśnie z tą warstwą. Na granicy złącza (centrum próbki) obserwowano wzrost amplitudy drgań w części wyłącznie polimerowej (*c<sub>1</sub>*, *c<sub>2</sub>*). Poza złączem, drgania w polimerze tworzyły regularne fale, co potwierdziły również wykresy fazowe (wyjątek stanowiła część polimerowa przeciwległa do części metalowej, w której obserwowano nieregularny wzór fazowy – część *b*, rys. 9.2). Identyfikacja występowania granicy między częścią polimerową, a metalową była możliwa w bardzo szerokim zakresie częstotliwości wzbudzenia – od 27,8 kHz do 125,8 kHz.

Uśrednienie wzdłuż szerokości próbki chwilowego wychylenia (rys. 9.3) dostarczyło dodatkowych informacji. Mimo dużych nieregularności drgań w części *b* ustalono, że dla niskiej częstotliwości wzbudzenia ( $f = 27,8$  kHz) fale tworzące się w części polimerowej połączonej z częścią metalową są prawie dwukrotnie krótsze niż w części metalowej, a wychylenia są przynajmniej dwukrotnie mniejsze.



Rys. 9.3. Wykresy chwilowych wychyleń, uśrednionych po szerokości próbki z połączeniem adhezyjnym, realizowanym w procesie wtryskiwania dla dwóch różnych częstotliwości wzbudzenia, długość obserwowanej części próbki 105 mm (1 mm  $\approx$  5 px); kolorem oznaczono drgania: niebieskim - dolnej części polimerowej (*c<sub>1</sub>* i *c<sub>2</sub>*); czerwonym - górnej części metalowej (*a*) i polimerowej (*b*)

Dla ponad czterokrotnie wyższych częstotliwości wzbudzania ( $f = 125$  kHz) wychylenia w metalu i polimerze zmniejszyły się przynajmniej pięciokrotnie, jednak różnice w charakterze i amplitudzie drgań obu połączonych części *a* i *b* były na tyle duże,

że umożliwiły odróżnienie części połączonej z metalem od części czysto polimerowej (części  $c_1$  i  $c_2$ ).

Ponadto bez względu na częstotliwość drgań ujawniała się tendencja do silnego tłumienia drgań w poliamidzie PA6 połączonym adhezyjnie ze stalą DC04. Im wyższa częstotliwość wymuszania w części  $b$ , tym mniejsza regularność drgań w tej części polimeru, mimo jednoczesnego tworzenia się regularnych fal płaskich w części stalowej.

Pomimo zachowania trwałości złącza podczas pomiarów należy przypuszczać, że adhezyjne połączenie PA6 – DC04 nie będzie trwałe, jeżeli w tym zakresie częstotliwości zwiększy się amplitudę wymuszonych wibracji.

W przeciwieństwie do części  $a$  i  $b$  w części wyłącznie polimerowej ( $c_1$  i  $c_2$ ) obserwowano regularne drgania. Mimo większego oddalenia od wzбудnika, amplituda fal była dla  $f = 27,8$  kHz większa niż w części  $b$ , choć mniejsza niż w części stalowej (rys. 9.2). Długość fal powierzchniowych po obu stronach ( $c_1$  i  $c_2$ ) polimeru była zbliżona (rys. 9.3) i mniejsza niż w DC04, co bezpośrednio przekładało się na relację prędkości tych fal w obu materiałach. Zgodnie z przewidywaniami prędkość fali w części stalowej była większa.

Amplituda drgań w części wyłącznie polimerowej nieznacznie malała wraz z odległością od wzbudnika, co wskazuje na umiarkowany stopień tłumienia fal powierzchniowych w PA6 dla niskich częstotliwości wymuszeń ultradźwiękowych.

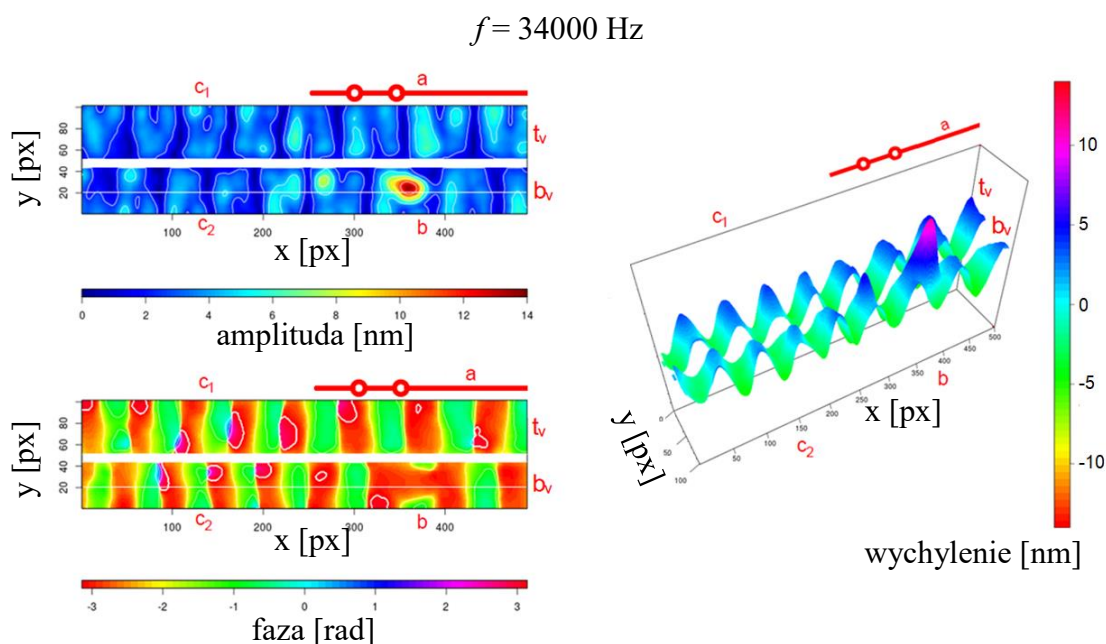
Dla dużo wyższych częstotliwości  $f = 125$  kHz efekt tłumienia w czystym polimerze był bardziej widoczny. Ponadto zaobserwowano nieznaczną różnicę długości fal rozprzestrzeniających się na górnej i dolnej powierzchni polimeru, co skutkuje stopniową zmianą wzajemnej fazy drgań (rys. 9.3). Natomiast bez względu na częstotliwość drgań wymuszających w części  $c_2$  polimeru graniczącej ze złączem metal-polimer obserwowano wzbudzenia zaburzające regularność drgań (okolice 270. piksela na wykresach – rys. 9.2 i 9.3). Sugeruje to krytyczność tego obszaru podczas obciążeń wibracyjnych.

#### WNIOSKI:

Analiza wykresów amplitudowych i fazowych wskazywała, że połączenie adhezyjne stali DC04 z poliamidem PA6 powodowało istotne zmniejszenie regularności drgań w części polimerowej przy zachowaniu fal płaskich w stali. Tłumienne właściwości polimeru powodowały zmniejszenie się amplitudy drgań wraz z rosnącą odległością od wzbudnika, przy niezmienniej długości fali, co wskazywało na słabe efekty tłumienne.

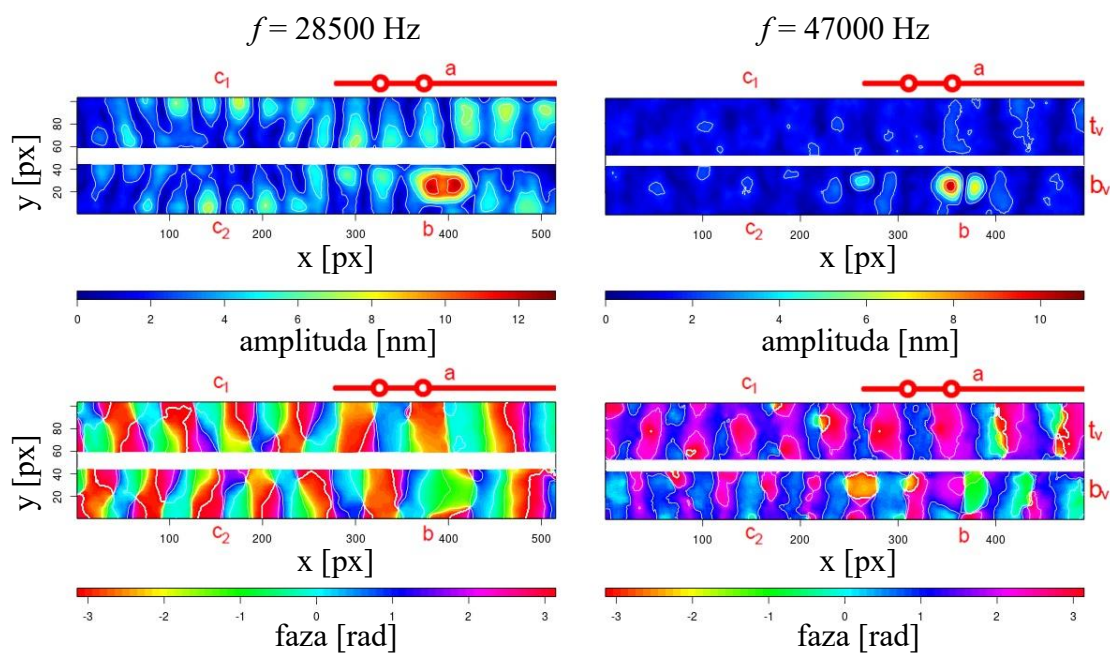
### 9.1.2. Wyniki badań dla próbek z połączeniem adhezyjnym i mechanicznym

Zbadano próbki z jednoczesnym połączeniem adhezyjnym i mechanicznym, realizowanym poprzez nawiercenie w płycie stalowej dwóch lub trzech otworów, które były wypełniane polimerem PA6 w procesie wtryskiwania (patrz podrozdział 8.1 – rys. 8.2b i c). Drgania po obu stronach próbki z takim połączeniem wykazywały dużą regularność w szerokim zakresie częstotliwości wzbudzenia od 20 kHz do 65 kHz.



Rys. 9.4. Kadr z trójwymiarowej animacji drgań oraz wykres amplitudowy i fazowy próbki z połączeniem adhezyjnym i mechanicznym, realizowanym w procesie wtryskiwania (dwa otwory w stalowej płycie wypełnione polimerem): wymiary obserwowanej części próbki  $105 \times 10 \text{ mm}$  ( $1 \text{ mm} \approx 5 \text{ px}$ );  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki (część polimerowa i metalowa),  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (część wyłącznie polimerowa), oznaczenia  $a - c_2$  zgodne z rys. 9.1

Dla niższych częstotliwości wzbudzenia z zakresu 28,5 – 47,0 kHz regularne wykresy amplitudowe i fazowe dla części  $b$  były zaburzone na granicy pierwszego otworu od strony wzbudnika (patrz rys. 9.4 i 9.5). W tym miejscu próbki dochodziło do większej absorpcji energii wzbudzenia, co manifestowało się podwojoną amplitudą drgań.



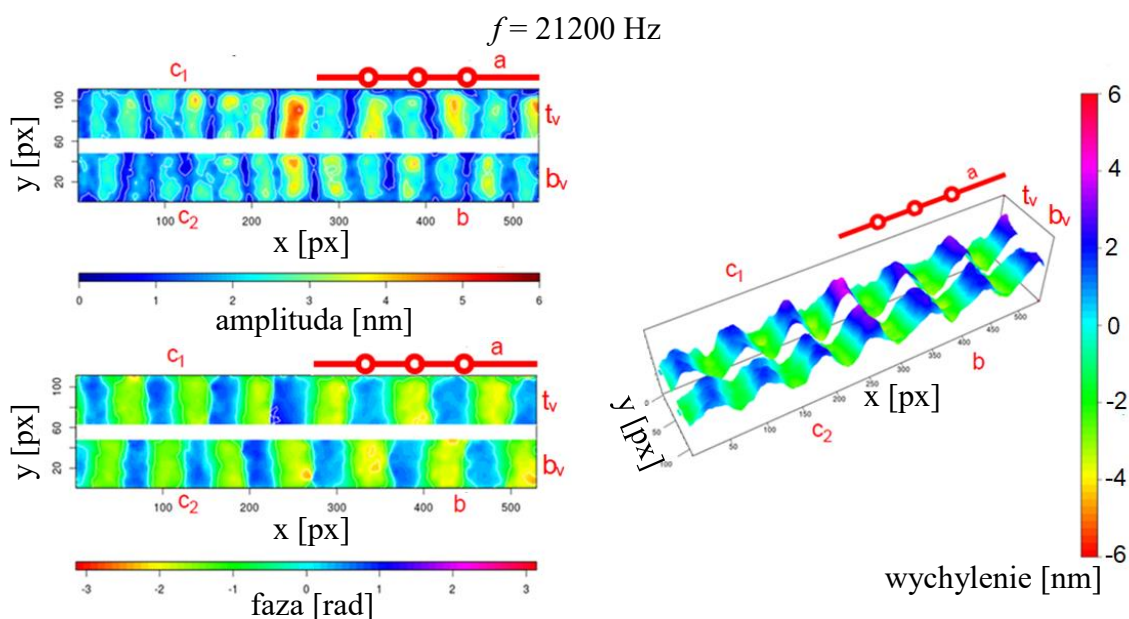
Rys. 9.5. Wykresy amplitudowe i fazowe próbek z połączeniem adhezyjnym i mechanicznym realizowanym w procesie wtryskiwania dla dwóch różnych częstotliwości wzbudzenia (dwa otwory w stalowej płytce wypełnione polimerem): wymiary obserwowanej części próbki 105 x 10 mm (1 mm  $\approx$  5 px);  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki (część polimerowa i metalowa),  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (część wyłącznie polimerowa), oznaczenia  $a - c_2$  zgodne z rys. 9.1

Analogiczne badania wibrometryczne przeprowadzono dla próbek z trzema otworami w płytce stalowej wypełnionymi polimerem w procesie wtryskiwania (patrz opis próbek w podrozdział. 8.1 – rys. 8.2c).

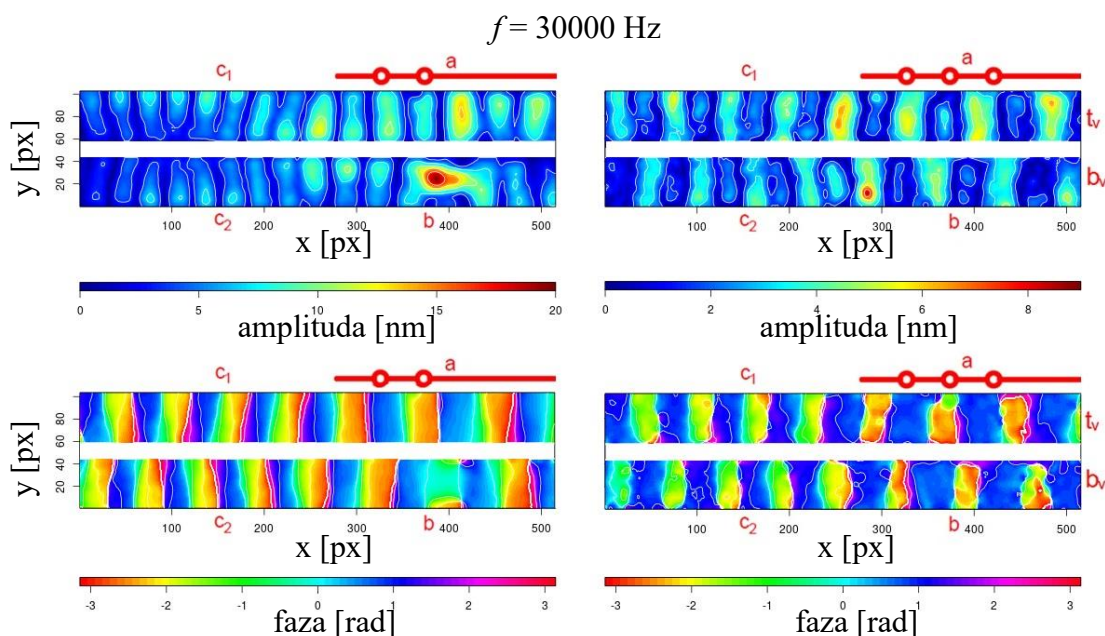
Dla niskich częstotliwości ultradźwiękowych obserwowano regularne fale płaskie po obu stronach, na całej długości próbki (rys. 9.6) i nie rejestrowano ich zaburzenia w okolicach otworów (w przeciwieństwie do próbek z dwoma otworami w płytce stalowej, patrz porównanie na rys. 9.7).

Natomiast po przejściu fali przez część stalową na część polimerową  $c_1$  wzrastała lokalnie amplituda drgań w polimerze (rys. 9.6 i 9.7), wskazując na wrażliwy obszar próbki. Zauważalne dla próbki z dwoma otworami zaburzenie zarówno wykresu amplitudowego (maksimum wartości wychylenia), jak i fazowego na granicy pierwszego otworu od strony wzbudnika (rys. 9.7a) było widoczne jedynie dla strony polimerowej (część  $b$ ).



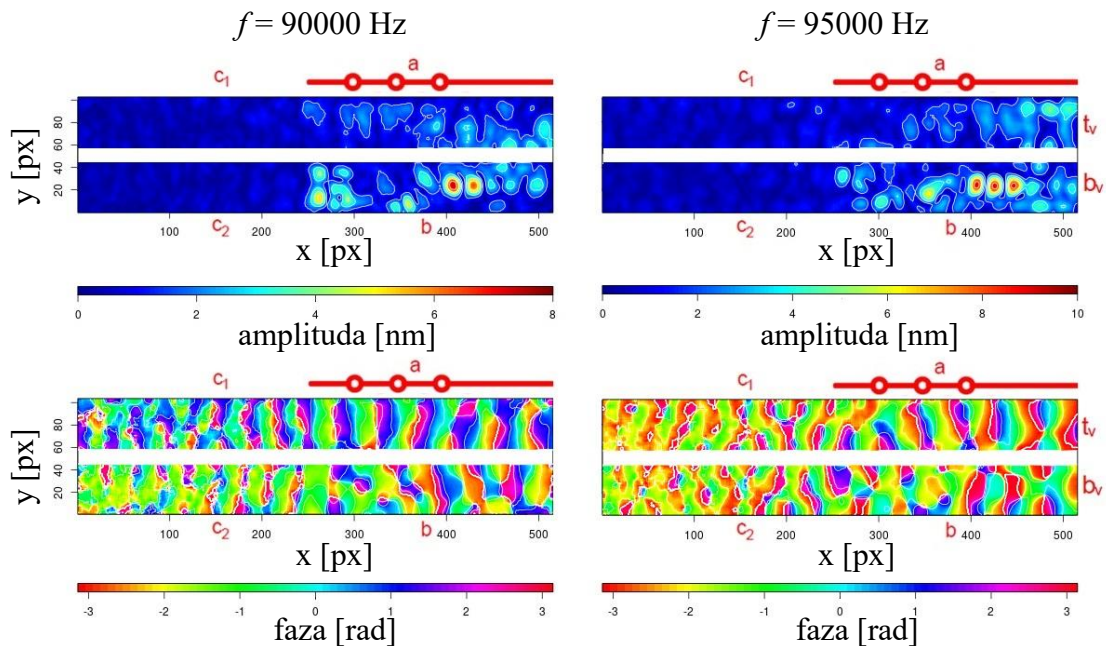


Rys. 9.6. Kadr z trójwymiarowej animacji drgań oraz wykres amplitudowy i fazowy próbki z połączeniem adhezyjnym i mechanicznym, realizowanym w procesie wtryskiwania (trzy otwory w stalowej płytce wypełnione polimerem): wymiary obserwowanej części próbki  $105 \times 10 \text{ mm}$  ( $1 \text{ mm} \approx 5 \text{ px}$ );  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki (część polimerowa i metalowa),  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (część wyłącznie polimerowa), oznaczenia  $a - c_2$  zgodne z rys. 9.1



Rys. 9.7. Wykresy amplitudowe i fazowe próbek z połączeniem adhezyjnym i mechanicznym realizowanym, w procesie wtryskiwania (po lewej – dwa, po prawej – trzy otwory w stalowej płytce wypełnione polimerem): wymiary obserwowanej części próbki  $105 \times 10 \text{ mm}$  ( $1 \text{ mm} \approx 5 \text{ px}$ );  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki (część polimerowa i metalowa),  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (część wyłącznie polimerowa), oznaczenia  $a - c_2$  zgodne z rys. 9.1

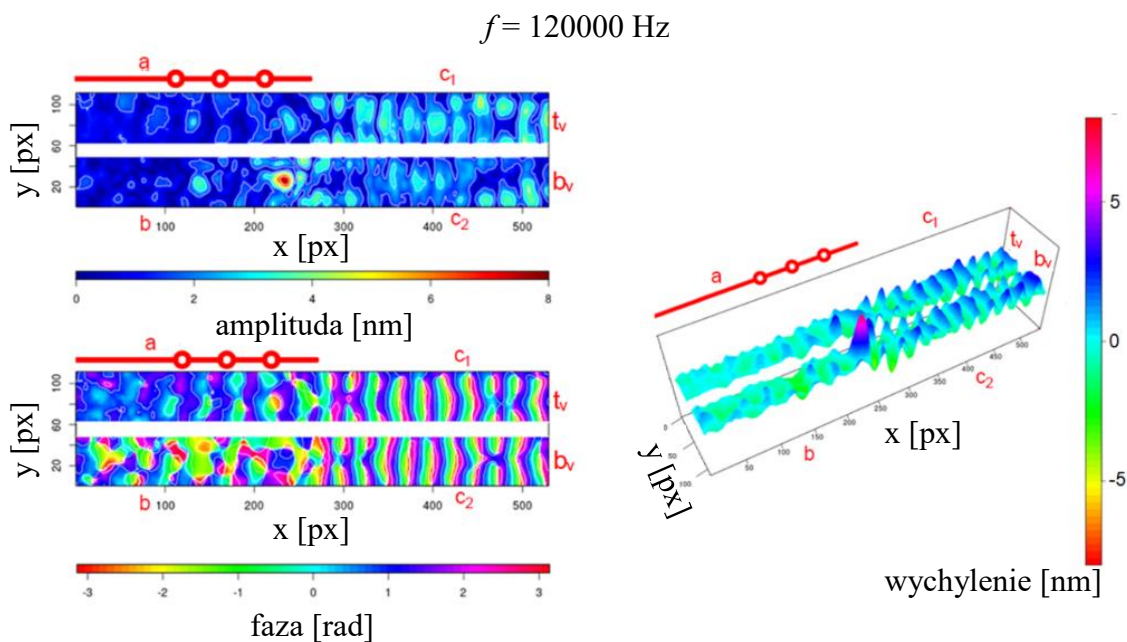
Zaburzenia regularności na wykresach amplitudowych i fazowych drgań dla próbek z trzema otworami, pojawiające się w okolicy pierwszego otworu od strony wzbudnika, były możliwe do zarejestrowania tylko dla dużo wyższych częstotliwości 90 kHz i 95 kHz (rys. 9.8). Ponownie były one widoczne tylko od strony polimerowej (część *b*). Dla wysokich częstotliwości malała też regularność drgań, a ich amplituda poza obszarem zaburzonym nie przekraczała 3 nm.



Rys. 9.8. Wykresy amplitudowe i fazowe próbki z połączeniem adhezyjnym i mechanicznym realizowanym, w procesie wtryskiwania (trzy otwory w stalowej płytce wypełnione polimerem) dla dwóch różnych częstotliwości wzbudzenia: wymiary obserwowanej części próbki 105 x 10 mm (1 mm  $\approx$  5 px);  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki (część polimerowa i metalowa),  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (część wyłącznie polimerowa), oznaczenia  $a - c_2$  zgodne z rys. 9.1

Po obróceniu próbki w uchwycie układu pomiarowego o 180° w płaszczyźnie poziomej tak, aby wzbudnik przylegał do części  $c_2$  próbki, maksimum amplitudy wciąż było widoczne przed pierwszym otworem od strony wzbudnika (rys. 9.9). Fala po obu stronach polimeru w częściach  $c_1$  i  $c_2$  wykazywała regularność do czasu napotkania obszaru przed pierwszym otworem. Absorpcja energii fali w tym miejscu była na tyle duża, że w pozostałej polimerowej części ( $b$ ) nie obserwowano już regularnych fal ani sygnałów umożliwiających lokalizację pozycji dwóch pozostałych otworów. W części stalowej ( $a$ ) tworzyła się co prawda fala płaska, jednak o bardzo małej amplitudzie, ok. 2 nm.





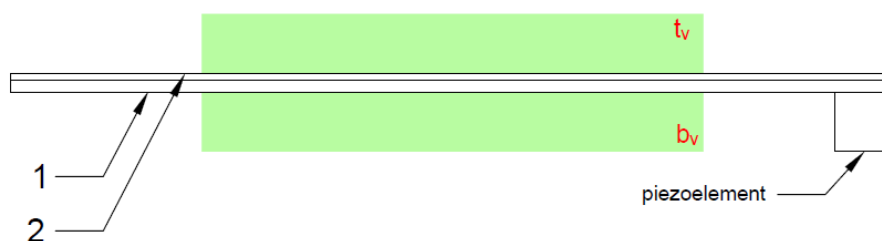
Rys. 9.9. Kadr z trójwymiarowej animacji drgań oraz wykres amplitudowy i fazowy próbki z połączeniem adhezyjnym i mechanicznym, realizowanym w procesie wtryskiwania (trzy otwory w stalowej płytce wypełnione polimerem): wymiary obserwowanej części próbki  $105 \times 10 \text{ mm}$  ( $1 \text{ mm} \approx 5 \text{ px}$ );  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki (część polimerowa i metalowa),  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (część wyłącznie polimerowa), oznaczenia  $a - c_2$  zgodne z rys. 9.1

#### WNIOSKI:

Zastosowana metoda badawcza umożliwiła w sposób nieniszczący na zlokalizowanie miejsc krytycznych w złączu polimer-metal. Zwiększenie regularności drgań, szczególnie w części polimerowej połączonej z częścią stalową wskazuje na znaczące wzmocnienie złącza w próbkach z dodatkowym połączeniem mechanicznym.

## 9.2. Wyniki badań dla próbek z połączeniem adhezyjnym z warstwą pośrednią

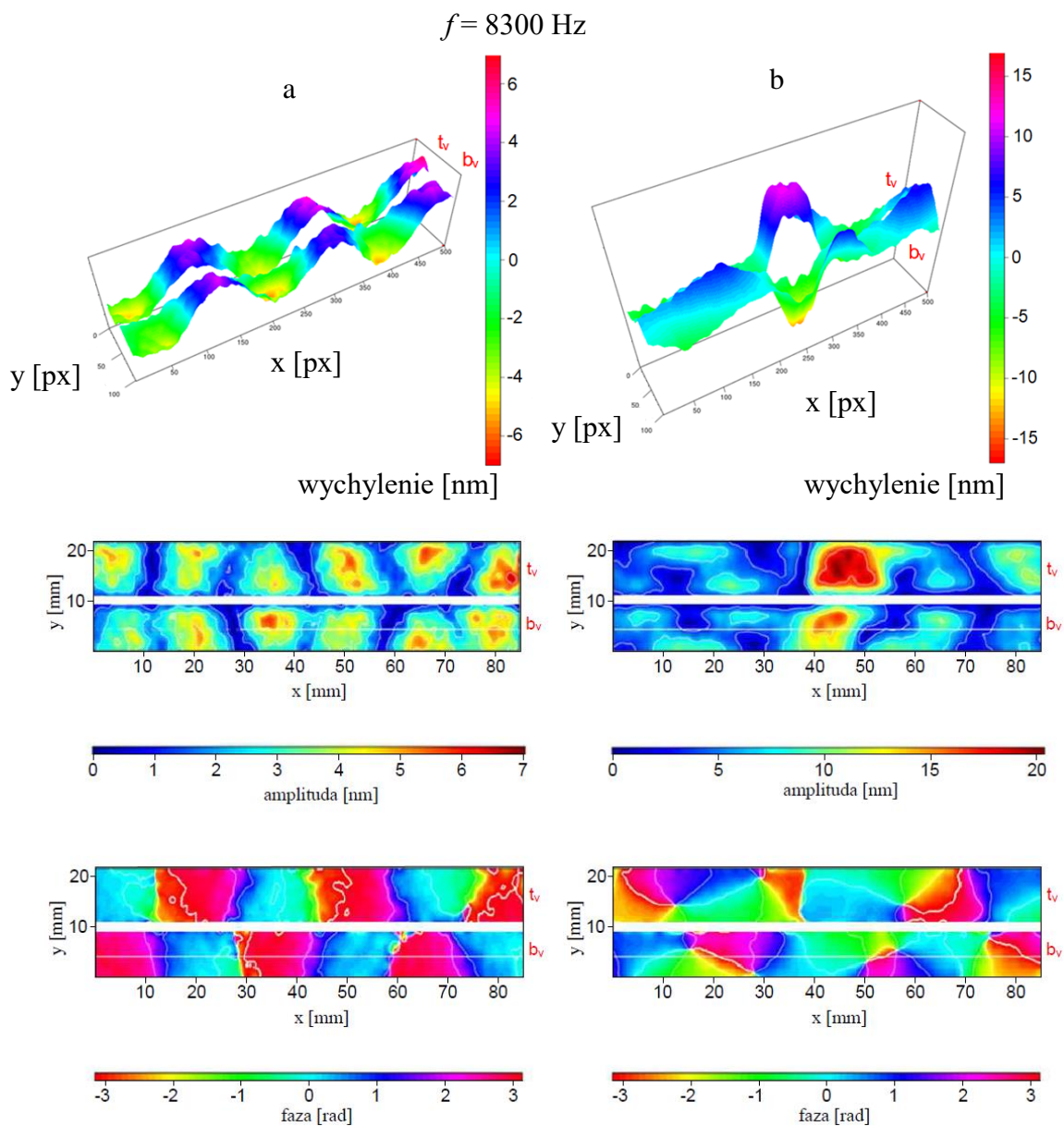
W przypadku próbek, gdzie płytkę ze stali DC04 była na całej długości próbki przyklejona klejem epoksydowym Araldite 2011 do polimerowej belki z PA6 (patrz opis w rozdziale 8.2), zbadano możliwość lokalizacji defektu połączenia, którym był ubytek w warstwie kleju pomiędzy poliamidem i stalą. Na poniższym rysunku (rys. 9.10) kolorem zielonym zaznaczono obszar próbki obserwowany podczas badania.



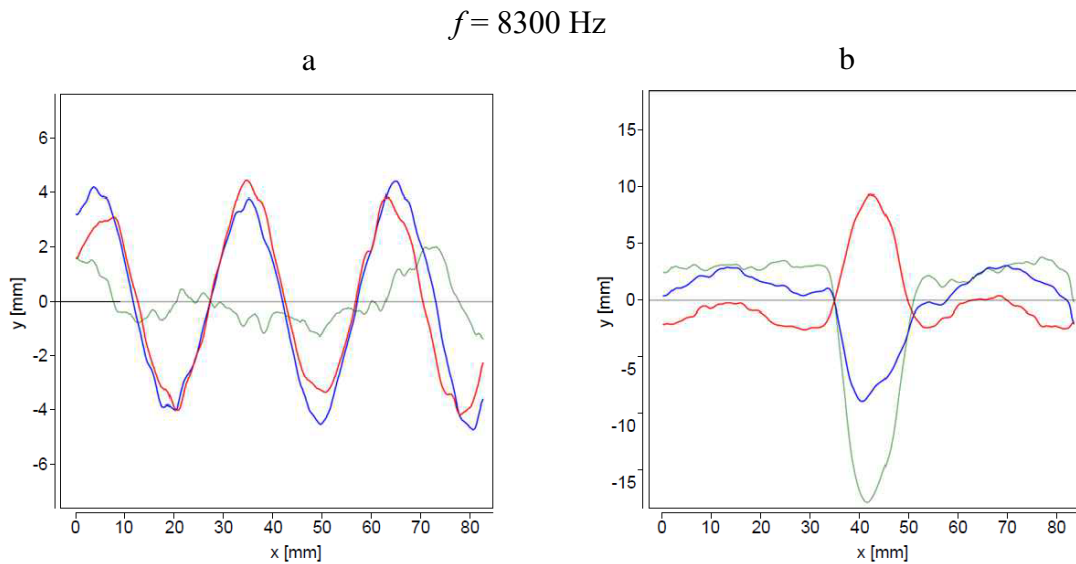
Rys. 9.10. Próбка z połączeniem adhezyjnym z warstwą pośrednią z zaznaczonym obszarem obserwacji (kolor zielony:  $t_v$  – widok powierzchni górnej próbki,  $b_v$  – widok powierzchni dolnej próbki) i miejscem przyłożenia piezoelementu: 1 – część polimerowa (PA6); 2 – część metalowa (stal DC04)

W wyniku pomiarów zaobserwowano wyraźne różnice w charakterze drgań i tworzących się fal Lamba między próbkami bez i z defektem połączenia. Wykresy dla próbek bez defektu miały regularny wzór amplitudowy i fazowy, o zbliżonym charakterze dla obu stron próbki (rys. 9.11a), a amplituda drgań nie przekraczała 7 nm. Na wykresach dla próbek z defektem w postaci ubytku warstwy kleju o szerokości 15 mm (rys. 9.11b), w centralnej części próbki obserwowano wyraźny wzrost wartości amplitudy drgań w miejscu występowania defektu (wartość amplitudy w tym miejscu wynosiła około 20 nm). Co więcej, szerokość czerwonego pola (oznaczającego wyraźny wzrost amplitudy w porównaniu do pozostałej części próbki, dla której wartości amplitudy wynosiły ok. 10 nm), odpowiadała szerokości defektu, a wykres fazowy był zdecydowanie mniej regularny niż w przypadku próbki bez defektu.

Uzyskane kadry z trójwymiarowych animacji (rys. 9.11) oraz wykresy dwuwymiarowe zawierające uśrednione dla jednego wymiaru próbki wartości amplitudy (rys. 9.12) umożliwiły zakwalifikowanie fali w próbce bez defektu jako antysymetrycznej fali Lamba  $A_0$  (patrz rozdział 3.1). W przypadku próbki z defektem zaobserwowano w miejscu jego występowania wyraźne wychylenia powierzchni metalowej i polimerowej będące w przeciwfazie (rys. 9.11b i 9.12b).



Rys. 9.11. Kadry z trójwymiarowej animacji drgań oraz wykresy amplitudowe i fazowe dla próbek klejonych: a – bez defektu, b – z defektem w postaci ubytku kleju o szerokości 15 mm, wymiary obserwowanej części próbki  $84 \times 10 \text{ mm}$  ( $1 \text{ mm} \approx 6 \text{ px}$ ),  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki (stal DC04),  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (PA6) [119]

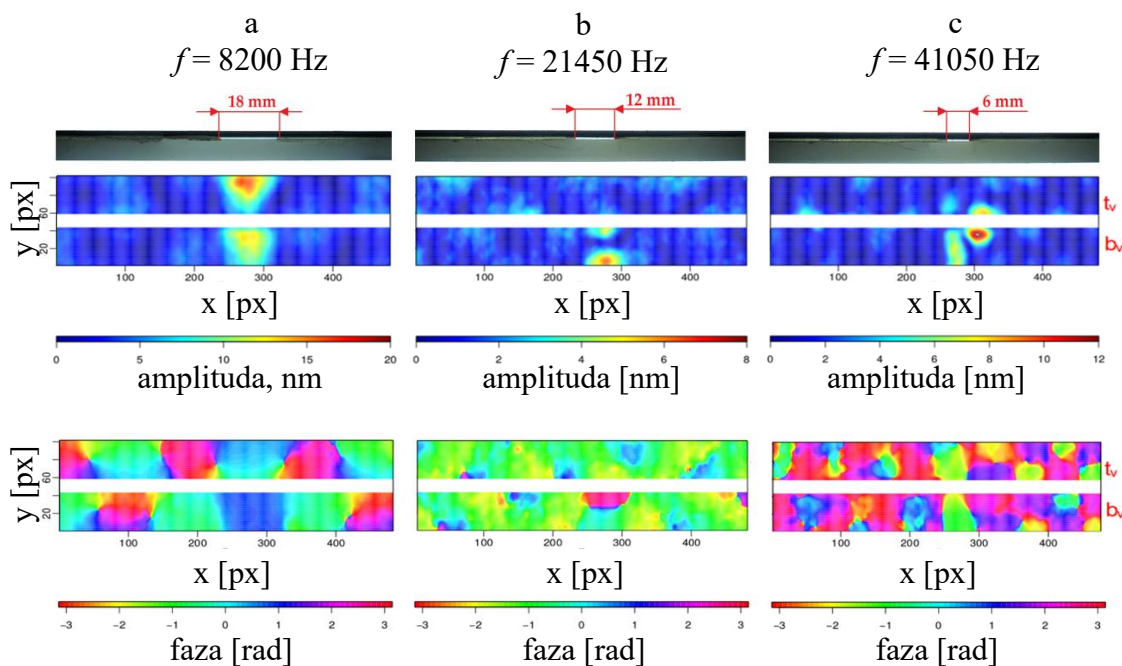


Rys. 9.12. Wykresy chwilowych wychyleń uśrednionych po szerokości próbek klejonych a – bez defektu, b – z defektem w postaci ubytku kleju o szerokości 15 mm, kolorem oznaczono drgania: niebieskim - dolnej części polimerowej ( $b_v$ ), czerwonym - górnej części stalowej ( $t_v$ ), zielonym – różnice w amplitudzie drgań między  $t_v$  i  $b_v$  [119]

**WNIOSKI:**

W przypadku próbek klejonych, charakteryzujących się silnym połączeniem obu składników w miejscu występowania defektu obserwowano lokalny wzrost wartości amplitudy drgań oraz wychylenie powierzchni metalowej i polimerowej w przeciwnych kierunkach.

W pracy przetestowano próbki z wadami połączenia o różnej szerokości od 6 mm do 18 mm. Wyniki pomiarów pokazały, że wraz z rosnącą częstotliwością wzbudzenia (czyli z rosnącą też zdolnością rozdzielczą wibrometru w płaszczyźnie próbki), uwidaczniała się lokalizacja defektów o mniejszych rozmiarach (rys. 9.13). Badania wibrometryczne pozwoliły zatem nie tylko zlokalizować wadę, ale również określić w przybliżeniu jej kształt i rozmiar.



Rys. 9.13. Wykresy amplitudowe i fazowe dla próbek klejonych z defektami w postaci ubytku kleju o różnej szerokości: a – 18 mm, b – 12 mm, c – 6 mm; dla różnych częstotliwości wzbudzenia: wymiary obserwowanej części próbki 84 x 10 mm (1 mm  $\approx$  6 px);  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki (część metalowa),  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (część polimerowa) [119]

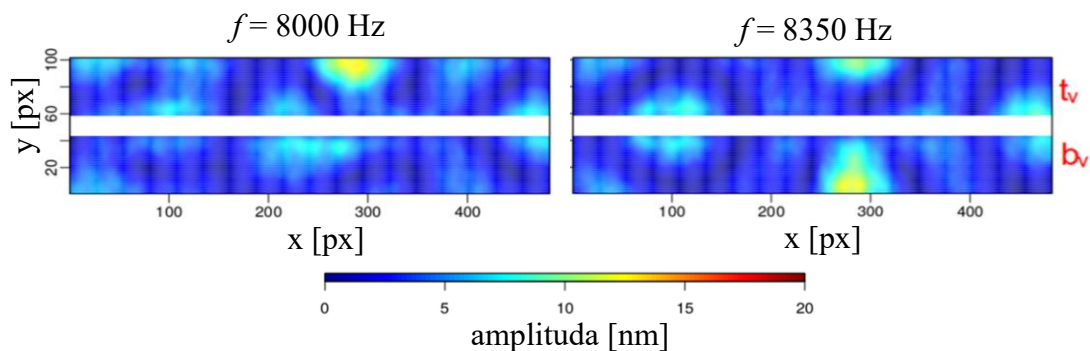
Na podstawie powyższych wykresów fazowych stwierdzono, że w obszarach próbek, w których nie występuje defekt, fazy powstających fal odczytane dla powierzchni górnej ( $t_v$  – części metalowej) i dolnej ( $b_v$  – części polimerowej) różnią się o stałą wartość wynoszącą około  $\pi$ . Jedynie w miejscu występowania wady dochodzi do zmiany wzoru fazowego (rys. 9.11 i 9.13).

Interpretując wykres fazowy dla próbki z defektem o szerokości 12 mm (rys. 9.13b) można stwierdzić, że w części polimerowej próbka doznawała skręcania w obszarze występowania defektu<sup>16</sup> – faza przedniej krawędzi (oznaczona kolorem niebiesko-zielonym)

<sup>16</sup> Informacje te uzyskano poprzez zastosowanie specjalnie napisanych programów umożliwiających wygenerowanie dodatkowych wykresów fazowych.

była przeciwna do fazy krawędzi tylnej (na wykresie kolor fioletowy w centrum przy górnej krawędzi), co wskazuje na to, że w danym momencie jedna krawędź poruszała się w górę, a druga w dół. Potwierdzenie tego faktu uzyskano poprzez obserwację ruchu próbki na wygenerowanych animacjach trójwymiarowych. Wykorzystanie wykresów ułatwiło w powyższym przypadku zlokalizowanie defektów nawet przy niewielkiej amplitudzie drgań wymuszonych w części polimerowej (około 6 nm, rys. 9.13b) oraz nieprzekraczającej 3 nm amplitudzie w części stalowej.

Zakres częstotliwości, w którym możliwe było wykrycie defektu, był stosunkowo szeroki i przekraczał 1500 Hz. Dla próbek z wadą połączenia o szerokości od 15 mm do 18 mm lokalizacja defektu następowała w zakresie częstotliwości wzbudzenia od około 7500 Hz do 10500 Hz (w zależności od badanej próbki – rys. 9.14). Mniejsze defekty o szerokości 12 mm i 6 mm widoczne były odpowiednio w zakresach częstotliwości wzbudzenia: 21300 – 22800 Hz oraz 39800 – 45300 Hz.



Rys. 9.14. Wykresy amplitudowe dla próbki klejonej z defektem połączenia w postaci ubytku kleju o szerokości 18 mm: wymiary obserwowanej części próbki 84 x 10 mm (1 mm  $\approx$  6 px),  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki (część metalowa),  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (część polimerowa) [119]

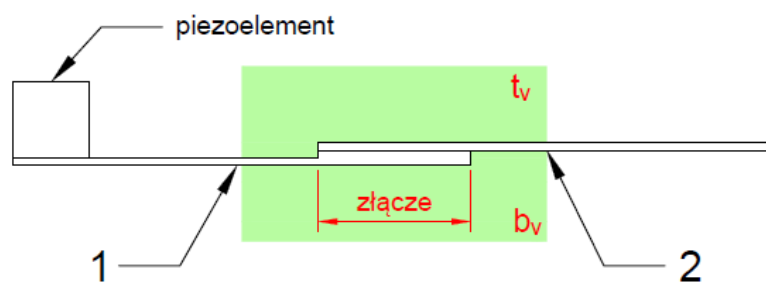
#### WNIOSKI:

Badania pozwoliły na określenie zakresów częstotliwości wzbudzenia umożliwiających wykrycie wad połączenia o różnej szerokości, od 6 mm do 18 mm – im większa była częstotliwość zadawanych przez wzbudnik drgań, tym mniejsze defekty można było lokalizować. Dla danego rozmiaru defektu połączenia zakres częstotliwości był na tyle szeroki, że wystarczył zgrubny wybór częstotliwości wzbudzenia (z tego zakresu).



### 9.3. Wyniki badań dla próbek z połączeniem adhezyjnym bez warstwy pośredniej, wytworzonym poza formą wtryskową

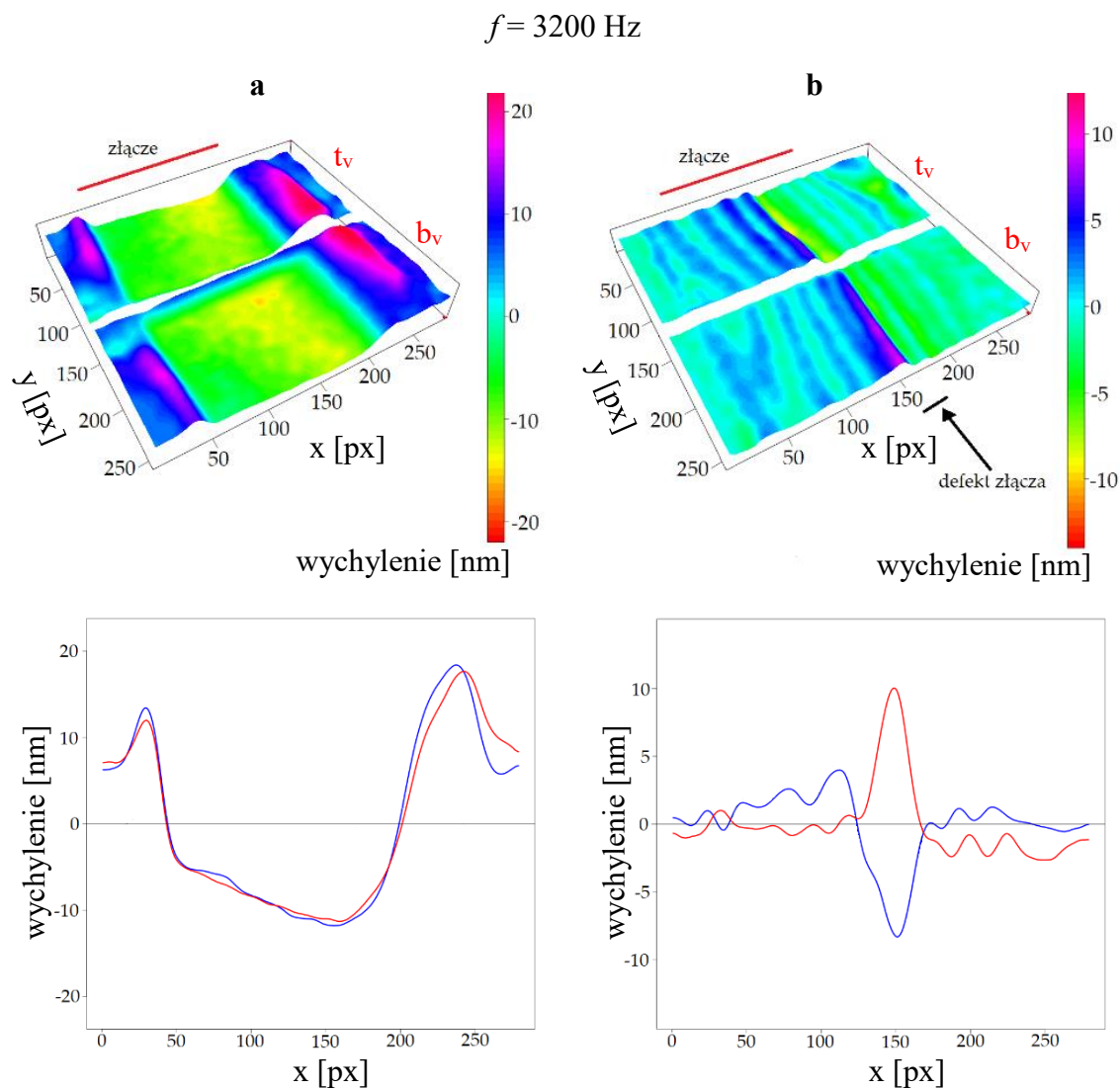
Na przykładzie próbek ze złączem adhezyjnym poliamid 6 z talkiem lub mikią – aluminium Al6061 (opis próbek w rozdziale 8.3), sprawdzono zachowanie złącza „na zakładkę” o powierzchni 20 x 20 mm z bardzo niedużym defektem w postaci poprzecznego rowka o przekroju od 1 mm do 3 mm. Na rysunku 9.15 kolorem zielonym zaznaczono obszar próbki obserwowany podczas badania.



Rys. 9.15. Próbkę z połączeniem adhezyjnym bez warstwy pośredniej z zaznaczonym obszarem obserwacji (kolor zielony:  $t_v$  – widok powierzchni górnej próbki,  $b_v$  – widok powierzchni dolnej próbki) i miejscem przyłożenia piezoelementu: 1 – część polimerowa (PA6); 2 – część metalowa (Al6061)

Ustalono, że dla próbek o takiej geometrii wzbudzenie powinno odbywać się w zakresie fal dźwiękowych bliskich częstotliwości 3200 Hz (lub dla niektórych próbek 2700 Hz), przy dużo niższym niż w poprzednich przypadkach napięciu podawanym na wzbudnik, równym 1 V. Wówczas dla próbek bez defektu obserwowano drgania złącza jako całości o amplitudzie ok. 10 nm, będące w przeciwfazie do drgań próbki tuż poza złączem o amplitudzie co najmniej równej amplitudzie drgań złącza (patrz rys. 9.16a i rys. 9.17a). Tutaj nieznacznie mniejszą amplitudę drgań złącza oraz obszaru próbki z nim sąsiadującego zarejestrowano dla próbek z poliamidem z dodatkiem miki (rys. 9.16a).

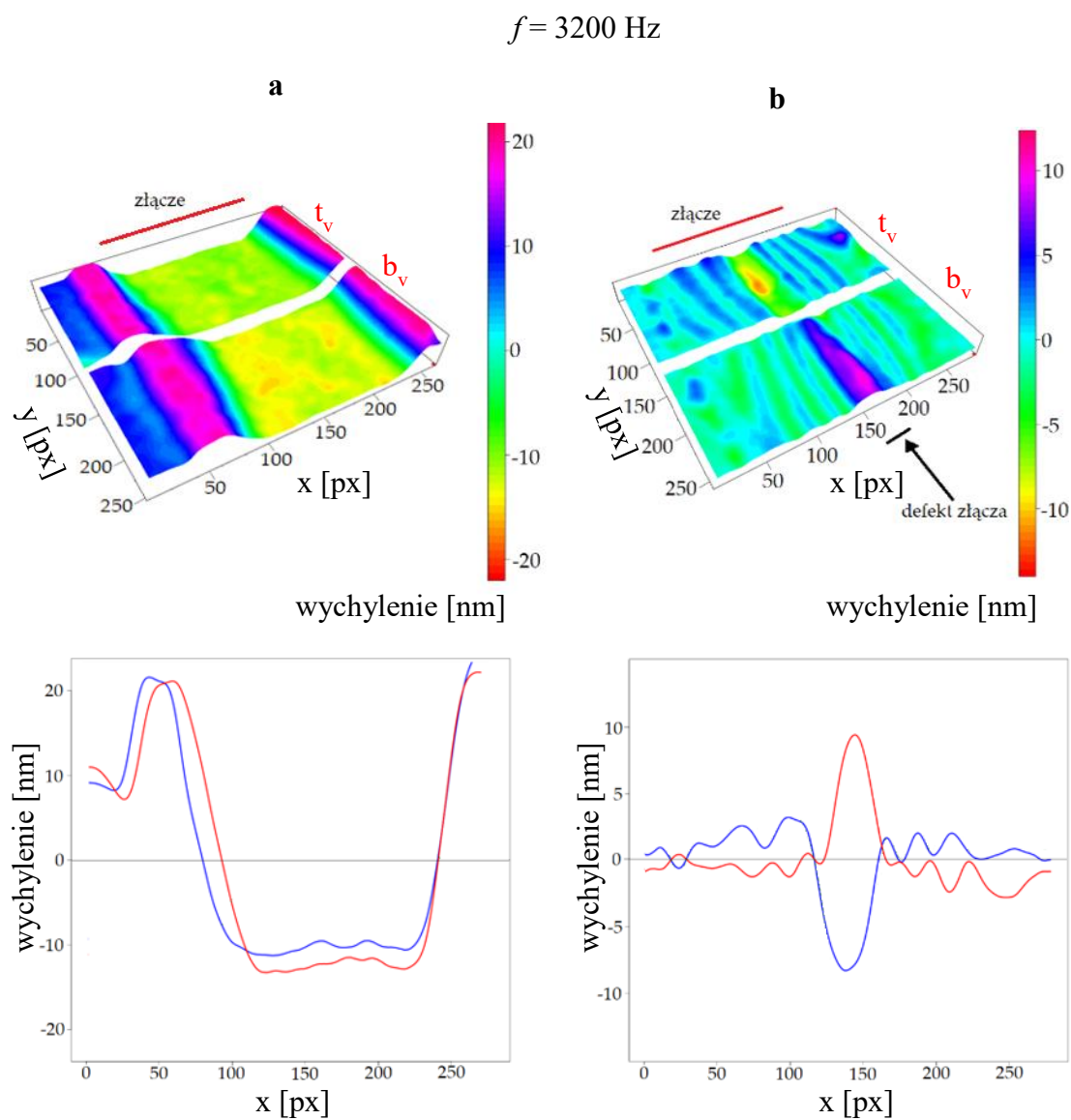
W próbkach z rowkowym defektem złącza generowała się fala płaska z wyraźnym lokalnym wzrostem amplitudy w miejscu defektu (patrz rys. 9.16b i 9.17b). Ten efekt dokładnie uwidaczniały wykresy dwuwymiarowe przedstawiające chwilową wartość wychylenia uśrednioną po szerokości próbki. W miejscu występowania defektu, powierzchnie metalowa i polimerowa poruszały się w przeciwnych fazach, podobnie jak miało to miejsce w przypadku próbek z połączeniem adhezyjnym z warstwą pośrednią (rys. 9.12).



Rys. 9.16. Kadry z trójwymiarowych animacji drgań i wykresy chwilowych wychyleń obu stron próbki uśrednionych po jej szerokości, dla próbek z połączeniem adhezyjnym aluminium i PA6 z dodatkiem miki: a – bez defektu, b – z defektem, wymiary obserwowanej części próbki 40 x 20 mm (1 mm  $\approx$  7 px); t<sub>v</sub> – wyniki dla powierzchni górnej próbki, b<sub>v</sub> – wyniki dla powierzchni dolnej próbki; kolorem oznaczono drgania: niebieskim - powierzchni dolnej (b<sub>v</sub>); czerwonym - powierzchni górnej (t<sub>v</sub>) [132]

Maksymalne wychylenia w obszarze defektu były zbliżone dla próbek z poliamidem z dodatkiem miki lub talku. Były one jednak zdecydowanie mniejsze (prawie o połowę) od tych na skraju złącza bez defektu (rys. 9.16 i 9.17). Wartości amplitud drgań obu rodzajów próbek były zbliżone i wynosiły około 10 nm, a fazy były zgodne (rys. 9.16 i 9.17).

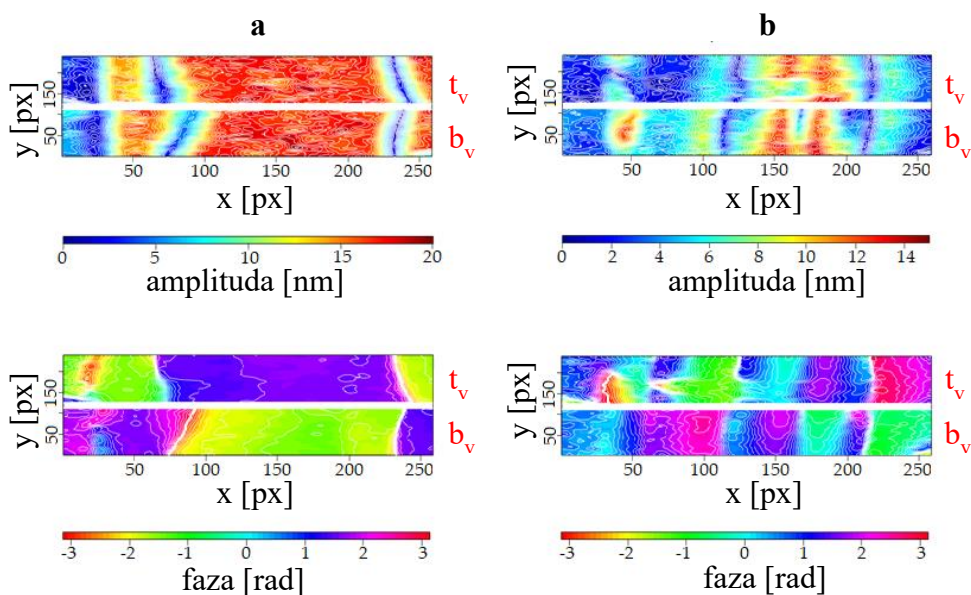




Rys. 9.17. Kadry z trójwymiarowych animacji drgań i wykresy chwilowych wychyleń obu stron próbki uśrednionych dla jej szerokości próbek z połączeniem adhezyjnym aluminium i PA6 z dodatkiem talku: a – bez defektu, b – z defektem, wymiary obserwowanej części próbki 40 x 20 mm ( $1 \text{ mm} \approx 7 \text{ px}$ );  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki,  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki; kolorem oznaczono drgania: niebieskim - powierzchni dolnej ( $b_v$ ); czerwonym - powierzchni górnej ( $t_v$ ) [115]

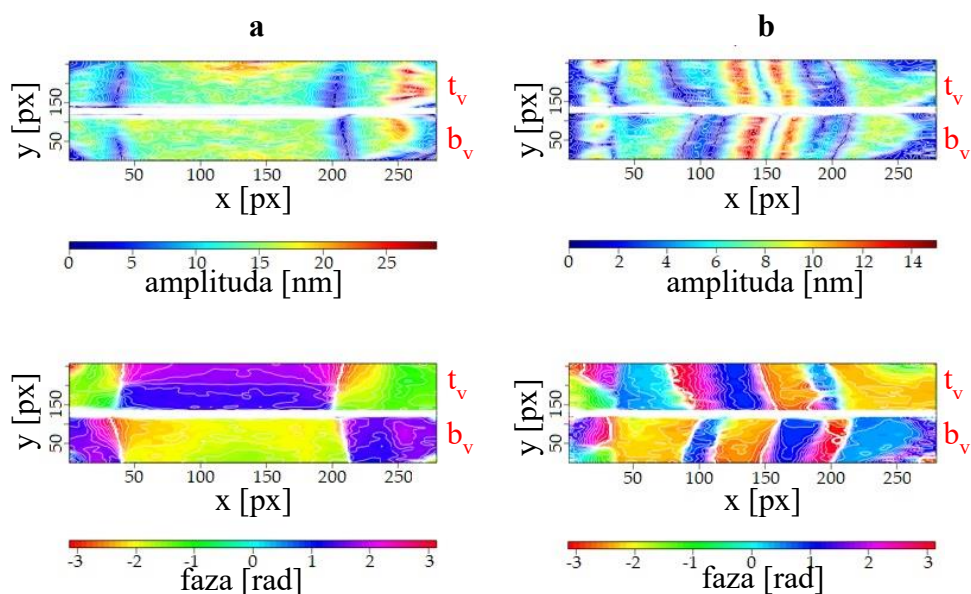
Zachowanie próbek bez i z defektem połączenia analizowano również na podstawie wykresów amplitudowych i fazowych (rys. 9.18 i 9.19), potwierdzając ww. wnioski. Ponownie można było zauważyć, że defekt połączenia powoduje zmiany w charakterze występujących drgań.

$f = 3200 \text{ Hz}$



Rys. 9.18. Wykresy amplitudowe i fazowe dla próbek z połączeniem adhezyjnym aluminium i PA6 z dodatkiem miki, a – bez defektu, b – z defektem: wymiary obserwowanej części próbki 40 x 20 mm ( $1 \text{ mm} \approx 7 \text{ px}$ ),  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki,  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki [115]

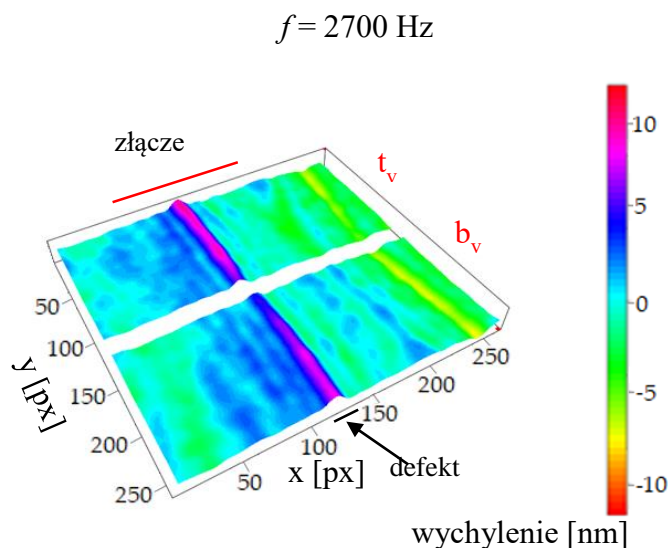
$f = 3200 \text{ Hz}$



Rys. 9.19. Wykresy amplitudowe i fazowe dla próbek z połączeniem adhezyjnym aluminium i PA6 z dodatkiem talku, a – bez defektu, b – z defektem: wymiary obserwowanej części próbki 40 x 20 mm ( $1 \text{ mm} \approx 7 \text{ px}$ ),  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki,  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki [115]

Częstotliwość wzbudzenia wynosząca 3200 Hz każdorazowo umożliwiała wykrycie występowania defektu w próbkach tego typu, jednakże nie dla wszystkich próbek pozwalała na jego lokalizację. W niektórych przypadkach konieczne było zastosowanie niższej

częstotliwości wzbudzenia wynoszącej 2700 Hz, celem określenia położenia zdefektowanego obszaru próbki (na rysunku 9.20 widoczna jest lokalizacja defektu o szerokości 1 mm dla częstotliwości wzbudzenia wynoszącej 2700 Hz).



Rys. 9.20. Kadr z trójwymiarowej animacji drgań próbki z połączeniem adhezyjnym aluminium i PA6 z dodatkiem talku, z defektem o szerokości 1 mm: wymiary obserwowanej części próbki 40 x 20 mm (1 mm  $\approx$  7 px);  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki,  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki

#### WNIOSKI:

Dla próbek bez defektu obserwowano regularny obraz amplitudowo-fazowy z wyraźnie widoczną zmianą fazy na krawędziach złącza polimer-metal. Dla próbki z defektem połączenia zarejestrowano drgania o mniejszej długości fali ze wzrostem amplitudy w miejscu defektu, gdzie powierzchnia metalowa i polimerowa próbki poruszały się w przeciwnych kierunkach.

Metoda laserowej wibrometrii holograficznej umożliwiła lokalizację niewielkich rowkowych defektów o przekroju wynoszącym ok. 5% długości złącza.

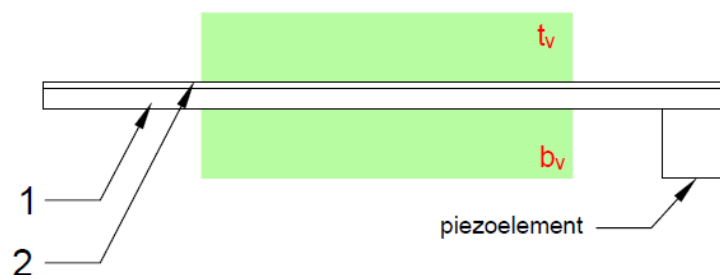
#### 9.4. Wyniki badań dla próbek z połączeniem adhezyjnym polimer-metal wytworzonym za pomocą prasowania przy użyciu prasy hydraulicznej

Dla tego rodzaju próbek oprócz lokalizacji defektu połączenia polimer-metal za pomocą wykresów amplitudowo-fazowych, zbadano dodatkowo zakresy częstotliwości wzbudzenia umożliwiające obserwację fal Lamba (ang. *Lamb-wave Frequency Observation Range* – LFOR), a także zależności od częstotliwości wzbudzenia dla amplitud i prędkości fal Lamba.

Nie zawsze było możliwe dokładne określenie lokalizacji defektu wyłącznie na podstawie wykresów amplitudowych i fazowych uzyskanych z badań wibrometrycznych. Dlatego na podstawie wykresów uśrednionej po szerokości próbki amplitudy drgań wyznaczono długość fali Lamba, a stąd jej prędkość. Porównanie krzywych dyspersyjnych prędkości dla próbek z defektem i bez defektu złącza pozwalało na wnioskowanie o występowaniu wady połączenia.

W stosowanym zakresie częstotliwości wzbudzenia (do około 130 kHz) mogą występować fale Lamba zerowego rzędu  $S_0$  – symetryczne lub  $A_0$  – antysymetryczne. W przypadku przebadanych próbek zaobserwowano tworzenie się antysymetrycznych fal Lamba  $A_0$ , co potwierdzały otrzymane zależności dyspersyjne oraz wykresy amplitudowo-fazowe<sup>17</sup>.

Rysunek 9.21 przedstawia obszar próbki obserwowany podczas badania (zaznaczony kolorem zielonym).

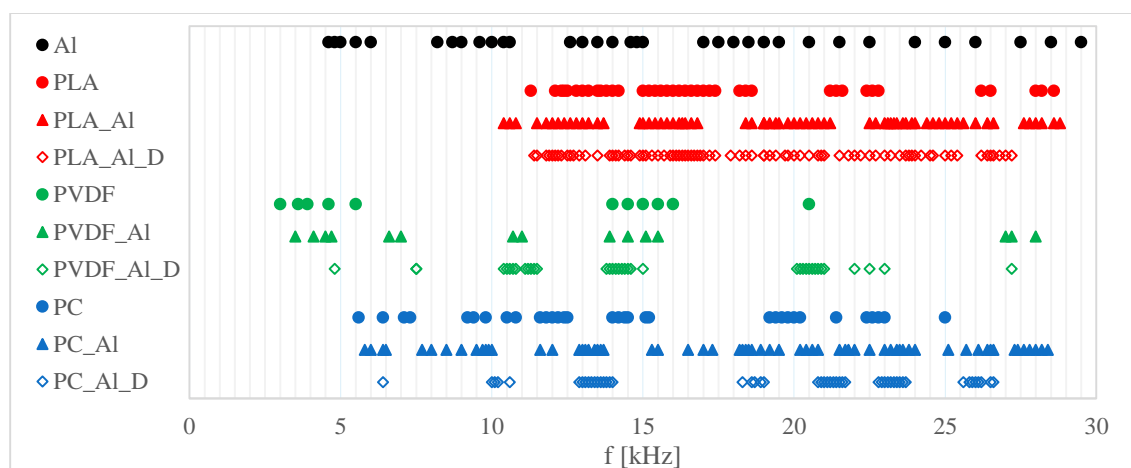


Rys. 9.21. Próbkę z połączeniem adhezyjnym bez warstwy pośredniej z zaznaczonym obszarem obserwacji (kolor zielony:  $t_v$  – widok powierzchni górnej próbki,  $b_v$  – widok powierzchni dolnej próbki) i miejscem przyłożenia piezoelementu: 1 – część polimerowa, 2 – część metalowa (AW-5754)

<sup>17</sup> Dla niektórych z użytych materiałów (Al i PC) możliwość występowania fal Lamba  $A_0$  w stosowanym, stosunkowo niskim zakresie częstotliwości zostało potwierdzone danymi literaturowymi oraz wynikami uzyskanymi korzystając z oprogramowania *open source Dispersion Calculator 2.0* udostępnionego przez Niemiecką Agencję Kosmiczną, DLR (niem. *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*) [45–47,86,89].

### 9.4.1. Połączenie aluminium z polilaktydem, poli(fluorkiem winylidenu) lub poliwęglanem

Na podstawie wyników pomiarów na innych grupach próbek i badań wstępnych, ustalono, że poszukiwania częstotliwości rezonansowych, a także możliwość wykrycia defektu o szerokości od 5 mm do 15 mm powinna być możliwa w zakresie częstotliwości wzbudzenia wynoszącym od 200 Hz do 30 kHz<sup>18</sup>. Aby uszczegółwić tę informację, dla wszystkich rodzajów zastosowanych w próbkach materiałów określono zakres częstotliwości wzbudzenia umożliwiający obserwację fal Lamba (rys. 9.22) [133].



Rys. 9.22. Częstotliwości wzbudzenia, dla których można było zaobserwować fale Lamba dla próbek aluminiowej, polimerowej oraz próbek bez i z defektem połączenia<sup>19</sup> [133]

W przypadku próbki aluminiowej obserwacja fal Lamba możliwa była w całym zakresie częstotliwości wzbudzenia od około 5 kHz do 30 kHz (rys. 9.22) [133]. Dla próbek wyłącznie polimerowych LFOR różnił się w zależności od materiału, ale każdorazowo jego szerokość spektralna nie przekraczała 20 kHz:

- 10 – 28 kHz dla PLA,
- 3 – 22 kHz dla PVDF,
- 5 – 25 kHz dla PC (rys. 9.22).

Należy zaznaczyć, że transmisja regularnych fal dla próbek, w których częścią polimerową był PVDF, była możliwa tylko dla kilku częstotliwości wzbudzenia wynoszących

<sup>18</sup> Wszystkie próbki przeskanowano dla tego samego zakresu częstotliwości wzbudzenia (w tym część wyłącznie aluminiową i wyłącznie polimerową próbki, których wymiary były takie same jak w złączach polimer-metal).

<sup>19</sup> Złącza z defektem połączenia zakodowano poprzez dodanie litery *D* w etykiecie (oznaczenia wprowadzono w legendzie rys. 9.22, na rys. 9.24 – 9.29 oraz w kolejnym podrozdziale 9.4.2).

około 5 kHz, 15 kHz lub 20 kHz. Próbki wykonane z PLA lub PC pozwalały na transmisję regularnych drgań w większym zakresie częstotliwości. Stwierdzono również, że w przypadku próbek ze złączem polimer-metal połączenie części wyłącznie polimerowej z aluminium prowadziło do poszerzenia LFOR i zmniejszenia w nim obszarów nie wykazujących transmisji drgań. Efekt ten był wyraźnie widoczny dla próbek PVDF\_Al oraz PC\_Al, które były zdolne do przenoszenia drgań dla wyższych częstotliwości wzbudzenia niż próbki wyłącznie polimerowe z tych materiałów. W przypadku próbek PLA\_Al nie zaobserwowano znacznego rozszerzenia LFOR w porównaniu do zakresu dla próbek wyłącznie z PLA. Natomiast obecność defektów w złączach polimer-metal prowadziła do zawężenia LFOR w porównaniu do próbek bez wady połączenia. Wystąpiła również niewielka tendencja LFOR do powrotu do zakresów obserwowanych dla próbek wyłącznie polimerowych.

Właściwości transmisyjne próbek porównano też za pomocą kryterium amplitudowego. Zgodnie z oczekiwaniami w próbkach aluminiowych generowały się fale o największej amplitudzie, wynoszącej ok. 20 nm. Amplitudy drgań w próbkach z polimerów przy tych samych warunkach wzbudzenia były znacząco mniejsze i wynosiły około:

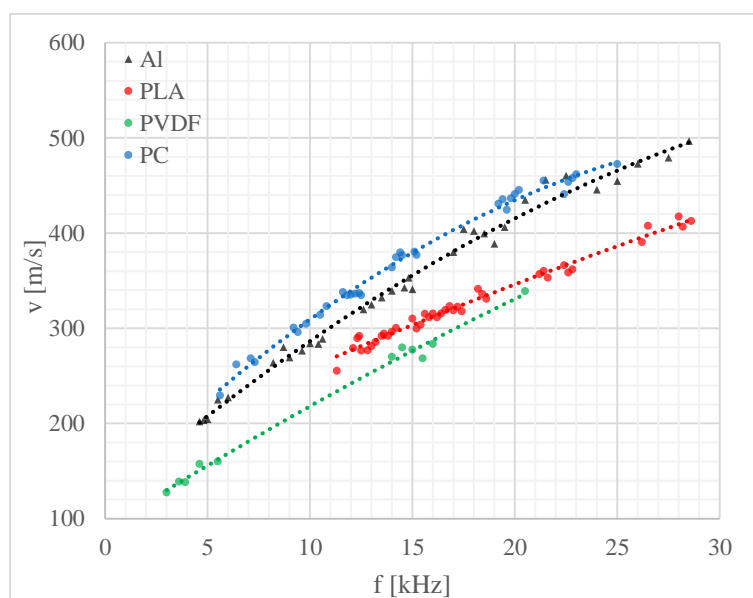
- 12 nm dla PLA,
- 5 nm dla PVDF,
- 15 nm dla PC.

Różna podatność na drgania w metalu i w polimerach prowadziła do wyraźnych różnic w wartościach amplitud fal Lamba dla obu stron złącza polimer-metal, które były szczególnie zauważalne w przypadku PLA\_Al i PVDF\_Al. Wibracje semikrystalicznych części polimerowych próbek wykonanych z PLA i PVDF były odpowiednio o około 10 – 20% i 40 – 50% słabsze niż dla metalowych części tych próbek. Wystąpienie defektu zwiększyło dysproporcję pomiędzy drganiami części metalowej i polimerowej, nawet do 60 – 70% dla PVDF\_Al\_D i do 25% dla PLA\_Al\_D. Jedynie w przypadku próbek (również tych z wadą połączenia), w których częścią polimerową był amorficzny poliwęglan (PC\_Al) wartości amplitud drgań części polimerowej i aluminiowej miały zbliżoną wartość (różnica wynosiła maksymalnie od 5 – 10%) [133].

**WNIOSKI:** Obecność wady połączenia w przypadku wszystkich próbek ze złączem polimer-metal zmniejszała zakres LFOR. Obecność defektu zwiększyła różnicę między amplitudami drgań metalu i polimeru w przypadku polimerów semikrystalicznych.

Zarówno dla próbek polimerowych, jak i z aluminium, na podstawie przeprowadzonych pomiarów, wykreślono krzywe prędkości fal Lamba w funkcji częstotliwości wzbudzenia (rys. 9.23 – 9.26). Jeżeli długość fali  $\lambda$  jest znana, to przy zadanej częstotliwości wzbudzenia  $f$ , możliwe jest obliczenie prędkości tworzących się fal Lamba, korzystając z wzoru na prędkość fazową fali:  $v = \lambda \cdot f$ . Najłatwiej jest odczytać długość fali z wykresu chwilowego wychylenia próbki uśrednionego po jej szerokości (na przykład rys. 9.27a).

Krzywe dyspersyjne dla prędkości posłużyły jako dodatkowe wskazania w procedurze wnioskowania o występowaniu defektu połączenia polimer-metal. Rysunek 9.23 przedstawia wykres zależności prędkości fal Lamba w funkcji częstotliwości wzbudzenia dla próbek polimerowych (PLA, PVDF i PC) oraz z aluminium. W próbkach semikrystalicznych PLA i PVDF prędkości fal Lamba w zakresie częstotliwości wzbudzania do 30 kHz były zdecydowanie niższe niż w próbce amorficznego PC i aluminium [133].



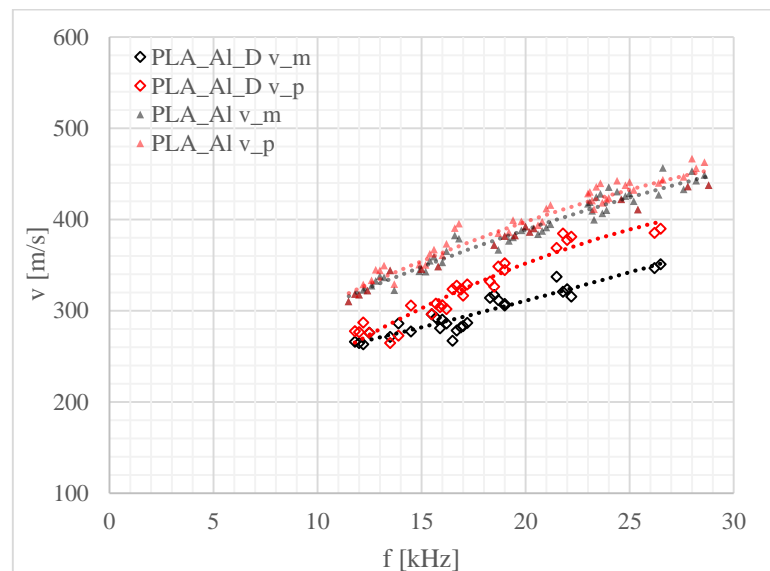
Rys. 9.23. Porównanie prędkości rozchodzenia się fal Lamba dla próbek polimerowych i aluminium [133]

Na rysunkach 9.24 – 9.26 przedstawiono krzywe dyspersyjne dla próbek polimerowo-metalowych bez i z defektem połączenia.

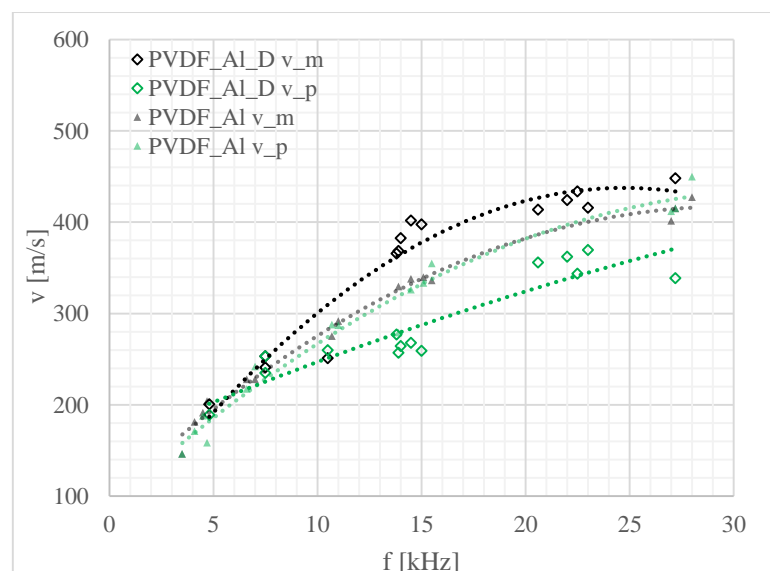
W przypadku próbek bez defektów, prędkość tworzących się fal Lamba w obu częściach, metalowej i polimerowej, była zbliżona do otrzymanej prędkości fal dla płytki aluminiowej. Zatem część aluminiowa determinowała rodzaj drgania wymuszonego, a część polimerowa tylko w nieznacznym stopniu je modyfikowała. Natomiast prędkości fal Lamba tworzących się w części polimerowej i metalowej w próbkach z defektem



PLA\_Al\_D i PVDF\_Al\_D zaczynały się znacząco od siebie różnić, począwszy od częstotliwości wzbudzenia wynoszącej około 10 kHz (rys. 9.24 i 9.25). Największe różnice między prędkościami w części metalowej i polimerowej zaobserwowano dla PVDF\_Al\_D, co było zgodne z wynikami, uzyskanymi z porównania wartości amplitud drgań (kryterium amplitudowe).



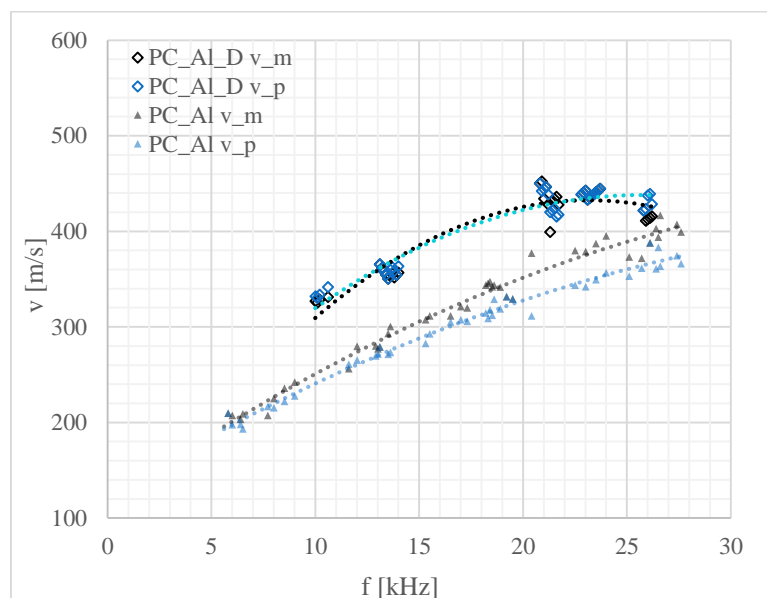
Rys. 9.24. Wykres zależności prędkości fal Lamba od częstotliwości wzbudzenia dla próbek PLA\_Al bez i z defektem połączenia  $_D$ : błąd pomiarowy:  $\Delta f = 1$  Hz,  $\Delta v = 10$  m/s. Prędkości fal Lamba oznaczono: kolorem czarnym w części metalowej ( $v_m$ ) i czerwonym w części polimerowej ( $v_p$ ) próbki [133]



Rys. 9.25. Wykres zależności prędkości fal Lamba od częstotliwości wzbudzenia dla próbek PVDF\_Al bez i z defektem połączenia  $_D$ : błąd pomiarowy:  $\Delta f = 1$  Hz,  $\Delta v = 10$  m/s. Prędkości fal Lamba oznaczono: kolorem czarnym w części metalowej ( $v_m$ ) i zielonym w części polimerowej ( $v_p$ ) próbki [133]



W próbkach PC\_Al\_D nie obserwowano różnicy w prędkości fal Lamba dla części metalowej i amorficznej polimerowej. Natomiast możliwe było rozróżnienie złączy polimer-metal bez i z defektem połączenia na podstawie różnic w wartościach prędkości (rys. 9.26). W przypadku występowania wady połączenia prędkości fal Lamba dla obu stron próbek były wyraźnie większe niż dla złączy bez defektu.



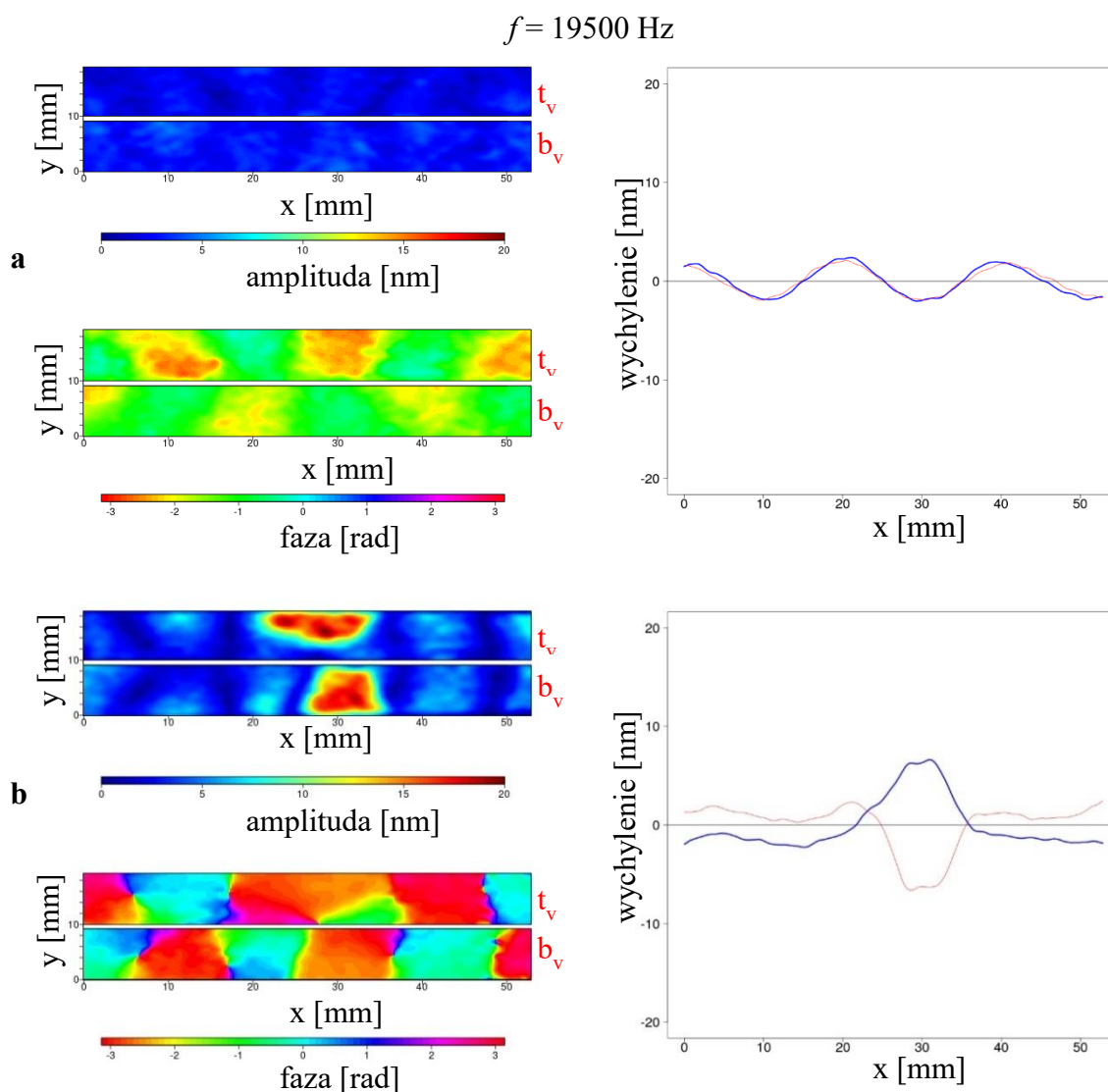
Rys. 9.26. Wykres zależności prędkości fal Lamba od częstotliwości wzbudzenia dla próbek PC\_Al bez i z defektem połączenia \_D: błąd pomiarowy:  $\Delta f = 1$  Hz,  $\Delta v = 10$  m/s. Prędkości fal Lamba oznaczono: kolorem czarnym w części metalowej ( $v_m$ ) i niebieskim w części polimerowej ( $v_p$ ) próbki [133]

Dla wszystkich przebadanych złączy polimer-metal z defektem połączenia (rys. 9.24 – 9.26) zaobserwowano, że wartości prędkości fal Lamba w części polimerowej dążyły do wartości prędkości fal Lamba wyznaczonych dla próbek wyłącznie z danego polimeru (rys. 9.23).

#### WNIOSKI:

Pomiary prędkości w obu częściach próbki metalowo-polimerowej przy częstotliwościach wzbudzenia z zakresu od 10 kHz do 25 kHz dostarczają wystarczających informacji, aby wnioskować o występowaniu defektu połączenia o szerokości od 5 mm do 15 mm.

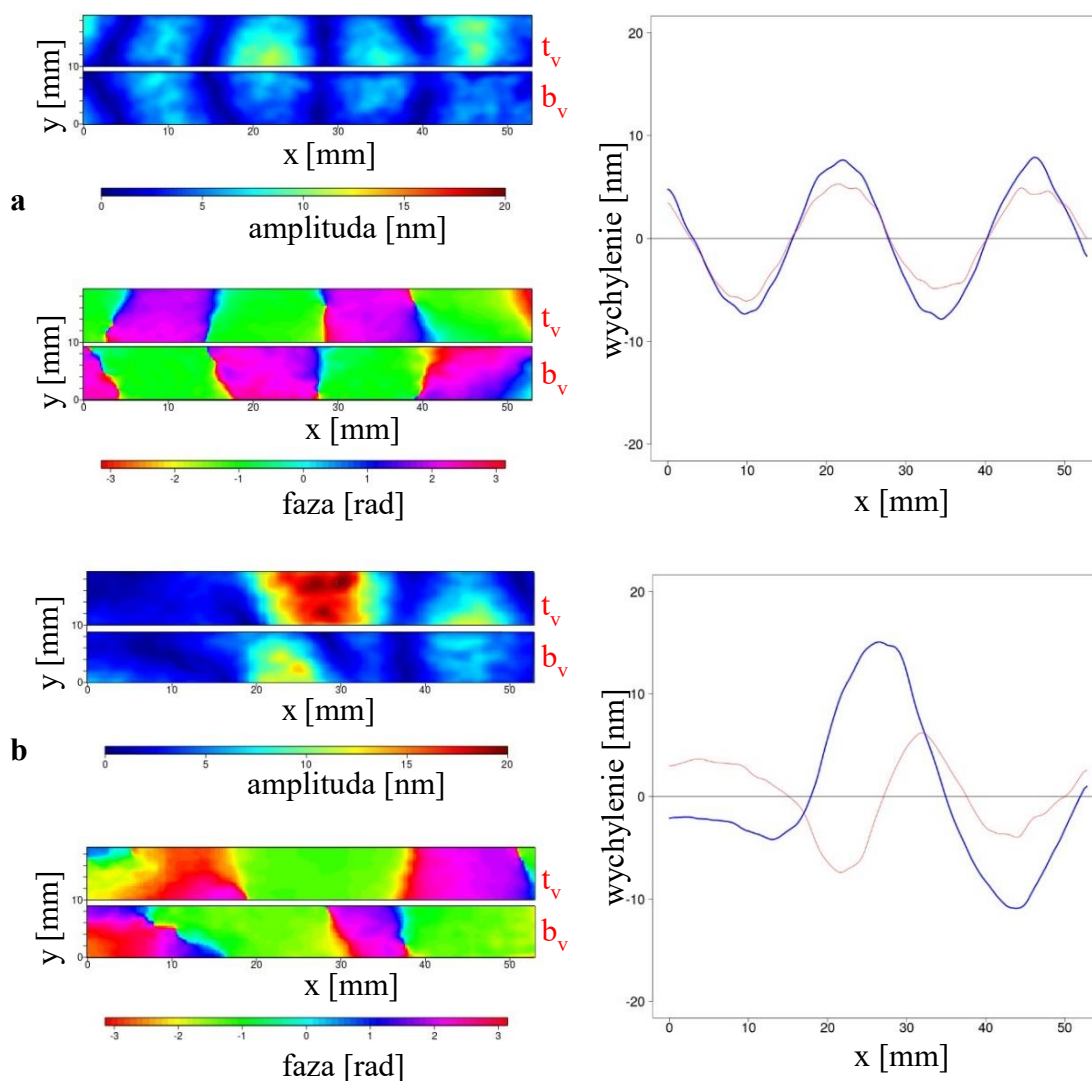
Podobnie jak w przypadku innych próbek bez defektu (wyniki opisano w podrozdziałach 9.2 – 9.3 i 9.4.2) wibracje części metalowej i polimerowej złącza były regularne, tworząc antysymetryczną falę Lamba  $A_0$ . Można to zaobserwować zarówno na wykresach amplitudowych, jak i fazowych (rys. 9.27a – 9.29a).



Rys. 9.27. Wykres amplitudowy i fazowy oraz chwilowych wychyleń uśrednionych dla szerokości próbki *a* – PLA\_Al bez defektu połączenia, *b* – PLA\_Al\_D z defektem połączenia: wymiary obserwowanej części próbki  $54 \times 9,5 \text{ mm}$ ;  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki (część metalowa – kolor niebieski),  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (część polimerowa – kolor czerwony) [133]

W przypadku próbek z defektem, fala Lamba traciła swoją regularność, a w niektórych przypadkach rejestrowano również drgania skrętne w obszarze wady (rys. 9.27b). Obecność defektu, w niektórych przypadkach, prowadziła do zwiększenia różnic w wartościach amplitud między drganiami części polimerowej i metalowej próbki.

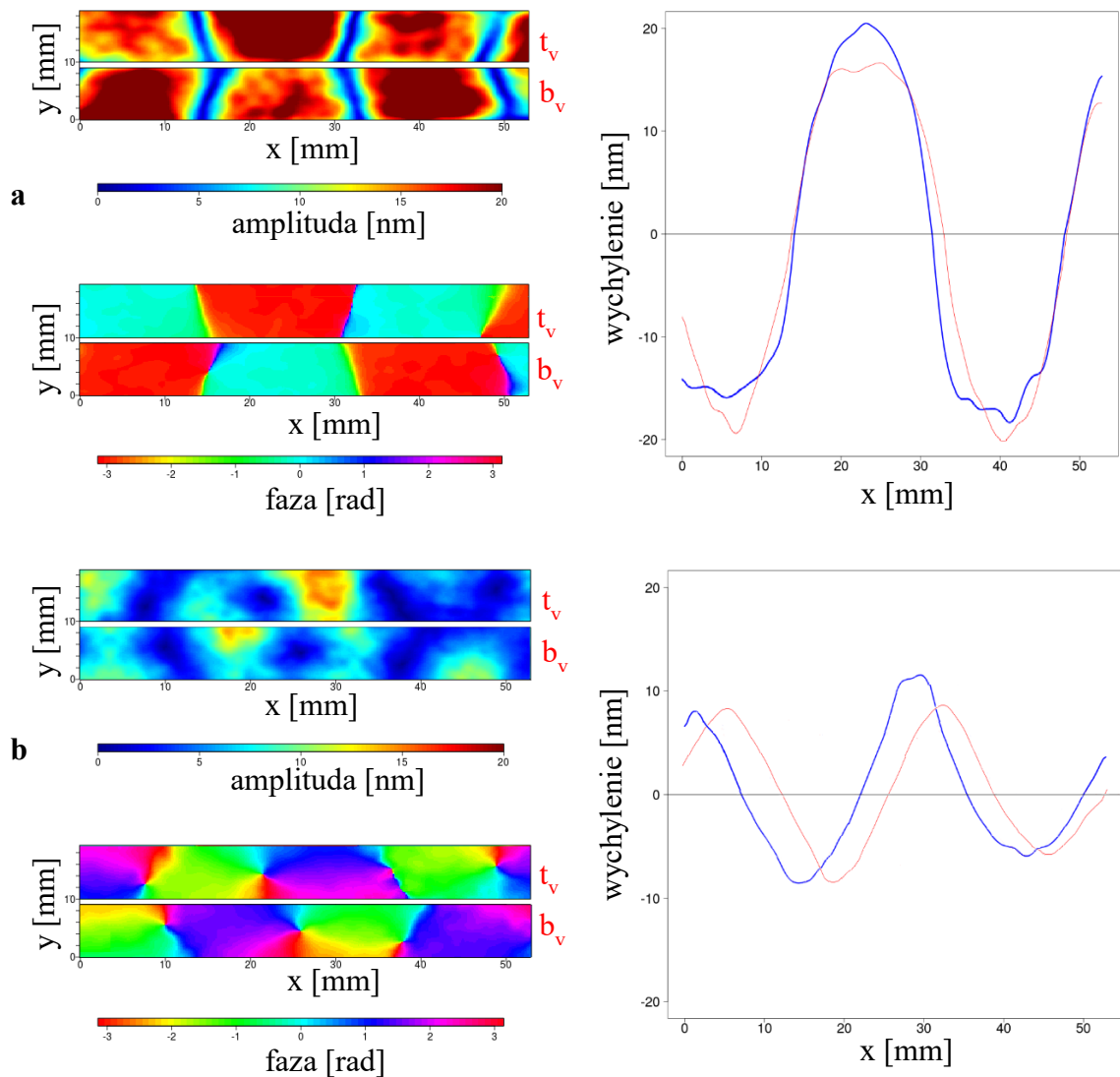
$$f = 14500 \text{ Hz}$$



Rys. 9.28. Wykres amplitudowy i fazowy oraz chwilowych wychyleń uśrednionych dla szerokości próbki a – PVDF\_Al bez defektu połączenia, b – PVDF\_Al\_D z defektem połączenia: wymiary obserwowanej części próbki  $54 \times 9,5 \text{ mm}$ ,  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki (część metalowa – kolor niebieski),  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (część polimerowa – kolor czerwony)

LFOR, dla którego możliwa była obserwacja defektu połączenia w złączach, różniła się bardziej w zależności od wielkości wady niż użytego materiału polimerowego. Im mniejsza szerokość defektu, tym wyższa musi być częstotliwość wzbudzenia, aby umożliwić ich obserwację. Wady o szerokości około 15 mm widoczne były przy częstotliwości wzbudzenia wynoszącej około 13 – 16 kHz (rys. 9.28b i 9.29b), a mniejsze (około 10 mm szerokości) około 19 – 22 kHz (rys. 9.27b).

$$f = 13200 \text{ Hz}$$

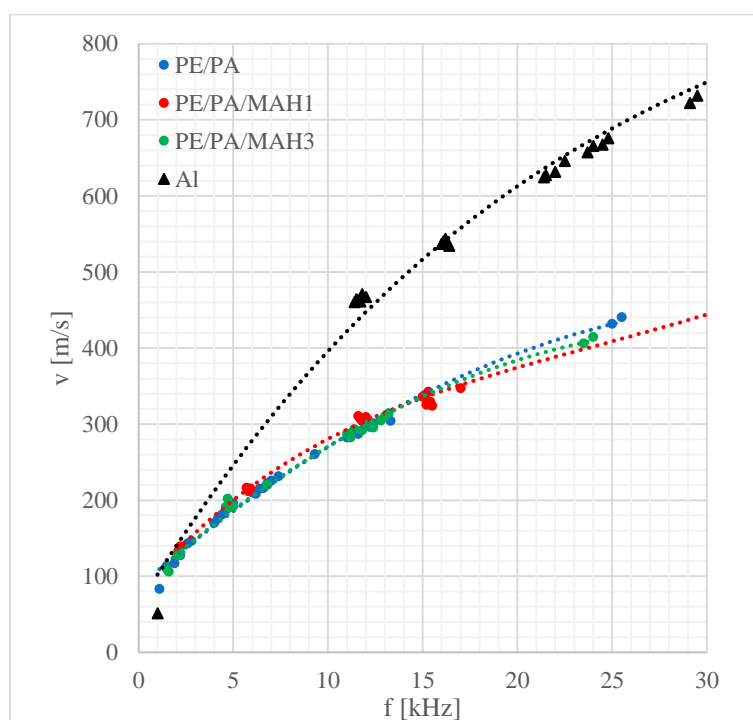


Rys. 9.29. Wykres amplitudowy i fazowy oraz chwilowych wychyleń uśrednionych dla szerokości próbek  
 a – PC\_Al bez defektu, b – PC\_Al\_D z defektem połączenia: wymiary obserwowanej części próbki  
 54 x 9,5 mm,  $t_v$  – widok powierzchni górnej próbki (część metalowa – kolor niebieski),  $b_v$  – widok po-  
 wierzchni dolnej próbki (część polimerowa – kolor czerwony)

**WNIOSKI:** Holograficzna wibrometria laserowa umożliwiła wykrycie i zlokalizowanie wad połączenia wszystkich złączy polimer-metal. W przypadku wszystkich rodzajów próbek z wadą występowało przesunięcie fazowe wibracji dla strony metalowej i polimerowej próbki.

#### 9.4.2. Połączenie aluminium z mieszaniną polietylenu i poliamidu z różnym procentowym udziałem kompozybilizatora PE-g-MAH

Badaniom wibrometrycznym poddano trzy rodzaje próbek polimerowo-aluminiowych, oznaczone jako L1, L2 i L3 (por. podrozdział 8.4d, str. 49), a także próbki wyłącznie aluminiowe oraz polimerowe (PE/PA, PE/PA/MAH<sub>1</sub>, PE/PA/MAH<sub>3</sub>), te ostatnie celem sprawdzenia występowania ewentualnego wpływu zawartości kompozybilizatora na drgania obiektów badanych. Do analizy użyto nie tylko wykresów amplitudowych i fazowych oraz trójwymiarowej animacji drgań, lecz również charakterystykę rozprzestrzeniania się drgań, w postaci zależności prędkości fal Lamba od częstotliwości wzbudzenia (krzywe dyspersyjne). Dla próbek aluminiowych oraz wykonanych wyłącznie z polimeru stwierdzono, że wychylenia na górnej i dolnej powierzchni próbek były zgodne zarówno co do wartości amplitudy jak i fazy, tworząc antysymetryczną falę Lamba. Krzywe dyspersyjne dla próbek polimerowych, zawierających różny udział kompozybilizatora pokrywały się, ale znacznie różniły się od krzywej dyspersyjnej płytki aluminiowej (rys. 9.30).

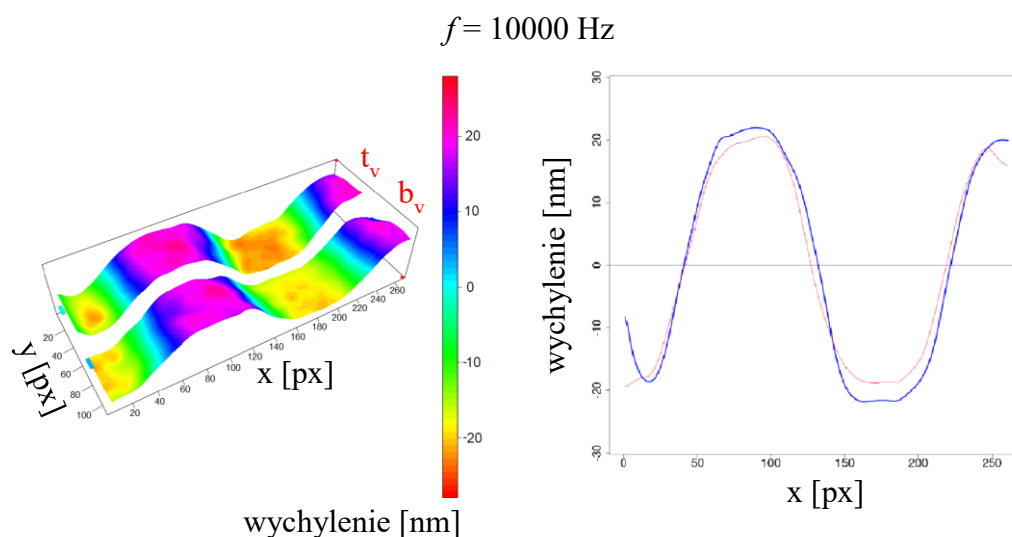


Rys. 9.30. Wykres prędkości fal Lamba w funkcji częstotliwości wzbudzenia próbek polimerowych PE/PA, PE/PA/MAH<sub>1</sub> i PE/PA/MAH<sub>3</sub> i aluminium

Dla wszystkich próbek zbadano cały zakres częstotliwości, w którym można było zaobserwować wyraźne obrazy fazowe i amplitudowe powstających fal. Zauważalną reak-

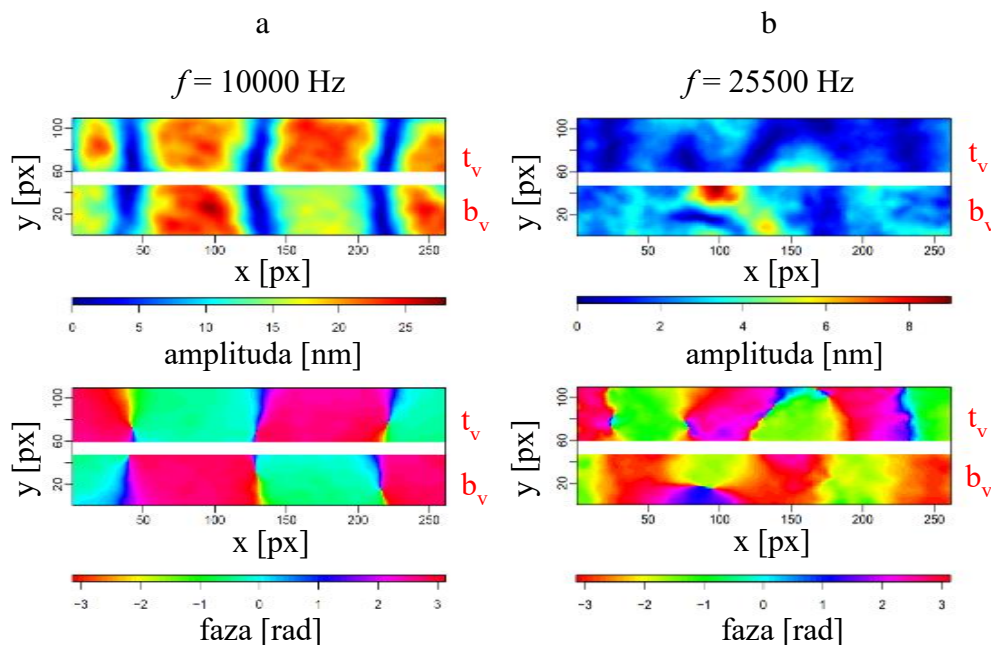
cję na wzbudzenie próbki aluminiowej obserwowano dla szerokiego zakresu częstotliwości od 200 Hz do 61 kHz. Próbki wyłącznie polimerowe, wykonane z mieszanek: PE/PA, PE/PA/MAH<sub>1</sub> i PE/PA/MAH<sub>3</sub> wykazywały regularne drgania od 200 Hz do odpowiednio 25 kHz, 57 kHz i 24 kHz. Dla próbek z polimeru PE/PA/MAH<sub>1</sub> LFOR był zatem ponad dwukrotnie większy niż dla próbek zawierających tylko polimery PE/PA oraz PE/PA/MAH<sub>3</sub> i był porównywalny z próbką aluminiową. Zaobserwowano zatem wpływ udziału kompatybilizatora na zakres przenoszenia fal Lamba. Dla próbek aluminiowo-polimerowych L1, L2 i L3 omawiane zakresy uległy znacznej zmianie. W przypadku L1 (PE/PA) górna granica wzrosła z 25 kHz do 41 kHz, a dla L2 (PE/PA/MAH<sub>1</sub>) zmniejszyła się z 57 kHz do 40 kHz. Niewielką zmianę z 24 kHz do 26 kHz zaobserwowano dla próbek L3 (PE/PA/MAH<sub>3</sub>). W przypadku złączy z defektem obserwowano ograniczenie LFOR niezależnie od rodzaju polimeru, LFOR dla: L1\_D – 32,5 kHz, L2\_D – 35,5 kHz, L3\_D – 25,5 kHz.

W przypadku złączy bez defektów obie strony próbek poruszały się zgodnie w fazie (rys. 9.31 i 9.32a) – tworzyła się antysymetryczna fala Lamba  $A_0$ . Wskazywało to na dobrą jakość połączenia adhezyjnego, z czego można wysnuć wniosek, że tego typu mieszanki polimerowe można z powodzeniem stosować do wytworzenia stabilnego złącza z warstwą aluminium.



Rys. 9.31. Kadry z trójwymiarowej animacji oraz wykres chwilowego wychylenia obu stron próbki, uśrednionego po jej szerokości dla próbki L1 bez defektu: wymiary obserwowanej części próbki 54 x 9,5 mm (1 mm = 4,8 px);  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki (kolor czerwony),  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (kolor niebieski)

Należy zaznaczyć, że nawet jeśli wykresy amplitudowe nie były dostatecznie wyraźne dla pewnych częstotliwości wzbudzenia, to nadal można było stwierdzić występowanie fal Lamba i wyznaczyć ich długość na podstawie wykresów fazowych (rys. 9.32b)<sup>20</sup>.



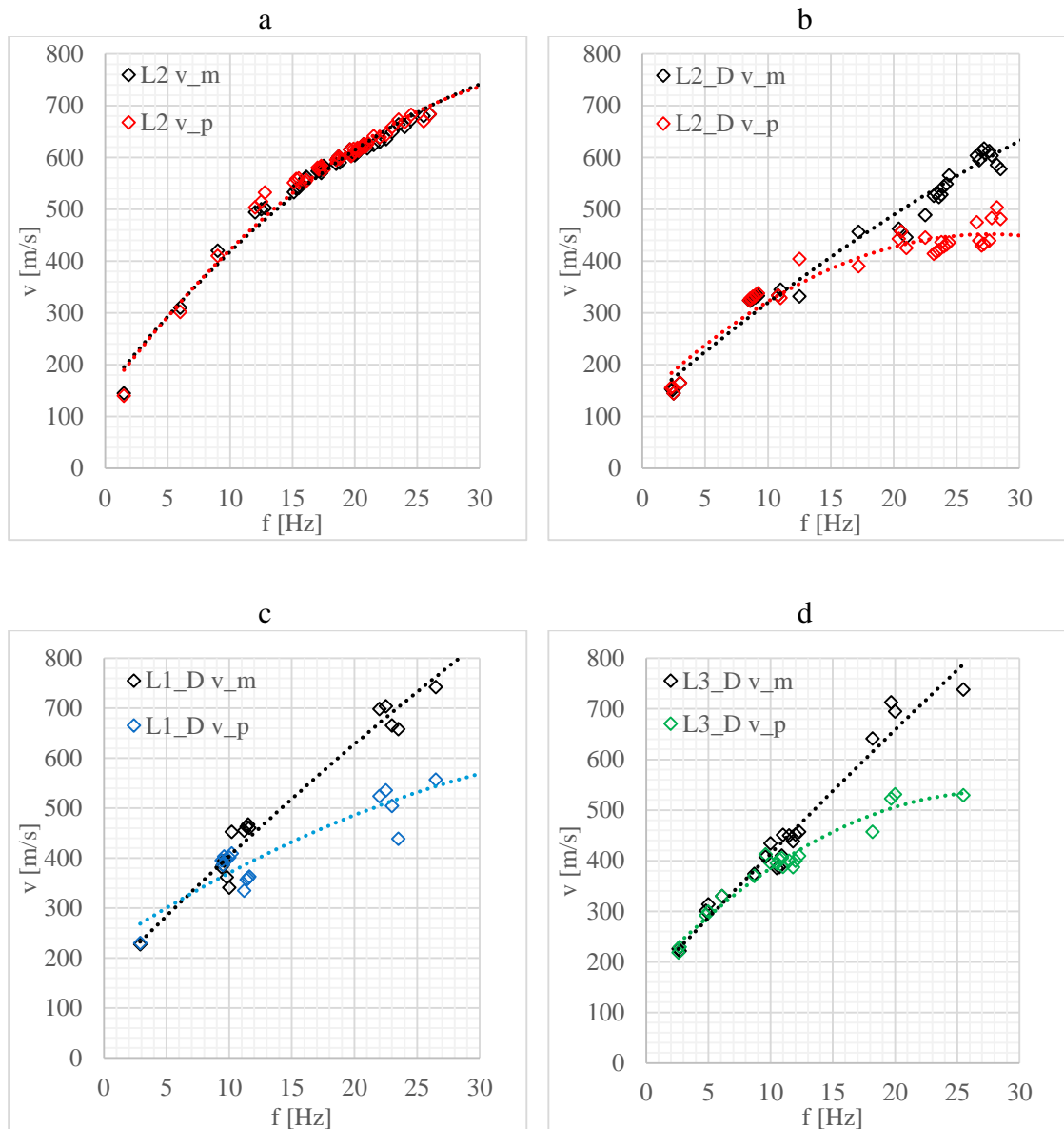
Rys. 9.32. Wykresy amplitudowe i fazowe próbek L1 bez defektu połączenia dla dwóch różnych częstotliwości wzbudzenia: a – 10 kHz, b – 25,5 kHz, wymiary obserwowanej części próbki 54 x 9,5 mm (1 mm  $\approx$  4,8 px)

Weryfikację przydatności uzyskanych krzywych dyspersyjnych do wnioskowania o występowaniu defektu w złączu polimer-metal przeprowadzono na podstawie porównania krzywych otrzymanych dla próbek bez defektu i z defektami. Jak już wcześniej wspomniano, na wykresie (rys. 9.30) przedstawiono zależność prędkości fal Lamba w funkcji częstotliwości wzbudzenia dla próbki aluminiowej o grubości 1 mm i próbek polimerowych o grubości 2 mm. Wymiary tych próbek były identyczne z użytymi w złączach polimer-metal. W obydwóch rodzajach próbek występowały antysymetryczne fale Lamba  $A_0$ . Wyraźnie większą prędkość fali zaobserwowano dla aluminium.

W przypadku wszystkich rodzajów próbek bez defektów (L1, L2, L3) zauważono, że na prędkość tworzących się fal ma wpływ głównie część metalowa próbki, niezależnie od zastosowanego rodzaju mieszanki polimerowej (rys. 9.33a), ponieważ prędkości fal w próbkach stały się zbliżone do prędkości w płycie aluminiowej (rys. 9.30).

<sup>20</sup> Prędkości fal Lamba obliczono według procedury opisanej w podrozdziale 9.4.1.





Rys. 9.33. Wykres prędkości fal Lamba w funkcji częstotliwości wzbudzenia dla próbek: bez defektu L2 (a) oraz z defektem połączenia b – L2\_D, c – L1\_D, d – L3\_D

W przypadku występowania wady połączenia, prędkości tworzących się fal Lamba w metalu i w polimerze zaczynały się znacząco różnić, poczynając od częstotliwości wzbudzenia między 10 kHz a 14 kHz, w zależności od badanej próbki (rys. 9.33b – d). Dla wszystkich próbek z defektem różnica ta stawała się ewidentna dla częstotliwości wzbudzenia ok. 25 kHz (rys. 9.33b – d). Prędkości fal Lamba w warstwie polimerowej przyjmowały mniejsze wartości, bardziej zbliżone do zmierzonych w próbce z czystego polimeru. Natomiast w warstwie aluminiowej defekt złącza polimer-metal skutkowało prędkościami fal Lamba zbliżonymi do wartości w płycie wyłącznie aluminiowej.



WNIOSKI:

Obecność wady połączenia w przypadku wszystkich złączy polimer-metal zmniejszyła zakres LFOR.

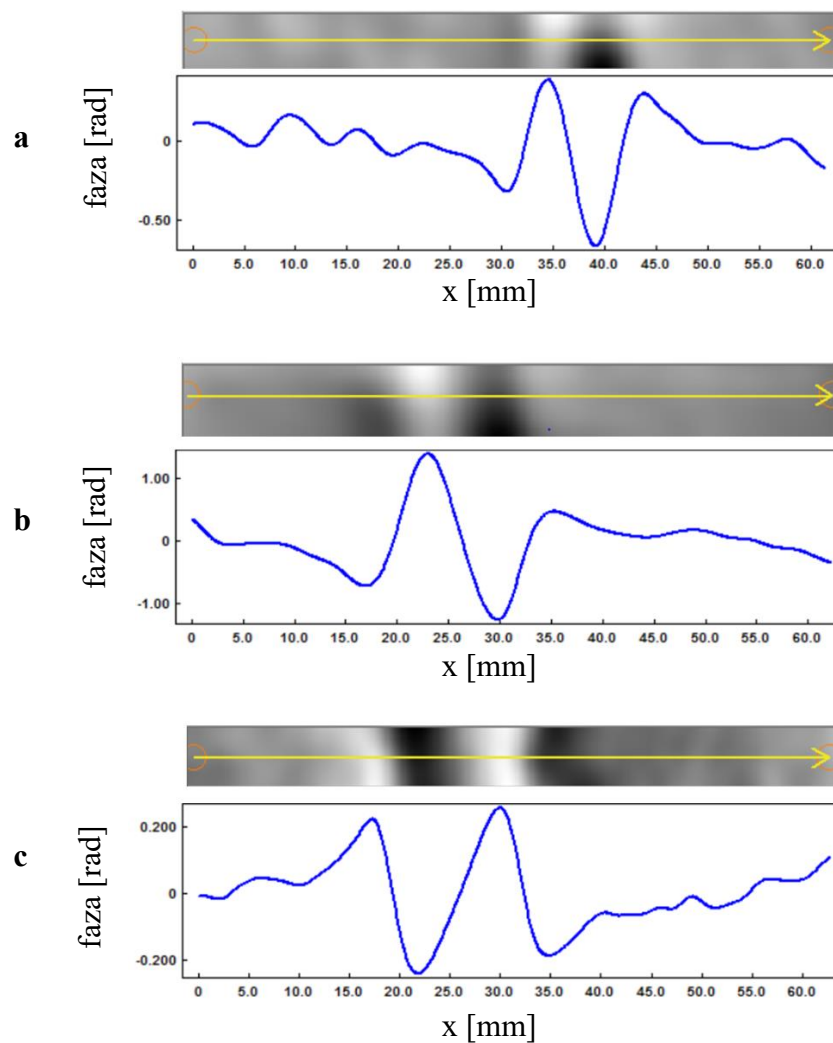
Na podstawie wykresów przedstawiających zależność prędkości propagujących się fal Lamba od częstotliwości wzbudzenia ustalono, że:

- krzywe dyspersyjne można wykorzystać do wykrywania defektów połączeń adhezyjnych w złączach polimer-metal,
- w testach wibrometrycznych na występowanie defektów złącza o szerokości od 5 mm do 15 mm w tego typu próbkach wystarczy ograniczyć częstotliwość wzbudzenia do zakresu 20 – 25 kHz.

Dla niższych częstotliwości nanometrycznych wzbudzeń istnienie kilkumilimetrowego defektu można zaniedbać.

Cyfrowa laserowa wibrometria holograficzna umożliwiła wykrywanie istnienia defektów w złączach polimer-metal na podstawie różnic w prędkościach propagujących się fal. Niestety, nie pozwoliła w tym wypadku na określenie miejsca występowania defektu [134].

W celu lokalizacji defektu próbki poddano badaniu za pomocą szerografu Q800 firmy Dantec Dynamics [135] – stanowisko pomiarowe opisano w dodatku A. Aluminiową powierzchnię próbki podgrzewano przez 5 sekund za pomocą lampy na podczerwień. Doprowadziło to do wzrostu temperatury powierzchni aluminiowej o  $1.6^{\circ}\text{C}$ , natomiast powierzchni polimerowej o  $0.9^{\circ}\text{C}$ . W wyniku ogrzewania obserwowano odkształcenie powierzchni polimerowej próbki, a obraz szerograficzny odzwierciedlał wielkość zmiany tej deformacji (rys. 9.34).



Rys. 9.34. Szerogramy oraz profile fazowe próbek z połączeniem polimer-metal o różnej szerokości:  
*a – 5 mm, b – 10 mm, c – 15 mm*

Maksymalna lub minimalna jasność obrazu odpowiada największym zmianom, wyrażonym w skali różnicy fazy pomiędzy dwoma wiązkami odbitymi od dwóch punktów na powierzchni próbki, które interferują, padając na jeden piksel matrycy CCD szero-  
grafu.

Zmiany w jasności obrazu były obserwowane w obszarze występowania defektu. Położenie punktu zerowego między dwoma ekstremami jasności, widoczne na profilach fazowych, odpowiada położeniu środka defektu.

Zmiany odkształcenia rejestrowane były natomiast wzdłuż całej szerokości i długości próbki na obszarze przekraczającym rozmiar wady złącza od około półtora do dwóch razy. Wskazuje to na silniejszy i bardziej rozległy efekt deformacji próbki podczas wymuszenia termicznego w badaniu szerograficznym niż w pomiarach wibrometrycznych.

**WNIOSKI:**                      Metoda szerograficzna umożliwiła określenie środka defektu złącza polimer-metal po poddaniu próbki niewielkiemu obciążeniu termicznemu.

## 9.5. Zestawienie wniosków z wykonanych pomiarów

### Próbki z połączeniem adhezyjnym oraz adhezyjnym i mechanicznym

WNIOSKI: Analiza wykresów amplitudowych i fazowych wskazała, że połączenie adhezyjne stali DC04 z poliamidem PA6 powodowało istotne zmniejszenie regularności drgań w części polimerowej przy zachowaniu fal płaskich w metalu. Tłumienne właściwości polimeru powodowały zmniejszenie się amplitudy drgań wraz z rosnącą odległością od wzbudnika, przy niezmiennej długości fali, co wskazywało na słabe efekty tłumienia.

Zastosowana metoda badawcza umożliwiła w sposób nieniszczący na zlokalizowanie miejsc krytycznych w złączu polimer-metal.

Zwiększenie regularności drgań, szczególnie w części polimerowej połączonej z częścią stalową wskazuje na znaczące wzmocnienie złącza w próbkach z dodatkowym połączeniem mechanicznym.

### Próbki z połączeniem adhezyjnym z warstwą pośrednią

WNIOSKI: W miejscu występowania defektu obserwowano lokalny wzrost wartości amplitudy drgań oraz każdorazowo wychylenie powierzchni metalowej i polimerowej w przeciwnych kierunkach.

Badania pozwoliły na określenie zakresów częstotliwości wzbudzenia, umożliwiających wykrycie wad połączenia o różnej szerokości, od 6 mm do 18 mm. Im większa była częstotliwość zadawanych przez wzbudnik drgań, tym mniejsze defekty można było wykryć. Dla danego rozmiaru defektu połączenia zakres częstotliwości był na tyle szeroki, że wystarczał zgrubny wybór częstotliwości wzbudzenia (w tym zakresie).

### Próbki z połączeniem adhezyjnym bez warstwy pośredniej

WNIOSKI: Dla próbek bez defektu obserwowano regularny obraz amplitudowo-fazowy z wyraźnie widoczną zmianą fazy na krawędziach złącza polimer-metal. Dla próbki z defektem połączenia zarejestrowano

drżania o mniejszej długości fali ze wzrostem amplitudy w miejscu defektu, a powierzchnia metalowa i polimerowa próbki poruszały się w przeciwnych kierunkach.

Metoda laserowej wibrometrii holograficznej umożliwiła lokalizację niewielkich rowkowych defektów o przekroju ok. 5% długości złącza.

### **Próbki z połączeniem adhezyjnym wytworzonym za pomocą prasowania**

**WNIOSKI:** Obecność wady połączenia w przypadku wszystkich próbek ze złączem polimer-metal zmniejszała zakres LFOR.

### **Połączenie aluminium z polilaktydem, poli(fluorkiem winylidenu) lub poliwęglanem:**

Obecność defektu zwiększyła różnicę między amplitudami drgań metalu i polimeru w przypadku polimerów semikrystalicznych.

Pomiary prędkości w obu częściach próbki metalowo-polimerowej przy częstotliwościach wzbudzenia z zakresu od 10 kHz do 25 kHz dostarczają wystarczających informacji, aby wnioskować o występowaniu defektu połączenia o szerokości od 5 mm do 15 mm.

Holograficzna wibrometria laserowa umożliwiła wykrycie i zlokalizowanie wad połączenia wszystkich złączy polimer-metal. W przypadku wszystkich rodzajów próbek z wadą występowało przesunięcie fazowe wibracji dla strony metalowej i polimerowej próbki.

### **Połączenie aluminium z mieszaniną polietylenu i poliamidu z różnym udziałem kompatybilizatora PE-g-MAH**

Obecność wady połączenia w przypadku wszystkich złączy polimer-metal zmniejszała zakres LFOR.

Na podstawie wykresów przedstawiających zależność prędkości propagujących się fal Lamba od częstotliwości wzbudzenia ustalono, że:

- krzywe dyspersyjne można wykorzystać do wykrywania defektów połączeń adhezyjnych w złączach polimer-metal,

- w testach wibrometrycznych na występowanie defektów złącza o szerokości od 5 mm do 15 mm, w tego typu próbkach wystarczy ograniczyć częstotliwość wzbudzenia do zakresu 20 – 25 kHz.

Dla niższych częstotliwości nanometrycznych wzbudzeń istnienie kilkumilimetrowego defektu można zaniedbać.

Metoda szerograficzna umożliwia określenie środka defektu złącza polimer-metal po poddaniu próbki niewielkiemu obciążeniu termicznemu.

## 10. PODSUMOWANIE

Zbudowane w pierwszym etapie pracy stanowisko pomiarowe z cyfrowym laserowym wibrometrem holograficznym pozwoliło na szybkie i nieskomplikowane przystosowanie go do badań próbek z różnymi typami złącza, pobudzanych do drgań w szerokim zakresie niskich częstotliwości. Przeprowadzone kilkakrotnie na tych samych próbkach badania wibrometryczne prowadziły do uzyskania takich samych lub zbliżonych wyników (drobne różnice wynikać mogły z ponownego zamontowania próbki w uchwytach), co potwierdziło wysoką powtarzalność układu pomiarowego. Stwierdzono również, że wielokrotne pomiary nie doprowadzały do uszkodzenia próbek, co potwierdziło nieniszczący charakter prowadzonych badań. Próbki poddawane badaniom miały kształty i wymiary umożliwiające poddanie ich dalszym testom np. wytrzymałościowym. Ustalono, że w badaniach wibrometrycznych możliwe jest wykrycie defektu połączenia polimer-metal poprzez m.in.: ocenę wykresów amplitudowo-fazowych, analizę różnic w charakterze tworzących się fal lub różnic w prędkościach propagujących się fal Lamba.

Cyfrowa wibrometria holograficzna pozwoliła na wykrywanie defektów w złączach polimer-metal z wysoką zdolnością rozdzielczą i przy niskiej energii wzbudzenia. Jednoczesna obserwacja obu stron próbki w czasie rzeczywistym pozwoliła na pełniejszą ocenę drgań złącza. Obserwowane amplitudy wymuszanych drgań nie przekraczały 40 nm, dzięki czemu próbka nie ulegała uszkodzeniom na skutek pomiaru.

Opracowane na potrzeby badań programy komputerowe pozwoliły na wypracowanie metody wykrywania defektu złącza i oceny charakteru drgań próbki. Wykresy amplitudowe używano głównie do wykrywania i lokalizowania defektu złącza. Na ich podstawie oceniano również charakter drgania.

Wykresy fazowe stanowiły źródło dodatkowych informacji, a dla niektórych próbek umożliwiały lokalizację defektu w przypadku, gdy wartości amplitudy drgań były bardzo niskie, a wnioski płynące wyłącznie z analizy wykresów amplitudowych były niejednoznaczne.

Regularność drgań sprawdzano też na podstawie animacji trójwymiarowej. Z poklatkowego zapisu drgań odczytywano chwilową wartość amplitudy i długość fali wymuszonej. Na podstawie znajomości długości fali oraz częstotliwości drgań, wyznaczano prędkość fazową fali w danym materiale próbki.

Obserwowane częstotliwości rezonansowe próbek były silnie zależne od wielkości wady połączenia, co umożliwiło wyznaczenie zakresów częstotliwości wzbudzenia

w których widoczne były defekty o różnej szerokości. Były one na tyle szerokie, że dla próbek o nieznanym rozmiarze defektu wstępne poszukiwania częstotliwości rezonansowych można było wykonać z dużym krokiem, wynoszącym nawet 1 kHz. Następnie można było przeskanować wybrany zakres częstotliwości z mniejszym krokiem celem dokładnego określenia miejsca występowania, wielkości czy kształtu defektu. Przedstawiona procedura pozwalała więc na szybkie zbadanie połączenia pomiędzy dwoma częściami złącza.

Obserwacja fal Lamba w badanych próbkach dostarczała dodatkowych informacji. W przypadku wszystkich próbek polimerowo-aluminiowych bez defektu, propagacja fal Lamba w polimerze była zgodna z obserwowaną w metalu. Wskazywało to na dobre połączenie obu warstw i pokazywało, że wszystkie badane polimery można z powodzeniem wykorzystać do wytworzenia stabilnego złącza.

W przypadku obserwacji fal Lamba obecność defektu połączenia manifestowała się na kilka sposobów:

- we wszystkich przypadkach doszło do ograniczenia LFOR – zakres częstotliwości wzbudzenia umożliwiający obserwację fal Lamba, w przypadku którego można wykryć defekt złącza, zależał od rozmiaru defektu, a nie od użytego materiału polimerowego,
- zmiana w prędkościach propagującej się w części metalowej i polimerowej próbki antysymetrycznej fali Lamba  $A_0$  – rozbieżności w krzywych dla metalu i polimerów semikrystalicznych stawały się widoczne przy częstotliwościach powyżej 10 kHz,
- obecność defektu w złączu zwiększyła różnicę między amplitudami drgań metalu i polimeru w przypadku polimerów semikrystalicznych – dla amorficznego PC\_Al nie zaobserwowano dużej różnicy w amplitudach drgań nawet dla próbek z wadą (wynosiła ona maksymalnie 5-10%). Z tego powodu kryterium amplitudowe może nie być skuteczne w przypadku złączy aluminium z polimerami o dobrej transmisji drgań w badanym zakresie niskich częstotliwości.

Skuteczność metody wibrometrycznej w tego typu badaniach potwierdzono, korzystając z innej metody optycznej – szerografii, która okazała się być pomocna w przypadku gdy defekt był trudny do zlokalizowania za pomocą metody cyfrowej wibrometrii holograficznej.

Dotychczasowe badania pozwoliły stwierdzić, że cyfrowa wibrometria holograficzna jest szybką i nieniszczącą metodą wykrywania defektów w połączeniach polimer-metal,



a opisane metody będą przydatne w badaniach laboratoryjnych prowadzonych w celu opracowania różnych rodzajów złączy polimer-metal. Dodatkowo, wykorzystanie DHV do wykrywania fal Lamba jest użytecznym rozszerzeniem testów złączy, które można również przeprowadzać bezpośrednio w kontroli jakości produkcyjnej. Uzyskane informacje stanowią więc pogłębienie wiedzy w zakresie inżynierii materiałowej.

## LITERATURA

1. Trzaska O, Kaczmar J. *Local Shear Strength of Hybrid Polymer-Metal Joints Produced During Injection Moulding*. Przetwórstwo Tworzyw. 2008;24(5):43–9.
2. Bociąga E. *Specjalne metody wtryskiwania tworzyw polimerowych*. WNT, Warszawa, 2008.
3. Vieyra H, Molina-Romero JM, Calderón-Nájera J de D, Santana-Díaz A. *Engineering, Recyclable, and Biodegradable Plastics in the Automotive Industry: A Review*. Polymers. 2022;14(16):3412.
4. Hirsch J. *Recent development in aluminium for automotive applications*. Trans Nonferrous Met Soc China. 2014;24(7):1995–2002.
5. Luo AA. *Recent advances in light metals and manufacturing for automotive applications*. CIM Journal. 2021;12(3):79–87.
6. Lehmkus D, von Hehl A, Hausmann J, Kayvantash K, [i in.]. *New Materials and Processes for Transport Applications: Going Hybrid and Beyond*. Adv Eng Mater. 2019;21(6).
7. Temesi T, Czigany T. *Joining aluminium and poly(lactic acid) specimens by laser beam – a feasibility study*. IOP Conf Ser: Mater Sci Eng. 2020;903(1).
8. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2000/53/WE z dnia 18 września 2000 r. w sprawie pojazdów wycofanych z eksploatacji.
9. Czarnecka-Komorowska D, Kanciak W, Barczewski M, Barczewski R, [i in.]. *Recycling of Plastics from Cable Waste from Automotive Industry in Poland as an Approach to the Circular Economy*. Polymers. 2011;13(21):3845.
10. Lesiak P, Kisielowska A, Walkowiak K, Wiktorczyk A, [i inni]. *Preparation and characterization of polymer blends based on the wastes from automotive coverings*. Polimery. 2020;65(03):232–9.
11. Hopewell J, Dvorak R, Kosior E. *Plastics recycling: challenges and opportunities*. Phil Trans R Soc B. 2009;364(1526):2115–26.
12. Ćwiek J, Wierzbicki Ł. *The role of lightweight materials in modern transport vehicles*. Diagnostyka. 2022;23(4):1–6.
13. *Plastics and Polymer Composites in Light Vehicles*. DES ACC; 2019.
14. Leszczyńska M, Malewska E, Ryszkowska J, Kurańska M, [i in.]. *Vegetable Fillers and Rapeseed Oil-Based Polyol as Natural Raw Materials for the Production of Rigid Polyurethane Foams*. Materials. 2021;14(7):1772.
15. Czarnecka-Komorowska D, Nowak-Grzebyta J, Gawdzińska K, Mysiukiewicz O, [i in.]. *Polyethylene/Polyamide Blends Made of Waste with Compatibilizer: Processing, Morphology, Rheological and Thermo-Mechanical Behavior*. Polymers. 2021;13(14):2385.

16. Moraczewski K, Karasiewicz T, Jagodziński B, Trafarski A, [i in.]. *Recyclability of new polylactide based biodegradable materials with plant extracts containing natural polyphenols*. Sustain Mater Technol. 2021;30(12).
17. *Durethan BKV30 used for the first front end with aluminum hybrid technology*, 2007 [online], [dostęp 3.11.2022], dostępny: <https://techcenter.lanxess.com/scp/emea/en/innoscp/appl/article.jsp?docId=6780943>
18. Grujicic M. *Injection Overmolding of Polymer-Metal Hybrid Structures*. [w:] *Joining of Polymer-Metal Hybrid Structures*. [red.:] Amancio-Filho ST, Blaga LA. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, 2017. s. 277–305.
19. *Plastic/Metal Hybrid Technology* [online], [dostęp 3.11.2022], dostępny: <https://techcenter.lanxess.com/scp/americas/en/innoscp/tech/78310/article.jsp?docId=78310>
20. Zoellner OJ, Evans JA. *Plastic-Metal Hybrid - A new development in the injection molding technology* [materiały konferencyjne] ANTEC2002 Plastics, San Francisco, CA, Stany Zjednoczone Ameryki, 2002.
21. Korson C, Stratton D. *An integrated automotive roof module concept: plastic-metal hybrid and polyurethane composite technology* [materiały konferencyjne] 5th SPE Annual Automotive Composites Conference, Troy, MI, Stany Zjednoczone Ameryki, 2005.
22. Huang Y, Gao X, Zhang Y, Ma B. *Laser joining technology of polymer-metal hybrid structures - A review*. J Manuf Process. 2022;79:934–61.
23. Amne Elahi M, Koch M, Bardon J, Addiego F, [i in.]. *Failure mechanism analysis based on laser-based surface treatments for aluminum-polyamide laser joining*. J Mater Process Technol. 2021;298:117318.
24. Chen YJ, Yue TM, Guo ZN. *A new laser joining technology for direct-bonding of metals and plastics*. Mater Des. 2016;110(11):775–81.
25. Karami Pabandi H, Movahedi M, Kokabi AH. *A new refill friction spot welding process for aluminum/polymer composite hybrid structures*. Compos Struct. 2017;174:59–69.
26. Lambiase F. *Mechanical behaviour of polymer–metal hybrid joints produced by clinching using different tools*. Mater Des. 2015;87(12):606–18.
27. Solodov I, Rahammer M, Gulnizkij N, Kreutzbruck M. *Noncontact Sonic NDE and Defect Imaging Via Local Defect Resonance*. J Nondestruct Eval. 2016;35(3):48.
28. Baoping J, Qingdong Z, Liyuan Z, Jianshu C, [i in.]. *Non-contact detection of delamination in Cu/Al laminated plate with laser ultrasonic*. IOP Conf Ser: Mater Sci Eng. 2020;926(012003).

29. Martarelli M, Chiariotti P, Pezzola M, Castellini P. *Delamination detection in composites by laser ultrasonics* [materiały konferencyjne] 11th International Conference on Vibration Measurements by Laser and Noncontact Techniques: advances and applications: AIVELA, Ancona, Włochy, 2014.
30. Derusova DA, Vavilov VP, Sfarra S, Sarasini F, [i inni]. *Applying ultrasonic resonance vibrometry for the evaluation of impact damage in natural/synthetic fibre reinforced composites*. Polym Test. 2018;68.
31. Garcea SC, Wang Y, Withers PJ. *X-ray computed tomography of polymer composites*. Compos Sci Technol. 2018;156(1).
32. Schilling PJ, Karedla BR, Tatiparthi AK, Verges MA, [i in.]. *X-ray computed microtomography of internal damage in fiber reinforced polymer matrix composites*. Compos Sci Technol. 2005;65.
33. Hsieh J. *Computed tomography. Principles and design and artifacts and recent advances*. Wyd. 2. SPIE Press, Bellingham, 2009.
34. Aryan P, Kotousov A, Ng CT, Cazzolato BS. *A baseline-free and non-contact method for detection and imaging of structural damage using 3D laser vibrometry*. Struct Control Health Monit. 2017;24(4).
35. Krasnoveikin VA, Konovalenko IS. *Development of the noncontact approach to testing the dynamic characteristics of carbon fiber reinforced polymer composites*. AIP Conf Proc. 2018;2053(1):040048.
36. Francis D, Tatam RP, Groves RM. *Shearography technology and applications: a review*. Meas Sci Technol. 2010;21(10):102001.
37. Hung YY. *Shearography: A New Optical Method For Strain Measurement And Nondestructive Testing*. Opt Eng. 1982;21(3).
38. Gabor D. *A New Microscopic Principle*. Nature. 1948;161(4098):777–8.
39. Françon M. *Holographie*. Springer Berlin, Heidelberg, 2013.
40. Caulfield HJ. *Handbook of optical holography*. AP, Londyn, 2012.
41. Li J, Picart P [red.]. *Digital Holography*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2012.
42. Nutakor C, Semken RS, Heikkinen JE, Sopianen J, [i in.]. *Layered Sheet-Steel Damping Estimation Using Optical Vibrometry* [materiał konferencyjny] 27th Conference on Mechanical Vibration and Noise, Boston, MA, Stany Zjednoczone Ameryki, 2015.
43. Guan L, Zou M, Wan X, Li Y. *Nonlinear Lamb Wave Micro-Crack Direction Identification in Plates with Mixed-Frequency Technique*. Appl Sci. 2020;10(2135).

44. Aryan P, Kotousov A, Ng CT, Cazzolato BS. *Lamb wave characterisation and damage imaging for isotropic plate-like structures using 3D laser vibrometry*. [w:] *Recent Advances in Structural Integrity Analysis - Proceedings of the International Congress*. Elsevier; 2014. s. 585–9.
45. Marks R, Clarke A, Featherston C, Paget C, [i in.]. *Lamb Wave Interaction with Adhesively Bonded Stiffeners and Disbonds Using 3D Vibrometry*. *Appl Sci*. 2016;6(1):12.
46. Jankauskas A, Mazeika L, Draudviliene L, Genutis G. *Investigation of the Lamb Waves Generation in Isotropic Plates Using Ultrasonic Broadband Transducers*. *Elektron ir Elektrotech*. 2013;19(8):33–6.
47. Pant S, Laliberte J, Martinez M. *Structural Health Monitoring (SHM) of Composite Aerospace Structures Using Lamb Waves* [materiały konferencyjne] ICCM19, Montreal, Kanada, 2013.
48. Tan KS, Guo N, Wong BS, Tui CG. *Comparison of Lamb waves and pulse echo in detection of near-surface defects in laminate plates*. *NDT E Int*. 1995;28(4):215–23.
49. Mustapha S, Ye L. *Non-destructive evaluation (NDE) of composites: assessing debonding in sandwich panels using guided waves*. [w:] *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites*. [red.:] Karbhari VM. Woodhead Publishing, 2013. s. 238–78.
50. Su Z, Ye L. *Lamb wave-based quantitative identification of delamination in composite laminates*. [w:] *Delamination Behaviour of Composites*. [red.:] Sridharan S. Woodhead Publishing, 2008. s. 169–216.
51. Liu B, Feng T, Wu X, Li N. *Noise Radiation Characteristics of the Washing Machine Based on Sound Intensity Measurement*. *Adv Mater Res*. 2012;482–484:1406–9.
52. Fletcher MD, Lloyd Jones S, White PR, Dolder CN. *Effects of very high-frequency sound and ultrasound on humans. Part I: Adverse symptoms after exposure to audible very-high frequency sound*. *J Acoust Soc Am*. 2018;144(4):2511–20.
53. Scholkmann F. *Exposure to High-Frequency Sound and Ultrasound in Public Places: Examples from Zurich, Switzerland*. *Acoust*. 2019;1(4):816–24.
54. Leighton TG. *Are some people suffering as a result of increasing mass exposure of the public to ultrasound in air?* *Proc R Soc A*. 2016;472(2185).
55. Ueda M, Ota A, Takahashi H. *Investigation on high-frequency noise in public space* [materiały konferencyjne] 7th Forum Acusticum, Kraków, Polska, 2014.
56. Śliwiński A. *Ultradźwięki i ich zastosowania*. Wyd. 2 zm. WNT, Warszawa, 2001.
57. Zych JS. *Synteza zastosowań techniki ultradźwiękowej w analizie kinetyki wybranych procesów zachodzących w tworzywach formierskich*. Uczelniane Wydaw. Nauk.-Dydakt. AGH im. S. Staszica, Kraków, 2007.

58. Kah P, Suoranta R, Martikainen J, Magnus C. *Techniques for joining dissimilar materials: Metals and polymers*. Rev Adv Mater Sci. 2014;36:152–64.
59. Amancio-Filho ST, dos Santos JF. *Joining of polymers and polymer-metal hybrid structures: Recent developments and trends*. Polym Eng Sci. 2009;49(8):1461–76.
60. Jia L, Yang H, Wang Y, Zhang B, [i in.]. *Direct bonding of copper foil and liquid crystal polymer by laser etching and welding*. Opt Lasers Eng. 2021;139(4):106509.
61. Han SC, Wu LH, Jiang CY, Li N, [i in.]. *Achieving a strong polypropylene/aluminum alloy friction spot joint via a surface laser processing pretreatment*. J Mater Sci Technol. 2020;50:103–14.
62. Wu LH, Nagatsuka K, Nakata K. *Achieving superior mechanical properties in friction lap joints of copper to carbon-fiber-reinforced plastic by tool offsetting*. J Mater Sci Technol. 2018;34(9):1628–37.
63. Wang H, Feng W, Zhang Z, Guan Y, [i in.]. *Hybrid laser technique for joining of polymer and titanium alloy*. J Laser Appl. 2019;31(4):042017.
64. Wu LH, Nagatsuka K, Nakata K. *Direct joining of oxygen-free copper and carbon-fiber-reinforced plastic by friction lap joining*. J Mater Sci Technol. 2018;34(1):192–7.
65. Pramanik A, Basak AK, Dong Y, Sarker PK, [i in.]. *Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys – A review*. Compos Part A Appl Sci. 2017;101(10):1–29.
66. Abibe AB, Sônego M, dos Santos JF, Canto LB, [i in.]. *On the feasibility of a friction-based staking joining method for polymer–metal hybrid structures*. Mater Des. 2016;92(2):632–42.
67. Huang Y, Meng X, Xie Y, Li J, [i in.]. *New technique of friction-based filling stacking joining for metal and polymer*. Compos B Eng. 2019;163(4):217–23.
68. Lambiase F, Di Ilio A. *Mechanical clinching of metal–polymer joints*. J Mater Process Technol. 2015;215(01):12–9.
69. Sankaranarayanan R, Hynes N. *Prospects of joining multi-material structures* [materiały konferencyjne] 2nd International Conference on Condensed Matter and Applied Physics, Bikaner, India, 2018.
70. Dulebová L, Sasimowski E, Jachowicz T, Królikowski B, [i in.]. *Przetwórstwo tworzyw polimerowych: aspekty technologiczne i nowe trendy. Cz. I*. Politechnika Lubelska, Lublin, 2015.
71. Brockmann W. *Adhesive bonding: materials, applications and technology*. Wiley-VCH, Weinheim, 2009.

72. Bula K, Szymańska J, Sterzyński T, Piasecki A, [i in.]. *Visualization of particles arrangement during filling stage of polyamide 6 - metal insert injection molding*. Polym Eng Sci. 2019;59.
73. Bula K, Sterzyński T, Piasecka M, Różański L. *Deformation Mechanism in Mechanically Coupled Polymer–Metal Hybrid Joints*. Materials. 2020;13(11):2512.
74. Piwowarczyk T. *Rozprawa doktorska - Zwiększanie oddziaływań adhezyjnych i kohezyjnych w połączeniach klejowych węglików spiekanych ze stalą C45*. Politechnika Wrocławska, Wrocław, 2008.
75. Mirski Z, Piwowarczyk T. *Podstawy klejenia, kleje i ich właściwości*. Przegląd Spawalnictwa. 2008;(8):12–21.
76. Żenkiewicz M. *Adhezja i modyfikowanie warstwy wierzchniej tworzyw wielkocząsteczkowych*. WNT, Warszawa, 2000.
77. Domińczuk J. *Właściwości adhezyjne warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych*. Postępy Nauki i Techniki. 2011;(9):28–37.
78. Gent AN, Hamed GR. *Fundamentals of Adhesion*. [w:] *Handbook of Adhesives*. [red.:] Skeist I. Springer US, Boston, MA, 1990. s. 39–73.
79. Campilho RDSG, da Silva LFM, Banea MD. *Adhesive Bonding of Polymer Composites to Lightweight Metals*. [w:] *Joining of Polymer-Metal Hybrid Structures*. [red.:] Amancio-Filho ST, Blaga LA. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2017. s. 29–59.
80. Kaczmar JW, Wróblewski R, Nakonieczny L, Iwko J. *Manufacturing and properties of metal-polymer type hybrid elements*. Polimery. 2022;53(7–8):519–25.
81. Johannaber F, Michaeli W. *Handbuch Spritzgießen*. Wyd. 2. Hanser, Monachium, 2004. 499–504 s.
82. Wellekötter J, Wälder J, Kast O, Felde A, [i in.]. *Kunststoff und Metall auf Antrieb verbinden*. Kunststoffe. 2016;33–6.
83. Starczewski, Z. *Drgania mechaniczne*. Politechnika Warszawska, Warszawa, 2010.
84. Arczewski KP, Pietrucha J, Szuster JT. *Drgania układów fizycznych*. Wyd. 2 popr. i uzup. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2014.
85. Rauter N, Hennings B, Neumann MN, Asmus A, [i in.]. *Wave Propagation in Elastic Solids: An Analytical Approach*. [w:] *Lamb-wave based structural health monitoring in polymer composites*. [red.:] Lammering R, Gabbert U, Sinapius M, Schuster T, [i in.]. Springer, Cham, 2018. s. 17–27.
86. Lamb H. *On the Vibrations of an Elastic Sphere*. Proc Lond Math Soc. 1881;1–13(1):189–212.
87. Lamb H. *On waves in an elastic plate*. Proc R Soc Lond A. 1917;93(648):114–28.

88. Lowe MJS. *WAVE PROPAGATION, Guided Waves in Structures*. [w:] *Encyclopedia of Vibration*. [red.:] Braun S, Elsevier, 2001. s. 1551–9.
89. Huber, A. *Dispersion Calculator 2.0* [online], [dostęp 15.11.2022], dostępny: [https://www.dlr.de/zlp/en/desktopdefault.aspx/tabid-14332/24874\\_read-61142/](https://www.dlr.de/zlp/en/desktopdefault.aspx/tabid-14332/24874_read-61142/)
90. Birks A, Green R, Mcintire P. *Nondestructive testing handbook. Volume 7: Ultrasonic testing*. Wyd. 3. T. 7. ASNT, Columbus, OH, 2007.
91. Dafydd I, Sharif Khodaei Z. *Laser Vibrometer Imaging of Delamination Interaction with Lamb Waves Using a Chirp Excitation Method*. *Key Eng Mater*. 2017;754:375–8.
92. Michałkiewicz A, Kujawińska M. *Optoelektroniczna rekonstrukcja hologramów cyfrowych*. *Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania*. 2009;50(1):120–8.
93. Gabor D. *Microscopy by reconstructed wave-fronts*. *Proc R Soc Lond A*. 1949;197(1051):454–87.
94. Kujawińska M. *Rekonstrukcja*. [w:] *Interferometria laserowa z automatyczną analizą obrazu*. [red.:] Patorski K. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005. s. 176–8.
95. Jankowski L. *Zastosowanie interferometrii i fotografii plamkowej w badaniach ciał stałych*. Politechnika Wrocławska, Zakład Inżynierii Biomedycznej, 2019 [online], [dostęp 25.10.2022], dostępny: <http://www.biomech.pwr.wroc.pl/wp-content/uploads/2019/03/FotografiaPlamkowa.pdf>
96. Lasyk Ł. *Rozprawa doktorska - Interferometria plamkowa i inne metody optyczne w analizie uszkodzeń obiektów zabytkowych*. AGH, Kraków, 2010.
97. Rigden J, Gordon E. *The Granularity of Scattered Optical Maser Light*. *Proc Inst Radio Eng*. 1962;50(11):2367.
98. Caulfield HJ. *Holographic Interferometry*. *Med Phys*. 1979;6(6):542–542.
99. Kreis T. *Handbook of Holographic Interferometry: Optical and Digital Methods*. Wyd. 1. Wiley, Weinheim, 2004.
100. Rastogi PK. *Holographic Interferometry: Principles and Methods*. Springer, Cham, 1994.
101. Hecht E, Makowski M, Siemion A, Siemion A. *Optyka*. Wyd. I-3 dodruk. PWN, Warszawa, 2020. 394–395 s.
102. Patorski K, Kujawińska M, Sałbut L. *Interferometria laserowa z automatyczną analizą obrazu*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005.
103. Targowski P, Ziętek B, Trędowski P. *HOLOGRAFIA Instytut Fizyki UMK* [online], [dostęp 25.10.2022], dostępny: [https://wwwold.fizyka.umk.pl/~bezeta/pdf/VIII\\_Holo.pdf](https://wwwold.fizyka.umk.pl/~bezeta/pdf/VIII_Holo.pdf)



104. Yang L, Li J. *Shearography*. [w:] *Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation*. [red.:] Ida N, Meyendorf N. Springer, Cham, 2019. s. 383–419.
105. E07 Committee. *Standard Practice for Shearography of Polymer Matrix Composites and Sandwich Core Materials in Aerospace Applications*, ASTM International [online], [dostęp 16.11.2022], dostępny: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E2581-07>
106. Moser E. *Detection Capabilities of State-of-the-Art Shearography Systems* [materiały konferencyjne] 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, Chiny, 2008.
107. Krishnaswamy S. 5.19 - *Optical Methods of Inspecting Composites (Holography and Shearography)*. [w:] *Comprehensive Composite Materials*. [red.:] Kelly A, Zweben C. Pergamon, 2000. s. 447–68.
108. Newman J. *Aerospace NDT with Advanced Laser Shearography* [materiały konferencyjne] 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, Chiny, 2008.
109. Hung YY, Yang LX, Huang YH. *Non-destructive evaluation (NDE) of composites: digital shearography*. [w:] *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites*. [red.:] Karbhari VM. Woodhead Publishing, 2013. s. 84–115.
110. Ettemeyer A. *Laser shearography for inspection of pipelines*. Nucl Eng Des. 1996;160(1–2):237–40.
111. Bossi RH, Giurgiutiu V. *Nondestructive testing of damage in aerospace composites*. [w:] *Polymer Composites in the Aerospace Industry*. [red.:] Irving PE, Soutis C. Woodhead Publishing, 2015. s. 413–48.
112. Taillade F, Quiertant M, Benzarti K, Aubagnac C. *Non-destructive evaluation (NDE) of composites: using shearography to detect bond defects*. [w:] *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites*. [red.:] Karbhari VM. Woodhead Publishing, 2013. s. 542–57.
113. Steinchen W, Yang L. *Digital shearography: theory and application of digital: Speckle pattern shearing interferometry*. SPIE PRESS, Bellingham, WA, 2003.
114. THORLABS Ø1.5" Damped Posts [online], [dostęp 14.10.2022], dostępny: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=170](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=170)
115. Nowak-Grzebyta J, Meijer F, Stachowska E. *Non-destructive holographic vibrometric testing of the adhesive joint in metal-polymer laminates*. Polimery. 2020;65(07/08):572–7.
116. P-010.00P PICA [online], [dostęp 18.10.2022], dostępny: <https://www.physikinstrumente.com/en/products/piezoelectric-transducers-actuators/p-010xxp-p-056xxp-pica-power-piezo-actuators-102700>
117. KingState KPE-827 [online], [dostęp 18.10.2022], dostępny: <https://www.kingstate.com.tw/product/45>

118. Meijer F. Oprogramowanie w języku R, informacja prywatna.
119. Nowak-Grzebyta J, Meijer F, Bula K, Stachowska E. *Non-destructive Testing of Metal-Polymer Laminates with a Digital Holographic Vibrometer*. J Nondestruct Eval. 2020;39(3):50.
120. R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Wiedeń, 2018, [online], [dostęp: 10.10.2022], dostępny: [www.R-project.org](http://www.R-project.org)
121. Pieczonka T. *Dylatometryczna metoda wyznaczania liniowego współczynnika rozszerzalności termicznej ciał stałych*. WIMiIP AGH, Kraków, 2010.
122. PA11 (AW-5754) [online], [dostęp: 30.11.2022], dostępny: <https://www.kronosedm.pl/aluminium-pa11-aw-5754>
123. PA45 (AW-6061) [online], [dostęp: 30.11.2022], dostępny: [https://emetal.eu/aluminium/aluminium-EN-AW-6061-ISO\\_-AlMg1SiCu-EN\\_-AW-AlMg1SiCu-PN\\_-PA-45-DIN\\_-AlMg1SiCu-wnr\\_-3.3211/](https://emetal.eu/aluminium/aluminium-EN-AW-6061-ISO_-AlMg1SiCu-EN_-AW-AlMg1SiCu-PN_-PA-45-DIN_-AlMg1SiCu-wnr_-3.3211/)
124. DC04 [online], [dostęp: 30.11.2022], dostępny: <https://matmatch.com/materials/mamawick004-dc04>
125. Karta materiałowa - Lotte Advanced Materials Infino S.C.-1220UR - PC [online], [dostęp: 30.11.2022], dostępny: <https://www.materialdatacenter.com/mb/material/pdf/485740/485740/INFINOSC-1220UR>
126. Karta materiałowa - Arkema Kynar Flex 3312 C PVDF [online], [dostęp: 30.11.2022], dostępny: <https://www.materialdatacenter.com/mb/material/pdf/486099/486099/KynarFlex3312C>
127. Karta materiałowa - Tarnamid® T-27 - PA6 - Grupa Azoty S.A. [online], [dostęp: 30.11.2022], dostępny: <https://www.materialdatacenter.com/ms/en/Tarnamid/Grupa+Azoty+S%252EA/Tarnamid%C2%AE+T-27/d190b1d8/2607>
128. Karta materiałowa - Ingeo Biopolymer 6400D PLA [online], [dostęp: 30.11.2022], dostępny: <https://www.materialdatacenter.com/mb/material/pdf/500186/500186/Ingeo6400D>
129. Adebahr W, Solodov I, Rahammer M, Gulnizkij N, [i in.]. *Local defect resonance for sensitive non-destructive testing* [materiały konferencyjne] 42nd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Minneapolis, MN, Stany Zjednoczone Ameryki, 2015.
130. Solodov I, Bai J, Bekgulyan S, Busse G. *A local defect resonance to enhance acoustic wave-defect interaction in ultrasonic nondestructive evaluation*. Appl Phys Lett. 2011;99(21):211911.
131. Segers J, Kersemans M, Verboven E, Hedayatrasa S, [i in.]. *Investigation to Local Defect Resonance for Non-Destructive Testing of Composites* [materiały konferencyjne] The 18th International Conference on Experimental Mechanics, Bruksela, Belgia, 2018.

132. Nowak-Grzebyta J, Meijer F, Stachowska E, Sterzyński T. *Nieniszcząca metoda wykrywania defektów połączeń w materiałach kompozytowych za pomocą wibrometrii holograficznej* [materiały konferencyjne] XIV Konferencja Naukowo-Techniczna pt. Kierunki Modyfikacji i Zastosowań Tworzyw Polimerowych, Rydzyna, Polska, 2020.
133. Nowak-Grzebyta J, Stachowska E, Meijer F, Sterzyński T. *A non-destructive technique using digital holographic vibrometry and Lamb waves for quality determination of polymer-metal laminates*. Sci Rep. 2022;12(1):18041.
134. Nowak-Grzebyta J, Meijer F, Stachowska E, Sterzyński T. *A non-destructive technique using Lamb waves for quality determination of polymer-metal laminates* [materiały konferencyjne] XI International Scientific-Technical Conference “Advance in Petroleum and Gas Industry and Petrochemistry”, Lwów, Ukraina, 2022.
135. Dantec Dynamics, Laser shearography (Q-800), Skovlunde, Dania [online], [dostęp 16.11.2022], dostępny: <https://www.dantecdynamics.com/>
136. Konieczna Z, Meijer F, Stachowska E. *Non-destructive Testing of Metal-Polymer Laminates by Digital Shearography*. [w:] *Advances in Manufacturing III*. [red.:] Diering M, Wiczorowski M, Harugade M, Pereira A. Springer International Publishing, Cham, 2022. s. 57–66.

## SPIS TABEL

<i>Tab. 7.1. Parametry filaru tłumiącego DP8A Thorlabs [114].....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 7.2. Podstawowe parametry piezoelementów: PI P-010.00P i KingState KPE-827 [116,117].....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 7.3. Zakresy skanowania częstotliwości .....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 8.1. Wybrane właściwości fizyczne materiałów stalowych/metalowych złącza [121–124] .....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 8.2. Wybrane właściwości fizyczne tworzyw polimerowych złącza [121,125–128] .....</i>	<i>44</i>

## SPIS ILUSTRACJI

Rys. 2.1. Adhezja: <i>a</i> – właściwa, <i>b</i> – mechaniczna .....	10
Rys. 2.2. Schemat przedstawiający zwilżanie powierzchni klejami: <i>a</i> – o małej lepkości, <i>b</i> – o dużej lepkości .....	10
Rys. 3.1. Trójwymiarowy model symetrycznego modu fali Lamba $S_0$ zaznaczonym układem współrzędnych [85] .....	15
Rys. 3.2. Symetryczny $S_0$ ( <i>a</i> ) i antysymetryczny $A_0$ ( <i>b</i> ) mod fal Lamba, oznaczenia w tekście [85] .....	15
Rys. 3.3. Wykres prędkości fazowej modów $A_0$ , $S_0$ i $A_1$ , $S_1$ fal Lamba dla płyty aluminiowej o grubości 3 mm [45].....	17
Rys. 3.4. Fala stojąca – kolorem niebieskim zaznaczono węzły, czerwonym strzałki .....	19
Rys. 4.1. Holografia optyczna i cyfrowa [92].....	21
Rys. 4.2. Rekonstrukcja hologramu.....	22
Rys. 4.3. Schemat i oznaczenia stosowane w numerycznym opisie rekonstrukcji hologramu [94].....	23
Rys. 5.1. Wiązka przedmiotowa ulegająca odbiciu w punkcie <i>P</i> lub <i>P'</i> w zależności od fazy drgania ....	25
Rys. 5.2. Porównanie obrazów wibrometrycznych metalowego obiektu cienkościennego bez defektu i z defektem dla dwóch różnych częstotliwości wzbudzenia – amplituda drgań proporcjonalna do zaciemnienia obrazu.....	26
Rys. 5.3. Wykres kwadratu funkcji Bessela zerowego rzędu, stosowanej w interferometrii holograficznej dla metody uśredniania w czasie [102].....	27
Rys. 6.1. Schemat szerograficznego układu pomiarowego.....	29
Rys. 6.2. Bieg wiązek w pomiarach szerograficznych: <i>S</i> – źródło promieniowania laserowego, <i>D</i> – detektor .....	30
Rys. 6.3. Porównanie wyników pomiarów holograficznych i szerograficznych [104].....	31
Rys. 7.1. Schemat blokowy i widok stanowiska pomiarowego z cyfrowym wibrometrem holograficznym, w czerwonej ramce wyróżniono część optyczną wibrometru holograficznego oraz układ mocowania próbek .....	33
Rys. 7.2. Część optyczna wibrometru holograficznego VibroMap 1000 firmy Optonor .....	34
Rys. 7.3. Interferometr Michelsona: <i>a</i> – ramię referencyjne, <i>b</i> – ramię obiektowe, 1 – laser Nd:YAG $\lambda=532$ nm, 2 – element światłodzielnący, 3 – obiekt badany, 4 – zwierciadło referencyjne, 5 – układ soczewek formujących wiązkę, 6 – detektor CCD .....	35
Rys. 7.4. Widok z przodu i z boku systemu mocowania zwierciadeł i próbki umożliwiający jednoczesną obserwację dwóch powierzchni próbki podczas pojedynczego pomiaru wibrometrycznego zwierciadła i mocowanie próbki umieszczone na filarach tłumiących; 1,2 – odpowiednio górny i dolny obraz powierzchni próbki widoczny w zwierciadłach, 3 – filary tłumiące, 4 – próbka, 5 – mocowanie próbki, 6 – wzbudnik piezoelektryczny. ....	36
Rys. 7.5. Filar tłumiący DP8A Thorlabs [114].....	37
Rys. 7.6. Zmodyfikowany układ pomiarowy umożliwiający szczegółową obserwację złącza polimer-metal o wymiarach 20 x 20 mm: 1 – źródło promieniowania laserowego, 2 – mocowanie próbki, 3 – wzbudnik piezoelektryczny, 4 – próbka, <i>A</i> , <i>B</i> – odpowiednio górny i dolny obraz powierzchni próbki widoczny w zwierciadłach [115] .....	38

- Rys. 7.7. Piezoelementy stosowane w badaniach i ich położenie względem próbki: A - PI P-010.00P, B - KingState KPE-827, 1 – próbka, 2 – piezoelement [116,117] ..... 39
- Rys. 7.8. Punkty przyłożenia piezoelementu do próbki ..... 40
- Rys. 8.1. Schemat przedstawiający zestawienie próbek i metod badawczych ..... 45
- Rys. 8.2. Próbkę z połączeniem: a – adhezyjnym; b i c – adhezyjnym i mechanicznym, 1 – poliamid 6, 2 – stal DC06 ..... 46
- Rys. 8.3. Próbkę z połączeniem klejonym polimer-metal: a – próbka bez defektu, b – próbka z defektem połączenia w postaci ubytku warstwy kleju (defekt oznaczono kolorem czerwonym), 1 – poliamid 6, 2 – stal DC04, 3 – klej epoksydowy ..... 47
- Rys. 8.4. Próbkę z połączeniem adhezyjnym: a – próbka bez defektu, b – próbka z defektem, 1 – poliamid 6, 2 – aluminium 6061 ..... 48
- Rys. 8.5. Próbkę z połączeniem adhezyjnym: a – próbka bez defektu, b – próbka z defektem, 1 – część polimerowa, 2 – aluminium AW-5754 ..... 50
- Rys. 9.1. Próbkę z połączeniem adhezyjnym lub adhezyjnym i mechanicznym z wyodrębnionymi obszarami obserwacji drgań próbki: 1 – PA6, 2 – stal DC04 (oznaczona czerwoną linią), a – część metalowa, b – część polimerowa przeciwległa do części metalowej, c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub> – polimer po obu stronach próbki, obszar próbki widoczny w czasie badania zaznaczono kolorem zielonym: t<sub>v</sub> – widok powierzchni górnej próbki, b<sub>v</sub> – widok powierzchni dolnej próbki ..... 53
- Rys. 9.2. Kadry z trójwymiarowej animacji drgań oraz wykresy amplitudowe i fazowe próbek z połączeniem adhezyjnym realizowanym w procesie wtryskiwania dla dwóch różnych częstotliwości wzbudzenia: wymiary obserwowanej części próbki 105 x 10 mm (1 mm ≈ 5 px); t<sub>v</sub> – wyniki dla powierzchni górnej próbki (część polimerowa i metalowa), b<sub>v</sub> – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (część wyłącznie polimerowa), oznaczenia a – c<sub>2</sub> zgodne z rys. 9.1 ..... 55
- Rys. 9.3. Wykresy chwilowych wychyleń, uśrednionych po szerokości próbki z połączeniem adhezyjnym, realizowanym w procesie wtryskiwania dla dwóch różnych częstotliwości wzbudzenia, długość obserwowanej części próbki 105 mm (1 mm ≈ 5 px); kolorem oznaczono drgania: niebieskim - dolnej części polimerowej (c<sub>1</sub> i c<sub>2</sub>); czerwonym - górnej części metalowej (a) i polimerowej (b) ..... 56
- Rys. 9.4. Kadr z trójwymiarowej animacji drgań oraz wykres amplitudowy i fazowy próbki z połączeniem adhezyjnym i mechanicznym, realizowanym w procesie wtryskiwania (dwa otwory w stalowej płytce wypełnione polimerem): wymiary obserwowanej części próbki 105x10 mm (1 mm ≈ 5 px); t<sub>v</sub> i b<sub>v</sub> – wyniki odpowiednio dla powierzchni górnej próbki (część polimerowa i metalowa) i dolnej próbki (część wyłącznie polimerowa), oznaczenia a – c<sub>2</sub> zgodne z rys. 9.1 ..... 58
- Rys. 9.5. Wykresy amplitudowe i fazowe próbek z połączeniem adhezyjnym i mechanicznym realizowanym w procesie wtryskiwania dla dwóch różnych częstotliwości wzbudzenia (dwa otwory w stalowej płytce wypełnione polimerem): wymiary obserwowanej części próbki 105 x 10 mm (1 mm ≈ 5 px); t<sub>v</sub> – wyniki dla powierzchni górnej próbki (część polimerowa i metalowa), b<sub>v</sub> – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (część wyłącznie polimerowa), oznaczenia a – c<sub>2</sub> zgodne z rys. 9.1 ..... 59

- Rys. 9.6. Kadr z trójwymiarowej animacji drgań oraz wykres amplitudowy i fazowy próbki z połączeniem adhezyjnym i mechanicznym, realizowanym w procesie wtryskiwania (trzy otwory w stalowej płytce wypełnione polimerem): wymiary obserwowanej części próbki 105 x 10 mm (1 mm ≈ 5 px);  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki (część polimerowa i metalowa),  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (część wyłącznie polimerowa), oznaczenia  $a - c_2$  zgodne z rys. 9.1..... 60
- Rys. 9.7. Wykresy amplitudowe i fazowe próbek z połączeniem adhezyjnym i mechanicznym realizowanym, w procesie wtryskiwania (po lewej – dwa, po prawej – trzy otwory w stalowej płytce wypełnione polimerem): wymiary obserwowanej części próbki 105 x 10 mm (1 mm ≈ 5 px);  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki (część polimerowa i metalowa),  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (część wyłącznie polimerowa), oznaczenia  $a - c_2$  zgodne z rys. 9.1 ..... 60
- Rys. 9.8. Wykresy amplitudowe i fazowe próbki z połączeniem adhezyjnym i mechanicznym realizowanym, w procesie wtryskiwania (trzy otwory w stalowej płytce wypełnione polimerem) dla dwóch różnych częstotliwości wzbudzenia: wymiary obserwowanej części próbki 105 x 10 mm (1 mm ≈ 5 px);  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki (część polimerowa i metalowa),  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (część wyłącznie polimerowa), oznaczenia  $a - c_2$  zgodne z rys. 9.1 ..... 61
- Rys. 9.9. Kadr z trójwymiarowej animacji drgań oraz wykres amplitudowy i fazowy próbki z połączeniem adhezyjnym i mechanicznym, realizowanym w procesie wtryskiwania (trzy otwory w stalowej płytce wypełnione polimerem): wymiary obserwowanej części próbki 105 x 10 mm (1 mm ≈ 5 px);  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki (część polimerowa i metalowa),  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (część wyłącznie polimerowa), oznaczenia  $a - c_2$  zgodne z rys. 9.1 ..... 62
- Rys. 9.10. Próbka z połączeniem adhezyjnym z warstwą pośrednią z zaznaczonym obszarem obserwacji (kolor zielony:  $t_v$  – widok powierzchni górnej próbki,  $b_v$  – widok powierzchni dolnej próbki) i miejscem przyłożenia piezoelementu: 1 – PA6; 2 – stal DC04 ..... 63
- Rys. 9.11. Kadry z trójwymiarowej animacji drgań oraz wykresy amplitudowe i fazowe dla próbek klejonych:  $a$  – bez defektu,  $b$  – z defektem w postaci ubytku kleju o szerokości 15 mm, wymiary obserwowanej części próbki 84 x 10 mm (1 mm ≈ 6 px),  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki (stal DC04),  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (PA6) [119]..... 64
- Rys. 9.12. Wykresy chwilowych wychyleń uśrednionych po szerokości próbek klejonych  $a$  – bez defektu,  $b$  – z defektem w postaci ubytku kleju o szerokości 15 mm, kolorem oznaczono drgania: niebieskim - dolnej części polimerowej ( $b_v$ ), czerwonym - górnej części stalowej ( $t_v$ ), zielonym – różnice w amplitudzie drgań między  $t_v$  i  $b_v$  [119]..... 65
- Rys. 9.13. Wykresy amplitudowe i fazowe dla próbek klejonych z defektami w postaci ubytku kleju o różnej szerokości:  $a$  – 18 mm,  $b$  – 12 mm,  $c$  – 6 mm; dla różnych częstotliwości wzbudzenia: wymiary obserwowanej części próbki 84 x 10 mm (1 mm ≈ 6 px);  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki (część metalowa),  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (część polimerowa) [119]..... 66
- Rys. 9.14. Wykresy amplitudowe dla próbki klejonej z defektem połączenia w postaci ubytku kleju o szerokości 18 mm: wymiary obserwowanej części próbki 84 x 10 mm (1 mm ≈ 6 px),  $t_v$  – wyniki

- dla powierzchni górnej próbki (część metalowa),  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (część polimerowa) [119] ..... 67
- Rys. 9.15. Próbkę z połączeniem adhezyjnym bez warstwy pośredniej z zaznaczonym obszarem obserwacji (kolor zielony:  $t_v$  – widok powierzchni górnej próbki,  $b_v$  – widok powierzchni dolnej próbki) i miejscem przyłożenia piezoelementu: 1 – PA6; 2 – Al6061..... 68
- Rys. 9.16. Kadry z trójwymiarowych animacji drgań i wykresy chwilowych wychyleń obu stron próbki uśrednionych po jej szerokości, dla próbek z połączeniem adhezyjnym aluminium i PA6 z dodatkiem miki: a – bez defektu, b – z defektem, wymiary obserwowanej części próbki 40 x 20 mm (1 mm  $\approx$  7 px);  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki,  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki; kolorem oznaczono drgania: niebieskim - powierzchni dolnej ( $b_v$ ); czerwonym - powierzchni górnej ( $t_v$ ) [132] ..... 69
- Rys. 9.17. Kadry z trójwymiarowych animacji drgań i wykresy chwilowych wychyleń uśrednionych dla szerokości próbek z połączeniem adhezyjnym aluminium i PA6 z dodatkiem talku: a – bez defektu, b – z defektem, wymiary obserwowanej części próbki 40 x 20 mm (1 mm  $\approx$  7 px);  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki,  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki; kolorem oznaczono drgania: niebieskim - powierzchni dolnej ( $b_v$ ); czerwonym - powierzchni górnej ( $t_v$ ) [115]..... 70
- Rys. 9.18. Wykresy amplitudowe i fazowe dla próbek z połączeniem adhezyjnym aluminium i PA6 z dodatkiem miki, a – bez defektu, b – z defektem: wymiary obserwowanej części próbki 40 x 20 mm (1 mm  $\approx$  7 px),  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki,  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki [115]..... 71
- Rys. 9.19. Wykresy amplitudowe i fazowe dla próbek z połączeniem adhezyjnym Al i PA6 z dodatkiem talku, a – bez defektu, b – z defektem: wymiary obserwowanej części próbki 40x20 mm (1 mm  $\approx$  7 px),  $t_v$  i  $b_v$  – wyniki odpowiednio dla powierzchni górnej i dolnej próbki [115]..... 71
- Rys. 9.20. Kadr z trójwymiarowej animacji drgań próbki z połączeniem adhezyjnym Al i PA6 z dodatkiem talku, z defektem o szerokości 1 mm: wymiary obserwowanej części próbki 40 x 20 mm (1 mm  $\approx$  7 px);  $t_v$  i  $b_v$  – wyniki odpowiednio dla powierzchni górnej i dolnej próbki ..... 72
- Rys. 9.21. Próbkę z połączeniem adhezyjnym bez warstwy pośredniej z zaznaczonym obszarem obserwacji (kolor zielony:  $t_v$  – widok powierzchni górnej próbki,  $b_v$  – widok powierzchni dolnej próbki) i miejscem przyłożenia piezoelementu: 1 – część polimerowa, 2 – część metalowa ..... 73
- Rys. 9.22. Częstotliwości wzbudzenia, dla których można było zaobserwować fale Lamba dla próbek aluminiowej, polimerowej oraz próbek bez i z defektem połączenia [133] ..... 74
- Rys. 9.23. Porównanie prędkości rozchodzenia się fal Lamba dla próbek polimerowych i aluminium [133] ..... 76
- Rys. 9.24. Wykres zależności prędkości fal Lamba od częstotliwości wzbudzenia dla próbek PLA\_Al bez i z defektem połączenia \_D: błąd pomiarowy:  $\Delta f = 1$  Hz,  $\Delta v = 10$  m/s. Prędkości fal Lamba oznaczono: kolorem czarnym w części metalowej ( $v_m$ ) i czerwonym w części polimerowej ( $v_p$ ) próbki [133]..... 77



- Rys. 9.25. Wykres zależności prędkości fal Lamba od częstotliwości wzbudzenia dla próbek PVDF\_Al bez i z defektem połączenia \_D: błąd pomiarowy:  $\Delta f = 1$  Hz,  $\Delta v = 10$  m/s. Prędkości fal Lamba oznaczono: kolorem czarnym w części metalowej ( $v_m$ ) i zielonym w części polimerowej ( $v_p$ ) próbki [133]..... 77
- Rys. 9.26. Wykres zależności prędkości fal Lamba od częstotliwości wzbudzenia dla próbek PC\_Al bez i z defektem połączenia \_D: błąd pomiarowy:  $\Delta f = 1$  Hz,  $\Delta v = 10$  m/s. Prędkości fal Lamba oznaczono: kolorem czarnym w części metalowej ( $v_m$ ) i niebieskim w części polimerowej ( $v_p$ ) próbki [133]..... 78
- Rys. 9.27. Wykres amplitudowy i fazowy oraz chwilowych wychyleń uśrednionych dla szerokości próbki a – PLA\_Al bez defektu połączenia, b – PLA\_Al\_D z defektem połączenia: wymiary obserwowanej części próbki 54 x 9,5 mm;  $t_v$  i  $b_v$  – wyniki odpowiednio dla powierzchni górnej (część metalowa – kolor niebieski) i dolnej próbki (część polimerowa – kolor czerwony) [133] ..... 79
- Rys. 9.28. Wykres amplitudowy i fazowy oraz chwilowych wychyleń uśrednionych dla szerokości próbki a – PVDF\_Al bez defektu połączenia, b - PVDF\_Al\_D z defektem połączenia: wymiary obserwowanej części próbki 54 x 9,5 mm,  $t_v$  i  $b_v$  – wyniki odpowiednio dla powierzchni górnej (część metalowa – kolor niebieski) i dolnej próbki (część polimerowa – kolor czerwony) [133] ..... 80
- Rys. 9.29. Wykres amplitudowy i fazowy oraz chwilowych wychyleń uśrednionych dla szerokości próbki a – PC\_Al bez defektu, b – PC\_Al\_D z defektem połączenia: wymiary obserwowanej części próbki 54 x 9,5 mm,  $t_v$  i  $b_v$  – wyniki odpowiednio dla powierzchni górnej (część metalowa – kolor niebieski) i dolnej próbki (część polimerowa – kolor czerwony) [133]..... 81
- Rys. 9.30. Wykres prędkości fal Lamba w funkcji częstotliwości wzbudzenia próbek polimerowych PE/PA, PE/PA/MAH<sub>1</sub> i PE/PA/MAH<sub>3</sub> i aluminium..... 82
- Rys. 9.31. Kadry z trójwymiarowej animacji oraz wykres chwilowego wychylenia obu stron próbki, uśrednionego po jej szerokości dla próbki L1 bez defektu: wymiary obserwowanej części próbki 54 x 9,5 mm (1 mm = 4,8 px);  $t_v$  – wyniki dla powierzchni górnej próbki (kolor czerwony),  $b_v$  – wyniki dla powierzchni dolnej próbki (kolor niebieski) ..... 83
- Rys. 9.32. Wykresy amplitudowe i fazowe próbek L1 bez defektu połączenia dla dwóch różnych częstotliwości wzbudzenia: a – 10 kHz, b – 25,5 kHz, wymiary obserwowanej części próbki 54 x 9,5 mm (1 mm  $\approx$  4,8 px)..... 84
- Rys. 9.33. Wykres prędkości fal Lamba w funkcji częstotliwości wzbudzenia dla próbek: bez defektu L2 (a) oraz z defektem połączenia b – L2\_D, c – L1\_D, d – L3\_D..... 85
- Rys. 9.34. Szerogramy oraz profile fazowe próbek z połączeniem polimer-metal o różnej szerokości: a – 5 mm, b – 10 mm, c – 15 mm..... 87
- Rys. D.1. Schemat blokowy i widok stanowiska pomiarowego z szerografem: 1 – maska zapobiegająca prześwietleniu kamery szerografu..... 111
- Rys. D.2. Zdjęcie próbki z zamocowaną maską podczas badania szerograficznego..... 112

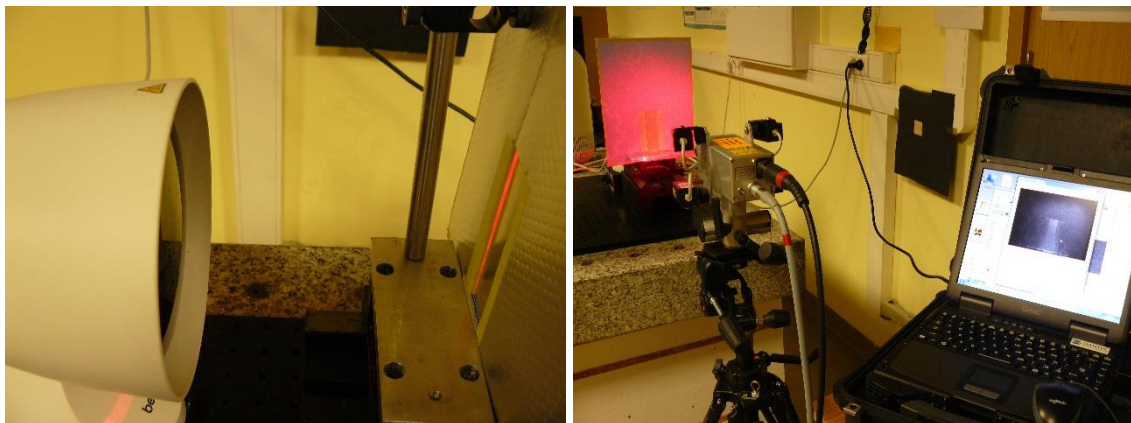
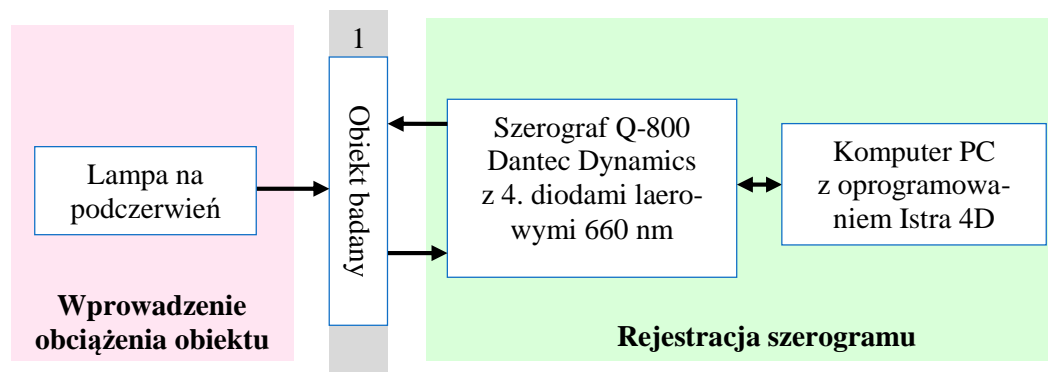
## DODATEK A

### Stanowisko pomiarowe do badań szerograficznych

Badania szerograficzne połączeń w próbkach kompozytowych służyły do weryfikacji holograficznych badań wibrometrycznych, w których występowanie defektów opierało się głównie na właściwościach dyspersyjnych fal Lamba.

Pomiary wykonano za pomocą szerografu Q-800 firmy Dantec Dynamics [135] oraz układzie szerograficznym autorstwa Z. Koniecznej z Politechniki Poznańskiej [136].

Poniższy schemat blokowy (rys. D1) przedstawia elementy stanowiska pomiarowego szerografu Q-800, niezbędne do zebrania i analizy danych doświadczalnych – kolorem różowym oznaczono elementy odpowiedzialne za wprowadzenie obciążenia termicznego obiektu, natomiast kolorem zielonym elementy odpowiedzialne za rejestrację szerogramu.

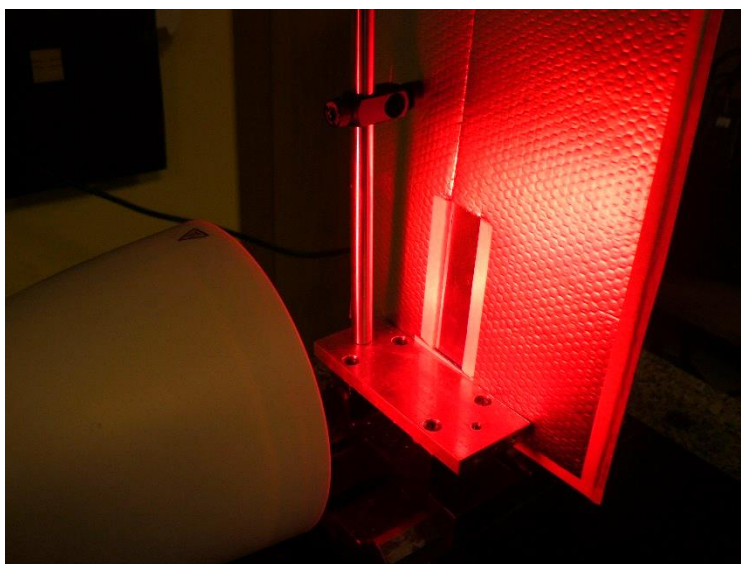


Rys. D.1. Schemat blokowy i widok stanowiska pomiarowego z szerografem: 1 – maska zapobiegająca prześwietleniu kamery szerografu

Przenośny system szerograficzny Q-800, służy do kontroli jakości i badań nieniszczących materiałów. Urządzenie składa się z systemu oświetlającego obiekt, złożonego z czterech laserów półprzewodnikowych o długości fali 660 nm i regulowanej mocy

do 120 mW (rys. D1). Podstawową częścią szerografu jest zminiaturyzowany interferometr szerograficzny w konfiguracji Michelsona z pochylonym zwierciadłem (patrz rozdział 6. rys. 6.1) z automatycznym sterowaniem przesunięcia fazowego. Obrazy interferencyjne rejestrowane są przez kamerę CCD o wysokiej zdolności rozdzielczej. Analizy obrazów dokonuje się za pomocą oprogramowania *Istra 4D* przeznaczonego do tego urządzenia.

Obiektem odpowiadającym za wymuszenie termiczne w obiekcie była lampa na podczerwień. Pozwalała ona na podniesienie temperatury obydwu części laminatu podczas nagrzewania krótszego niż 10 sekund do 2°C, co zapewniało nieniszczący charakter badań. Próbka była mocowana za pomocą jednego lub dwóch uchwytów (po jednym z każdej strony próbki, podobnie jak w przypadku badań wibrometrycznych).



Rys. D.2. Zdjęcie próbki z zamocowaną maską podczas badania szerograficznego

Za wymuszenie termiczne na obiekcie odpowiadała lampa IR PAR38E o mocy 150 W (BEURER GmbH, Ulm, Niemcy), promieniująca głównie w bliskiej podczerwieni. Spektrum promieniowania lampy obejmowało również fale o długości pokrywającej się z długością fali laserów szerograficznych (660 nm) i z tego powodu było niemożliwym odfiltrowanie tej części widma przez filtr interferencyjny przed kamerą CCD szerografu. Powodowało to gwałtowny wzrost szumów po włączeniu lampy. Celem uniknięcia tego efektu oraz zabezpieczenia kamery przez prześwietleniem zastosowano maskę termoizolacyjną z odbijającą warstwą aluminiową od strony lampy (rys. 6.2). Dzięki temu rozwiązaniu uniknięto także nagrzewania się uchwytów po drugiej stronie maski, co mogło zniekształcać wyniki pomiarów.