Uniwersytet Morski w Gdyni

Wydział Mechaniczny

Katedra Podstaw Techniki

PRACA DOKTORSKA

Rozwój metodologii analiz badań wibrodiagnostycznych w monitorowaniu uszkodzeń połączeń spawanych cienkościennych konstrukcji okrętowych

Promotor:

dr hab. inż. Lech Murawski

Promotor pomocniczy:

dr inż. Adam Muc

Pracę wykonał:

mgr inż. Adam Szeleziński

GDYNIA 2019

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ 4

WSTĘP 5

1. PRZEGLĄD PROBLEMATYKI POŁĄCZEŃ SPAWANYCH I ICH BADAŃ 10

1.1. SPAWANIE 10

1.1.1. BUDOWA ZŁĄCZA SPAWANEGO 10

1.1.2. SYSTEMATYKA WAD SPAWALNICZYCH. 11

1.1.3. PRZYCZYNY POWSTANIA WYBRANYCH WAD I ICH CHARAKTERYSTYKA. 12

1.2. KOMERCYJNE METODY BADAŃ NIENISZCZĄCYCH 29

1.3. NIESKOMERCJALIZOWANE METODY BADAŃ NIENISZCZĄCYCH 40

2. TEZA, CEL I ZAKRES PRACY 45

3. BADANIE PŁYT O ZNACZNEJ GRUBOŚCI 48

3.1 STANOWISKO POMIAROWE I METODYKA POMIARÓW 48

3.2. METODYKA BADAŃ 52

3.3. KLASYCZNA METODA ANALIZ WIBRODIAGNOSTYCZNYCH W OCENIE POŁĄCZEŃ SPAWANYCH 67

3.4 ROZSZERZONE METODY ANALIZ BADAŃ WIBRODIAGNOSTYCZNYCH POŁĄCZEŃ SPAWANYCH 73

3.4.1 ANALIZA CHARAKTERYSTYK CZASOWO – CZĘSTOTLIWOŚCIOWYCH 2D I 3D 73

3.4.2 METODA OKIEN CZASOWYCH 79

3.4.3. DEKREMENT TŁUMIENIA W OCENIE POŁĄCZEŃ SPAWANYCH 94

4. BADANIA BLACH KONSTRUKCJI CIENKOŚCIENNYCH 104

4.1. WERYFIKACJA NUMERYCZNA BADAŃ POMIAROWYCH 110

4.2. ANALIZA CHARAKTERYSTYK CZASOWO – CZĘSTOTLIWOŚCIOWYCH 2D I 3D 118

4.3. METODA ROZKŁADU ŚREDNIEJ Z OKIEN CZASOWYCH 122
4.4. ROZKŁAD LOGARYTMICZNEGO DEKREMENTU TŁUMIENIA W OCENIE POŁĄCZEŃ SPAWANYCH – WERYFIKACJA 127
4.5. BADANIA AMPLITUD PRZEMIESZCZEŃ DRGAŃ 132
WNIOSKI I CELE DALSZYCH BADAŃ 138
LITERATURA 141
ZAŁĄCZNIKI 146

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

CCLD – linia stałego zasilania prądowego

DUT – urządzenie podlegające testowi

EBW – spawanie elektronowe

EMA – eksperymentalna analiza modalna

ESW – spawanie elektrożużlowe

ET – metoda prądów wirowych

FBG – światłowodowa siatka Bragga

FFT – szybka transformata Fouriera

GLV – pasywny wibrometr laserowy

GTAW – spawanie nietopliwą elektrodą wolframową

HAZ – strefa dotknięta wysoką temperaturą

IEPE – element piezoelektryczny z zintegrowaną elektroniką

KB – komórka Bragga

LDV – laserowy wibrometr oparty na zjawisku Dopplera

MAG – spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazów aktywnych

MIG – spawanie elektrodą topliwą w osłonie gazów obojętnych

MMA – spawanie elektrodą

MT – badania magnetyczno - proszkowe

NDT – badania nieniszczące

PAW – spawanie plazmowe

PT – badania penetracyjne

RT – badania radiograficzne

RW – rozdzielacz wiązki

SAW – spawanie łukiem krytym

SHM – badanie stanu żywotności konstrukcji

SNR – stosunek sygnału do szumu

TEDS – elektroniczne dane przetwornika

TIG – spawanie nietopliwą elektrodą wolframową

UT – badania ultradźwiękowe

VT – badania wizualne

WSTĘP

Spośród różnych środków transportu, transport morski obok lotniczego jest narażony na największe zagrożenia. Statki morskie często pracują w ekstremalnie ciężkich warunkach środowiskowych. Ponadto, konstrukcje morskie są narażone na agresywne środowisko morskie oddziaływujące na nie przez bardzo długi okres czasu.
Intensywnie eksploatowane statki są szczególnie narażone na krytyczne uszkodzenia, do których można zaliczyć pęknięcia połączeń spawanych. Uszkodzenia tego typu bezpośrednio wpływają na poziom bezpieczeństwa żeglugi. Rysunek 1 przedstawia przykład katastrofalnego uszkodzenia, w postaci złamania, kontenerowca w wyniku oddziaływania silnej sztormowej pogody. Tego typu uszkodzenie konstrukcji ma tragiczny wpływ na bezpieczeństwo załogi statku, środowisko morskie oraz ładunek statku. Katastrofy tego typu zdarzają się pomimo tego, że każde odpowiedzialne połączenie spawane jest w trakcie budowy statku dokładnie sprawdzane przy pomocy technik NDT (ang. *Non-Destructive Testing*).

Rys. 1 Katastrofalne uszkodzenie statku wywołane ciężkim środowiskiem morskim

W strukturze statku wyróżnić można dwa podstawowe systemy konstrukcyjne. Jednym z nich jest kadłub statku wraz z nadbudówką, a drugi to układ napędowy w skład, którego wchodzi kadłub silnika głównego oraz układ przeniesienia napędu: wał korbowy, linia wałów i śruba napędowa. W mojej pracy będę się koncentrować na bezpieczeństwie kadłuba statku, którą uznać można za rodzaj konstrukcji cienkościennej. W szczególności, planuje rozwinąć techniki analiz uszkodzeń połączeń spawanych dla potrzeb ciągłej kontroli ich jakości przy pomocy systemów opartych o SHM (ang. *Structural Health Monitoring*).
Każdy obiekt morski jest budowany a następnie eksploatowany pod nadzorem określonego towarzystwa klasyfikacyjnego. Wymagają one szczegółowej kontroli okresowej bezpieczeństwa danej konstrukcji morskiej. Począwszy od momentu jej projektowania, następnie budowy, a szczególnie w trakcie intensywnej eksploatacji. Połączenia spawane są jednym z kluczowych elementów, które są zgodnie z tymi badaniami poddawane szczegółowej kontroli.

Techniki NDT są badaniami, dzięki którym można uzyskać informacje o stanie, właściwościach i ewentualnych wadach badanego obiektu bez ingerowania w jego cechy użytkowe. Celem korzystania z badań nieniszczących jest określenie rodzaju, wielkości

i miejsca występowania niezgodności w celu stwierdzenia ich dopuszczenia lub konieczności usunięcia z badanego elementu. Czynności kontrolne zapewniające jakość złączy spawanych znajdują miejsce zarówno w trakcie procesu produkcyjnego, ale także w celu diagnozowania eksploatowanej konstrukcji. Brak wykonywania eksploatacyjnych badań nieniszczących obiektów technicznych takich jak samoloty, statki, urządzenia dźwigowe czy mosty bądź przeprowadzenie ich niezgodnie z procedurami badań może prowadzić do katastrof i awarii.
Techniki badań NDT są dobrze zbadane i dają rezultaty o zwykle wystarczającej niezawodności. Mają jednak podstawową wadę - przeprowadzane są okresowo. W okresach pomiędzy badaniami nie mamy pewności, co do niezawodności konstrukcji. Szczególnie w przypadku wystąpienia zdarzeń krytycznych takich jak: silny sztorm czy kolizja, istotna jest informacja o możliwości dalszej eksploatacji obiektu. Informacja ta musi zawierać stopień zagrożenia potencjalną katastrofą wraz z parametrami eksploatacji ze szczególnym uwzględnieniem czasu jego bezpiecznego użytkowania. W tym celu rozwijane są badania nad nowymi technikami określanymi jako Structural Health Monitoring.

Proponowane w dysertacji metody monitoringu konstrukcji bazują na metodach wibrodiagnostycznych. Dotychczas stosowane badania metodami drganiowymi opierają się najczęściej na metodzie rezonansowej i uproszczonej analizie modalnej (dziedzina nauki zajmująca się wyznaczaniem częstotliwości własnych oraz postaci drgań przypisanych określonym częstotliwościom) [33]. Bada się głównie zmiany częstotliwości drgań własnych spowodowane uszkodzeniem konstrukcji. Wadą tego typu badań jest ich mała czułość, ponieważ częstotliwość drgań własnych jest zależna od spierwiastkowanej sztywności konstrukcji. Stosując badania drganiowe można wykryć następujące defekty: zmiany wymiarów, kształtu, masy, gęstości oraz pęknięcia. Umożliwia ona również rozpoznanie nieprawidłowo wykonanych procesów technologicznych, gdyż każde niedociągnięcie technologiczne wpływa na zmiany w strukturze materiału z jakiego zbudowany jest badany obiekt [59, 37].

Dla każdego obiektu można wyznaczyć charakterystyki dynamiczne. Rozmieszczenie częstotliwości rezonansowych dla sprawdzonych i nieuszkodzonych elementów powinno być niezmienne w trakcie eksploatacji obiektu. Na częstotliwość i amplitudę drgań w rezonansie bezpośredni wpływ mają cechy mechaniczne badanego obiektu: masa, sztywność, współczynnik tłumienia. Zmiana jednego lub kilku z powyższych elementów powoduje zmianę odpowiedzi elementu na wymuszenie. Różnica między charakterystyką rezonansową obiektu badanego, a charakterystyką rezonansową obiektu wzorcowego informuje o wystąpieniu usterki w badanym obiekcie [13, 69].

Pierwszym elementem badań drganiowych jest wzbudzenie badanego obiektu. Wymuszenie może mieć postać impulsu (np. przez uderzenie) lub może mieć charakter harmoniczny. Wzbudzony element drga w charakterystyczny dla niego sposób (zgodny z postaciami drgań własnych), a drgania te są rejestrowane. Następnym elementem badań drganiowych jest przetworzenie pomierzonych danych (najczęściej zmiana dziedziny czasu na dziedzinę częstotliwości za wykorzystaniem transformacji Fouriera). Końcowym elementem badań drganiowych jest porównanie otrzymanego widma z widmem wzorcowym [12].
Ocena badanego elementu za pomocą badań drganiowych może się odbywać na podstawie: przesunięcia częstotliwości rezonansowych w zakresie amplitudy i częstotliwości, przesunięcia częstotliwości rezonansowych w zakresie częstotliwości z zachowaniem amplitudy, przesunięcia i rozszczepienia częstotliwości rezonansowych, zaniku częstotliwości rezonansowych [70].

Metoda badań drganiowych jest powszechnie stosowana w diagnostyce prewencyjnej pomp, silników, skrzyń biegów, turbin, wiatraków i kompresorów, ale także wszystkich rodzajów pojazdów mechanicznych, mostów i konstrukcji inżynierskich. Najczęściej badanymi obiektami są samoloty, urządzenia mechaniczne, mosty, budynki,

płytki obwodów scalonych, komputery, instrumenty, urządzenia wirujące, statki kosmiczne, satelity oraz pojazdy. Nadmierne drgania urządzenia pracującego pod obciążeniem może być spowodowana zużyciem, korozją lub nawet czynnikami środowiskowymi. Nadmierne drgania są najczęstszym powodem uszkodzenia urządzeń i struktur. W wielu przypadkach nadmierna aktywność drganiowa wywołuje duży hałas [74, 61, 29]. Na podstawie badań wibrodiagnostycznych jesteśmy wstanie ustalić, czy obiekt nadaje się do dalszego bezpiecznego użytku.

Pojedyncze części jak i cały produkt często testowane są przy użyciu wzbudników drgań (ang. *shakers*) lub „stołów wibracyjnych", które mogą wytwarzać zmienne, ale kontrolowalne impulsy i obciążenia wibracyjne [72, 32, 73, 22]. Wzbudniki drgań mogą być napędzane mechanicznie, elektrohydraulicznie lub elektromagnetycznie działają najczęściej w granicach częstotliwości od 10 do 55 Hz, od 0 do 500 Hz, i od 5 do 2 kHz.

W badaniach wibrodiagnostycznych używa się kilku rodzajów czujników, są to najczęściej:

- Czujniki tensometryczne – często stosowane są w badaniach uszkodzeń. Ich zaletą jest pewność i niezawodność pomiarów. Wadami czujników tensometrycznych jest niska czułość przy niskim naprężeniu oraz konieczność kompensacji temperatury jak również tzw. płynięcie czujników [90].
- Akcelerometry – przetworniki, których wyjściem jest sygnał elektryczny, proporcjonalny do zbadanego przyspieszenia. Dzięki wewnętrznemu tłumieniu zastosowanemu w akcelerometrach zapewnia on liniową odpowiedź w swoim zakresie pomiarowym. Jego naturalna częstotliwość drgań własnych jest zazwyczaj bardzo wysoka - jest on zaprojektowany do operowania w częstotliwościach poniżej swojej częstotliwości drgań własnych. Wadami akcelerometrów jest to, że wymagają zewnętrznego zasilania i mają niską czułość w pomiarach na bardzo niskich częstotliwościach.
- Czujniki prędkości – przetworniki elektrodynamiczne, które wytwarzają napięcie proporcjonalne do prędkości drgań wywołanej przez poruszającą się maszynę. Cewka jest zawieszona na dwóch resorach i tworzy bezsmarowy system sprężynowy. Kiedy przetwornik zostaje umieszczony na drgającym elemencie, cewka pozostaje nieruchoma, a magnes trwały wibruje z obiektem. Doprowadza to do wytworzenia indukowanego napięcia na cewce. Czujnik prędkości nie wymaga zewnętrznego źródła zasilania, przez co uznawany jest za „czujnik aktywny". Wadami czujników prędkości jest to, że ich maksymalną częstotliwością pomiarową jest około 2 kHz i są podatne na zakłócenia w obecności silnych pól magnetycznych. Czujniki tego typu są względnie rzadko stosowane.
- Czujniki przemieszczeń można podzielić na: stykowe, bezstykowe, wiroprądowe oraz laserowe. Najpowszechniej stosowanymi czujnikami przemieszczeń są czujniki wiroprądowe, ich największą zaletą jest to, że można je zastosować do każdego materiału przewodzącego prąd. Bezkontaktowe czujniki prądów wirowych z wbudowanymi oscylatorami cechują zwiększona niezawodność, uproszczona instalacja i niższy koszt [62]. W ostatnich latach coraz większą popularność zdobywają czujniki laserowe.

W trakcie analiz sygnałów zarejestrowanych podczas badań drganiowych najczęściej stosuje się transformatę FFT (ang. *Fast Fourier Transformation*). Jest to algorytm, który konwertuje sygnał cyfrowy z dziedziny czasu do częstotliwości. Cyfrowe przetwarzanie sygnału wymaga konwersji analogowo-cyfrowej sygnału wejściowego. Pierwszym krokiem w konwersji jest próbkowanie amplitud chwilowych sygnału wejściowego w określonych odstępach czasowych, według wybranej częstotliwości próbkowania. Badana (spodziewana) częstotliwość urządzenia nie może przekraczać połowy częstotliwości próbkowania,

ponieważ wyższe częstotliwości wejściowe zawierają fałszywe komponenty, tworząc zjawisko tzw. „aliasingu". W konsekwencji wystąpienia aliasingu w widmie odtworzonym z błędnie zarejestrowanego sygnału pojawiają się składowe o fałszywych częstotliwościach (tzw. aliasy).

W związku z zastosowaniem w pracy metod dla których punktem wyjścia jest eksperymentalna analiza modalna w dalszej części podano jej teoretyczne podstawy. Eksperymentalna analiza modalna (EMA – ang. *experimental modal analasis*) jest procesem polegającym na doświadczalnym wyznaczeniu częstotliwości rezonansowych badanego układu. Przy zastosowaniu odpowiednich technik możliwe jest również określenie postaci drgań własnych. EMA posiada wiele zalet jest szybkim stosunkowo tanim i prostym sposobem określania częstotliwości rezonansowych. Równaniem wyjściowym analizy modalnej jest ogólne równanie ruchu drgającego:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \tag{1}$$

gdzie: m – masa, c – współczynnik tłumienia, k – współczynnik sprężystości. Równanie (1) można przekształcić do postaci:

$$[-m\omega^2 + jc\omega + k]X(\omega) = F(\omega) \tag{2}$$

Uwzględniając, że:

$$H(\omega) = \frac{1}{-m\omega^2 + jc\omega + k} \tag{3}$$

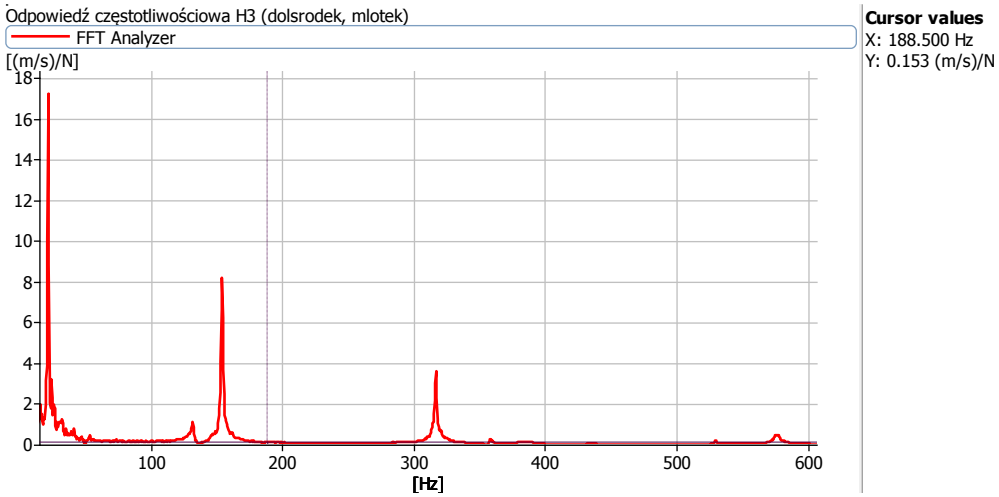
Możemy zapisać:

$$H(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \tag{4}$$

Wielkość *H(ω)* znana jest jako funkcja odpowiedzi częstotliwościowej (FRF – ang. *frequency respone function*). FRF opisuje stosunek transformaty Fouriera na wyjściu z układu *X(ω)* do transformaty Fouriera wymuszania przyłożonego do układu *F(ω)*. W czasie określania wartości FRF stosuje się trzy rodzaje estymatorów *H1*, *H2* oraz *H3*. Użycie właściwego zależy od przewidywanych składowych sygnału na wejściu i wyjściu [26]. Zastosowanie estymatora *H3* pozwala zminimalizować wpływ szumu sygnału wejściowego i wyjściowego na wyniki odpowiedzi częstotliwościowej układu. Estymator *H3* dany jest równaniem [26]:

$$H3 = \sqrt{H1 \cdot H2} \tag{5}$$

Na rysunku 2 przedstawiono widmo odpowiedzi częstotliwościowej uzyskane dla pomiarów płyty P1. Przedstawia ono relację pomiędzy wymuszeniem (młotek) a jednym z akcelerometrów.



Rys. 2 Widmo funkcji odpowiedzi częstotliwościowej uzyskane dla jednego z prowadzonych pomiarów (płyta bez połączenia spawanego) – sygnał jednokrotnie całkowany.

H1 to estymator stosowany w przypadku, gdy sygnał na wyjściu posiada dużą wartość współczynnika SNR (ang. *signal to noise ratio*), *H2* to estymator stosowany w celu minimalizacji wpływu szumu sygnału wejściowego. Estymatory *H1* i *H2* dane są równaniami (6) i (7).

$$H1 = \frac{G_{XF}}{G_{XX}} \tag{6}$$

Estymator H1 należy interpretować jako stosunek spectrum wzajemnego sygnału odpowiedzi i wymuszenia układu do spektrum wzajemnego wymuszenia [26].

$$H2 = \frac{G_{FF}}{G_{XF}} \tag{7}$$

Estymator H2 interpretuje się jako stosunek wzajemnego spektrum sygnału wymuszenia do spektrum wzajemnego wymuszenia i odpowiedzi. Dokładniejsze informacje dotyczące omawianej problematyki zostały przedstawione w [16, 50, 49, 2].

1. PRZEGLĄD PROBLEMATYKI POŁĄCZEŃ SPAWANYCH I ICH BADAŃ

1.1. SPAWANIE

Spawalnictwo jest dziedziną technologii zajmującej się procesami spajania, czyli łączenia elementów konstrukcyjnych i procesami pokrewnymi spajaniu. Procesy spajania różnią się między sobą stanem skupienia materiałów podstawowych i stopiwa (materiału dodatkowego) w miejscu spajania, charakterem wiązań tworzących połączenie, rodzajem doprowadzonej energii cieplnej i/lub mechanicznej w celu utworzenia złącza. W porównaniu ze złączami, w których poszczególne elementy zostały powiązane ze sobą za pomocą takich łączników jak: nity, śruby, kliny, wpusty, poprawnie zaprojektowane i wykonane złącza spawane charakteryzują się między innymi monolitycznością, szczelnością, dużą wytrzymałością, małą masą, łatwością zabezpieczania przed korozją itp. [15].

Definicję spawania podaje się najczęściej w następującej postaci: „*spawanie polega na łączeniu materiałów przez ich nagrzanie i stopienie w miejscu łączenia z dodaniem lub bez dodania spoiwa. Metal części łączonych nazywa się metalem rodzimym. Stopione spoiwo łącznie ze stopionymi brzegami części łączonych, czyli materiałem rodzimym, tworzy po ostygnięciu spoinę*”. Zagadnienia dotyczące zjawisk fizycznych występujących podczas spawania są dobrze poznane jednak nadal, w warunkach stoczniowych, nie udało się wypracować technik pozwalających na wykonywanie spoin pozbawionych jakichkolwiek wad w sposób powtarzalny.

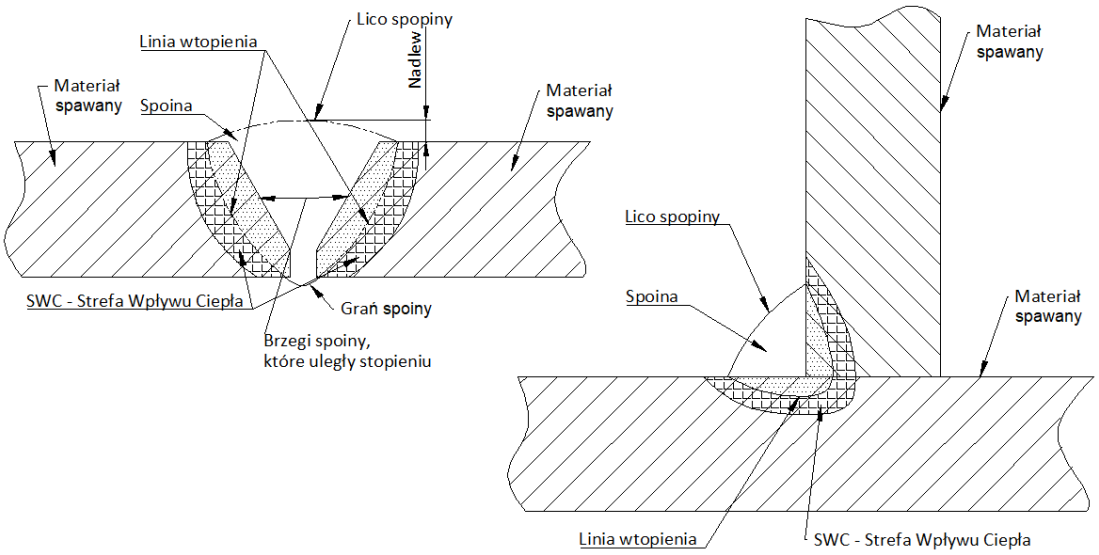
1.1.1. BUDOWA ZŁĄCZA SPAWANEGO

W procesie spawania połączenie uzyskuje się w wyniku stopienia dwóch lub więcej elementów przy użyciu energii cieplnej. Dodatkowym źródłem ciepła może być energia reakcji chemicznych przebiegających w łuku i jeziorku spawalniczym [15].

W wyniku procesu spawania powstaje złącze spawane w którym wyróżnia się trzy wyraźne obszary:

- **spoinę** – utworzoną z metalu, który w procesie spawania ulega przetopieniu,
- **strefę wpływu ciepła (SWC)** – to jest strefę materiału spawanego o strukturze zmienionej wskutek cieplnego oddziaływania źródła ciepła (**HAZ** ang. Heat Affected Zone),
- strefę materiału spawanego.

Spoina ograniczona jest liniami wtopienia, licem i granią (rysunek 1.1). Prawidłowo wykonana spoina czołowa ma lico lekko wypukłe. Wystająca ponad grubość blachy wypukłość nazywana jest nadlewem. Nadlew powinien łagodnie przechodzić do powierzchni połączonych elementów Od strony grani spoina powinna być również lekko zgrubiona i łagodnie przechodzić w powierzchnię połączonych ze sobą elementów. Szerokość strefy wpływu ciepła pozostaje w ścisłym związku z warunkami spawania. W przypadku spoin pachwinowych lico powinno być płaskie lub lekko wklęsłe, zaś od strony grani spoina powinna charakteryzować się wtopieniem w łączone elementy [15, 16, 50].



Rys. 1.1 Elementy złącza spawanego [15]; a) ze spoiną czołową b) ze spoiną pachwinową

Niezgodności i wady spawalnicze mogą występować w spoinie, strefie wpływu ciepła i materiale spawanym.

1.1.2. SYSTEMATYKA WAD SPAWALNICZYCH.

Niezgodnością spawalniczą określa się taką niedoskonałość złącza, która odbiega od idealnej jakości złącza pod względem budowy i kształtu. Niezgodność spawalnicza może stanowić lub też stanowi zagrożenie obniżenia własności eksploatacyjnych konstrukcji. Niezgodność spawalnicza może być dopuszczalna, gdy wymiar niezgodności nie przekracza wymiaru granicznego według obowiązującej normy lub przepisu [15, 14]. Złącza spawane, w których niezgodności przekraczają wymiary graniczne dla założonego poziomu jakości wymagają podjęcia określonych działań, takich jak: naprawa, wzmocnienie lub wykonanie od nowa [38, 14].

Niezgodności spawalnicze klasyfikuje się według różnych kryteriów. Według kryterium ich występowania w złączu spawanym dzielą się one na zewnętrzne (powstające na powierzchni złącza od strony lica lub grani), oraz wewnętrzne nie wychodzące na powierzchnię złącza lub nie będące bezpośrednio dostępne [42, 7, 38, 14, 73]. Biorąc pod uwagę wielkość (i wykrywalność), niezgodności spawalnicze dzieli się na niezgodności makroskopowe (np. braki przetopu, żużle, pęcherze, podtopienia itp.), które są wykrywane powszechnie stosowanymi w praktyce przemysłowej metodami badań nieniszczących oraz niezgodności mikroskopowe (np. mikropęknięcia, mikro wtrącenia siarki, fosforu, krzemu, wtrącenia na granicy ziaren, nieciągłości w strefie wpływu ciepła SWC itp.), wykrywane metodami nieniszczącymi z zastosowaniem specjalnych technik (np. mikro rentgenografii, jądrowego rezonansu magnetycznego, elektronowego rezonansu paramagnetycznego itp.). W niektórych przypadkach wyróżnia się grupę niezgodności submikroskopowych (np. wakanse, dyslokacje), wykrywane specjalnymi metodami i technikami zarówno badań nieniszczących jak i niszczących. Kryterium klasyfikacji niezgodności spawalniczych jest głównie ich kształt. W dużym stopniu wpływa on na koncentracje naprężeń w obszarze niezgodności spawalniczej. Według kryterium kształtu, niezgodności spawalnicze dzieli się na: niezgodności przestrzenne (trójwymiarowe) np. pęcherze, żużle oraz niezgodności płaskie (szczelinowe) np. przyklejenia tworzące ostry karb inicjujący pęknięcia konstrukcji [42, 7].

Niezgodności występujące w złączach spawanych opisane zostały w normie PN – EN ISO 6520 – 1:2009. (norma to nie obejmuje niezgodności o charakterze metalurgicznym). Niezgodności sklasyfikowano w sześciu podstawowych grupach, w zależności od ich rodzaju ich kształtu oraz przyczyn powstania. Są to:

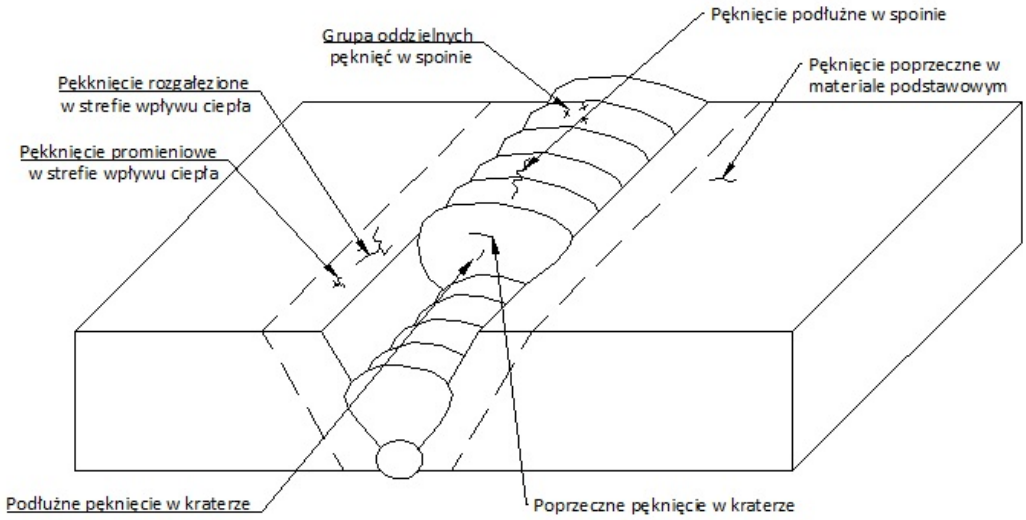
- pęknięcia,
- pustki,
- wtrącenia stałe,
- przyklejenia i brak przetopu,
- niezgodności spawalnicze dotyczące kształtu i wymiaru,
- inne niezgodności spawalnicze nie ujęte w punktach od 1 do 5 [42, 7, 38].

1.1.3. PRZYCZYNY POWSTANIA WYBRANYCH WAD I ICH CHARAKTERYSTYKA.

Głównymi przyczynami powstania wad w złączach spawanych są wszelkie odstępstwa od prawidłowej technologii spawania, niewłaściwy dobór i przygotowanie materiałów podstawowych i dodatkowych do spawania, nie technologiczne rozwiązania konstrukcyjne połączeń, nieprzestrzeganie technologii spawania, niewystarczające kwalifikacje i nieodpowiedzialność spawaczy, niesprawność urządzeń spawalniczych i tym podobne. Poznanie przyczyn powstania niezgodności pozwala na łatwiejszą i precyzyjniejszą interpretację jakości badanych metodami nieniszczącymi złączy, ocenę wpływu tych niezgodności na własności eksploatacyjne złączy oraz podjęcie działań, umożliwiających wyeliminowanie wad w procesie wytwarzania konstrukcji spawanych [15]. Wady spawalnicze ze względu na mechanizm ich powstawania dzieli się na **wady technologiczne,** które są bezpośrednio związane z metodą wytwarzania i powstają podczas niepoprawnie zrealizowanej operacji technologicznej (np. brak przetopu, przyklejenia) oraz na **wady eksploatacyjne** wywołane warunkami pracy elementu (np. pęknięcia zmęczeniowe) [7, 38]. Poniżej przedstawiono najczęściej spotykane wady występujące w złączach spawanych

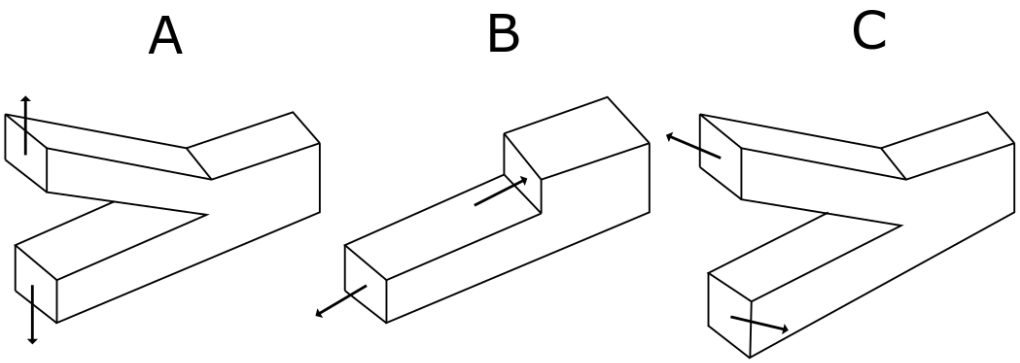
1.1.3.1. PĘKNIĘCIA

Pęknięcia - nieciągłości metalu, spoiny lub strefy wpływu ciepła w postaci szczeliny powstałej w wyniku działania naprężeń. Pęknięcia są powszechnie uważane za najbardziej groźne dla złączy spawanych spośród wszystkich niezgodności i z zasady muszą być usunięte. Pęknięcia złączy spawanych są wynikiem stanu naprężeń (odkształceń), w wyniku, którego następuje miejscowe przekroczenie wytrzymałości materiału na rozciąganie to jest utrata ciągliwości. Pęknięcia powstają na powierzchni lica. Przykłady różnego rodzaju pęknięć rozmieszczonych w różnych elementach złącza przedstawia rysunek 1.2. Pęknięcie jest wadą trudną do wykrycia a w niektórych wypadkach wykrycie jej jest nie możliwe (np. przy równoległym ustawieniu wady do osi wiązki fal ultradźwiękowych w przypadku stosowania metody ultradźwiękowej lub do kliszy w metodzie radiograficznej) [7].



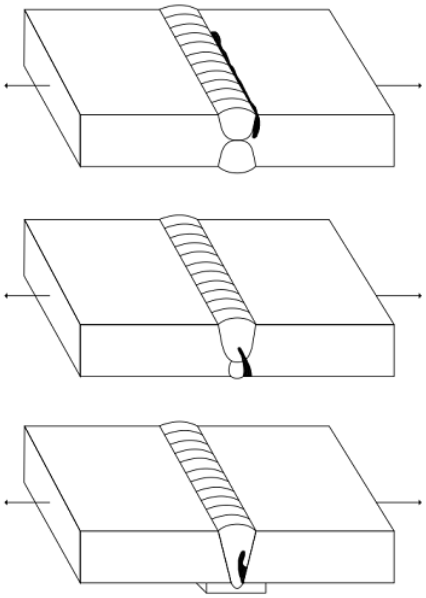
Rys. 1.2 Przykłady różnych pęknięć w złączu spawanym

Występują trzy modele pękania (niekiedy określane też sposobami pękania) rozwierne, ścinanie wzdłużne oraz ścinanie poprzeczne (rysunek 1.3) [7].

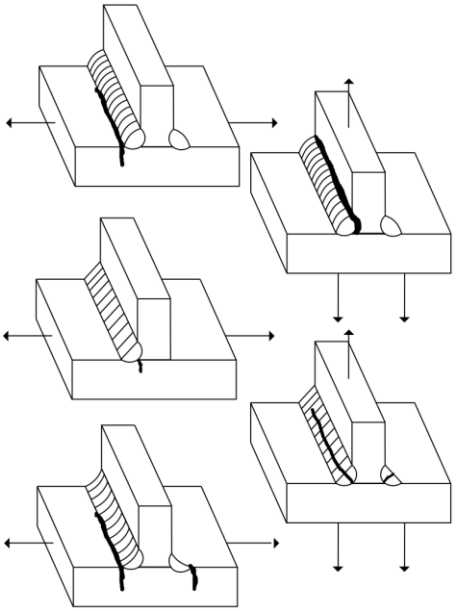


Rys. 1.3 Modele pękania A – rozwierny, B – ścinanie wzdłużne, C – ścinanie poprzeczne.

Pęknięcia zmęczeniowe powstają nieoczekiwanie w konstrukcjach spawanych, które w czasie eksploatacji znajdowały się pod wpływem naprężeń zmiennych co do wielkości i kierunku. Na rysunek 1.4 przedstawiono miejsca inicjacji pęknięć zmęczeniowych w złączach doczołowych a na rysunek 1.5 miejsca inicjacji pęknięć zmęczeniowych w złączach ze spoinami pachwinowymi.



Rys. 1.4 Miejsca inicjacji pęknięć zmęczeniowych w złączach doczołowych.

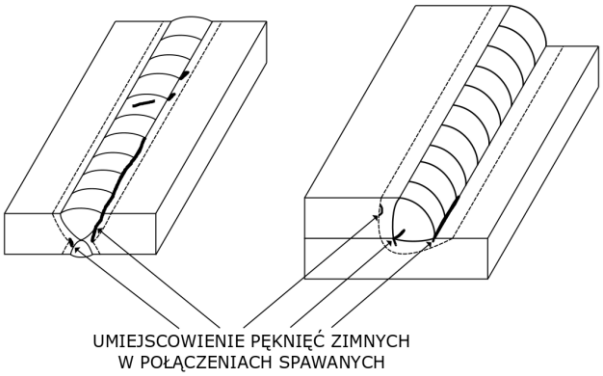


Rys. 1.5 Miejsca inicjacji pęknięć zmęczeniowych w złączach ze spoinami pachwinowymi.

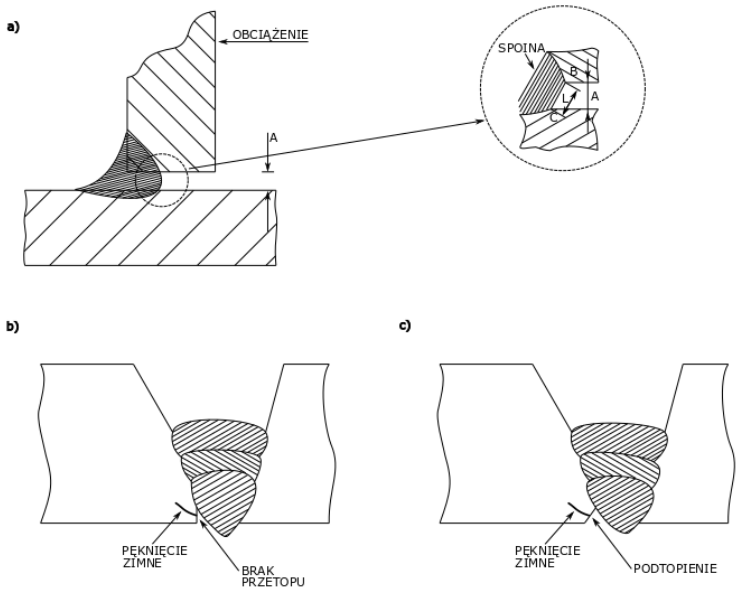
Pęknięcia korozyjne spowodowane są równoczesnym działaniem na złącze spawane wodnych roztworów korozyjnych i naprężeń rozciągających. Pęknięcia kruche natomiast powstają w spoinie lub strefie wpływu ciepła w przypadku wystąpienia w złączu spawanym ostrego karbu spiętrzonego naprężenia, kruchej struktur w obszarze karbu, naprężeń rozciągających w obszarze wierzchołka karbu, temperatury, w jakiej funkcjonuje konstrukcja, niższej od temperatury przejścia ze stanu ciągliwego do kruchego. Operacje jakim podaje się materiał podstawowy na konstrukcje zdecydowanie zmniejszają jego odporność na pękanie kruche. Do operacji takich zalicza się: cięcie, prostowanie, gięcie na zimno i spawanie.

Pęknięcia gorące występują w obszarze spoiny i strefy wpływu ciepła, w temperaturze około 1200^{o} C, w następstwie wydzielania się warstewki cieczy pomiędzy zakrzepniętymi ziarnami i jednoczesnego działania w tym obszarze naprężeń skurczowych, silniejszych od wytrzymałości materiału na rozciąganie. Najczęściej występują jako pęknięcia podłużne w osi spoiny.

Pęknięcia zimne w złączu spawanym (najczęściej w strefie wpływu ciepła) powstają w temperaturze 200 – 300^{o} C na skutek jednoczesnego oddziaływania trzech czynników: odkształceń i naprężeń spawalniczych, hartowania się stali pod wpływem ciepła spawania, lokalnego wzrostu naprężeń rozciągających na skutek rekombinacji atomów wodoru w wodór cząsteczkowy. Umiejscowienie pęknięć zimnych w połączeniu spawanym przedstawia rysunek 1.6. Pierwotne mikropęknięcia rozwijają się i przechodzą w pęknięcia makroskopowe. Miejsca generowania się pęknięć zimnych w wyniku koncentracji naprężeń przedstawia rysunek 1.7.

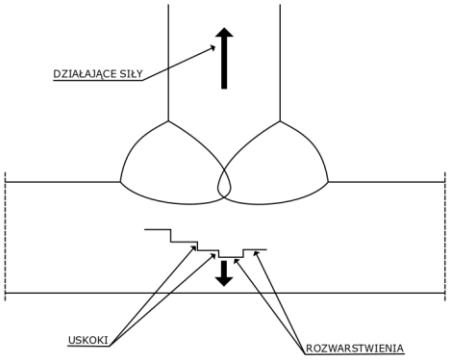


Rys. 1.6 Umiejscowienie pęknięć zimnych w połączeniach spawanych



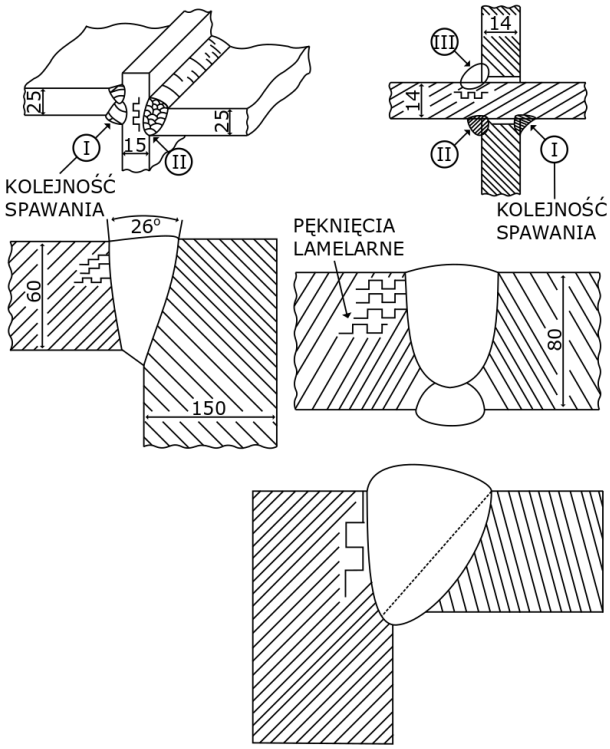
Rys. 1.7 Miejsca generowania pęknięć zimnych w wyniku koncentracji naprężeń: a – w obszarze karbu grani spoiny pachwinowej złącza teowego blach; b – spoinie czołowej z brakiem przetopu; c – w spoinie czołowej z podtopieniem.

Pęknięcia lamelarne występują głównie w obszarze złączy spawanych w materiale łączonych elementów (charakteryzują się tak zwanym przebiegiem schodkowym). Spowodowane są łączeniem się pasmowych wtrąceń niemetalicznych, równoległych do powierzchni blachy, pionowymi lub skośnymi uskokami. Schematycznie proces powstawania pęknięcia lamelarnego przedstawia rysunek 1.8.



Rys. 1.8 Schematyczne przedstawienie procesu powstawania pęknięcia lamelarnego.

Pęknięcia lamelarne występują głównie w blachach o grubości powyżej 15 mm [7]. Przyczyną pęknięcia laminarnego jest skurcz spawalniczy oraz naprężenia spowodowane niewłaściwą technologią spawania lub montażu konstrukcji. Powstaniu pęknięć lamelarnych sprzyja niska czystość metalurgiczna stali (zanieczyszczenie stali wtrąceniami niemetalicznymi, głównie siarczanami, które wydłużają się w procesie walcowania stanowiąc inicjację pęknięć lamelarnych) oraz wszelkiego rodzaju zewnętrzne i wewnętrzne niezgodności spawalnicze stanowiące koncentratory naprężeń. Pęknięcia lamelarne występują głównie w złączach krzyżowych i teowych. Schematycznie pęknięcia lamelarne w różnych złączach spawanych konstrukcji stalowych zmieszczono na rysunku 1.9.

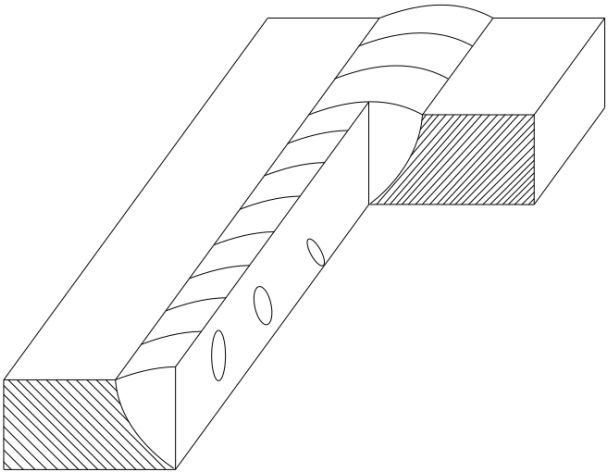


Rys. 1.9 Schematyczne przedstawienie pęknięć lamelarnych w różnych złączach spawanych konstrukcji stalowych

Naprawa złącza spawanego, w którym występuje pęknięcie powinna być przeprowadzona przez jego całkowite usunięcie, najlepiej poprzez szlifowanie lub inną obróbkę mechaniczną i ponowne spawanie. Ponieważ w większości przypadków nie toleruje się żadnych pęknięć niezależnie od ich wymiarów można założyć, iż każde występujące pęknięcie można kwalifikować jako złącze do naprawy [38].

1.1.3.2. PUSTKI

Pustki przestrzeń w spoinie wypełniona gazem. Pustki gazowe (pęcherze gazowe) są niezgodnościami spawalniczymi powstającymi na skutek obecności różnego rodzaju gazów w łuku i jeziorku spawalniczym (rysunek 1.10). Norma PN – EN ISO 6520 – 1 podaje 14 sklasyfikowanych typów usterek, wśród nich pustki gazowe zamknięte i otwarte.



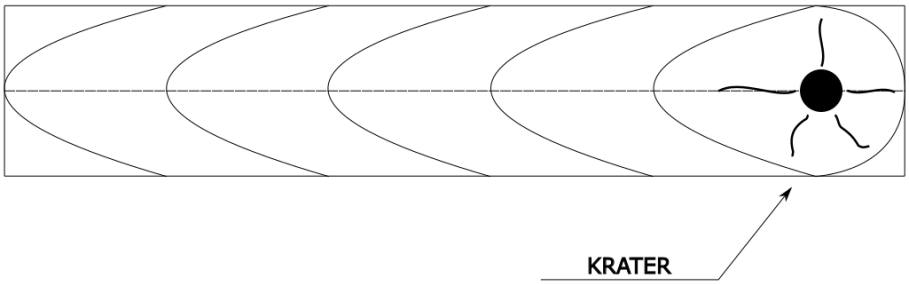
Rys. 1.10 Pęcherze gazowe

Powstają w wyniku gazotwórczych reakcji metalurgicznych przebiegających w nieprawidłowy sposób przez wydzielanie się wodoru (H_2), azotu (N_2) z płynnego metalu oraz wskutek zachodzących reakcji chemicznych, w czasie których wydziela się tlenek węgla (CO) i siarkowodór (H_2S) [7]. Wpływ na tworzenie pęcherzy mają zawilgocenie otuliny w elektrodach zasadowych, zanieczyszczenie spawanych krawędzi (rdza, farba, tłuszcz), zbyt duże prędkości stygnięcia spoiny (małe natężenie prądu, za duża prędkość spawania, brak osłony gazowej jeziorka płynnego metalu, zbyt długi lub niestabilny łuk elektryczny). Pustki mogą występować w jednej warstwie spoiny, w wielu warstwach lub nawet na wskroś, od grani aż do lica.

Najgroźniejszą formą tych niezgodności są pęcherze kanalikowe, łańcuchy pęcherzy i pęcherze podłużne (występujące najczęściej w obszarze grani). Pęcherze, które połączyły się z powierzchnią spoiny (zwykle licem), lecz nie zdążyły się zamknąć po uwolnieniu przebywających w nich gazów nazywa się porami. Pustki gazowe występują w spoinach w postaci pojedynczych lub rozproszonych pęcherzy gazowych o kształcie zbliżonym do kuli, grupy (gniazda pęcherzy) lub szeregów (łańcuchy pęcherzy) pęcherzy gazowych również o kształcie w przybliżeniu kulistym, pęcherzy podłużnych, których większy wymiar jest równoległy do osi spoiny, v-rurkowych pęcherzy kanalikowych, tworzących zazwyczaj układ „jodełek".

Pustki gazowe mogą powstać również jako międzydendrytyczne jamy skurczowe powstające w okresie schładzania spoiny pomiędzy dendrytami, mogące zawierać gaz, znajdują się przeważnie prostopadle do lica spoiny. Pustki gazowe mogą również występować jako wgłębienia w kraterze, stanowiące nieprawidłowe zakończenie warstwy lub ściegu spowodowane nagłym przerwaniem spawania i brakiem wypełnienia tego zakończenia. Kratery są wynikiem niskich kwalifikacji spawaczy. Podczas wykonywania badań konstrukcji, w których bardzo ważna jest szczelność trzeba zwrócić szczególną uwagę na wykrywanie pustek kanalikowych [42, 7].

Pustki gazowe mogą występować również jako wgłębienia w kraterze, stanowiąc nieprawidłowe zakończenie warstwy lub ściegu, spowodowane nagłym przerwaniem spawania i brakiem wypełnienia tego zakończenia (rysunek 1.11)



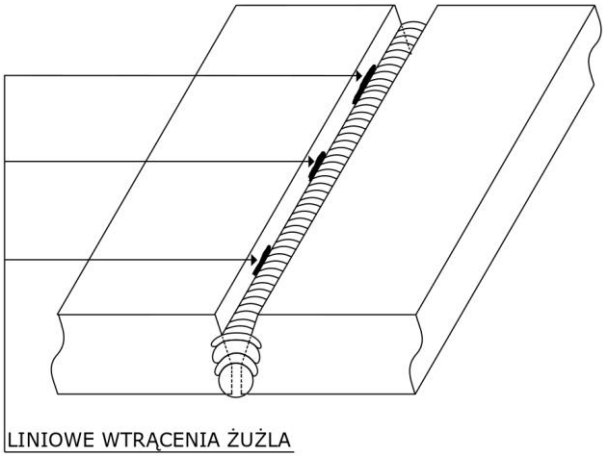
Rys. 1.11 Krater na końcu spoiny

Pustki będące niezgodnościami wewnętrznymi nie są tak groźne, jak te wychodzące na powierzchnię. Naprawę złączy z występującymi wadami takimi jak otwarte pustki (np. por lub wgłębienie w kraterze) można wykonać poprzez całkowite ich usunięcie mechaniczne na przykład poprzez szlifowanie i ponowne spawanie [7, 38].

1.1.3.3. WTRĄCENIA STAŁE.

Wtrącenia stałe to obce ciała; pozostałe w spoinie żużle, topik, obcy metal. Dzieli się je na metaliczne i niemetaliczne (żużle). Niezgodności nazywane wtrąceniami stałymi mogą występować wewnątrz spoiny lub na jej powierzchni (gdy ta jest niedostępna dla rutynowego czyszczenia). Wyróżnia się następujące obce ciała powstałe w spoinie wtrącenie żużla lub topnika które występują jako liniowe, odosobnione, gniazda, wtrącenie tlenków (zatrzymane w spoinie podczas krzepnięcia) mogą one występować jako liniowe pojedyncze, gniazda, warstewka tlenku; wtrącenia metaliczne (cząstka obcego metalu pozostała w spoinie) np. wolframu, miedzi lub innego metalu oraz żużle pochodzenia metalurgicznego takie jak: siarczki, węgliki, krzemiany czy fosforki [7, 38].

Żużel powstaje w wyniku topienia otulin elektrod, topnika, drutu proszkowego samo osłaniającego. Żużle są lżejsze od metalu i w postaci ciekłej chronią roztopiony metal jeziorka spawalniczego przed działaniem atmosfery. Żużle reagują z metalem i umożliwiają jego rafinację. Powstający podczas spawania żużel powinien charakteryzować się topliwością i małą przyczepnością do spoiny. Jest on wówczas łatwo usuwalny z powierzchni wykonywanych warstw lub ściegów. W praktyce jednak w zależności od gatunku otuliny lub topika, usuwanie żużla może być trudne. Przyczyną występowania wtrąceń żużla w spoinie może być również niska kultura pracy spawacza [15, 42]. Z parametrów spawania najwyraźniej uwidacznia się wpływ zbyt dużej prędkości spawania lub zastosowanie zbyt niskiego natężenia prądu spawania. Zanieczyszczone brzegi elementów spawanych, głębokie wżery na tych brzegach, zbyt mały kąt ukosowania rowka spawalniczego stanowią mechaniczne zakotwiczenie resztek żużla lub topika i wspomagają ich zatrzymanie w spoinie [7]. Na rysunku 1.12 pokazano liniowe wtrącenia żużla.



Rys. 1.12 Szkic liniowych wtrąceń żużla w spoinie

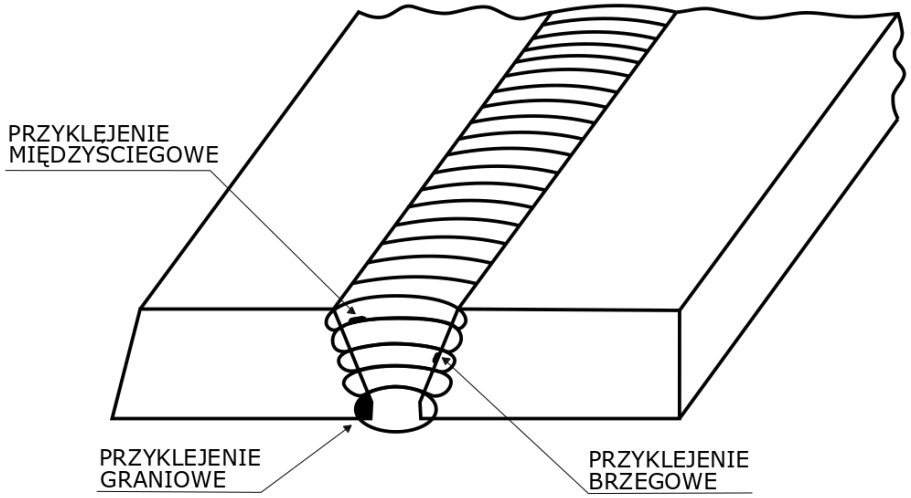
Wtrącenia stałe w spoinie mogą występować w postaci wtrąceń lub warstw tlenków. Zwłaszcza podczas spawania aluminium i jego stopów, przy niewystarczającym zabezpieczeniu przed działaniem atmosfery, na powierzchni kropel ciekłego metalu powstaje błonka (warstewka) tlenkowa. Błona ta zatrzymana w spoinie, bardzo obniża jej wytrzymałość i udarność [50, 7].

Cząstki obcego metalu pozostałe w spoinie stanowią wtrącenia metaliczne. Wyróżnia się wtrącenia wolframu, miedzi oraz innych metali (np. cynku, kadmu, aluminium itp.). Wtrącenia wolframu najczęściej występują podczas spawanie elektrodą nietopliwą w osłonie gaz obojętnego (TIG). Generowane są nadmiernym natężeniem prądu podczas spawania, złą jakością elektrody lub przypadkowym jej zanurzeniem w jeziorku spawalniczym. Oderwane kawałeczki elektrody nie ulegają stopieniu w temperaturze jeziorka spawalniczego tworząc, po jego zakrzepnięciu wtrącenia stałe. Wtrącenia miedzi w spoinie pochodzą przeważnie z powłok ochronnych drutów spawalniczych oraz podkładek i nakładek formujących grań lub lico spoiny. Miedź może penetrować granice ziaren stali nagrzewanej do wysokiej temperatury stanowiąc przyczynę pęknięć gorących wykonywanych złącz. W podobny sposób oddziaływają wtrącenia innych metali np. podczas spawania złączy metalowych z pokryciami ochronnymi z cynku, kadmu, aluminium itp. [15, 50].

Występujące w złączach punktowe wtrącenia stałe nie są zbyt groźne. Natomiast wtrącenia płaskie mogą powodować duże zagrożenie dla złącza. Po zdiagnozowaniu rozległych wtrąceń w złączu spawanym (np. badaniami radiograficznymi) trzeba wykonać naprawę. Powinno się wtedy usunąć, najlepiej mechanicznie, metal w spoinie z pewnym zapasem dającym zabezpieczenia na pełne usunięcie wady i ponowne wykonanie w tym miejscu spoiny zgodnie z kwalifikowaną technologią spawania [42, 7, 38].

1.1.3.4. PRZYKLEJENIE

Przyklejeniem określa się brak połączenia metalicznego (stopienia) pomiędzy materiałem spoiny a materiałem podstawowym oraz pomiędzy poszczególnymi warstwami lub ściegami spoiny (ciekłe stopiwo nie przetapia ścianek materiału spawanego a tylko przylegnie do nich). Rozróżnia się trzy podstawowe przyklejenia (rysunek 1.13): brzegowe, międzyściekowe, graniowe (według normy PN – EN ISO 6520 – 1) [42, 38, 14].



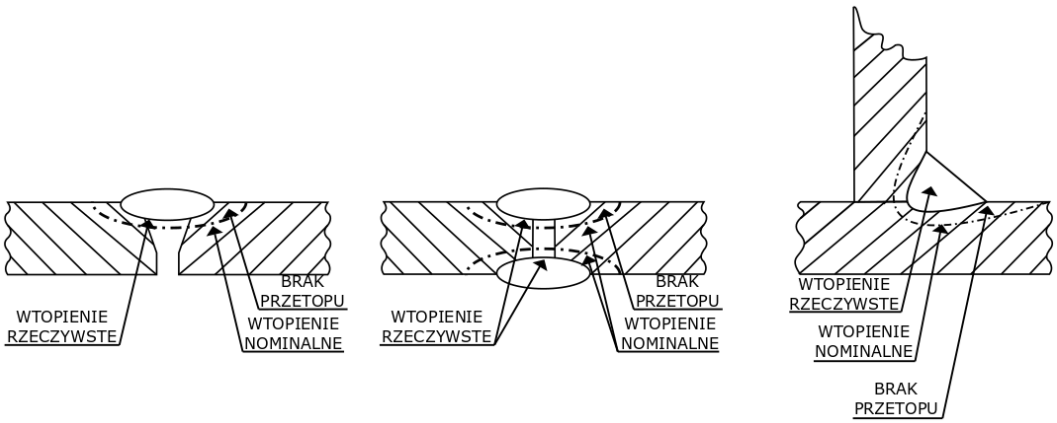
Rys. 1.13 Rodzaje przyklejeń

Przyklejenia występują zarówno w spoinach czołowych jak i pachwinowych. Przyklejenia należą do niezgodności płaskich a zatem stanowią bardzo ostre karby geometryczne spiętrzające naprężenia. Spowodowane są doprowadzeniem za małej ilości ciepła, niewystarczającej do nadtopienia brzegu rowka spawalniczego lub uprzednio ułożonej warstwy. Przyczyny powstania przyklejeń to spawanie małym natężeniem prądu przy dużej prędkości (niska energia liniowa łuku), niewłaściwa technika spawania (np. jednostronne pochylenie elektrody), obecność trudnotopliwych związków (tlenki, żelazowolfram) na powierzchniach łączonych. Zastosowanie elektrody o zbyt małej średnicy i dużego natężenia prądu powoduje szybsze stapianie się elektrody niż materiału spawanego i również prowadzi do powstania przyklejeń. Za mała prędkość spawania może powodować napływanie ciekłego metalu o dużej objętości na niedostatecznie nagrzany obszar rowka lub wcześniej ułożonej warstwy, izolując oddziaływanie ciepła łuku spawalniczego i powodując powstanie przyklejeń. Zbyt małe natężenie przepływu gazu ochronnego może być przyczyną niestabilnego jarzenia się łuku oraz utleniania powierzchni rowka spawalniczego (co prowadzi do powstania przyklejeń). Podczas wykonywania spoin pachwinowych znaczny wpływ na powstanie przyklejeń wywiera technika spawania, a w szczególności kąt nachylenia palnika lub elektrody względem osi symetrii. Duży wpływ na powstanie przyklejeń ma również niewłaściwa jakość łączonych powierzchni występowanie na ich trudnotopliwych tlenków, obecność smaru, farby, rdzy, resztek żużla [15, 50, 42, 7, 38].

Naprawa złącza, w którym występuje przyklejenie może być przeprowadzona przez jego całkowite usunięcie, najlepiej poprzez szlifowanie lub inną obróbkę mechaniczną i ponowne spawanie. Ważne jednak jest, aby dokładnie zlokalizować (np. za pomocą badania ultradźwiękowego) wystąpienie przyklejenia by móc go w całości usunąć. Brzegi wybrania mechanicznego takiego przyklejenia odpowiednio się ukosuje. Spawanie powinno odbywać się zgodnie z kwalifikowaną procedurą naprawy [38].

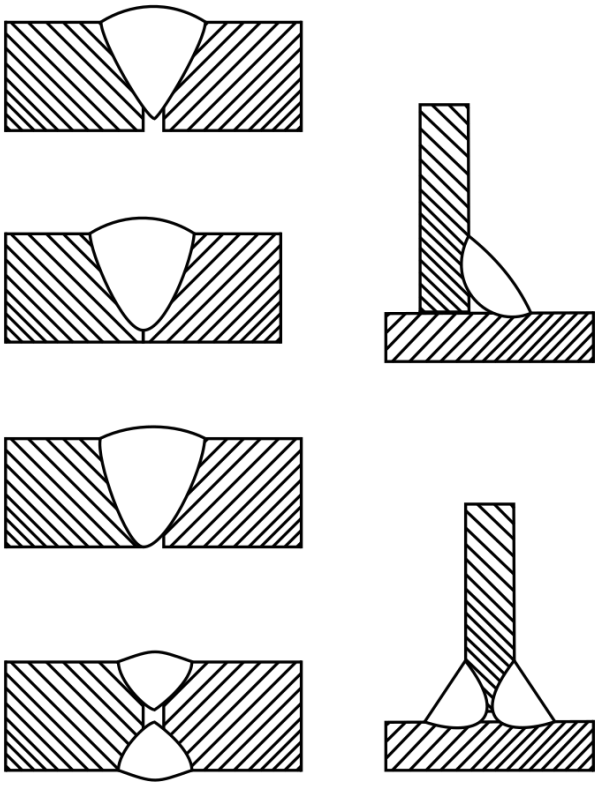
1.1.3.5 BRAK PRZETOPU

Brak przetopu objawia się niestopieniem brzegów łączonych elementów. Zgodnie z definicją podaną w normie PN – EN ISO 6520 – 1, brak przetopu (niepełny przetop) to różnica między rzeczywistym a nominalnym przetopem. Do niezgodności zwanej brakiem przetopu dochodzi, gdy wykona się spoinę o głębokości mniejszej niż założona w projekcie. Może ona wystąpić w grani spoiny jednostronnej lub dwustronnej oraz w złączach kątowych ze spoinami pachwinowymi [7, 38, 14]. Na rysunku 1.14 przedstawiono schematycznie brak przetopu w złączach spawanych.



Rys. 1.14 Brak przetopu w złączach spawanych

Do wad spawalniczych klasyfikuje się również niepełne przetopienie grani, czyli brak przetopienia jednej lub obu powierzchni w obszarze grani spoiny (rysunek 1.15).



Rys. 1.15 Brak przetopu i niepełne przetopienie grani w jednostronnych i dwustronnych złączach spawanych.

Skutkiem braku przetopu jest zmniejszenie przekroju spoiny i osłabienie wytrzymałości złącza spawanego. Do najczęściej występujących przyczyn braku przetopu zalicza się: niewłaściwe przygotowanie brzegów elementów do spawania, brak odstępu lub za mały odstęp między brzegami spawanych elementów, za wysoki próg rowka, zbyt mały kąt ukosowania rowka, nieukosowanie elementów o grubości powyżej 4 mm, zbyt szybkie tempo spawania lub zbyt mała wydajność palnika gazowego, niewłaściwa technika spawania polegająca na nieprowadzeniu przy spawaniu otworka (tzw. oczka). Jest to groźna niezgodność, kiedy wystąpi w złączu jednostronnym. Powoduje wtedy niesymetryczne obciążenia złącza doczołowego i dodatkowe naprężenia od zginania. [15, 7, 14].

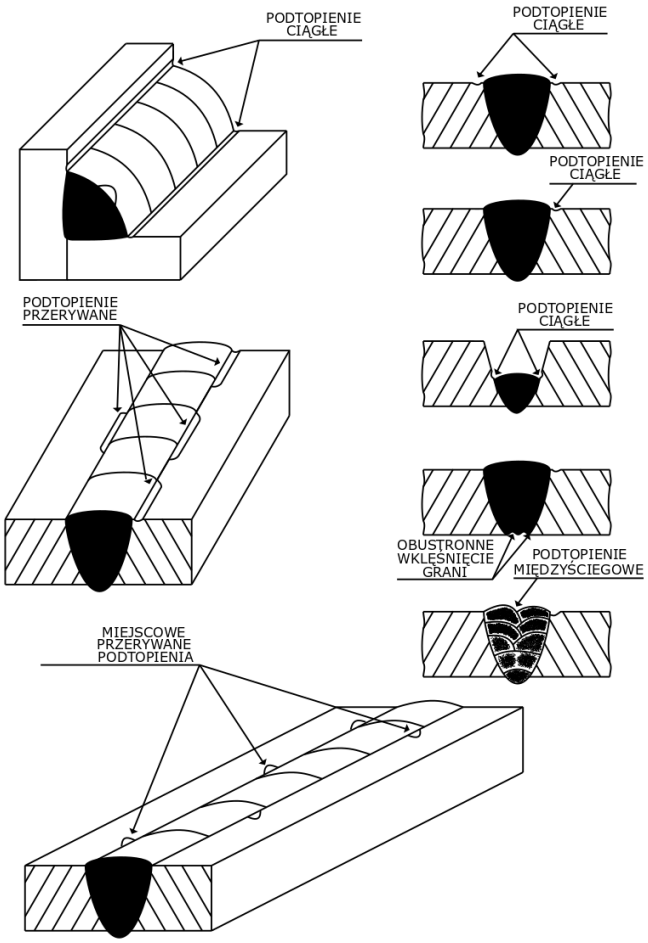
Naprawa złącza ze spoiną jednostronną, w której występuje brak przetopu zwykle polega na mechanicznym usunięciu spoiny lub poprzez żłobienie i na wykonaniu spoiny z prawidłowym przetopem. Jeżeli istnieje odpowiedni odstęp do grani spoiny można ją wyszlifować lub żłobić, a następnie podpawać. Technologia naprawy nie powinna odbiegać od tej, która została wybrana do wykonania złącza [38].

1.1.3.6. NIEZGODNOŚCI KSZTAŁTU I WYMIARU ZŁĄCZA

Niezgodności kształtu i wymiaru złącza związane są z niewłaściwym kształtem zewnętrznych powierzchni spoiny, niewłaściwej geometrii lub wymiarów złącza spawanego. Sposób przenoszenia obciążenia konstrukcji spawanej decydują o tym, które z nich są dopuszczalne. Wady spawalnicze związane z niewłaściwym kształtem zewnętrznych powierzchni spoiny lub niewłaściwej (wadliwej) geometrii złącza są jedną z liczniejszych grup wad. Wady zaliczane do grupy niewłaściwego kształtu i wymiaru złącza to: podtopienia, nadmierny nadlew lica, nadmierna wypukłość spoiny, nadmierny przetop, niewłaściwy kształt spoiny, nawis, przesunięcie brzegów, odkształcenia kątowe, zwis, niezupełne wypalenie rowka spawalniczego, nadmierna asymetria spoiny pachwinowej, nieregularna szerokość, nierówność lica, wklęśnięcie grani, porowatość grani, niewłaściwe ponowne rozpoczęcie spawania, nadmierne odkształcenia, niewłaściwe wymiary spoiny.

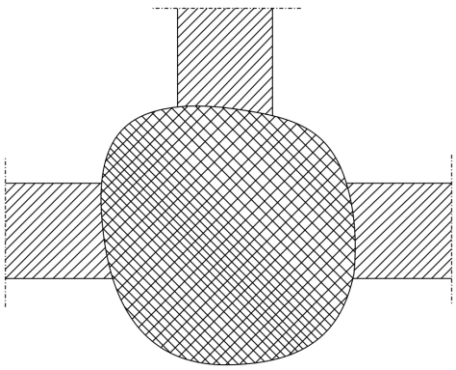
Powstanie niezgodności kształtu i wymiarów złącza mogą spowodować następujące czynniki: niewłaściwe parametry spawania, nieprawidłowe wzajemne ustalenie elementów spawanych i ich zamocowanie, niewłaściwa kolejność i kierunek spawania, niedbałość spawacza, mogąca doprowadzić do pozostania w strefie złącza spoin montażowych, śladów zajarzenie łuku i tym podobnych.

Podtopienie to nierównomierny rowek w materiale podstawowym przy brzegu ściegu. Podtopienie może występować jako podtopienie ciągłe, podtopienie przerywane, obustronne wklęśnięcie grani, podtopienie międzyściekowe (występujące w kierunku wzdłużnym między ściegami spoiny), miejscowe przerwanie podtopienia. Na rysunku 1.16 przedstawiono przykłady występowania podtopień w złączach spawanych. Przyczyny powstania podtopień to zbyt duże natężenie prądu spawania lub za mała końcówka, nieumiejętne prowadzenie elektrody lub palnika, zły kąt nachylenia elektrody. Podtopienia zmniejszają przekrój złącza. Podczas eksploatacji konstrukcji przy zmiennych obciążeniach wskutek koncentracji naprężeń, mogą być ogniskiem przełomu zmęczeniowego.



Rys. 1.16 Podtopienia w złączach spawanych

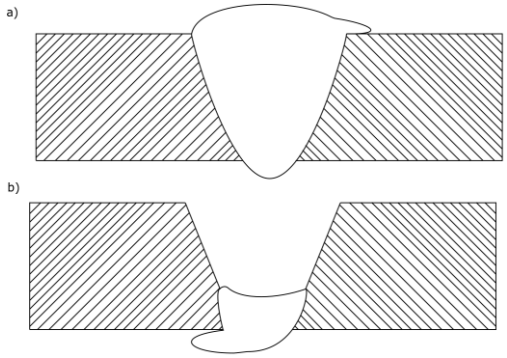
Nadmierny nadlew lica to wada charakteryzująca się nadmierną wysokością spoiny od strony lica w złączu doczołowym. Czynnikami powstania nadmiernego nadlewu lica to nieumiejętne spawanie przy zbyt małym natężeniu prądu i braku rozprowadzenia ostatniej warstwy. Nadmierna wypukłość spoiny to nadmierna ilość metalu spoiny w warstwie licowej spoiny pachwinowej. Przyczyny powstania tej wady są analogiczne jak w przypadku nadmiernego nadlewu lica. Nadmierny przetop to nadmiar metalu spoiny wystający z jej grani. Nadmierny przetop może występować jako wyciek miejscowy, wyciek ciągły, przetopienie na wylot (rysunek 1.17). Nadmierny przetop występuje głównie w jednostronnych złączach doczołowych. Przyczyny powstania nadmiernego przetopu to: nieumiejętność spawania, zbyt duży odstęp między łączonymi elementami, zbyt duże natężenie prądu spawania lub zbyt duży palnik gazowy, zbyt mała prędkość spawania.



Rys. 1.17 Przetopienie na wylot

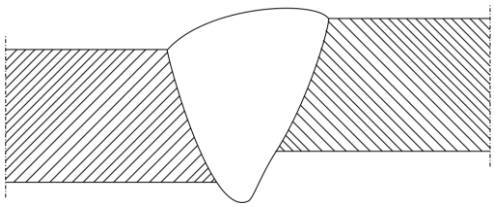
Niewłaściwy kształt spoiny określony jest zbyt małym kątem α między płaszczyzną powierzchni materiału podstawowego a płaszczyzną styczną do lica spoiny w miejscu przejścia. Wada niewłaściwy kształt spoiny występuje bardzo rzadko. Przyczyny jej powstania to stosowanie zbyt małej prędkości spawania i zbyt niskiego napięcia łuku lub stosowania podkładek (nakładek) formujących (np. w przypadku spawania łukiem krytym lub przy spawaniu żużlowym).

Nawis to nadmierna ilość stopionego metalu wtopiona do powierzchni materiału podstawowego (rysunek 1.18). Wada to może być umiejscowiona zarówno od strony lica, jaki i od strony grani. Wada typu nawis tworzy się w spoinach czołowych w wyniku spłynięcia metalu spoiny przy stosowaniu zbyt dużego natężenia prądu i małej prędkości spawania. Przyczyną powstania wady typu nawis jest przede wszystkim, niestaranne przygotowanie brzegów elementów do spawania lub niewłaściwe opracowana instrukcja spawania.



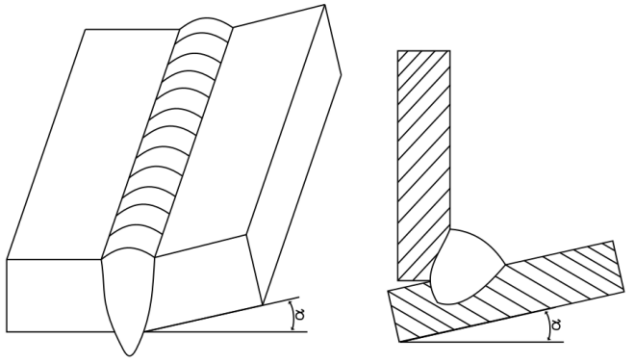
Rys. 1.18 Spoiny czołowe z nawisem a) lica spoiny, b) grani spoiny

Wada spawalnicza przesunięcie brzegów to przesunięcie pomiędzy spawanymi elementami, których powierzchnie pozostają wzajemnie równoległe, ale nie znajdują się na wymaganej tej samej płaszczyźnie. Wadę typu przesunięcie brzegów łączonych elementów pokazano na rysunku 1.19.



Rys. 1.19 Przesunięcie brzegów łączonych elementów.

Odkształcenie kątowe to przesunięcie między spawanymi elementami powodujące brak równoległości i ich powierzchni lub niedotrzymanie wymaganego kąta między tymi powierzchniami. Rysunek 1.20 przedstawia odkształcenia kątowe złączy spawanych.

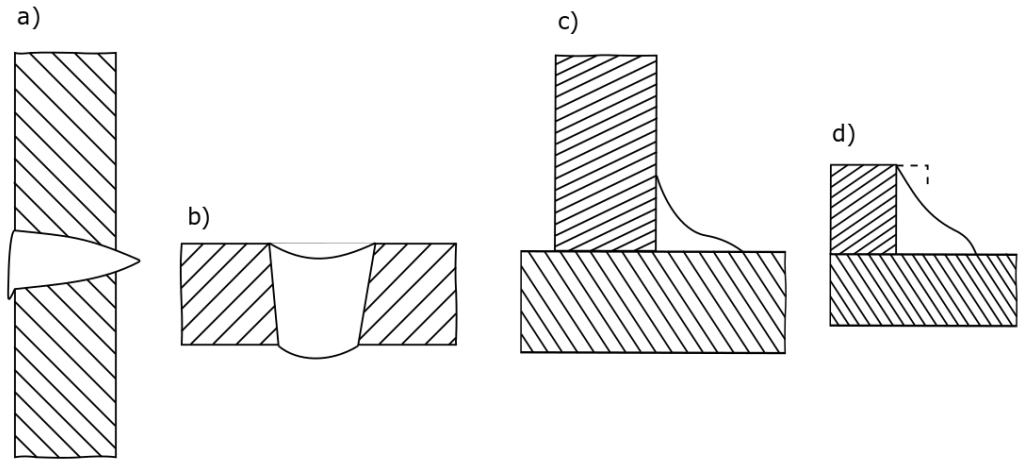


Rys. 1.20 Odkształcenie kątowe złączy spawanych

Czynnikiem wystąpienia odkształceń kątowych jest brak wstępnego odkształcenia elementów spawanych przy wykonywaniu spoin jednostronnych, stosowanie spoin jednostronnych (np. Y) zamiast spoin dwustronnych (np. X), zbyt duży kąt ukosowania brzegów przeznaczonych do spawania, brak sztywnego umocowania elementów spawanych. Wielkość odkształcenia kątowego zależy od grubości łączonych elementów, metody wykonywania, sposobu układania poszczególnych ściegów oraz ich liczby.

Większość niezgodności kształtu można usunąć lub naprawić poprzez: napawanie dodatkowej warstwy na istniejącą spoinę, usunięcie nadmiaru metalu w spoinie poprzez obróbkę mechaniczną lub żłobienie i ponowne spawanie, prostowanie złącza (termicznie lub na zimno, zależnie od gatunku materiału).

Wadą typu zwis nazywamy obniżenie się metalu spoiny wskutek ciężaru. Wady w postaci zwisów powstają przede wszystkim, z powodu niskich umiejętności spawacza oraz nadmiernego prądu spawania, zbyt dużej prędkości spawania, za wysokiego napięcia łuku. Spoina z wadą typu zwis charakteryzuje się dużą koncentracją naprężeń, a więc mniejszą nośnością, co obniża własności eksploatacyjne złączy w konstrukcjach spawanych. Rysunek 1.21 przedstawia przykłady zwisów w złączach spawanych.

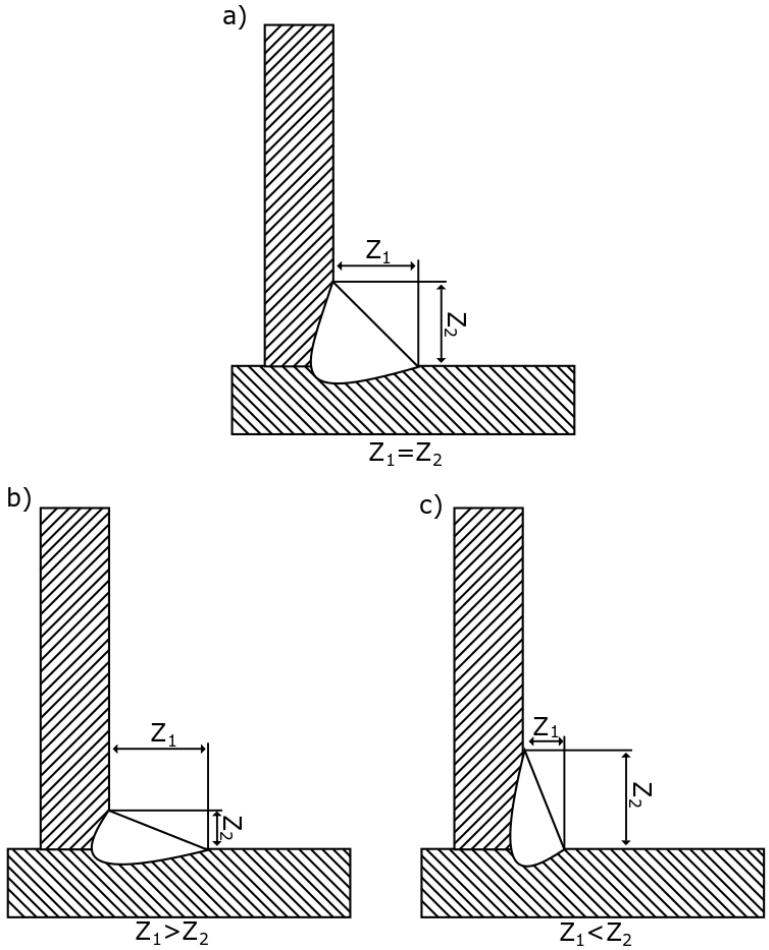


Rys. 1.21 Przykłady zwisów w złączach spawanych a – w złączach doczołowych wykonanych w pozycji naściennej, b – w złączach doczołowych wykonywanych w pozycji podolnej, c – w złączu ze spoiną pachwinową w pozycji nabocznej, d – na przetopionej krawędzi spoiny, e – widok zwisu w złączu doczołowym wykonywanym w pozycji podolnej

Wadą typu przepalenie nazywamy zapadnięcie się jeziorka spawalniczego powodujące powstanie otworu na wskroś w spoinie. Przypalanie przeważenie występuje podczas wykonywania złączy z cienkich blach. Przyczynami powstania przypalenia są nieumiejętność spawania, przy zbyt dużym natężeniu prądu spawania lub zbyt dużej końcówce palnika i nagłym zmniejszeniu prędkości spawania. Przypalenie obniża własności wytrzymałościowe złącza i estetyczny wygląd spawanego elementu konstrukcyjnego.

Wada typu niezupełne wypalenie rowka spawalniczego to podłużne wgłębnie lica spoiny, ciągłe lub miejscowe, spowodowane niewystarczającą ilością metalu spoiny. Przyczynami powstania niezupełnego wypalania jest niestaranność i niska kultura techniczna pracy spawaczy.

Koleją wada to nadmierna asymetria spoiny pachwinowej (niejednakowa długość boków) została pokazana na rysunku 1.22. Przyczynami powstania nadmiernej asymetrii spoiny pachwinowej jest oddziaływanie siły ciężkości i nieumiejętne prowadzenia elektrody lub palnika (zły kąt pochylenia w bok przez spawacza).



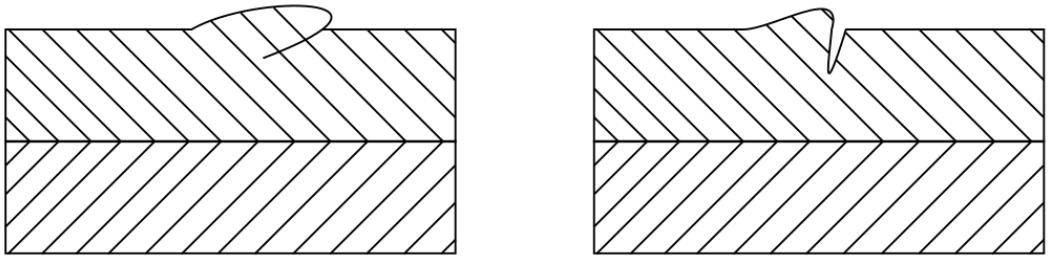
Rys. 1.22 Złącza ze spoinami pachwinowymi a) spoina wykonana poprawnie przyprostokątne Z1 i Z2 są sobie równe b), c) spoiny wykonane błędnie: przyprostokątne Z1 i Z2 znacznie się od siebie różnią

Nieregularna szerokość spoiny (nadmierne zmiany szerokości spoiny) powstaje w wyniku nieumiejętnego spawania, polegającego na naprzemiennie zbyt szerokim i zbyt wąskim rozprowadzaniu lica, próby zaspawania podtopień lub zbyt dużego natężenia prądu spawania.

Wklęśnięcie grani to wgłębienie w grani spowodowane skurczem spoiny czołowej. Przyczynami powstania wady typu wklęśnięcie grani są nieprawidłowe złożenie elementów do spawania polegające na pozostaniu między nimi zbyt dużego odstępu, zbyt duża prędkość spawania oraz zbyt krótki wolny wylot elektrody w przypadku spawania w osłonie gazów ochronnych.

Porowatość grani w niektórych przypadkach na przykład przy spawaniu gazowym płomieniem utleniającym, przy łączeniu stali wysokostopowych bez właściwej osłony grani, może powstać wada w postaci gąbczastego metalu w grani. Zjawisko to powstało w wyniku tworzenia się pęcherzy w metalu spoiny w momencie krzepnięcia. Zapobieganie powstaniu wady typu porowatość grani polega na zachowaniu wysokiej czystości brzegów elementów przeznaczonych do spawania oraz na przestrzeganiu instrukcji technologicznej spawania.

Kolejną wadą spawalniczą zaliczaną do grupy niewłaściwego kształtu i wymiaru złącza jest niewłaściwe ponowne rozpoczęcie spawania. Jest to miejscowa nieregularność powierzchni w miejscu ponownego rozpoczęcia spawania, która może znajdować się zarówno w licu jak i w grani spoiny. Wadę typu niewłaściwe ponowne rozpoczęcie spawania przedstawiono na rysunku 1.23.



Rys. 1.23 Niewłaściwe ponowne rozpoczęcie spawania

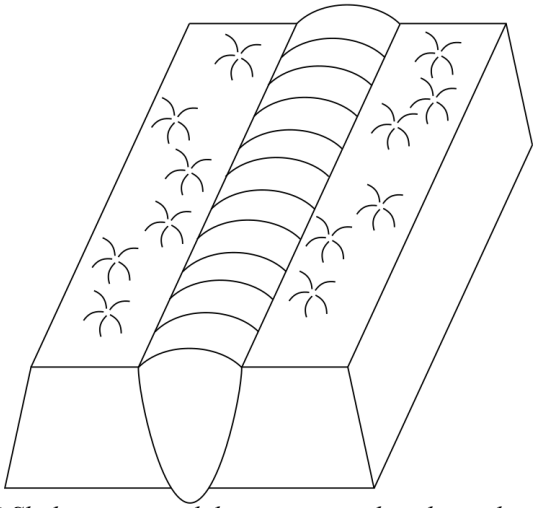
Nadmierne odkształcenie to odchyłki wymiarów spowodowane skurczem i odkształceniem podczas spawania. Niewłaściwe wymiary spoiny dotyczą odchyłek od wymaganych jej wymiarów. Do tej wady zalicza się nadmierną grubość spoiny, nadmierną szerokość spoiny, za małą grubość spoiny pachwinowej, nadmierną grubość spoiny pachwinowej.

Naprawa istniejących lokalnych niezgodności kształtu, takich jak: podtopienia, niewłaściwy kształt lica lub wklęśnięcie grani, może zostać przeprowadzona przez szlifowanie lub przez żłobienie i ponowne spawanie [38].

1.1.3.7 POZOSTAŁE WADY SPAWALNICZE

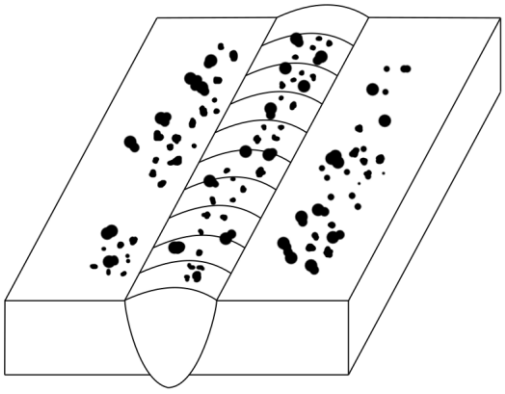
Do wad spawalniczych różnych zalicza się wady stanu powierzchni, kształtu zewnętrznego lub geometrii złącza. Są one wykrywane za pomocą badań wizualnych i prostych pomiarów. Wady zaliczane do grupy wad spawalniczych różnych to: ślady zajarzenia, rozpryski, naderwania powierzchni, ślady szlifowania i ślady dłutowania, podszlifowania.

Ślady zajarzenia pokazane na rysunku 1.24 to miejscowe uszkodzenie powierzchni materiału podstawowego w sąsiedztwie spoiny spowodowane zajarzeniem łuku poza rowkiem spawalniczym. Przyczyną powstania tych wadą są niskie umiejętności spawaczy lub ich brak staranności podczas spawania. Zajarzenie łuku poza spoiną jest bardzo niebezpieczne (zwłaszcza w stali o podwyższonej lub wysokiej wytrzymałości) ponieważ w miejscu zajarzenia może dojść do podhartowania a w jego wyniku do generowania mikropęknięć.



Rys. 1.24 Slady zajarzenie łuku na powierzchni złącza doczołowego

Wadą typu rozprysk określa się cząstki stopiwa lub spoiwa rozpryskane w czasie spawania i przyklejające się do powierzchni materiału podstawowego lub skrzepniętej spoiny. Rozpryski na powierzchni złącza doczołowego pokazano na rysunku 1.25.

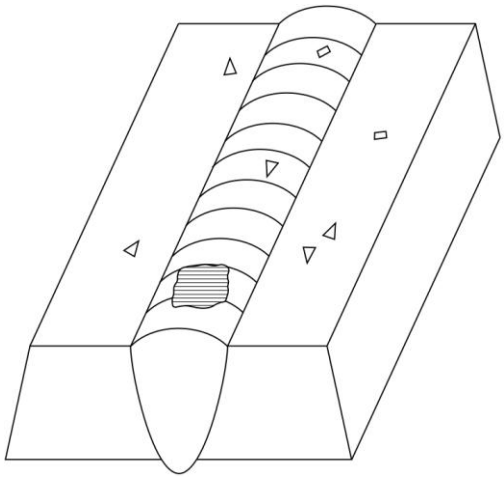


Rys. 1.25 Rozpryski na powierzchni złącza doczołowego

Przyczyną powstania rozprysku jest stosowanie zbyt dużego natężenia prądu przy spawaniu elektrycznym, zbyt mała indukcyjność przy spawaniu metodą MAG, złe uregulowanie płomienia gazowego, nieodpowiedni skład gazów osłonowych, złe własności dynamiczne źródła prądu, zbyt krótki łuk, zanieczyszczenie gazów osłonowych, otuliny elektrod lub drutów elektrodowych.

Kolejna wada zaliczania do grupy wad spawalniczych różnych to naderwanie powierzchni. Podczas składania zespołów i podzespołów konstrukcyjnych podczas montażu stosuje się bardzo często elementy pomocnicze takie jak przyspawane uchwyty, jarzma itp. Po zakończeniu elementy te usuwa się łącznie z mocującymi je spoinami na przykład przez odłamanie. Nieumiejętne odłamanie elementów przyspawanych na czas montażu może spowodować uszkodzenie powierzchni poprzez jej naderwanie.

Wadą zaliczaną do grupy wad spawalniczych różnych są również ślady szlifowania i ślady dłutowania (rysunek 1.26) zalicza się do niej wszelkie przypadki miejscowych uszkodzeń mechanicznych złączy spawanych w wyniku nieumiejętnego użycia narzędzi mechanicznych przy obróbce tych złączy (np. szlifierki, dłuta, przecinaka, młotka spawalniczego itp.).



Rys. 1.26 Ślady szlifowania oraz ślady dłutowania na powierzchni złącza doczołowego

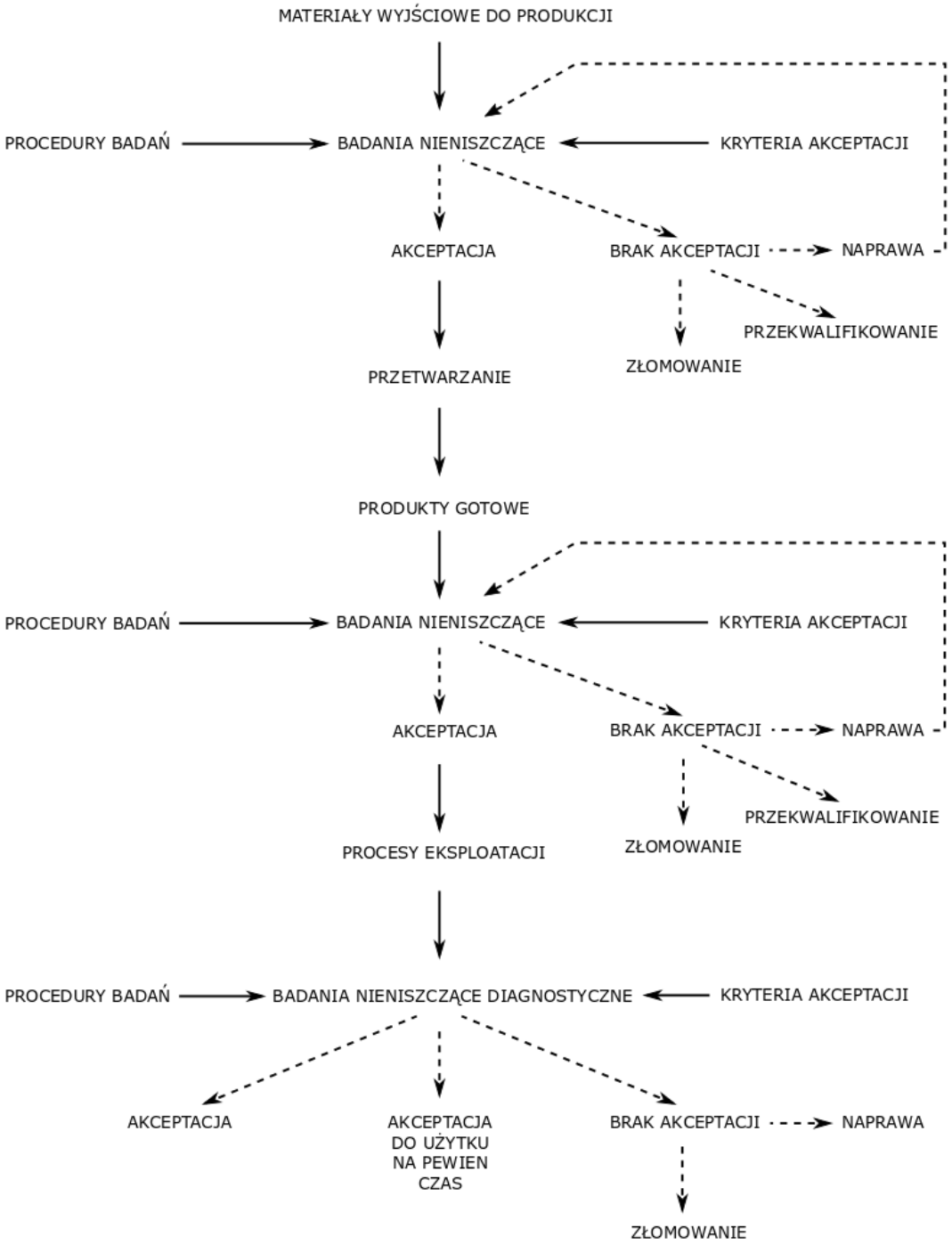
Podszlifowanie to zmniejszenie grubości metalu przez jego nadmierne szlifowanie. Wada podszlifowania zmniejsza przekrój nośny złącza. Miejsce z tą wadą cechuje się dużym spiętrzeniem naprężeń. Podszlifowanie zmniejsza własności eksploatacyjne złącza spawanego. Niedopuszczalne podszlifowania muszą być napawane a następnie obrobione mechanicznie aż do wyrównania uszkodzonej powierzchni.

1.2. KOMERCYJNE METODY BADAŃ NIENISZCZĄCYCH

Badania nieniszczące NDT są badaniami, dzięki którym można uzyskać informacje o stanie, właściwościach i ewentualnych wadach badanego obiektu bez integrowania w jego cechy użytkowe (bez naruszenia jego spójności ani pogorszenia cech funkcjonalnych czy użytkowych). Obiektami technicznymi badań nieniszczących są między innymi połączenia przede wszystkim złącza spawane, ale też połączenia klejone, zgrzewane i lutowane oraz obiekty wykonane z materiałów kompozytowych [18, 17, 46]. Celem badań nieniszczących jest określenie rodzaju, wielkości, miejsca występowania wad w celu stwierdzenia ich dopuszczenia lub konieczności ich usunięcia, o ile to możliwe [7]. Badania nieniszczące wykorzystywane są w procedurach oceny niezawodności oraz jakości produktów zarówno będących w trakcie procesu technologicznego jak i gotowych oraz jako badania eksploatacyjne w działających urządzeniach i instalacjach

Badania NDT są stosowane w celu osiągnięcia odpowiednio wysokiego poziomu jakości i bezpieczeństwa maszyn i urządzeń przemysłowych. Wykonuje się je w przemyśle oraz w laboratoriach ośrodków naukowych podczas projektowania i określania własności nowych materiałów i konstrukcji. Na szybki rozwój i wręcz powszechne stosowanie w przemyśle badań nieniszczących wpływ ma dużo czynników, ale główne to ekonomia i bezpieczeństwo. Kwestie związane z bezpieczeństwem zdecydowały o rutynowym stosowaniu badań NDT w: lotnictwie, astronautyce, przemyśle wydobywczym, energetyce jądrowej, przemyśle stoczniowym). Niewykonywanie nieniszczących badań diagnostycznych eksploatowanych obiektów technicznych (np. samolotów, statków, urządzeń dźwigowych) bądź przeprowadzanie ich niezgodnie z przyjętymi zasadami, może prowadzić do katastrof i awarii [42, 7, 38]. Badania nieniszczące można prowadzić na różnych etapach wytwarzania złączy spawanych: przed spawaniem, w trakcie i po spawaniu. Schematycznie miejsce badań nieniszczących w procesach wytwarzania i eksploatacji obiektów pokazano na rysunku 1.27.

Rozwój badań NDT polega na uzyskaniu możliwości wykrywania coraz mniejszych wad, pozyskiwaniu większej ilości informacji o nich oraz ograniczeniu niebezpieczeństwa operatorów podczas ich wykonywania (dotyczy to zarówno dotychczas stosowanych metod i ich zastosowań oraz nowo wprowadzanych metod badań). Współcześnie zagadnienie jakości jest bardzo istotne poprzez powszechność i konsekwencje jakie ze sobą niesie przemysł i usługi. Rozwój współczesnego przemysłu określił nowe bardzo wygórowane wymagania wobec wytwarzanych materiałów i konstrukcji. Wymagana jest ich większa wytrzymałość i niezawodność, przy obniżeniu ciężaru i wysokiej odporności na działanie niepożądanych czynników zewnętrznych [45]. Obecnie bardzo ważnym zagadnieniem produkcji jest określenie właściwej relacji nakładów do zysku przy jednoczesnym zachowaniu cech wyrobu wymaganych przez odbiorców. Nie trzeba nikogo uświadamiać o tym jak bardzo istotne jest zachowanie odpowiedniej jakości wyrobów w celu prawidłowego funkcjonowania konstrukcji i instalacji. Szczególnie w spawalnictwie bardzo ciężko jest zapewnić wymaganą jakość ze względu na bardzo dużą liczbę czynników wpływających na własności produktu końcowego. Czynniki te generują naturalne zapotrzebowanie na nowe metody badań nieniszczących, które pozwalałby na dokładny pomiar procesów zachodzących podczas obciążenia materiału jak również na monitorowanie stanu konstrukcji w trakcie jej eksploatacji [45]. Komercyjnie stosuje się dużo metod badań nieniszczących, które uzupełniane są o nowo powstające techniki badań. Wykorzystuje się również badania łączące dwie lub więcej metody [19, 4]. W zastosowaniach przemysłowych korzysta się głównie z sześciu podstawowych metod badań: wizualnych (VT), penetracyjnych (PT), magnetyczno – proszkowych (MT), radiograficznych (RT), ultradźwiękowych (UT), prądami wirowymi (ET). Metodyka badań nieniszczących powinna być dobrana zgodnie z PN – EN ISO 17635.

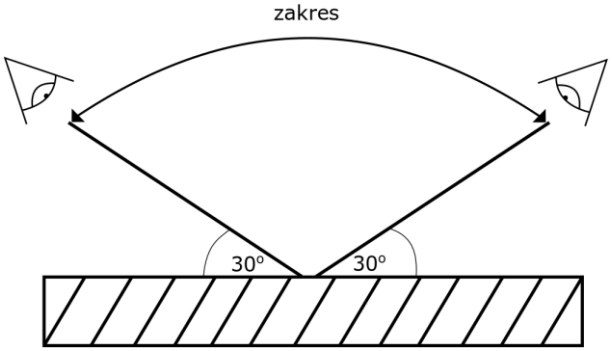


Rys. 1.27 Miejsce badań nieniszczących w procesach wytwarzania i eksploatacji obiektów.

1. ***Badania wizualne*** są podstawowym sposobem kontroli polegającym na obserwacji wzrokowej i pomiarach spoin. Badania wizualne obejmują sprawdzenie czy wszystkie spoiny wykonano i prawidłowo umiejscowiono, oględzinach powierzchni i kształtu, pomiarach grubości i długości spoiny, wykryciu wad powierzchniowych (np. podtopień, przyklejeń, odprysków, pęknięć, wżerów korozyjnych). Omawiana metoda badań (określana również oględzinami zewnętrznymi) jest traktowana priorytetowo w stosunku do każdego odbiorowego wyrobu spawalniczego. Badania te są realizowane przeważnie na złączach gotowych, ale można je prowadzić również w różnych fazach produkcji. Badania wizualne polegają na kontroli wzrokowej i/lub pomiarach elementów przygotowanych do spawania, sprawdzeniu poprawności ich

montażu oraz kontroli złączy po spawaniu. Za pomocą badań wizualnych można określić długość i głębokość wady oraz wymiary małych obiektów w różnych kierunkach. Możliwe jest wykrywanie pęknięć o głębokości od około 0,1mm, szerokości około 0,01 mm i długości około 0,1 mm [42]. Badania wizualne należy przeprowadzić zawsze przed wykonaniem badań innymi metodami NDT. Zalicza się je do tak zwanych metod badań powierzchniowych. Zasady i podział badań wizualnych określa norma PN-EN 13018. Badania wizualne dzielą się na bezpośrednie i zdalne. W badaniach bezpośrednich istnieje nieprzerwana ścieżka optyczna od oka obserwatora do badanego obszaru. Mogą one być wspomagane na przykład za pomocą lusterka, soczewki, endoskopu lub światłowodu. Badania wizualne zdalne są to badania, w których ścieżka optyczna od oka obserwatora do obszaru badanego jest przerwana. Badania wizualne zdalne obejmują zastosowanie fotografii, systemów video, systemów zautomatyzowanych i robotów [28]. Wyposażenie do badań wizualnych opisano w normie PN – EN 13927. W badaniach wizualnych stosuje się przyrządy i środki pomocnicze takie jak: szkła powiększające, przymiary liniowe i kątowe, spoinomierze, sprawdziany oraz bardziej zaawansowane i kosztowne boroskopy, endoskopy, wideoskopy, środki trawiące i identyfikatory światła. Badania wizualne złączy spawanych wykonuje się na zasadach zamieszczonych w normie PN – EN ISO 17637:2011.

W spawalnictwie badania wizualne polegają na oględzinach lica i grani spoiny oraz pomiarach spoiny. Odległość między okiem badającego a powierzchnią badaną nie może być większa niż 600 mm, przy kącie widzenia nie mniejszym niż 300 (rysunek 1.28). Zalecane natężenia oświetlenia na badanej powierzchni wynosi 500 luksów (minimum 350) [65]. Podczas badań wizualnych sprawdzeniu podlega również cała konstrukcja spawanego wyrobu. Pomiar wysokości i grubości spoiny wykonuje się spoinomierzem. Przed przeprowadzeniem badań wizualnych trzeba oczyścić obserwowaną powierzchnię z zanieczyszczeń (nie należy stosować obróbki mechanicznej np. szlifowania, frezowania).

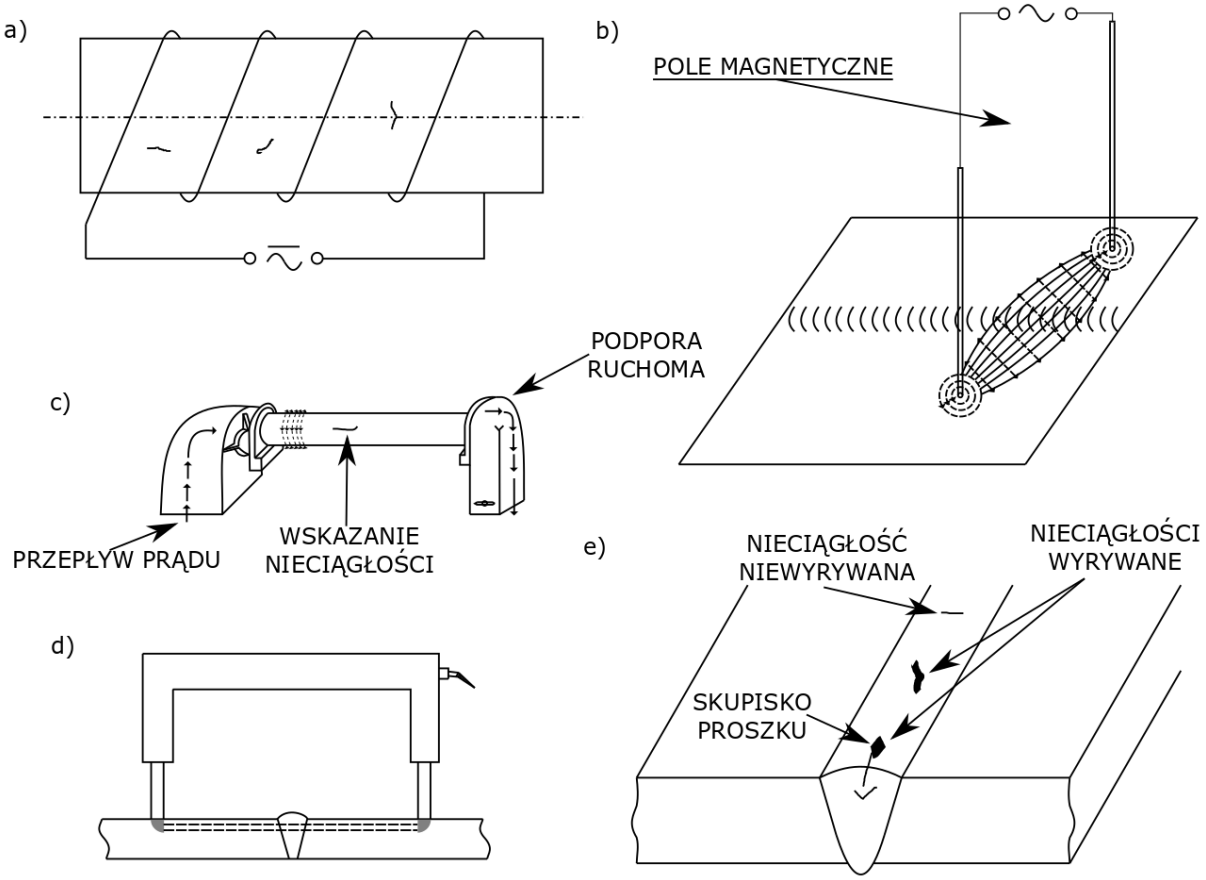


Rys. 1.28 Dostęp do miejsca realizacji badania metodą wizualną

Badania wizualne stosowane są do kontroli obiektów w procesie wytwarzania oraz podczas eksploatacji. Zalety omawianej metody badań to nieskomplikowana metoda przeprowadzenia badań oraz małe koszty ich przeprowadzenia, możliwość badania miejsc trudno dostępnych (stosując sondy endoskopowe o małej średnicy), możliwość stosowania metody do wszystkich materiałów. Wady to możliwość wykrywania tylko wad powierzchniowych, nie możliwość wykrywania wad zaciśniętych, brak trwałego zapisu potwierdzającego diagnozę badania, bardzo ważne podczas interpretacji wyników badań wizualnych jest doświadczenie operatora [50, 42, 7, 28, 38]. Badania wizualne nie nadają się jednak do zastosowań w systemach monitoringu (SHM) konstrukcji okrętowych.

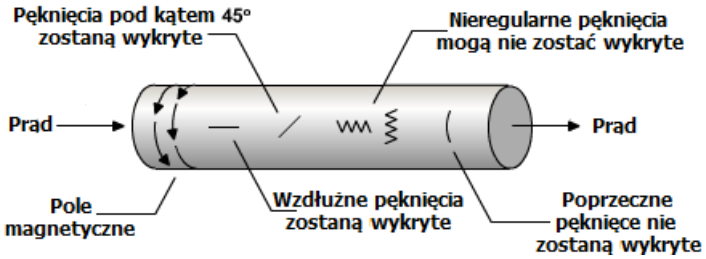
2. ***Badanie magnetyczno – proszkowe*** polega na pokryciu badanej powierzchni spoiny proszkiem ferromagnetycznym (metoda sucha) lub zawiesiną proszku w oleju (metoda mokra) i wytworzeniu pola magnetycznego na odcinku badanej spoiny. Metody magnetyczne wykorzystują zjawisko lokalnego rozproszenia pola magnetycznego lub zmiany przenikalności magnetycznej w miejscu wystąpienia wad. Wady wewnętrzne lub podpowierzchniowe są czynnikiem zmieniającym przebieg linii pola magnetycznego. Zakłócenie pola magnetycznego nazywane jest polem magnetycznym rozproszenia. Wielkość i ukształtowanie pola rozproszenia wynika z charakteru, wielkości, kształtu i orientacji wady względem linii sił wzbudzanego pola magnetycznego. Wady w spoinie spowodują zmiany linii pola magnetycznego - linie pola magnetycznego (a zarazem opiłki) skupią się wokół wad [15, 50, 7, 38]. Na rysunku 1.29 przedstawiono zasadę badań metodą magnetyczno – proszkową.

   Badania magnetyczno proszkowe zaliczane są do tak zwanych metod badań powierzchniowych. Badania magnetyczno - proszkowe stosuje się do badania materiałów ferromagnetycznych (przenikalność magnetyczna jest dużo większa od jedności): stali ferrytycznych, żeliwa, staliwa. Duża zaletą badań magnetyczno – proszkowych jest niski koszt ich przeprowadzenia Za ich pomocą niezawodnie wykrywane są wady powierzchniowe płaskie i wąskoszczelinowe mogą wskazywać również duże wady podpowierzchniowe (znajdujące się blisko powierzchni) [42, 7, 38].

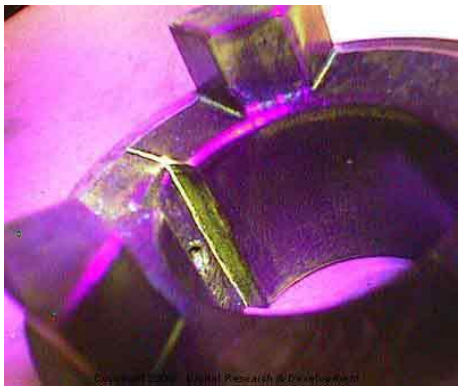


Rys. 1.29 Zasada badań magnetyczno – proszkowych a) wzbudzenie pola magnetycznego w pręcie lub rurze za pomocą solenoidu, b), c) wzbudzenie pola magnetycznego w złączu doczołowym za pomocą defektoskopu prądowego, d) wzbudzenie pola magnetycznego w złączu doczołowym za pomocą defektoskopu prądowego, d) wzbudzenie pola magnetycznego w złączu doczołowym za pomocą defektoskopu strumieniowego jarzmowego, e) wykrywanie niezgodności w zależności od ich położenia względem linii sił pola magnetycznego.

Metoda magnetyczna umożliwia wykrywanie wad typu: pęknięcia powierzchniowe, przyklejenia wychodzące na powierzchnie złączy, zawalcowania, naderwania, nawisy, rozwarstwienia, wgniecenia zgorzeliny, wtrącenia niemetaliczne (np. wtrącenia pasmowe żużla), pęcherze podpowierzchniowe, wżery korozyjne. Najlepsza wykrywalność wad omawianą metodą jest uzyskiwana, jeśli kierunek pola magnetycznego wzbudzonego w obiekcie jest prostopadły do występującej wady (rysunek 1.30.). Do badania połączeń spawanych z wymaganym poziomem akceptacji wymagana jest gładka powierzchnia i środki wykrywające: fluoryzujące lub barwne, ze środkiem kontrastowym. Przykład zastosowania metody magnetyczno-proszkowej przedstawiono na rysunku 1.31. Metodą magnetyczną podczas magnesowania prądem przemiennym istnieje możliwość lokalizacji wad położonych do głębokości około 2 mm, a magnesowania prądem stałym do głębokości około 3 mm. Można nią diagnozować pęknięcia o głębokości około 0,1 mm, szerokości od około 0,005 mm i długości os około 0,3 mm. W wyniku badania przeprowadzonego metodą magnetyczno – proszkową można oszacować w przybliżeniu długość wady nie ma możliwości określenia dokładnej jej głębokości. Badania metodą magnetyczno – proszkową można przeprowadzać w temperaturze pokojowej oraz w podwyższonych temperaturach 250 – 400 C. Metodą magnetyczno można przeprowadzać badania elementów pokrytych powłokami do 40 mikrometrów z materiałów nieferromagnetycznych [42, 7, 38].



Rys. 1.30 Wykrywalność wad a kierunkowość pola magnetycznego wytworzonego w czasie badania.

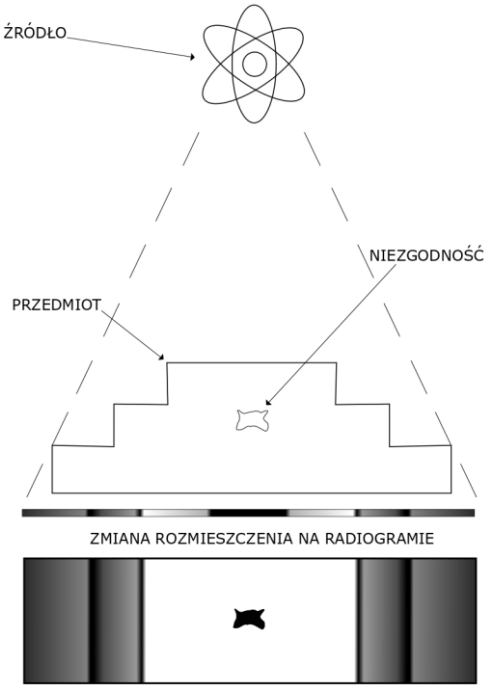


Rys. 1.31 Mokre fluorescencyjne cząsteczki magnetyczne wykazujące pęknięcie.

Badania magnetyczno – proszkowe prowadzi się na podstawie normy PN-EN ISO 17638. Wielkości dopuszczalnych wskazań (poziomy akceptacji) w przypadku połączeń spawanych określa norma PN –EN ISO 22278. Po przeprowadzeniu badania konieczna jest demagnetyzacja przedmiotu. Według zaleceń normy PN – EN ISO 17635 badania magnetyczno – proszkowe stosuje się głównie do spin pachwinowych [3, 41, 48].

Do zalet metody magnetyczno - proszkowej zalicza się: możliwość badania przedmiotów o skomplikowanej geometrii, możliwość realizacji badań w szerokim zakresie temperatur, duża skuteczność wykrywania wad wąskoszczelinowych, niski koszt przeprowadzenia badania; metoda ta jest łatwa i skuteczna do stosowania na dużych obiektach. Do wad opisywanej metody można zaliczyć: brak możliwości badań przedmiotów wykonanych ze stali austenitycznych, możliwość określenia jedynie orientacyjnej długość wady i brak możliwości precyzyjnego określenia głębokości wady. Ponadto zawiesiny magnetyczne pozostają w wadach i są bardzo trudne do usunięcia; często występuje konieczność oczyszczenia i rozmagnesowania elementu po przeprowadzeniu badania. W metodzie tej występują trudności w prawidłowej interpretacji obrazu magnetycznego między innymi przez występowanie wskazań wad pozornych. Niektóre środki do badań tą metodą są toksyczne; podczas wykonywania badań wydzielają się opary produktów ropy naftowej - istnieje możliwość podrażnienia dróg oddechowych personelu prowadzącego badanie oparami i pyłem suchym proszków magnetycznych a w związku z tym konieczna jest wentylacja pomieszczeń w których realizowane jest badanie. Innym ograniczeniem jest możliwość przeprowadzania badań w przypadku powierzchni chropowatych i nadmiernie nierównych [50, 42, 7, 38]. Badania metodą magnetyczno - proszkową nie nadają się do zastosowań w systemach monitoringu (SHM) konstrukcji okrętowych.

3. ***Badania radiograficzne*** polegają na naświetlaniu badanego przedmiotu promieniowanie rentgenowskim X z lamp rentgenowskich lub promieniowaniem gamma γ generowanym ze sztucznych źródeł izotopowych oraz rejestracji na radiogramach cieniowych obszarów wad [25, 68, 23, 27]. Metoda radiograficzną zalicza jest do tak zwanych metod badań objętościowych. Badania radiograficzne umożliwiają wykrywanie wewnętrznych, powierzchniowych i podpowierzchniowych wad. Stosując ją można wykrywać wady objętościowe oraz płaskie (można je diagnozować, jeżeli kierunek rozchodzenia się promieniowania jest zgodny z kierunkiem ich ułożenia i mają one odpowiednią szerokość i głębokość). Schematycznie proces realizacji badania radiograficznego przedstawia rysunek 1.32.



Rys. 1.32 Schematyczne przedstawienie realizacji badania radiograficznego

Wykrywanie wad za pomocą badań radiograficznych opiera się na zastosowaniu zdolności przenikania promieniowania przez przedmioty oraz różnicy w osłabieniu natężenia promieniowania, podczas jego przechodzenia przez badane przedmioty i ich wady. W badaniach rentgenowskich wykorzystywane są źródła promieniowania X (promieniowanie o częstotliwościach fal od 1016 do 1021 Hz) otrzymane przy użyciu lamp rentgenowskich o napięciach anodowych od 150 do 450 kV (przeważnie 220-300 kV), źródła wysokoenergetycznego promieniowania X (akceleratory liniowe, betatrony, mikrotrony), źródła promieniowania gamma γ izotopy promieniotwórcze promieniowanie o częstotliwości fal od 1018 do 1022 Hz. Źródła promieniowania (energię promieniowania) dopasowuje się do zamierzonego celu kontroli biorąc pod uwagę grubość, gęstość materiału oraz dokładność badania. [67, 10, 31, 85]

Miejsca wadliwe pochłaniają mniej promieniowania niż materiał jednorodny i są na błonie fotograficznej mniej zaciemnione. Radiogramy przedstawiają dwuwymiarowe cieniowe obrazy trójwymiarowych wad. Obraz wady zawiera jej kształt i wymiary w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozchodzenia się promieniowania. Zróżnicowanie zaciemnienia radiogramu w obszarze lokalizacji wady i miejscu bez wady obejmuje informacje o wysokości wady w płaszczyźnie równoległej do kierunku rozchodzenia się promieniowania. Metodą radiograficzną można wykrywać wady o wysokości od około 0,5% grubości elementu w kierunku rozchodzenia się promieniowania i szerokości rozwarcia od 0,1 mm [15, 50, 11, 42, 7, 38].

Zależnie od rodzaju stosowanego detektora promieniowania jonizującego rozróżnia się badania: radiograficzne (detektorem jest błona fotograficzna), radioskopowe (ekran fluorskopowy lub specjalna kamera telewizyjna), radiometryczna (mierniki natężenia promieniowania) oraz radiografię cyfrową (cyfrowa matryca rentgenowska) [38].

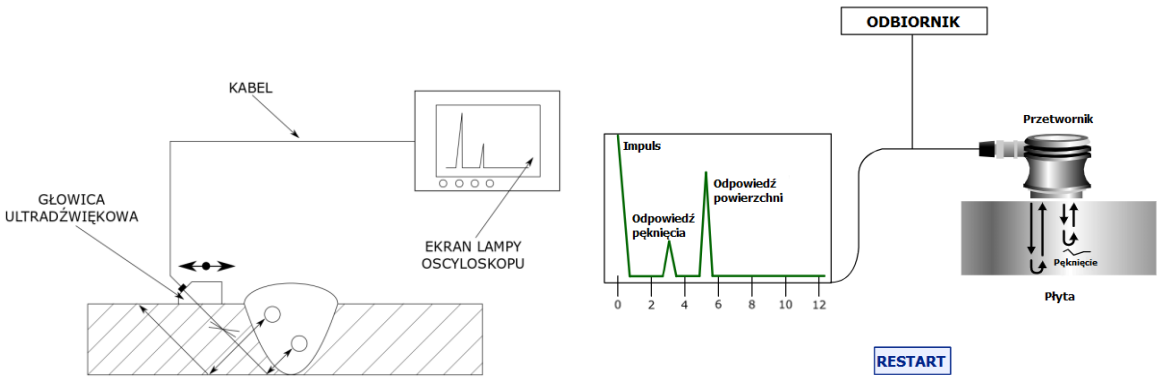
Badania radiograficzne wykorzystywane są do kontroli: odlewów, przedmiotów wykonanych z metali ferromagnetycznych i nieferromagnetycznych, z materiałów przewodzących i nieprzewodzących prądu elektrycznego. Można z jej wykorzystaniem przeprowadzać badania elementów wykonanych z stali ferrytycznych i austenitycznych, żeliwa szarego i sferoidalnego, aluminium i jego stopów, niemetali (wyrobów z tworzyw sztucznych, gumy, drewna, betonu, ceramik). Metodą radiograficzną przeprowadza się badania połączeń: spawanych, zgrzewanych i lutowanych. Korzystanie z metody radiograficznej zalecane jest dla złączy o skomplikowanym kształcie, małej grubości np. złączy obwodowych rur o małych średnicach. Radiografia jest stosowana do badania materiałów w: defektoskopii elementów, pomiarach grubości (również powłok), wykrywania korozji, określaniu składu materiału. Połączenia spawane z blach stalowych do 10 mm najkorzystniej jest badać metodą radiograficzną [75, 20, 63, 30].

Badania radiograficzne należą do najbardziej wiarygodnych, lecz jednocześnie najdroższych metod wykrywania wewnętrznych wad spawalniczych. Cechuje je dobra wykrywalność nawet małych wad oraz stosunkowo jednoznaczna ich interpretacja [42, 7, 38]. Podczas realizacji badania materiału metodą radiologiczną bardzo ważne jest określenie kierunku napromieniowania elementu. Tak zwane wady „niekorzystnie zorientowane" (np. wady płaskie – pęknięcia, rozwarstwienia) umiejscowione prostopadle do kierunku rozchodzenia się promieniowania mogą nie zostać zdiagnozowane. Ścisłą lokalizacje wady można wskazać po przeprowadzeniu szeregu napromieniowań badanego elementu (metodami: stereografii, podwójnej ekspozycji i kąta prostego) [24, 9].

W spawalnictwie metoda radiograficzna jest skuteczną metodą do wykrywania następujących wad wewnętrznych: pęcherzy i ich skupisk, żużli, wtrąceń obcego metalu, przyklejeń brzegowych i międzybrzegowych, braku przetopu, pęknięć, podtopień lica i grani, nadmiernego nadlewu lica, uskoków oraz określenia ich parametrów [6, 11, 42, 95]. Według zaleceń normy PN – EN ISO 17635 badania radiograficzne stosuje się do spin doczołowych i (rzadziej) kątowych ze spoinami czołowymi. Do spoin pachwinowych można ją stosować tylko w szczególnie uzasadnionych przypadkach, gdyż trudno jest poprawnie zinterpretować wynik badania. Dobrą wykrywalność uzyskuje się dla wad trójwymiarowych, natomiast wady płaskie np. przyklejenia są w miarę pewnie wykrywane, gdy usytuowane są wzdłuż kierunku promieniowania.

Badania radiograficzne cechują następujące zalety: umożliwiają one przeprowadzenie badań przedmiotów o zróżnicowanej geometrii, umożliwiają przeprowadzenie badań materiałów o dowolnych własnościach mechanicznych, zapewniają dobrą wykrywalność wad, umożliwiają możliwość automatyzacji procesu badania. Wady metody badań radiograficznych to ograniczenia wynikające z występowania promieniowania jonizującego, pracochłonny, powolny i drogi sposób przeprowadzenia badania, duże gabaryty i ciężar aparatów rentgenowskich, brak wykrywalności płaskich wad równoległych do powierzchni, konieczny dwustronny dostęp do badanego elementu, duże koszty zakupu sprzętu do realizacji badań [50, 42, 7, 38]. Badania metodą radiograficzną również nie nadają się do zastosowań w systemach monitoringu (SHM) konstrukcji okrętowych.

4. ***Badania metodą ultradźwiękową*** polegają na wprowadzeniu do diagnozowanego przedmiotu fal ultradźwiękowych (sprężystych) o częstotliwościach od 20 kHz do 100 MHz z jednoczesnym skanowaniem badanej konstrukcji oraz detekcji sygnałów wytworzonych przez fale przechodzące przez badany przedmiot. W uproszczony schematyczny sposób realizacje badań metodą ultradźwiękową pokazano na rysunku 1.33. Metoda ultradźwiękowa zaliczana jest do tak zwanych metod badań objętościowych. Diagnozować wykorzystując ją można wady wewnętrzne, powierzchniowe i podpowierzchniowe. Pozwala ona na lokalizacje wady, ocenę jej wymiarów oraz ocenę rodzaju wady i jej orientacji. Podczas wykonywania badań diagnostycznych omawianą metodą można określić czy wada się rozwija. Umożliwia ona również klasyfikację elementów (zwłaszcza połączeń spawanych), do klasy jakości lub ocenę przydatności elementu do eksploatacji i oszacowanie dalszego możliwego czasu jego pracy. Metodą ultradźwiękową można wykrywać wady objętościowe o następujących wymiarach: szerokość od około 0.001 mm, długość lub średnica od około 0,7 mm oraz wady powierzchniowe o głębokości około 0,1 mm.



Rys. 1.33 Schematyczne przedstawienie realizacji badania złącza doczołowego metodą ultradźwiękową

Najlepsza lokalizacja wad uzyskiwana jest w przypadku, kiedy kierunek wiązki ultradźwiękowej jest prostopadły do wady badanego elementu. Większa częstotliwość stosowanych fal pozwala na wykrywanie coraz mniejszych wad, ale wpływa również na zwiększenie tłumienia fal. Analizowane sygnały to amplituda i faza, widmo a także obwiednia sygnałów, uzyskiwane przy przemieszczaniu głowic wokół lub wzdłuż wad. Parametry fal ultradźwiękowych dobierane są w zależności od makroskopowych i mikroskopowych właściwości materiałów badanych elementów takich jak: wymiary, gęstość, własności sprężyste, występowanie niejednorodności, anizotropia, budowa molekularna oraz od prędkości fal sprężystych ośrodka. W ultradźwiękowych badaniach defektoskopowych zakłada się stałość prędkości propagacji fal w materiale badanego obiektu [42]. Badania ultradźwiękowe bardzo dobrze nadają się do wykrywania wad płaskich. Bardzo dobrze dokonują detekcji takich wad, jak przyklejenia międzyściekowe czy pęknięcia, co do których badania radiograficzne mogą być zawodne. Można zatem uznać, że badania ultradźwiękowe i radiograficzne wzajemnie się uzupełniają.

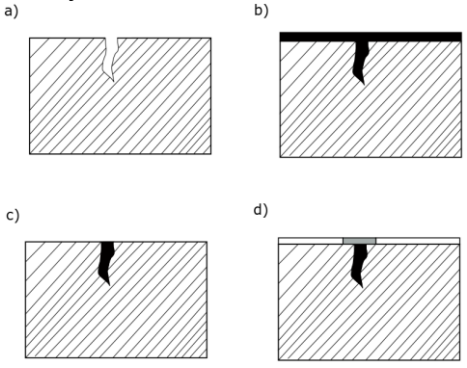
Diagnozowanie i lokalizowanie wad materiałowych w metodzie ultradźwiękowej bazuje na posługiwaniu się trzema metodami: echa, przepuszczania, TOFD (ang. Time – of – Wight Diffraction, czas przejścia fal dyfrakcyjnych). Najczęściej wykorzystywana jest metoda echa opiera się ona odbiciu fal od powierzchni elementów i od ich wad. W metodzie echa stosuje się głowice pojedyncze, w których jeden przetwornik ultradźwiękowy jest równocześnie źródłem oraz odbiornikiem fal ultradźwiękowych. Metoda przepuszczania (cienia) bazuje na przepuszczaniu wiązki fal przez wady. Wykorzystywana jest głównie do badania elementów z materiałów silnie tłumiących fale ultradźwiękowe i diagnozowania wad znajdujących się blisko powierzchni badanego elementu. Podczas realizacji badania metodą przepuszczania wymagany jest dostęp do dwóch powierzchni badanego elementu – dwie głowice umieszcza się naprzeciwko siebie; jedna z nich pełni funkcje nadawczą a druga odbiorczą. Stosując podczas badania metodę przepuszczania nie ma możliwości lokalizacji wady (ponieważ obserwuje się tylko impuls wywołany przez przejście fal). Wymiary wad wykrytych metodą przepuszczania szacuje się na podstawie analizy amplitudy impulsu przechodzącego i na pomiarze szerokości jego obwiedni. Metoda TOFD opiera się na wykorzystaniu dyfrakcyjnego ugięcia i rozproszenia fal ultradźwiękowych na przykład na krawędziach poprzecznych, w stosunku do kierunku przebiegu fal, (w aplikacjach techniki TOFD stosowana jest metoda przepuszczania). Podczas przeprowadzenia badania mogą być łączone różne metody badań ultradźwiękowych [42, 7, 38].

Badania ultradźwiękowe służą głównie do kontroli produktów powstałych w procesach walcowania, przeciągania, odlewania, kucia oraz przeprowadzania badań połączeń spawanych, zgrzewanych, lutowanych, nitowanych, klejonych, struktur z wypełnieniami komórkowymi. Przedmioty badane z wykorzystaniem omawianej w tym podrozdziale metody mogą być wykonane z metali stali ferrytycznych i stali austenitycznych (z pewnymi ograniczeniami), aluminium, magnezu, miedzi i stopów miedzi, stopów ołowiu, cynku, niklu i stopów niklu, cyrkonu, tytanu, metali spiekanych, aluminium, wolframu, tytanu, tantalu, niemetali (materiałów kompozytowych, drewna, tworzyw ceramicznych – porcelany technicznej, ceramiki ogniotrwałej, tworzyw sztucznych, szkła, gumy). Metoda ultradźwiękowa jest bardzo dobra do realizacji badań bardzo dużych i grubych elementów np. prętów, rur. Połączenia spawane z blach o grubości powyżej 10 mm najkorzystniej jest metodą ultradźwiękową. Metodą ultradźwiękową można przeprowadzać podczas diagnostycznych badań eksploatacyjnych pomiar grubości przedmiotów jednostronnie

dostępnych jest to bardzo istotne w przypadku badania zbiorników, rurociągów, kadłubów statków (określenie stopnia korozji). Omawiana metoda jest również wykorzystywana w badaniach diagnostycznych do wykrywania pęknięć zmęczeniowych na przykład: wałów korbowych, złączy spawanych, szyn kolejowych, nitów poszycia samolotów i w innych elementach pracujących pod zmiennym obciążeniem [6, 11, 42, 95, 93].

Według zaleceń normy PN – EN ISO 17635 badania ultradźwiękowe stosuje się do spoin czołowych. Podczas spawania odpowiedzialnych konstrukcji stosuje się zarówno zmechanizowane badania ultradźwiękowe jak i radiograficzne. Badania ultradźwiękowe są bardziej wydajne, szybsze i tańsze niż badania radiograficzne. Są dobre do wykrywania wad płaskich (pęknięcia podłużne i poprzeczne, przyklejenia brzegowe i między warstwowe, jamy skurczowe, brak przetopu, rozwarstwienia, wycieki, podtopienia lica i grani, nadmierne nadlewy lica, uskoki w złączach spawanych, rozwarstwienia w materiale podstawowym) oraz przestrzennych (pęcherze, żużle, wtrącenia metaliczne). Umożliwiają badanie bardzo grubych elementów [15, 50]. Wady omawianej metody to brak możliwości badania nią przedmiotów o nieregularnych kształtach oraz części bardzo małych i cienkich; badane nią powierzchnie nie mogą być nadmiernie chropowate, gruboziarniste. Istnieje konieczność dobrego przygotowania badanej powierzchni. Opisywana metoda badań ma charakter lokalny – w czasie badania analizuje się mały fragment materiału. Ponadto wady liniowe równoległe do fali ultradźwiękowej mogą zostać niewykryte. Metoda ta wymaga medium sprzęgającego, by przenieść energię dźwiękową na element badany. Żeliwo i inne gruboziarniste materiały są trudne do przebadania z powodu niskiego pasma przenoszenia dźwięku i wysokiego poziomu szumu sygnałowego. Standardy referencyjne są potrzebne zarówno do kalibracji urządzeń jak i charakteryzacji wad [50, 42, 7, 38].

5. ***Metody penetracyjne*** są jedną z najstarszych metod badań nieniszczących. Należą do powierzchniowych metod badań NDT. Wykorzystuje zjawisko włoskowatości polegające na wnikaniu niektórych cieczy (penetrantów o małym napięciu powierzchniowym, odpowiedniej lepkości małej gęstości i zwilżalności powierzchni obiektów) do wąskich naczyń nazywanych kapilarami [42, 7, 38]. Po wniknięciu penetrantu w szczelinę jego nadmiar usuwa się, a część, która jest w szczelinie wywabiana jest na powierzchnię za pomocą wywoływacza. Wchłania on penetrant, który wniknął i pozostał w nieciągłościach, dzięki czemu pojawia się łatwo widoczne powiększone wskazanie nieciągłości [15, 50]. Przed rozpoczęciem badania należy badaną powierzchnię oczyścić i wysuszyć. Proces realizacji badania metodą penetracyjną przedstawia rysunek 1.34.



Rys. 1.34 Proces realizacji badań metodą penetracyjną a) oczyszczenie powierzchni, b) naniesienie penetranta, c) zmycie penetranta z powierzchni, d) naniesienie wywoływacza i przeprowadzenie kontroli po odpowiednim czasie (od 5 do 60 minut)

Oględziny wskazań wyników badania przeprowadzanego metodą penetracyjną powinny odbywać się w świetle białym, którego natężenie powinno wynosić minimum 500 luksów lub ultrafioletowym o długości 365 nm [64]. Badania penetracyjne umożliwiają kontrolę elementów o temperaturze od – 30 do + 100 C [42, 7, 38]. Szerokość realizacji diagnozowanej powierzchni powinna obejmować spoinę i minimum 10 mm po jej obydwu spoinach.

Badania penetracyjne służą do wykrywania wad wychodzących na powierzchnię: otwartych wad powierzchniowych, płaskich, wąskoszczelinowych: pęknięć oraz innych wad powierzchniowych (np. przyklejanie powierzchniowe), wad przelotowych (nieszczelności), braku przetopu, nie metalicznych wtrąceń powierzchniowych, zawalcowań, zakłuć, fałd, porów i porowatości z ograniczeniami wżerów korozyjnych i erozyjnych. Stosując opisywaną metodę możliwe jest wykrywanie różnie zorientowanych wad powierzchniowych otwartych to znaczy niezaciągniętych i niewypełnionych zanieczyszczeniami. Przy pomocy metody penetracyjnej możliwe jest lokalizowanie wad znajdujących się w miejscach nagłych zmian przekroju badanych elementów (wykrywanie tak położonych wad jest niemożliwe lub bardzo trudne innymi metodami NDT) [42, 7, 38]. Metodę penetracyjną można wykrywać wady szczelinowe o szerokości minimalnej od około 0,00025 mm do około 0,2 mm [7]. Nie można tą metodą określić ściśle głębokości wady. Omawiana metoda podczas realizacji eksploatacyjnych badań diagnostycznych umożliwia wykrywanie płytkich pęknięć (wad zapoczątkowujących pęknięcia zmęczeniowe). Nie ma możliwości wykrywania wad pod warstwą pokrycia na przykład malarskiego lub galwanicznego [11, 42, 95, 64].

Metodą penetracyjną przeprowadza się badania przedmiotów wykonanych z metali ferromagnetycznych, materiałów nieferromagnetycznych: stali austenitycznych, miedzi, mosiądzów, brązów, aluminium, magnezu, tytanu, cyrkonu, wolframu oraz przedmiotów z materiałów niemetalicznych: szkła, ceramik, tworzyw sztucznych, żywic, wyrobów grafitowych, materiałów: kompozytowych, spiekanych [42, 7, 8, 75]. Ogólne zasady badań penetracyjnych podaje norma PN – EN ISO 3452 – 1. Według zaleceń normy PN – EN ISO 17635 badania penetracyjne stosuje się do spoin pachwinowych.

Zalety metody penetracyjnej to nieskomplikowany sposób przeprowadzania badań, niski koszt przeprowadzenia badania, lekki i względnie tani sprzęt do badań, możliwość przeprowadzenia badań przedmiotów o skomplikowanych kształtach, możliwość wykonywania badań małych obiektów, możliwość wykrywania wad umiejscowionych w miejscach nagłych zmian przekroju badanego elementu, możliwość przeprowadzenia badań materiałów nieferromagnetycznych. Istotna jest duża skuteczność wykrywania wad eksploatacyjnych, bezproblemowość stosowania badań penetracyjnych w warunkach warsztatowych i terenowych. Do wad metody penetracyjnej zalicza się subiektywność oceny stanu badanego przedmiotu, długi czas trwania badania, pracochłonność metody, brak możliwości diagnozowania przedmiotów pokrytych powłoką ochronną, możliwość diagnozowania wystąpienia jedynie wad powierzchniowych otwartych. Ponadto powierzchnia badanego przedmiotu nie może być nadmiernie chropowata. Istnieje konieczność oczyszczania i odtłuszczania badanej powierzchni oraz jej oczyszczenia po przeprowadzeniu badania. Należy zwrócić uwagę na toksyczność preparatów i związaną z tym konieczność stosowania wentylacji w pomieszczeniach zamkniętych [50, 11, 42, 7, 38]. Metoda ta zdecydowanie nie znajduje zastosowania w systemach monitoringu konstrukcji - SHM.

1.3. NIESKOMERCJALIZOWANE METODY BADAŃ NIENISZCZĄCYCH

Oprócz scharakteryzowanych w poprzednim podrozdziale metod badań nieniszczących można wskazać jeszcze inne metody, które poza emisją akustyczną i częściowo termografią nie doczekały się jeszcze standardów i normatywnego opracowania.

1. Emisja akustyczna w sensie badań nieniszczących to przejściowe fale sprężyste, produkowane przez zjawisko nagłego uwalniania przeciążenia w materiale. Kiedy struktura podlega zewnętrznym bodźcom, znajdujące się w niej nieciągłości inicjują wyzwolenie energii w postaci fali przeciążeniowych, które rozprzestrzeniają się na powierzchnię i mogą być rejestrowane przez czujniki [5, 52, 47]. Z punktu widzenia diagnostyki, emisja akustyczna jest spowodowana odkształceniami, poślizgami na granicach ziaren, pękaniem, korozją, nieszczelnością (np. w zbiornikach) lub przemianami fazowymi w strukturze materiału, pękaniem włókien i osnowy w kompozytach itp. Badania za pomocą emisji akustycznej polegają na pomiarach dźwięków generowanych przez materiał. Zjawisku emisji akustycznej towarzyszy intensywne uwalnianie energii, która rozchodzi się po strukturze badanego obiektu we wszystkich kierunkach. Amplituda drgań maleje wraz z upływem czasu i wzrostem odległości od centrum, a zasięg drgań zależy od własności materiału, kształtu badanego obiektu i otoczenia. [66, 34, 76]. Emisja akustyczna jest w ostatnim dwudziestoleciu bardzo ważnym uzupełnieniem badań radiograficznych i ultradźwiękowych, za jej pomocą można otrzymać unikalne informacje o procesach przebudowy mikrostruktury materiału (ruchy dyslokacyjne, powstanie mikropęknięć). Metoda emisji akustycznej jest coraz częściej wykorzystywana do przeprowadzania badań nieniszczących połączeń spawanych i diagnozowania powstających w nich pęknięć. W porównaniu z innymi metodami badań nieniszczących emisja akustyczna ma tę zaletę, że może być wykorzystywana nie tylko do diagnostyki już gotowego elementu spawanego, lecz również do monitorowania jakości procesu spawania jeszcze podczas jego przebiegu [45]. Podczas realizacji badań metodą emisji akustycznej (zwłaszcza wysokoczęstotliwościowe) występują następujące trudności pomiarowe: sygnały emisji akustycznej rozłożone są w szerokim widmie częstotliwościowym związanym z badanym materiałem (do rzeczywistego oddania kształtu impulsów korzysta się podczas przeprowadzania pomiarów zakresem od pojedynczych Hz do 100 MHz), sygnały mogą być bardzo słabe i zakłócone przez trudne do wyeliminowania szumy tła, do przeprowadzenia analizy emisji akustycznej konieczny jest pomiar amplitudy i czasu trwania impulsów od mikrosekundy do dziesiętnych części sekundy. Należy pamiętać, że źródła emisji akustycznej znajdują się wewnątrz materiału a odbiornik jest umieszczony na jego powierzchni, w rezultacie odbierany sygnał jest zniekształcony przez tłumienie ośrodka i wielokrotne odbicie od granicy materiału [45].
2. Badanie prądami wirowymi jest jedną z kilku metod nieniszczących, które w głównym założeniu polegają na elektromagnetyzmie jako podstawie do wykonywania badań. Prąd wirowy jest tworzony poprzez indukcję elektromagnetyczną. W przypadku zderzenia się prądu wirowego z wadą, nastąpi zmiana impedancji głowicy, co skutkuje otrzymaniem odpowiedniego odczytu na defektoskopie wiroprądowym. Główną zaletą stosowania metody prądów wirowych jest różnorodność możliwych badań i pomiarów, jakie można wykonać [97]. Może to być diagnozowane: pęknięć, pomiar grubości materiału, pomiar grubości pokrycia,

pomiar przewodności (do identyfikacji materiału, wykrycia zagrożenia przegrzaniem, określania głębokości obudowy, monitorowania terapii cieplnej). Metoda prądów wirowych charakteryzuje się dużą czułością na małe pęknięcia i inne defekty, wykrywa defekty powierzchni i defekty bliskie powierzchni [98]. Inne zalety to: sonda badawcza nie musi dotykać elementu, można badać skomplikowane kształty i duże rozmiary materiałów przewodzących. Wady metody prądów wirowych to: możliwość badania jedynie materiały przewodzące elektrycznie, powierzchnia musi być na tyle dostępna by umieścić sondę w jej pobliżu, metoda wymaga o wiele większych umiejętności niż pozostałe, szorstkość powierzchni może negatywnie wpływać na badanie, głębokość penetracji jest ograniczona, wady takie jak rozwarstwienia leżące równolegle do cewki sondy są niewykrywalne.

3. Główną zasadą działania wibrometru laserowego, jest to, że częstotliwość wibracyjna powierzchni może zostać zmierzona poprzez analizę odbitej od badanej powierzchni wiązki laserowej. W zależności od pożądanego zakresu częstotliwości pomiarowej, rozdzielczości i czułości, skomplikowanie systemu pomiarowego może różnić się znacząco. Dwoma głównymi zjawiskami fizycznymi, które pozwoliły wykrywać wibracje na dużych częstotliwościach z dużą dokładnością (czułością) są interferencja i efekt Dopplera. Głównymi zaletami wibrometrów laserowych jest możliwość dokonania bezdotykowych i bezinwazyjnych pomiarów. Dzięki temu w żaden sposób nie oddziaływają na badany układ. Optyczny charakter wibrometrów czyni je odpornymi na zakłócenia zewnętrzne tj. zaburzenia elektromagnetyczne. Na rynku dostępne jest zaawansowane oprogramowanie, które czyni analizy szybkimi i w miarę łatwymi do wykonania. Wadą wibrometrów jest konieczność odizolowania ich od wibracji środowiskowych np. stosując gumę jako tłumik. Cecha ta znacząco ogranicza ich zastosowanie do pomiarów realizowanych na jednostkach pływających podczas ich pobytu w na morzu. Kolejną wadą jest wysoka cena.
4. Wiele różnych technik wykorzystujących metodę propagacji fal sprężystych używanych jest do detekcji, lokalizacji oraz identyfikacji uszkodzeń występujących w elementach konstrukcji. Operator korzysta w badaniach z sieci przetworników piezoelektrycznych umieszczonych na badanym obiekcie do generowania oraz rejestrowania fal sprężystych w celu lokalizacji pęknięcia. Zarejestrowane sygnały są przetwarzane za pomocą transformaty falkowej. Metoda propagacji fal sprężystych wykorzystuje fakt, że nieciągłości występujące w badanym elemencie powodują zaburzenia i odbicia w propagacji fal. Wspomniane zaburzenia mogą zostać zarejestrowane za pośrednictwem sieci przetworników piezoelektrycznych. Zarejestrowane sygnały podlegają filtracji i obróbce, której zadaniem jest detekcja, lokalizacja oraz identyfikacja rodzaju uszkodzenia. Najczęściej spotykane w literaturze metody detekcji uszkodzeń wykorzystują w swych algorytmach rejestrowane sygnały propagujących fal powierzchniowych Lambda. Typowy system badań przy pomocy fal sprężystych może zostać podzielony na dwie części: sprzętową (generator sygnału, wzmacniacze napięcia, układ akwizycji sygnałów, sieć przetworników piezoelektrycznych) oraz programową (algorytmy filtrowania sygnałów i przetwarzania w celu wydobycia cech sygnałów pozwalających na detekcję i lokalizację uszkodzeń oraz wizualizacji otrzymanych wyników). Zaletami badań metodą fali sprężystych są: możliwość badań miejsc trudno dostępnych dla standardowych technik badań nieniszczących możliwość badania obiektu w jego normalnych warunkach pracy (zwłaszcza pod obciążeniem), możliwość wykrywania i badania powiększających się defektów. Wadami badań metodą fali sprężystych są: możliwość analizy pomiarów tylko z pomocą wyspecjalizowanego oprogramowania

przez doświadczonego operatora, bardzo kosztowny sprzęt pomiarowy, czułość systemów badań na szumy i wpływ środowiska zewnętrznego [39].

5. Praca wszystkich urządzeń mechanicznych związana jest z wydzielaniem ciepła. Termograficzne metody badań polegają na bezkontaktowej detekcji, przetworzeniu i wizualizacji rozkładu widma promieniowania elektromagnetycznego, w zakresie podczerwieni, pochodzącego z powierzchni badanego elementu [71, 38]. Przy pomocy tej metody można monitorować urządzania w trakcie ich eksploatacji oraz wspomagać prace projektowe i testowe nowo powstających urządzeń [42, 7, 38]. Termograficzne badania można przeprowadzać na pracujących maszynach lub w tak zwanym trybie statycznym (polega on na wzbudzaniu badanego elementu w sposób ciągły np. drganiami lub krótkotrwałym impulsem świetlnym i rejestracji nierównomiernych gradientów temperatury). Metoda termografii pozwala na pomiar lub mapowanie temperatur powierzchni podczas przenoszenia się ciepła z, przez lub do obiektu. Najprostsze badanie termograficzne to punktowy pomiar termoelementem. Pomiar tego typu może przydać się w lokalizacji gorących punktów, takich jak zużywające się łożysko, zaczynające się nagrzewać w wyniku wzrostu tarcia [94, 88]. Bardziej zaawansowane techniki termografii wykorzystują kamery termowizyjne, rejestrujące obszary o nierównym rozkładzie temperatur lub tzw. gorące punkty. W niektórych badaniach, może być konieczne generowanie przepływu ciepła przez obiekt lub ocenianie przepływu ciepła w funkcji czasu [57, 58, 94].
6. Badania metodą aktywnej termografii realizowane są przeważnie w dwóch fazach. W pierwszej fazie badany materiał poddawany jest wymuszeniu cieplnemu (impulsowemu lub okresowo zmiennemu). Wynikiem wymuszenia cieplnego jest pojawienie się na jednej z powierzchni elementu rozkładu temperatury związanego z właściwościami termofizycznymi materiału, warunków brzegowych na innych powierzchniach elementu itp. Podczas fazy drugiej dokonuje się zapisu rozkładu temperatury powierzchni za pomocą układu termowizyjnego. Przykłady zastosowań aktywnej termografii to badania nieniszczące materiałów, identyfikacja parametrów cieplnych materiałów a nawet odkrywanie warstw malarskich zabytkowych dzieł sztuki [21, 92, 36, 38, 77]. Zarówno termografia aktywna jak i pasywna dają szansę na wyznaczenie rozkładu temperatury od kilkudziesięciu ^{o}C poniżej zera do kilku tysięcy powyżej zera, z dokładnością nawet do około 0,1^{o} C przeważnie rejestrowanego przez kamery termowizyjne. Termografia pozwala na skuteczniejsze wykrywanie pęknięć. Próbka ciała stałego zostaje wzbudzona dużą dawką energii akustycznej o niskiej częstotliwości. Powoduje to grzanie brzegów pęknięcia, co może być zarejestrowane za pomocą kamery podczerwonej. Badania termograficzne mogą również znaleźć zastosowanie w analizie procesów spawania i zgrzewania, gdzie ważne są informacje dotyczące rozkładu temperatury w poszczególnych strefach złącza. Zalety metody termograficznej to: możliwość szybkiego przeprowadzenia badania dużej powierzchni, nieinwazyjność, dokładność. Wady to: wysokie koszty aparatury do realizacji badań, konieczność usunięcia wszelkich przeszkód znajdujących się między kamerą termowizyjną a badanym obiektem. Mogą występować zakłócenia pomiaru w wyniku zjawiska konwekcji, komplikacje w uzyskaniu jednorodnego nagrzewania w przypadku aktywnej termografii, możliwość wykrycia za pomocą aktywnej termografii tylko tych wad, które mają inne właściwości cieplne niż badany obiekt. Termografia aktywna pozwala wykryć anomalie tylko w powierzchniowej warstwie badanego materiału. Niezbędna jest konieczność znajomości właściwej wartości współczynnika emisyjności powierzchni badanego obiektu [2, 42, 21, 71, 7, 38].

7. Wibrotermografia należy do metod aktywnych, związanych z zewnętrznym wymuszeniem badanego obiektu. W tej metodzie wykorzystywane jest zjawisko, które polega na wzroście temperatury w strukturze, w miejscach wystąpienia defektów strukturalnych spowodowanych rozchodzeniem się fal elastycznych w zakresie częstotliwości ultradźwiękowych. W miejscu występowania defektu strukturalnego występuje zwiększona podatność mechaniczna stąd więcej energii traci się w postaci ciepła. Ciepło powstałe w miejscu wystąpienia defektów strukturalnych propaguje na powierzchnie obiektu, gdzie może zostać zmierzone przez kamerę termowizyjną. Interpretacja obrazów otrzymanych przy pomiarze termowizyjnym pozwala na identyfikację defektów strukturalnych. W aktywnej wibrotermografii stosuje się wymuszenie falami ultradźwiękowymi (o częstotliwościach do 25 kHz) lub wymuszeniem wibracyjnym. Wymuszenie może mieć charakter powtarzalnych impulsów lub ciągłych sygnałów harmonicznych. Następnym elementem procesu diagnostycznego opierającego się na aktywnej termografii jest porównanie wzorcowych obrazów termowizyjnych (zarejestrowanych na nieuszkodzonym obiekcie) z obrazami pochodzącymi z rejestracji aktualnego stanu diagnozowanego obiektu. Zarejestrowany sygnał zostaje poddany transformacie Fouriera, otrzymując w ten sposób powierzchniowe rozkłady amplitudy i fazy. Faza jako funkcja czasu propagacji fali od wady do powierzchni, pozwala na ustalenie głębokości wady [96]. Dużą zaletą wibrotermografii jest prostota jej stosowania oraz szybki czas realizacji badania diagnostycznego w porównaniu z innymi metodami badań nieniszczących. Można ją stosować jako metodę laboratoryjną oraz na obiekcie przemysłowym bez konieczności demontażu badanych elementów. Wadą wibrotermografii jest duża czułość związana z zmianami emisyjności badanej powierzchni, która to zależy od stanu powierzchni oraz jej koloru (zalecane jest pokrycie jej warstwą farby lub sadzy tak aby powierzchnia była czarna i matowa). Przy badaniu obiektów o dużej masie i objętości wymagana jest duża moc źródła ultradźwięków do uzyskania efektu zmiany temperatury na badanej powierzchni [2, 89].
8. Światłowodowa (ang. fibre optic) metoda badań polega na wykorzystaniu przewodu światłowodowego, jako czujnika do oceny stanu technicznego badanego obiektu. Najczęściej na bazie światłowodów budowane są czujniki do pomiarów przemieszczeń-odkształceń oraz temperatur. Światłowód jest odporny na zakłócenia elektromagnetyczne i korozję, co oznacza, że można go umieszczać bardzo ekstremalnym środowisku. Światłowód jest mały i lekki i może być zarówno osadzony na strukturze jak i wewnątrz, nie mając większego wpływu na strukturę [1, 40, 53, 54, 55]. Czujniki światłowodowe (optyczne) są to przetworniki pomiarowe przekształcające oddziaływujące na nie wielkości fizyczne (np. odkształcenie) na zmodulowane sygnały optyczne niosące jednoznaczną informację o poziomie tej wielkości fizycznej. Zwykle czujniki optyczne charakteryzują się wysoką czułością w porównaniu z innymi typami czujników. Często można zastosować jeden typ czujnika optycznego do pomiaru różnych wielkości fizycznych (np. odkształcenie i temperatura). System pomiarowy wykorzystujący czujniki światłowodowe składa się ze źródła światła, układu czujników FBG oraz odbiornika rejestrującego długość fali odbitej wraz z jego rejestracją. Zwykle wszystkie elementy systemu, poza czujnikami, są zintegrowane w jednej obudowie zwanej „interrogator”. Analizatory laserowego światła odbitego działają na zasadzie precyzyjnego filtra skanującego, który rejestruje określoną długość fali w zależności od długości fali odbitej przez siatkę dyfrakcyjną Bragga [86, 43, 87, 44]. Techniki badawcze bazujące na czujnikach typu FBG oraz wykorzystujące metodę OTDR są kompatybilne. Przy projektowaniu systemu

monitoringu czujniki FBG stosuje się w miejscach spodziewanych lokalnych koncentracji naprężeń oraz tam, gdzie niezbędna jest wiedza o charakterystykach dynamicznych konstrukcji (wysoka częstotliwość próbkowania sygnału). Metodę badań typu OTDR stosujemy do globalnej, quasi-statycznej oceny deformacji badanej konstrukcji. Opisane metody badań można łatwo połączyć w jeden system z innymi metodami badań SHM np. z metodą badań drganiowych.

2. TEZA, CEL I ZAKRES PRACY

Autor rozprawy doktorskiej postawił sobie za cel opracowanie kluczowych elementów autonomicznego systemu monitoringu żywotności (SHM) spawanych konstrukcji cienkościennych z uszkodzeniami, ze szczególnym uwzględnieniem konstrukcji kadłuba statku. Na podstawie badań literaturowych założono, że planowany system SHM będzie bazował na metodach wibrodiagnostycznych. Wiele elementów takiego systemu jest już dobrze opracowanych przez innych badaczy. Autor skupił się na rozwoju metod analiz sygnałów drganiowych powstałych pod wpływem wymuszeń impulsowych, które byłyby wywoływane bądź przez środowiskowo bądź przez specjalne urządzenia badawcze. Głównym celem tych metod jest wczesne wykrycie powstających w trakcie eksploatacji uszkodzeń połączeń spawanych, i tym samym opracowanie metod pozwalających na zapobieganie katastrofalnym zdarzeniom morskim. W szczególności postanowiono znaleźć odpowiedź na pytanie czy można stworzyć autonomiczny system SHM, wykorzystujący badania wibrodiagnostyczne, który ostrzegałby nieprzeszkoloną w tym zakresie załogę statku przed potencjalnymi, katastrofalnymi uszkodzeniami - pęknięciem kadłuba statku. W oparciu o przeprowadzony przegląd literatury i zebrane doświadczenia własne autora sformułowano następującą tezę rozprawy doktorskiej:

Możliwe jest zdefiniowanie nowych parametrów i charakterystyk dynamicznych konstrukcji okrętowych opartych na analizach badań wibrodiagnostycznych pozwalających na wskazanie powstania uszkodzeń w połączeniach spawanych

Prace nad elementami monitoringu konstrukcji polegającymi na detekcji, lokalizacji i identyfikacji uszkodzeń są intensywnie rozwijane przez wielu badaczy, lecz najczęściej ograniczają się do badań laboratoryjnych i/lub wstępnych. Ponadto, prace na rzecz okrętownictwa są stosunkowo słabo rozwinięte (np. w stosunku do lotnictwa). W okrętownictwie brak jest uproszczonych, ale wiarygodnych, modeli matematycznych do oceny statyczno-dynamicznych, parametrów (istotnych z punktu widzenia niezawodności) pracy konstrukcji okrętowych. Modele te powinny być możliwe do zastosowania w systemach opartych na sztucznej inteligencji. Niezbędna jest ocena kluczowych elementów pomiarowych oraz ich efektywny dobór do takiego systemu. Założenie o autonomiczności systemu wymaga opracowania kilku niezależnych metod analiz danych pomiarowych. Alarm dla załogi statku musi być wiarygodny; zgodnie z założeniem autora alarm następowałby po zaistnieniu symptomów uszkodzenia kadłuba statku stwierdzonych przez przynajmniej dwa niezależne algorytmy analiz charakterystyk dynamicznych badanej konstrukcji. Przewiduje się opracowanie wybranych metod monitoringu konstrukcji statku poprzez ciągłe sprawdzanie spójności konstrukcji kadłuba (krytycznych z punktu widzenia wytrzymałości połączeń spawanych).

Monitoring oparty na technikach wibrodiagnostycznych jest jednym z najbardziej obiecujących z uwagi na jego prostotę i niskie koszty. W literaturze znaleźć można wiele prac na temat wibrodiagnostyki wybranych konstrukcji. Jednakże, czułość tych metod jest zwykle ograniczona. Przykładowo, zmiany częstotliwości drgań własnych konstrukcji pod wpływem jej uszkodzenia nie przekraczają najczęściej kilku procent. Badania takie sprawdzają się w warunkach laboratoryjnych; w warunkach morskich mogą mieć niewystarczającą czułość, z uwagi na duży poziom szumów i duży rozrzut pomiarów spowodowany np. bardzo

zmiennym oddziaływaniem środowiskowym. W proponowanej pracy zaplanowano wykorzystanie standardowych - tanich technik wibrodiagnostycznych (np. czujniki piezoelektryczne) do prowadzenia badań pomiarowych. Nowością są metody analiz sygnałów pomiarowych. Studia literaturowe, jak i dotychczas wykonane prace badawcze pozwalają na stwierdzenie, że uszkodzenia połączeń spawanych mają istotny wpływ na charakterystyki dynamiczne konstrukcji morskich. Wprowadzają one istotne nieliniowości do charakterystyk, takie jak: zmiany w czasie tłumienia i częstotliwości drgań własnych, zmiany zależne od poziomu wymuszenia konstrukcji oraz zmiany rozrzutów statystycznych uzyskanych wyników. Nowe metody bazują na założeniu, że obiekt po uszkodzeniu straci cechy obiektu możliwego do opisania modelami liniowymi. Przykładowo, dla liniowej struktury izotropowej tłumienie drgań jest niezmienne w czasie i niezależne od amplitudy drgań. Zmiany pomierzonego współczynnika tłumienia drgań w czasie i zależne od wymuszenia mogą świadczyć o uszkodzeniu konstrukcji [35].

Tak więc, celem przewodu doktorskiego jest opracowanie pakietu metod analiz sygnałów drganiowych wymuszanych impulsowo. Z założenia metody te powinny pozwolić na ich przyszłe zastosowanie w autonomicznych systemach monitoringu opartych o elementy sztucznej inteligencji. Powinny więc, spełniać dwa podstawowe kryteria (częściowo przeciwstawne): kryterium zapewnienia wysokiej dokładności i niezawodności oceny oraz kryterium prostoty zastosowanych metod analiz danych pomiarowych. Efektywna, numeryczna analiza stanu technicznego konstrukcji musi być uzupełniona o efektywne metody zbierania danych o konstrukcji - zostanie przeprowadzony dobór optymalnej metody identyfikacji eksperymentalnej uszkodzeń i/lub zmian stanów projektowych konstrukcji.

Przedstawiona powyżej teza i zakres pracy zostały zweryfikowane i osiągane poprzez szczegółowe cele badawcze. Istotnym celem pomocniczym jest weryfikacja zaproponowanych procedur na płytach spawanych, które będą wytworzone w warunkach laboratoryjnych i typowych stoczniowych. Autor pracy przeprowadził szereg rozmów z pracownikami działów kontroli jakości kilku trójmiejskich stoczni w wyniku czego udało się wskazać typowe uszkodzenia połączeń spawanych występujących podczas normalnej pracy spawaczy. W przypadku konstrukcji okrętowych typowymi uszkodzeniami są: przyklejenie brzegowe, pęknięcie, brak przetopu, pęcherze kuliste i pęcherze podłużne. Prowadzone w stoczniach badania certyfikacyjne spoin pozwalają na stwierdzenie, że w przypadku spawaczy z niewielkim stażem (ale posiadającymi wszystkie niezbędne uprawnienia), w spoinach zazwyczaj występuje więcej niż jedno uszkodzenie. W związku z powyższym materiał badawczy został tak przygotowany przez autora, aby objąć możliwie najszerszy zakres najczęściej występujących uszkodzeń połączeń spawanych.

Szczegółowy zakres pracy obejmuje:

- opracowanie właściwych z punktu widzenia autonomicznego systemu SHM metod przeprowadzania badań wibrodiagnostycznych a w szczególności dobór i konfiguracja czujników pomiarowych, analiza efektywnych sposobów wymuszeń drgań, dobór parametrów rejestracji sygnałów diagnostycznych itp.,
- wyznaczenie parametrów i charakterystyk dynamicznych najczulszych z punktu widzenia uszkodzeń spawanych i porównanie ich skuteczności ze standardowymi technikami opartymi na komercyjnych badaniach NDT,
- wstępne opracowanie metod analiz wyników badań wibrodiagnostycznych wykonanych na płytach z laboratoryjnie wykonanymi spawami (wybrane spawy będą sztucznie silnie uszkodzone); w celu wstępnego określenia kierunków dalszych badań, do analiz wybrano płyty o znacznej grubości, w których spodziewane efekty nieliniowe będą znaczne,

- określenie skuteczności opracowanych metod analiz, poprzez przeprowadzenie badań elementów spawanych pochodzących z przemysłu stoczniowego, z uszkodzeniami typowymi dla konstrukcji rzeczywistych; sprawdzenie możliwości modelowania tego typu uszkodzeń metodami numerycznymi w celu wstępnej weryfikacji badań pomiarowych,
- opracowanie przykładowego urządzenia do wykrywania uszkodzeń konstrukcji cienkościennych.

Badania eksperymentalne były realizowane w laboratoriach Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Metodyka badań pomiarowych była oparta o najbardziej obiecujące i ekonomicznie techniki, z punktu widzenia analiz charakterystyk statyczno-dynamicznych konstrukcji oraz analiz jej uszkodzeń. Badania prowadzono głównie przy pomocy analizatora drgań firmy Bruel & Kjear, akcelerometrów piezoelektrycznych, młotka modalnego do wymuszeń impulsowych z wymiennymi końcówkami (metalową, silikonową, teflonową). Uzupełniono je o pomiary amplitud przemieszczeń prowadzonych za pomocą laserowych czujników przemieszczeń. Badania prowadzono na szeregu płytach cienkościennych o różnych parametrach. Wykonano pomiary na płycie jednorodnej bez spawu (obiekt referencyjny), płycie o idealnym spawie, płycie z tak zwanym przyklejeniem brzegowym oraz płycie z pęknięciem o zdefiniowanej długości. Wszystkie obiekty przeznaczone do pomiarów wibrodiagnostycznych były zbadane za pomocą standardowych technik NDT takich jak metody wizualne, radiograficzne, ultradźwiękowe. Określono jakość i ewentualny stopień uszkodzenia połączenia spawanego każdej płyty. Algorytmy do wyznaczania nowych parametrów i charakterystyk dynamicznych obiektów zaimplementowano do programu Matlab. Opracowano skrypty umożliwiające automatyczne wczytanie danych pomiarowych, wyznaczenie diagnostycznych parametrów oraz ich graficznej prezentacji.

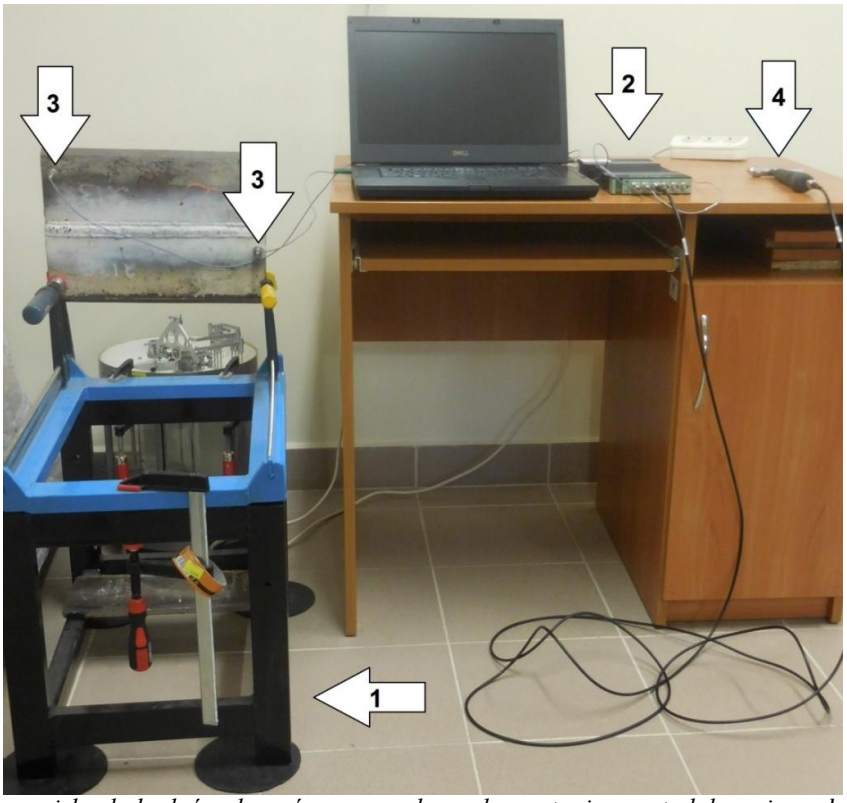
3. BADANIE PŁYT O ZNACZNEJ GRUBOŚCI

Podczas analiz wstępnych przyjęto założenie, że płyty o znacznej grubości charakteryzują się odmiennymi parametrami wibrodiagnostycznymi od blach poszycia o mniejszej grubości. Założono, że w płytach o większej grubości ze spawami z niezwykle wysoką wadliwością (spawy wykonane laboratoryjnie ze sztuczną wadliwością połączeń spawanych) łatwiejsze będzie wykrycie generalnych tendencji zmian charakterystyk dynamicznych obiektu. Wyniki badań odnoszące się do elementów częściej spotykanych w rzeczywistych konstrukcjach (o mniejszej grubości), ze spawami wykonanymi bez celowych wad w spoinach będą analizowane w kolejnym rozdziale. W niniejszym rozdziale skupiono się głównie nad opracowaniem możliwie skutecznej metodyki badań, podczas gdy w kolejnym rozdziale, celem jest opracowanie metod możliwych do zastosowania w systemie SHM zaprojektowanym dla konstrukcji pracującej w rzeczywistych warunkach pracy (myślą przewodnią był kadłub statku handlowego) [51].

Na potrzeby prowadzonych badań za płytę grubą przyjęto płytę, której stosunek grubości do długości najkrótszego boku stanowi 1:20. Płyty spawane o znacznej grubości charakteryzują się częstotliwościami drgań własnych większymi niż 250 Hz. Typowe drgania okrętowe charakteryzują się częstotliwościami z zakresu 5-75 Hz (za wyjątkiem drgań globalnych kadłuba statku, które mogą przyjmować wartości poniżej 1 Hz). Typowe drgania lokalne pokładów statków handlowych charakteryzują się częstotliwościami drgań własnych rzędu dwudziestu kilku herców [56]. W pierwszym etapie pracy przeprowadzono badania na płytach o wymiarach 350 mm x 250 mm i grubości 15 mm. Blachy o mniejszej grubości będą przedmiotem analizy w kolejnym rozdziale pracy.

3.1 STANOWISKO POMIAROWE I METODYKA POMIARÓW

W celu realizacji przyjętego planu badań autor opracował i wykonał stanowisko laboratoryjne. Stanowisko pomiarowe do badania połączeń spawanych przy zastosowaniu metod drganiowych składa się z: stojaka, analizatora drgań firmy Bruel&Kjaer typu 3050-A-60, dwóch akcelerometrów 4514-B, młotka modalnego (8206 – 002) z trzema wymiennymi końcówkami (metalową, silikonową, teflonową). Konstrukcja stojaka pozwala na montowanie płyt (próbek spawalniczych) w sposób poziomy (mocowanie czteropunktowe) lub pionowy (mocowanie dwupunktowe). Opisywane stanowisko wraz z wskazaniem najważniejszych elementów przedstawiono na rysunku 3.1.



Rys. 3.1 Stanowisko do badań połączeń spawanych z wykorzystaniem metod drganiowych. 1 - stojak, 2 - analizator drgań firmy Bruel&Kjear typu 3050-A-60, 3 - akcelerometry 4514-B, 4 - młotek modalny (8206-002) z trzema wymiennymi końcówkami

Podczas pomiarów rejestrowano przebiegi czasowe przyspieszeń drgań z użyciem systemu pomiarowego Pulse firmy Bruel&Kajer. Do akwizycji danych drganiowych użyto programu Time Data Recorder, który umożliwia eksport danych do programu MATLAB.

Badania wibrodiagnostyczne wykonano przy pomocy sprzętu pomiarowego przedstawionego na rysunku 3.2. Kaseta pomiarowa B&K 3050-A-60 jest urządzeniem pomiarowym umożliwiającym jednoczesny pomiar z użyciem od 1 do 6 czujników. Wykorzystane urządzenie charakteryzuje się maksymalnym pasmem pomiarowym 51,2 kHz/kanał przy próbkowaniu wynoszącym 131,072 kHz/kanał, wartości te są niezależne od liczby podłączonych kanałów. Urządzenie wyposażone jest w przełączalny górnoprzepustowy filtr analogowy o częstotliwościach odcięcia 0,1 0,7 Hz, 1 i 7 Hz, oraz 22,4 Hz. W przedziale do 1 kHz i napięciu sygnału wejściowego wartości do 1 V zachowana jest liniowość amplitudy na poziomie +/- 0.05 dB. Szumy własne w przedziale 10 Hz do 25.6 kHz zależą od wartości napięcia wejściowego i wynoszą od 4 μV_{rms} do 13 μV_{rms} dla napięcia wejściowego o wartości 10 V. Zakres dynamiki urządzenia wynosi 160 dB, jest ono również wyposażone w filtr antyaliasingowy trzeciego rzędu typu Butterworth. Kaseta wyposażona jest w 24 bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy.

a)

b)

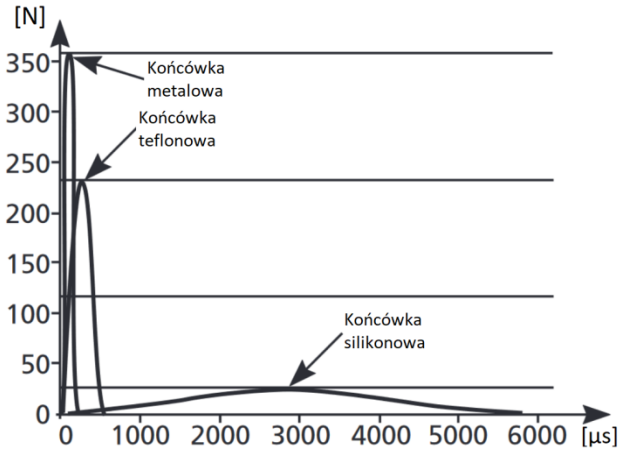
c)

Rys. 3.2. Kaseta pomiarowa [www.bksv.com] wraz z akcelerometrem i młotkiem modalnym, gdzie: a) kaseta pomiarowa, b) akcelerometr, c) młotek modalny

Przetworniki B&K 4514 B są piezoelektrycznymi akcelerometrami typu DeltaTron wykonanymi w standardzie IEPE (ang. intergrated electronic piezo-electric) – z wbudowaną elektroniką (przedwzmacniaczem). W przypadku produktów firmy B&K przetworniki w standardzie IEPE występują pod nazwą CCLD (ang. Constant Current Line Drive). Zastosowanie standardu IEPE oznacza, że na wyjściu z przetwornika uzyskujemy sygnał napięciowy, dzięki czemu istnieje możliwość stosowania zwykłych kabli o jednej żyle sygnałowej, co do których, nie ma żadnych specjalnych wymagań odnośnie impedancji lub niskiego poziomu szumów. Kolejną zaletą tego standardu jest możliwość zdalnego monitorowania stanu przewodu i połączeń między przetwornikiem a przyrządem pomiarowym. Użyty podczas pomiarów system Pulse automatycznie wykrywa wszelkie zaburzenia pomiędzy kasetą pomiarową a przetwornikiem i w przypadku ich wystąpienia sygnalizuje przesterowanie. Nie bez znaczenia jest również możliwość umieszczenia w module elektronicznym przetwornika jego danych (TEDS – ang. Transducer Electronic Data Sheet), co umożliwia systemowi jego automatyczną identyfikację, dzięki temu unika się błędów związanych np. ze zdefiniowania niewłaściwej czułości przetwornika. Zakres

pomiarowy użytych przetworników mieści się w przedziale od 1 Hz do 10 kHz, deklarowana czułość to 1 mV/ms^{-2}. Przetwornik jak również cały układ pomiarowy spełniają wymagania wszystkich norm dotyczących pomiarów parametrów drganiowych w tym PN-ISO 10816-1.

Jako elementu wymuszającego impuls udarowy pobudzający badane płyty do drgań własnych użyto młotka modalnego typu B&K 2270. Urządzenie to również wykonane jest w standardzie CCLD. Czułość użytego młotka modalnego wynosi 2.27 mV/N a maksymalne możliwe do poprawnego zarejestrowania z jego użyciem wymuszenie wynosi 2200 N. Młotka używano w konfiguracjach z trzema różnymi końcówkami metalową (aluminium), teflonową oraz silikonową. W zależności od użytej końcówki wymuszenie charakteryzuje się inna amplitudą maksymalna oraz czas trwania impulsu – rysunek 3.3.



Rys. 3.3. Charakterystyka amplitudowo-czasowa impulsów wymuszających uzyskanych dla różnych typów końcówek młotka modalnego [www.bksv.com, czas dostępu 20.12.2018r.]

Wspomniana norma pomiarowa, jak również dobra praktyka pomiarowa, narzuca obowiązek kalibracji całych torów pomiarów przed rozpoczęciem pomiarów oraz po ich zakończeniu. Procedurę kalibracyjną zrealizowano z użyciem kalibratora B&K 4294 – rysunek 3.4, będącego elektrodynamicznym wzbudnikiem drgań o maksymalnym dopuszczalnym obciążeniu 70 gram. Kalibrator przy częstotliwości 159.2 Hz generuje sygnał drganiowy o następujących parametrach: przyspieszenie drgań o amplitudzie a_{rms}=10 mm/s^2, prędkości o amplitudzie v_{rms}=10 mm/s i przemieszczeniu x_{rms}=10 µm.

Rys. 3.4. Kalibrator B&K [www.bksv.com czas dostępu 20.12.2018r]

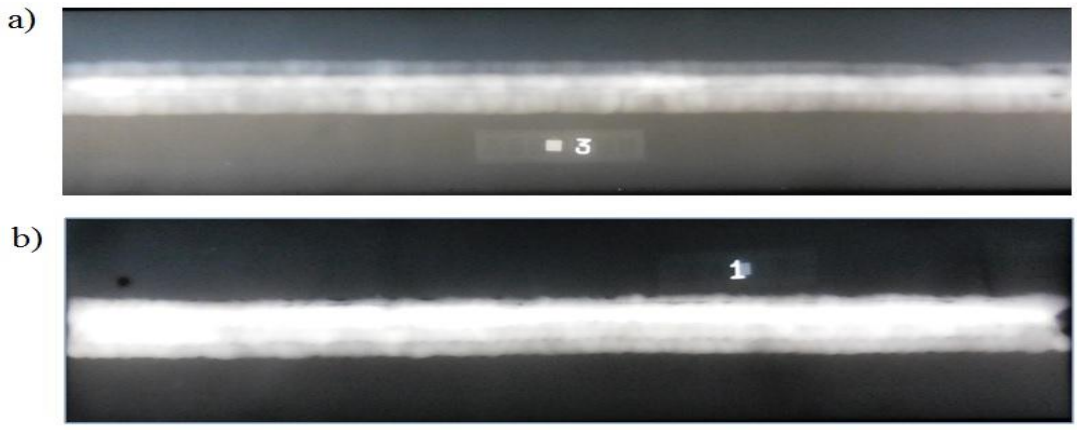
3.2. METODYKA BADAŃ

Po przygotowaniu stanowiska badawczego oraz weryfikacji poprawności jego wykonania, przystąpiono do wykonania badań wstępnych, których, zasadniczym celem było wykrycie występowania zależności pomiędzy stanem złącza spawanego a uzyskiwanymi widmami drganiowymi.

Podczas realizacji badań wstępnych płyty były montowane w stojaku, w położeniu pionowym (rysunek 3.1). Badania przeprowadzono na płytach o wymiarach 350 mm x 250 mm i grubości 15 mm. Płyty spawane były metodą FCAW (ang. Flux – Cared Arc Welding – spawanie łukowe drutem rdzeniowym) - spoina czołowa. Jako referencyjną wykorzystano płytę bez złącza spawanego, oznaczono ją cyfrą „0". Trzy kolejne były płytami spawanymi i oznaczono je następującymi numerami:

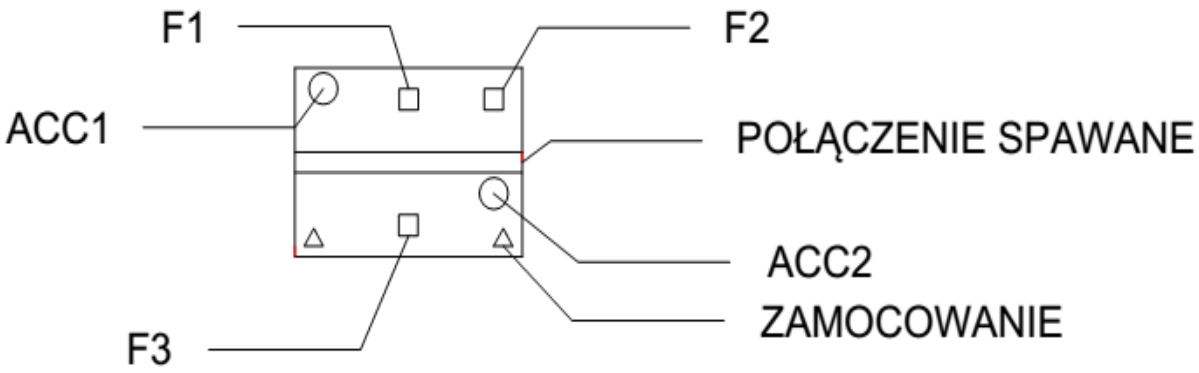
- 2202 – płyta spawana z połączeniem spawanym bez wad w spoinie,
- 2127 – płyta spawana z wadą w spoinie typu przyklejenie brzegowe,
- 2132 – płyta spawana z wadą w spoinie typu pęknięcie o zdefiniowanej długości.

Płyty spawane przed przeprowadzeniem pomiarów metodą drganiową zostały przebadane metodą radiograficzną. Wyniki tego badania dla płyty spawanej bez wad w spoinie oraz z wadą typu przyklejenie brzegowe przedstawiono na rysunku 3.5. Badanie to pozwoliło na ocenę jakości połączenia oraz umożliwiło identyfikację i umiejscowienie wad w połączeniach spawanych.



Rys. 3.5. Zdjęcia RTG, a) płyty spawanej bez wad w spoinie – 2202, b) płyty spawanej z wadą typu przyklejenie brzegowe – 2127

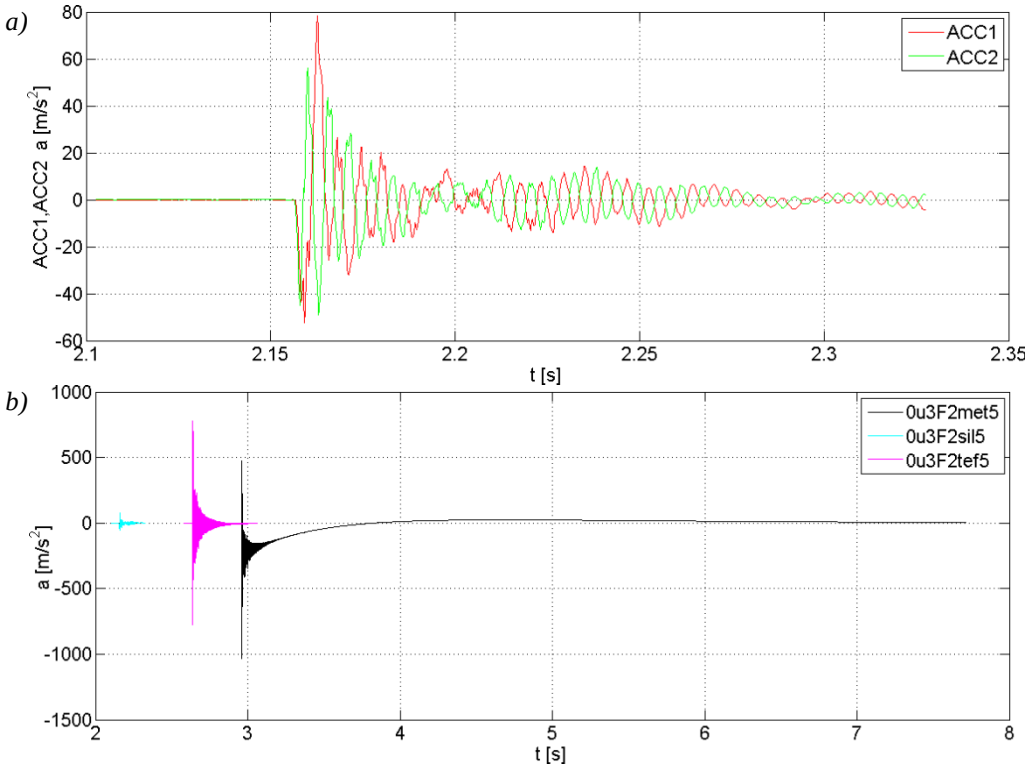
Używając wykonanego stanowiska badawczego przeprowadzono pomiary drgań generowanych w płytach przez impuls z młotka modalnego. Drgania wywoływane były przez uderzenie młotkiem modalnym z różnymi końcówkami: metalową, silikonową i teflonową. Miejsca uderzeń zostały przedstawione na rysunku 3.6 za pomocą oznaczeń F1, F2 i F3. Badania polegały na rejestracji za pomocą akcelerometrów, oznaczonych przez ACC 1 i ACC 2 (rysunek 3.6), amplitud przyspieszeń drgań. Wszystkie pomiary powtarzano wielokrotnie, z różną siłą uderzeniową, w celu określenia statystyki wyników oraz wykrycia ewentualnych nieliniowości zachowania się układu pomiarowego [81].



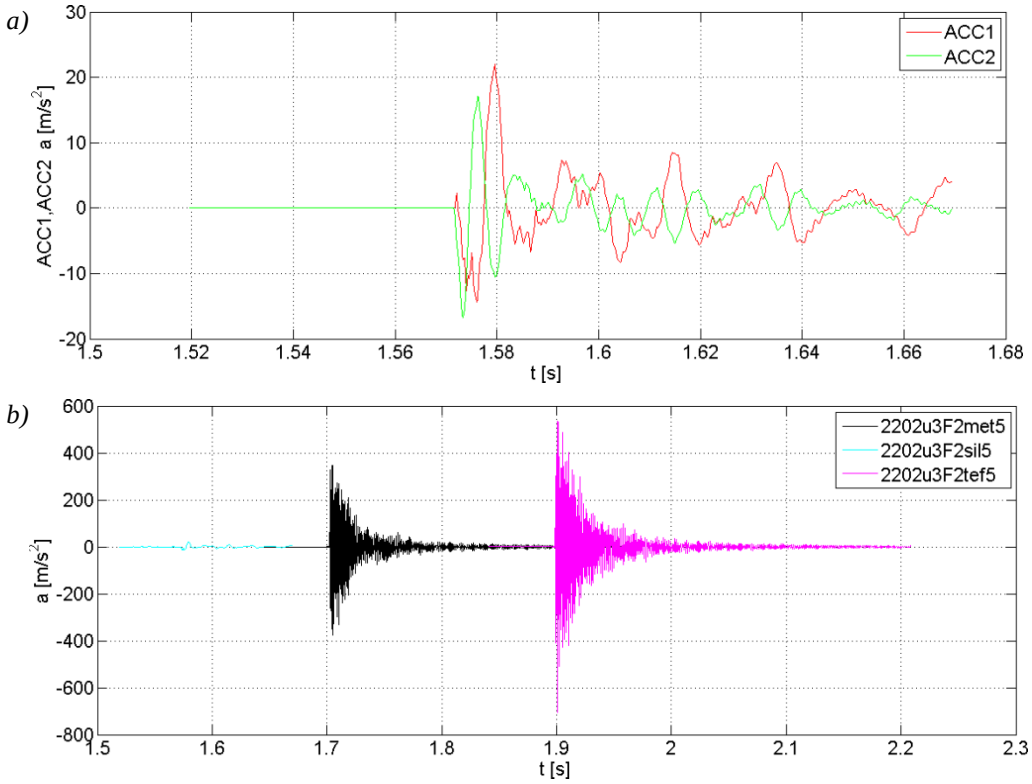
Rys. 3.6. Schemat przedstawiający rozmieszczenie akcelerometrów (ACC1 i ACC2), miejsc uderzeń (F1, F2, F3) oraz miejsc zamocowania płyty w uchwytach stojaka (Δ)

Podczas pomiarów rejestrowano i analizowano głównie amplitudę przyspieszeń drgań w dziedzinie czasu. Zarejestrowane sygnały poddano następnie analizie w środowisku MATLAB.

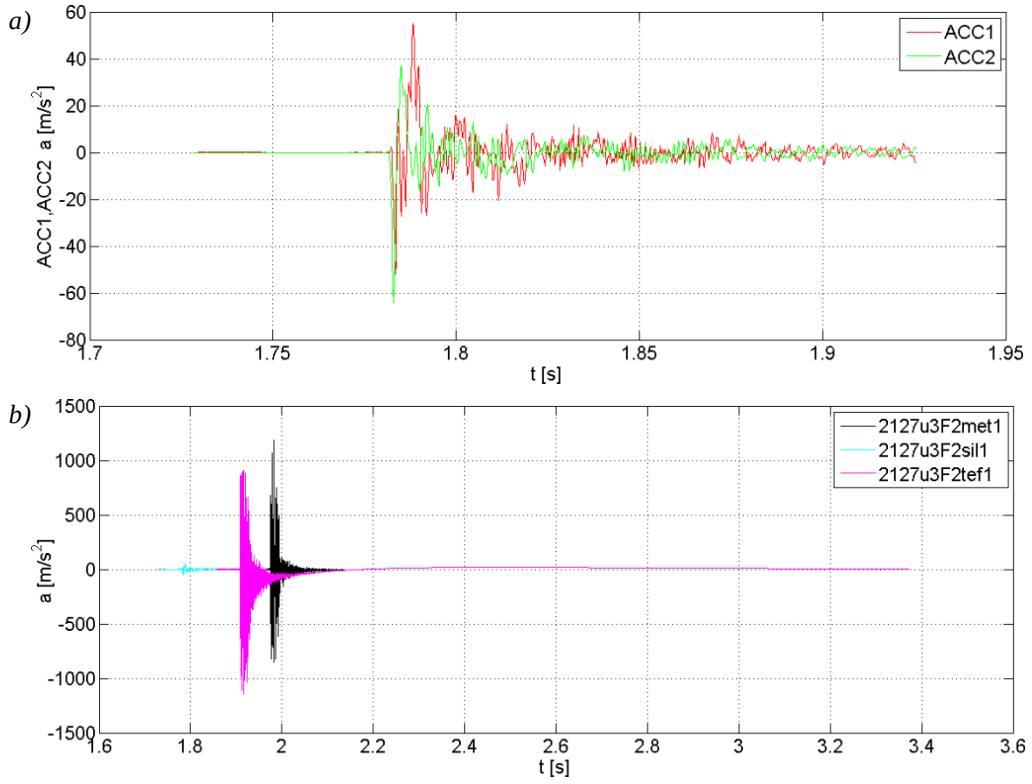
Rysunki od 3.7 do 3.10 przedstawiają przebiegi odpowiedzi zarejestrowane akcelerometrami ACC1 i ACC2 po uderzeniu w punkt F2 młotkiem modalnym z trzema różnymi końcówkami, tj. metalową, silikonową, teflonową. Na górnych wykresach w celu łatwiejszego odczytu przedstawiono jedynie wartości zarejestrowane podczas wymuszenia z użyciem metalowej końcówki na młotku modalnym.



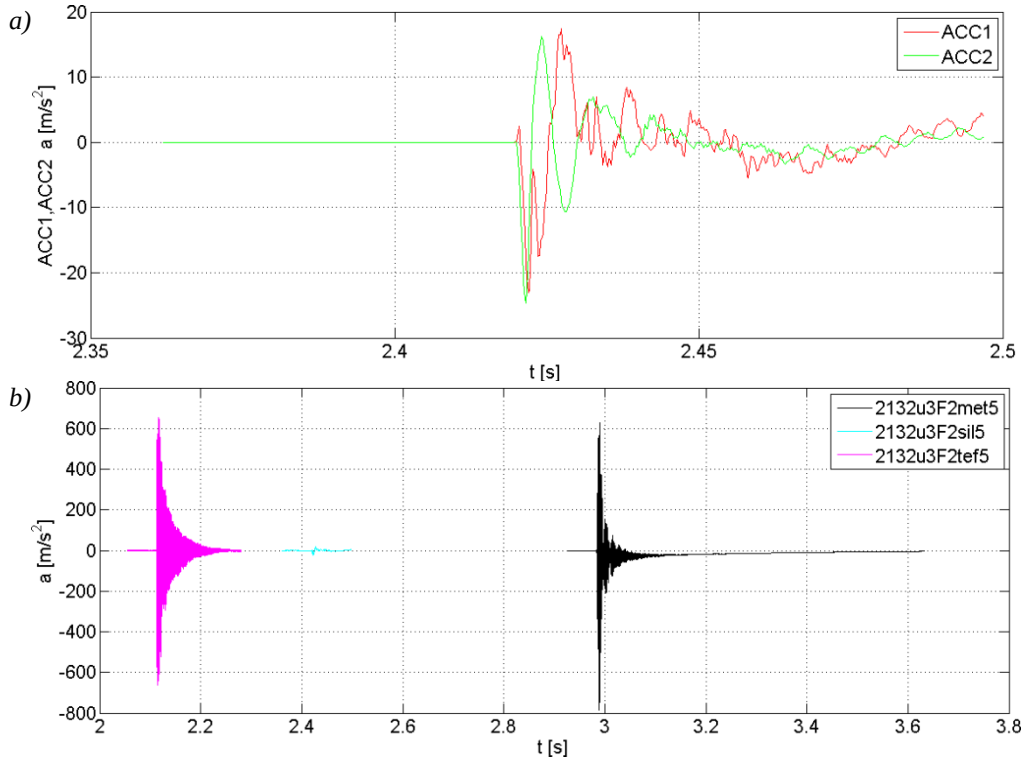
Rys. 3.7. a) Przebiegi odpowiedzi zarejestrowane akcelerometrami ACC1 i ACC2 dla płyty bez połączenia spawanego i wymuszenia końcówką metalową – 0, b) wymuszenia z użyciem młotka modalnego dla końcówki: metalowej, silikonowej i teflonowej dla płyty bez połączenia spawanego – 0



Rys. 3.8. a) Przebiegi odpowiedzi zarejestrowane akcelerometrami ACC1 i ACC2 dla płyty z połączeniem spawanym bez wad w spoinie – 2202, b) wymuszenia z użyciem młotka modalnego dla końcówki: metalowej, silikonowej i teflonowej dla płyty z połączeniem spawanym bez wad w spoinie – 2202



Rys. 3.9. a) Przebiegi odpowiedzi zarejestrowane akcelerometrami ACC1 i ACC2 dla płyty spawanej z połączeniem spawanym z wadą typu przyklejenie brzegowe w spoinie – 2127, b) wymuszenia z użyciem młotka modalnego dla końcówki: metalowej, silikonowej i teflonowej dla płyty spawanej z połączeniem spawanym z wadą typu przyklejenie brzegowe w spoinie – 2127

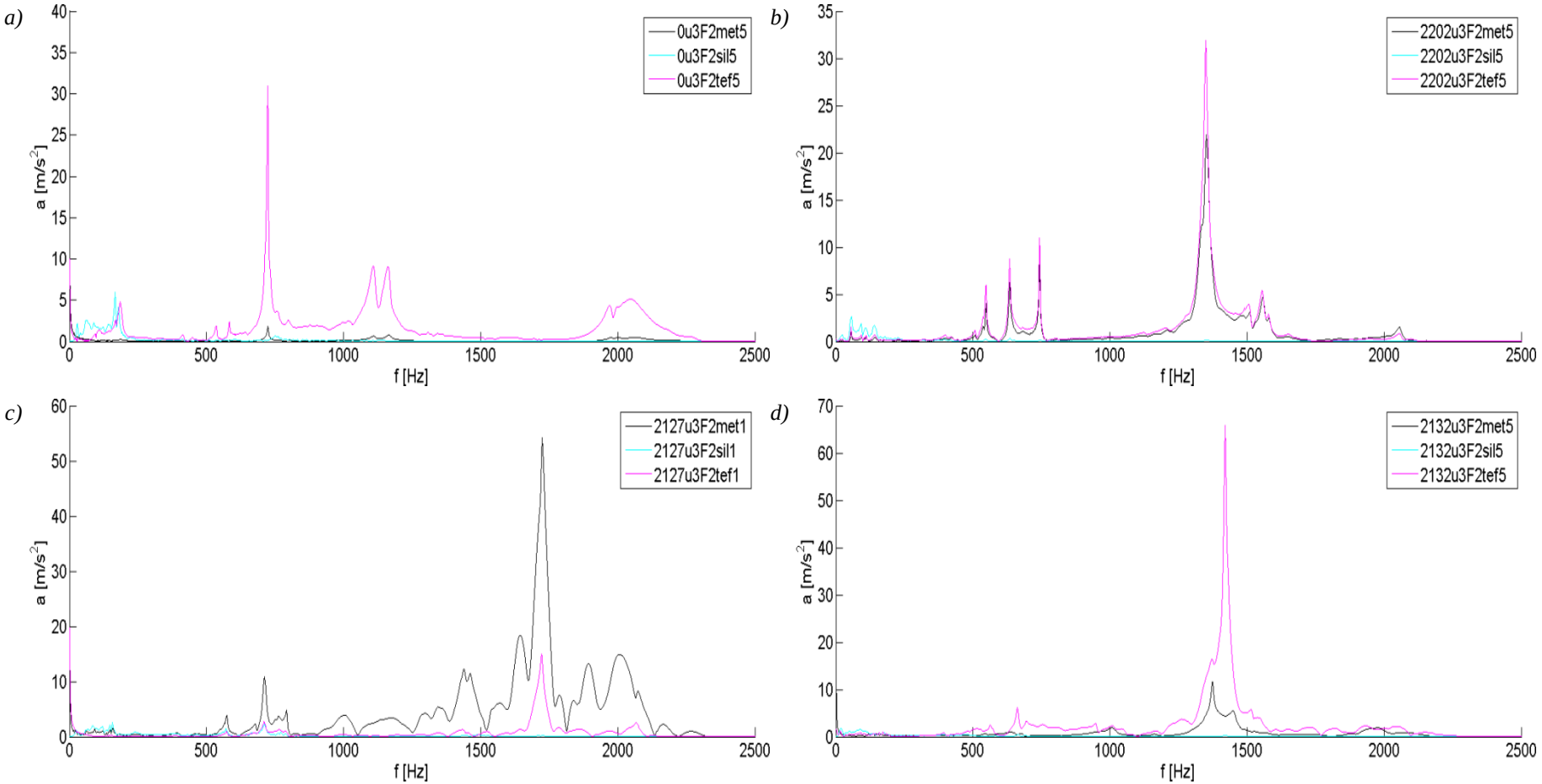


Rys. 3.10. a) Przebiegi odpowiedzi zarejestrowane akcelerometrami ACC1 i ACC2 dla płyty z wadą typu pęknięcia o zdefiniowanej długości spoinie – 2132, b) wymuszenia z użyciem młotka modalnego dla końcówki: metalowej, silikonowej i teflonowej dla płyty spawanej z wadą typu pęknięcia o zdefiniowanej długości w spoinie – 2132

Podczas realizacji badań zauważono, że oceny jakości połączeń spawanych można dokonać na podstawie analizy czasowej odpowiedzi zarejestrowanych akcelerometrami piezoelektrycznymi zwłaszcza z użyciem końcówki metalowej. Na podstawie obserwacji zarejestrowanych przebiegów czasowych amplitud prędkości drgań przedstawionych na rysunkach 3.7-3.10 zauważyć można, że przebiegi odpowiedzi różnią się między sobą amplitudami i rozkładem ich częstotliwości. W przypadku części sygnałów możliwe jest wskazanie niejednorodnych zmian amplitudy co może świadczyć o nieliniowości układu. Jest to ważna informacja diagnostyczna, która wymaga przeprowadzenia dalszej analizy. Ponadto analizując uzyskane wartości amplitud, można stwierdzić, że najwyższe wartości amplitud uzyskiwane są w przypadku płyty bez spoiny oraz płyty ze spoiną charakteryzującą się brakiem uszkodzeń. Rozpatrując pozostałe obiekty badań należy stwierdzić, że wartości amplitud są znacząco niższe, co świadczy zapewne o większej dyssypacji energii związanej z ruchem drgającym w przypadku, gdy w spoinie występuje uszkodzenie. Próby powiązania tych wartości z konkretnymi uszkodzeniami spoin zostaną podjęte na dalszych etapach pracy.

Z przeglądu publikacji wynika, że w metodzie drganiowej najwięcej informacji o badanym obiekcie można uzyskać przez analizę widm amplitudowych, tj. amplitudy drgań w funkcji częstotliwości [82, 83, 84, 91]. Dlatego dla zarejestrowanych przez akcelerometry odpowiedzi wyznaczone zostały widma (transformaty) z użyciem transformacji FFT. Następnie, przeprowadzono analizę częstotliwościową odpowiedzi z akcelerometrów, której celem było określenie zadanych powyżej parametrów badań. W tym celu obliczono i porównano widma amplitudowo - częstotliwościowe dla odpowiedzi układu przy zastosowaniu różnych końcówek młotka modalnego zarejestrowanych w tym samym miejscu uderzenia dla wszystkich badanych płyt.

W pierwszej kolejności porównano widma amplitudowo-częstotliwościowe otrzymane dla uderzenia w punkcie F2 (rysunek 3.11) z zastosowaniem końcówek: metalowej, silikonowej i teflonowej.

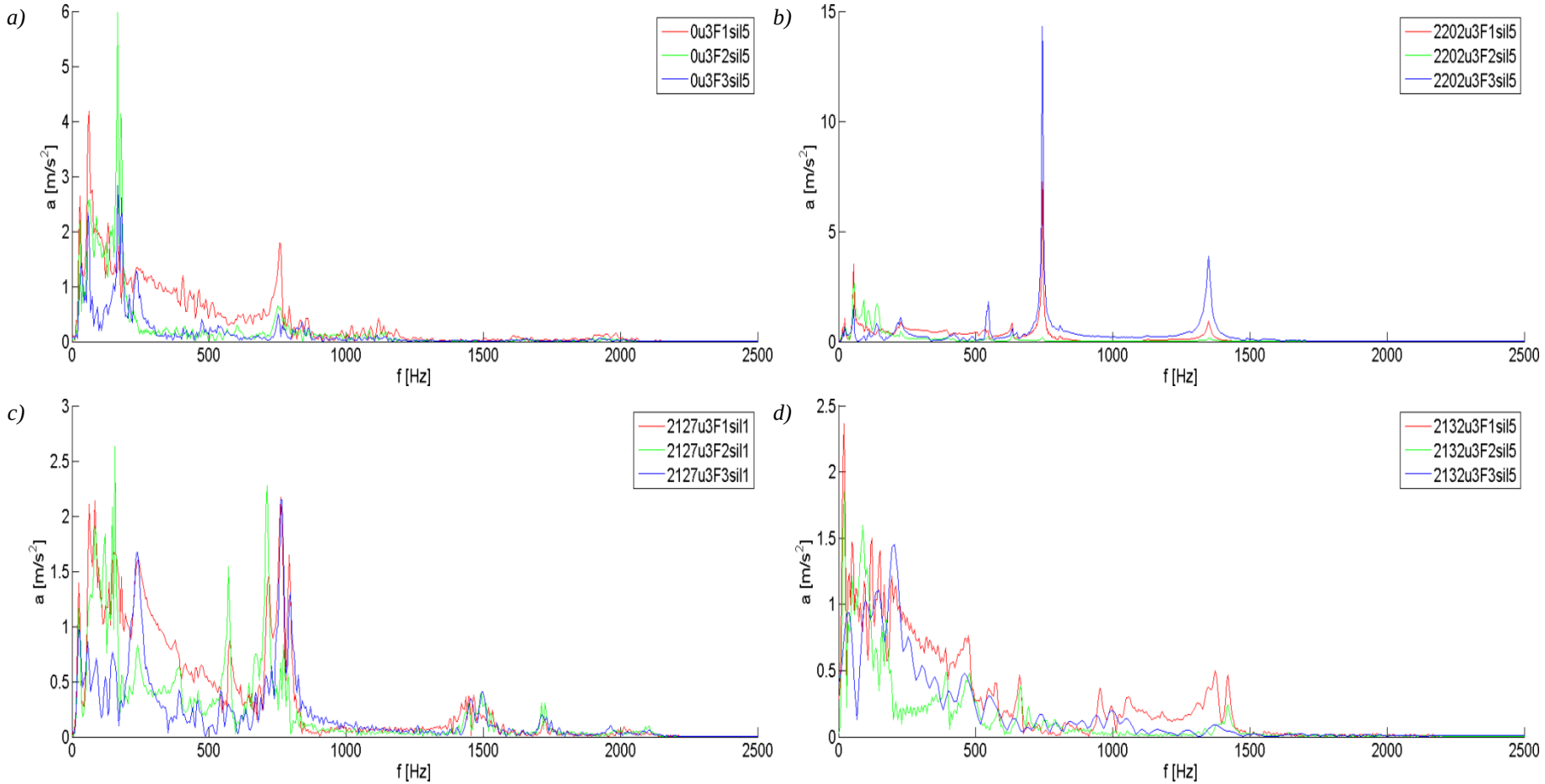


Rys. 3.11. Widma amplitudowo – częstotliwościowe przyspieszeń drgań dla odpowiedzi rejestrowanej na płytach przy zastosowaniu różnych końcówek młotka modalnego (met, sil, tef) w miejscu uderzenia F2 dla a) płyty bez połączenia spawanego – 0, b) płyty spawanej z połączeniem spawanym bez wad w spoinie – 2202, c) płyty spawanej z wadą typu przyklejenie brzegowe w spoinie – 2127, d) płyty spawanej z wadą typu pęknięcie o zdefiniowanej długości w spoinie 2132

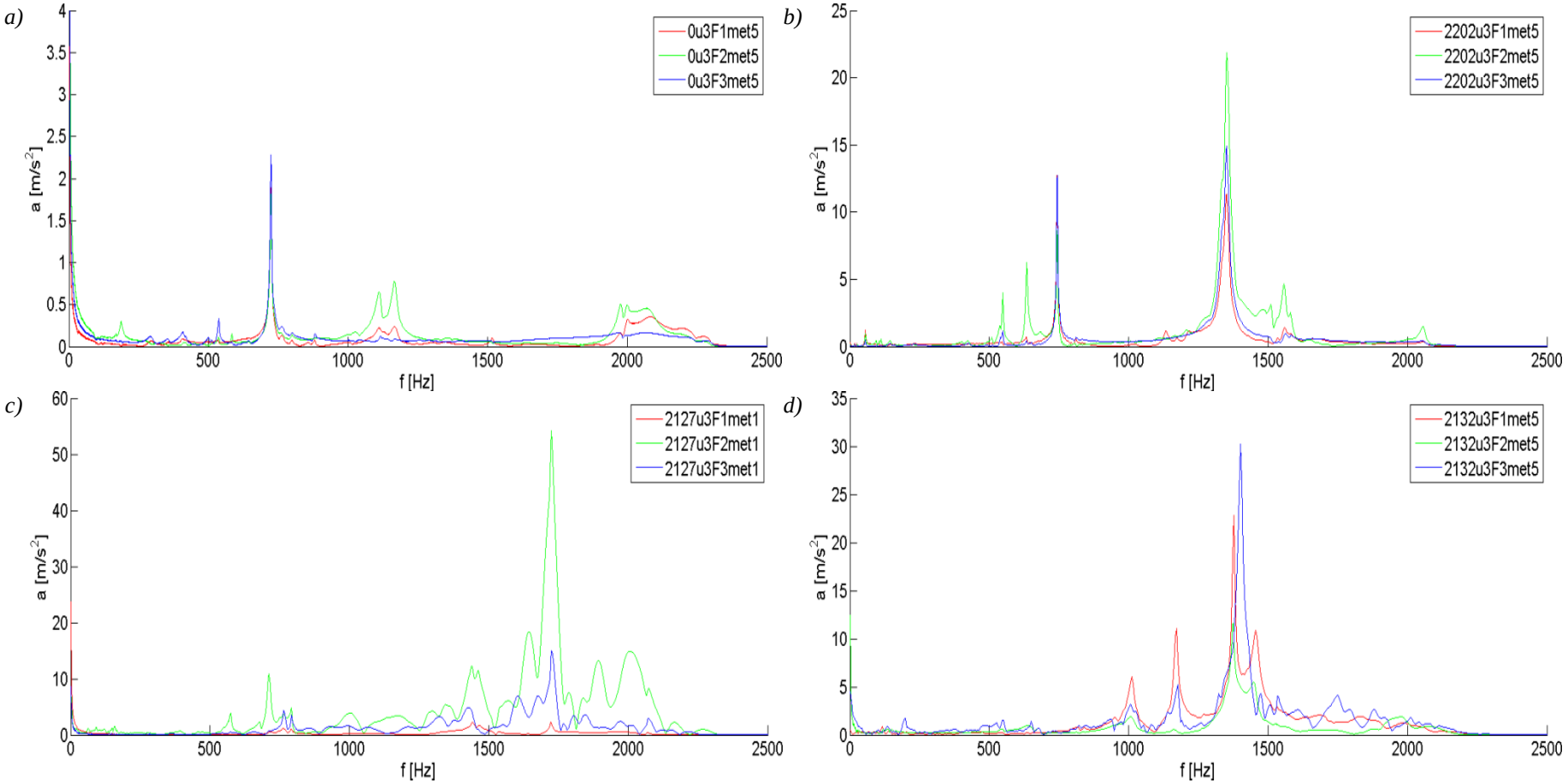
Analizując widma przedstawione na rysunku 3.11 zauważyć można zróżnicowane odpowiedzi rezonansowe w dziedzinie częstotliwości. Na tym etapie pracy trudno było jednoznacznie zinterpretować różnice wartości amplitud, jednak wynikają one zapewne z różnic dotyczących wartości impulsu wymuszającego oraz stanu spoiny.

Kolejnym zestawieniem porównawczym, które wykonano podczas analizy otrzymanych wyników pomiarowych była analiza widm amplitudowych dla tej samej końcówki (w kolejności: metalowa, silikonowa i teflonowa) w trzech miejscach uderzeń (F1, F2, F3), które przedstawiono na rysunkach 3.12-3.14. Biorąc pod uwagę charakter impulsu wymuszającego z użyciem końcówki teflonowej (długi czas trwania impulsu) jest to zapewne główna przyczyna występowania bardzo wielu odpowiedzi układu, co widoczne jest na rysunku 3.14. Widma te są trudne w interpretacji ze względu na swoją dużą niepowtarzalność. Przebiegi przedstawione na rysunkach 3.13 i 3.14 charakteryzują się mniejszą ilością „znaczących amplitud" w całym paśmie pomiarowym, co na dalszym etapie pracy powinno ułatwić interpretację uzyskanych wyników badań.

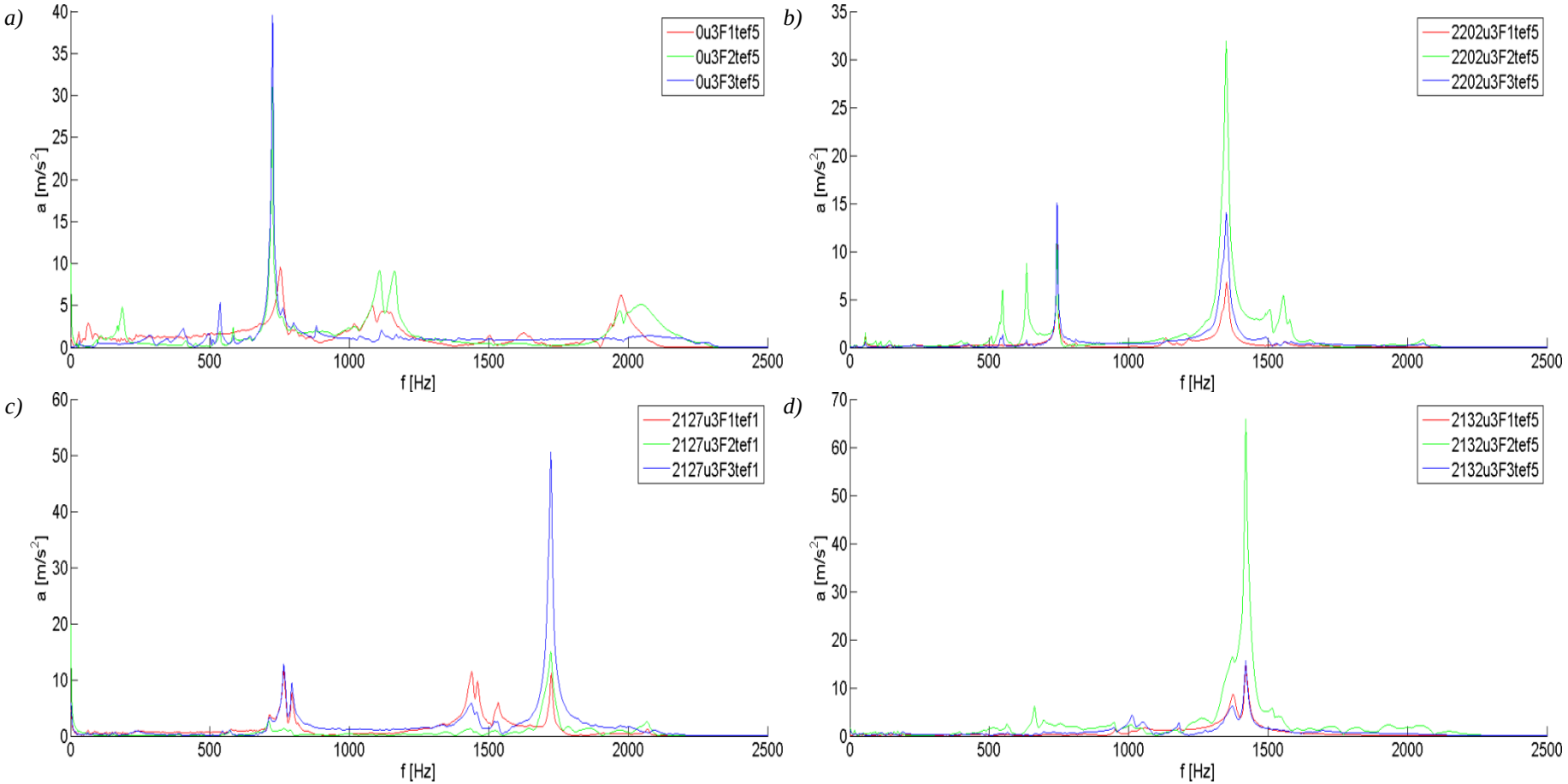
Główna różnica między widmami dla danej końcówki w rozważanych punktach powinna dotyczyć wartości amplitudy widma. Wartość częstotliwości podstawowych harmonicznych w widmie zależy od miejsca uderzenia, użytej siły oraz tłumienia związanego z płytą. Jedną z podstawowych nowości badań wibrodiagnostycznych wprowadzoną przez autora, jest założenie, że wartość tłumienia zależy od jakości spoiny.



Rys. 3.12. Widma amplitudowo-częstotliwościowe przyspieszeń drgań dla odpowiedzi rejestrowanej na płytach przy zastosowaniu końcówki silikonowej młotka modalnego w trzech miejscach uderzeń: F1, F2, F3 dla a) płyty bez połączenia spawanego – 0, b) płyty spawanej z połączeniem spawanym bez wad w spoinie – 2202, c) płyty spawanej z wadą typu przyklejenie brzegowe w spoinie – 2127, d) płyty spawanej z wadą typu pęknięcie o zdefiniowanej długości w spoinie 2132



Rys. 3.13. Widma amplitudowo-częstotliwościowe przyspieszeń drgań dla odpowiedzi rejestrowanej na płytach przy zastosowaniu końcówki metalowej młotka modalnego w trzech miejscach uderzeń: F1, F2, F3 dla a) płyty bez połączenia spawanego – 0, b) płyty spawanej z połączeniem spawanym bez wad w spoinie – 2202, c) płyty spawanej z wadą typu przyklejenie brzegowe w spoinie – 2127, d) płyty spawanej z wadą typu pęknięcie o zdefiniowanej długości w spoinie 2132



Rys. 3.14. Widma amplitudowo-częstotliwościowe przyspieszeń drgań dla odpowiedzi rejestrowanej na płytach przy zastosowaniu końcówki teflonowej młotka modalnego w trzech miejscach uderzeń: F1, F2, F3 dla a) płyty bez połączenia spawanego – 0, b) płyty spawanej z połączeniem spawanym bez wad w spoinie – 2202, c) płyty spawanej z wadą typu przyklejenie brzegowe w spoinie – 2127, d) płyty spawanej z wadą typu pęknięcia o zdefiniowanej długości w spoinie 2132

Porównując wykresy przedstawiające wyniki dla płyty bez połączenia spawanego (0) zauważono, że dla tych samych częstotliwości, gdzie słabe wzmocnienie rezonansowe generowała końcówka silikonowa, końcówka teflonowa miała wzmocnienie amplitud znacznie większe. Widmo otrzymane dla końcówki metalowej charakteryzuje się najwyższymi wartościami amplitud w pełnym zakresie częstotliwości. Poddając analizie wykresy próbki spawanej bez wad w spoinie (2202) można zauważyć, iż w tym przypadku wyniki otrzymane dla końcówki metalowej i teflonowej są podobne. W przypadku próbki ze spawem bez wad (2202) wyniki otrzymane dla końcówki silikonowej pokrywają się z wynikami otrzymanymi dla końcówki metalowej i teflonowej.

Analiza wykresów przedstawiających wyniki badań dla próbek spawanych z wadą typu przyklejenie brzegowe w spoinie (2127) można zauważyć, że końcówki metalowa i teflonowa generują wzmocnienie o porównywalnej wartości w tych samych punktach, natomiast wzmocnienie otrzymane z końcówki silikonowej mają znacząco inne wartości amplitud w pełnym paśmie pomiarowym.

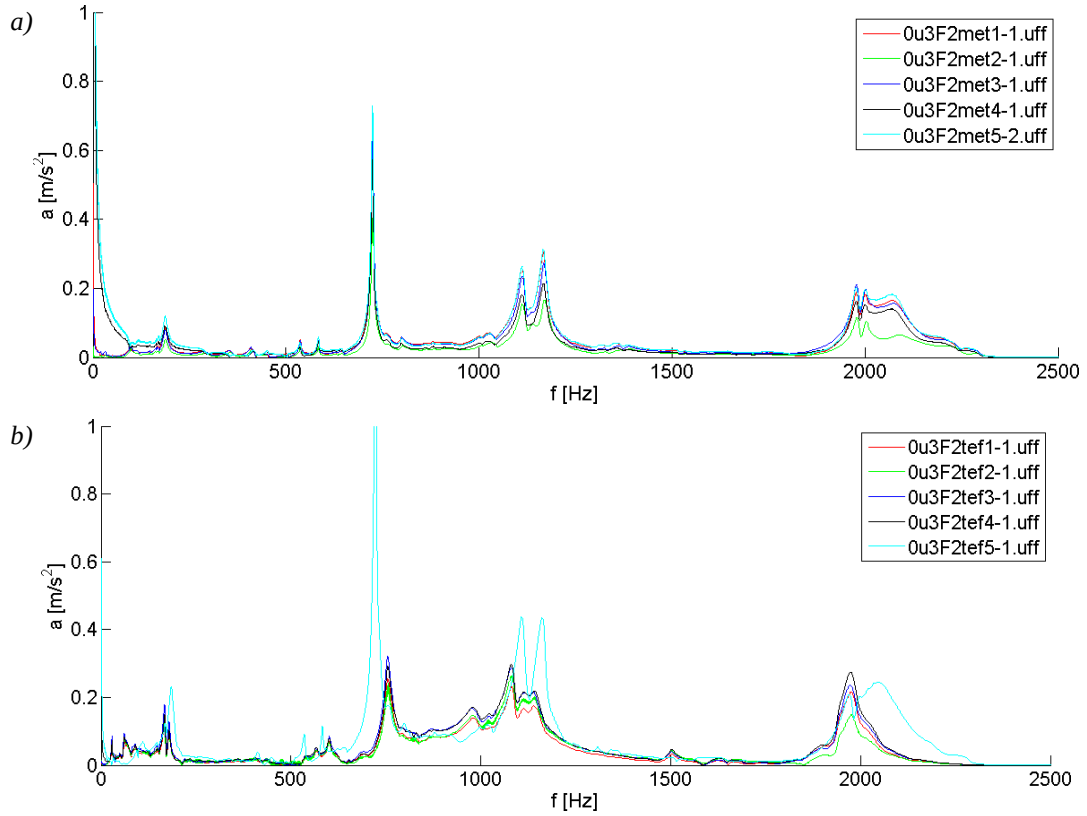
Porównanie charakterystyk FFT dla różnych końcówek przy położeniu akcelerometru w punkcie F2 (rysunki 3.12-3.14) dla płyty spawanej bez wad w spoinie (2202) oraz FFT dla różnych końcówek przy położeniu F2 dla płyty spawanej z wadą przyklejenie brzegowe w spoinie (2127) przedstawione na rysunku 3.11 wyraźnie widać, że końcówka metalowa i teflonowa generuje widma FFT charakteryzujące się zbliżonym trendem natomiast końcówka silikonowa odbiega od nich znacznie zarówno w dziedzinie częstotliwości jak i wartościach amplitud. Końcówka metalowa i teflonowa osiąga również zbliżone wartości amplitud w przypadku próbki spawanej bez wad w spoinie (2202) natomiast różne wartości w przypadku próbki spawanej z wadą typu przyklejenia brzegowego w spoinie (2127). Porównując widma dla próbek spawanych, stwierdza się, że najbardziej zbliżone wyniki uzyskuje się w przypadku zastosowania końcówki metalowej i teflonowej, natomiast widma uzyskane dla końcówki silikonowej charakteryzują się dużymi fluktuacjami dla małych częstotliwości. Widma otrzymane podczas badań z zastosowaniem końcówek metalowej i teflonowej na młotku modalnym są bardziej równomierne.

Do wyboru miejsca uderzenia w próbkę spawaną oraz wyboru typu końcówki nakładanej na młotek modalny zdefiniowano kryterium, które polegało na ocenie podobieństwa rozkładu harmonicznych w obliczonych widmach amplitudowych. Niezależnie od punktów uderzenia młotkiem modalnym, dla płyty bez połączenia spawanego (0) lub płyty spawanej bez wad w spoinie (2202), widma FFT powinny charakteryzować się zbliżonym rozkładem częstotliwościowym maksymalnych amplitud. Określając najlepsze miejsce uderzenia młotkiem modalnym zdecydowano, że wybrany zostanie punkt, w którym widma amplitudowe są najbardziej zbliżone do siebie przy zastosowaniu różnych typów końcówek. Widma takie będą zawierały łatwo interpretowalne informacje dotyczące amplitud maksymalnych dla różnych postaci drgań własnych. Amplitudy te z kolei, jak się oczekuje zmieniać się będą w zależności od stanu technicznego spoin. Z porównania widm przedstawionych wynika, że najlepszym miejscem badania z pośród typowanych jest pozycja F2 na płycie spawanej. Na podstawie otrzymanych widm amplitudowych, a w szczególności z powodu dużej rozbieżności między widmami otrzymanymi dla końcówki silikonowej zdecydowano, że w dalszej części badań nie będzie ona stosowana.

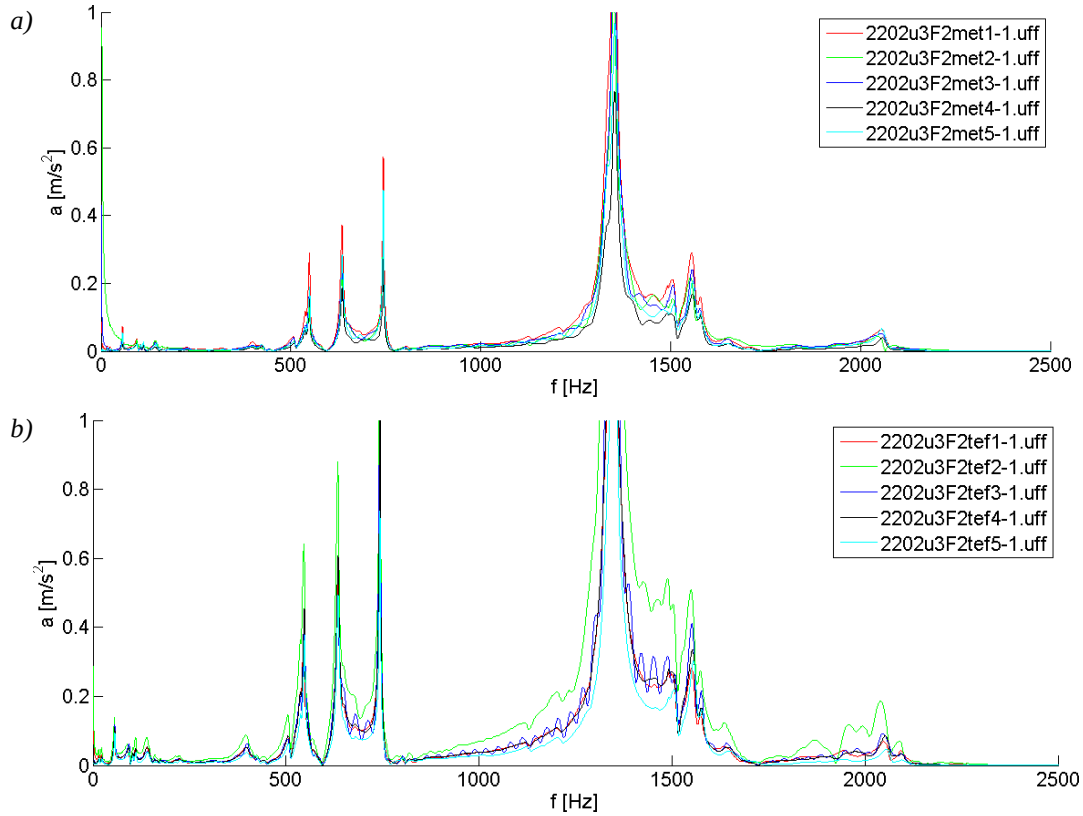
Podsumowując, na podstawie analiz dotychczas przedstawionych wyników badań wstępnych stwierdzono, że dalszą część eksperymentów (w części zasadniczej) powinno się przeprowadzić za pomocą końcówki metalowej i/lub teflonowej w punkcie uderzenia F2.

Po wyborze końcówki młotka modalnego oraz miejsca uderzenia przeprowadzono analizę, w której oceniono, w jakim stopniu rozrzut miejsca i siły uderzenia młotkiem modalnym wpływa na drgania i tym samym na charakterystykę widm. Aby ocenić wpływ siły uderzenia i rozrzutu miejsca uderzenia przeprowadzono próby, w których pięciokrotnie,

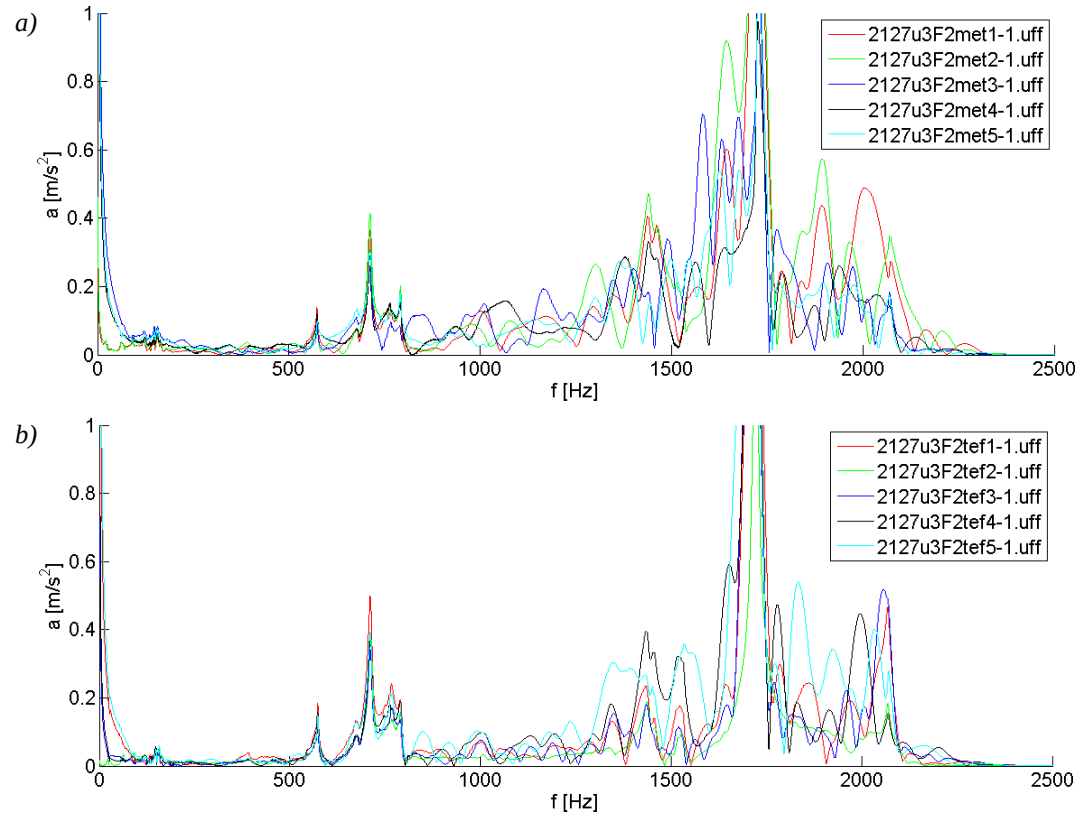
z taką samą końcówką, ale różną siłą uderzano w zadany punkt i odczytywano odpowiedzi. Rozrzut uderzenia wynika z niepowtarzalności operatora, który wymusza impuls młotkiem modalnym ręcznie. Podczas przygotowania do badań rozważano zastosowanie mechanizmu umożliwiającego uzyskanie powtarzalnej siły i punktu uderzenia jednak zrezygnowano z takiego rozwiązania. Wynika to z faktu, że przewiduje się możliwość wdrożenia opisywanej metody w przemyśle, gdzie jedynym rozsądnym sposobem wymuszania impulsu będzie właśnie wymuszanie ręczne. Na rysunkach od 3.15 do 3.18 przedstawiono widma wykonane dla pięciu uderzeń końcówkami metalową i teflonową.



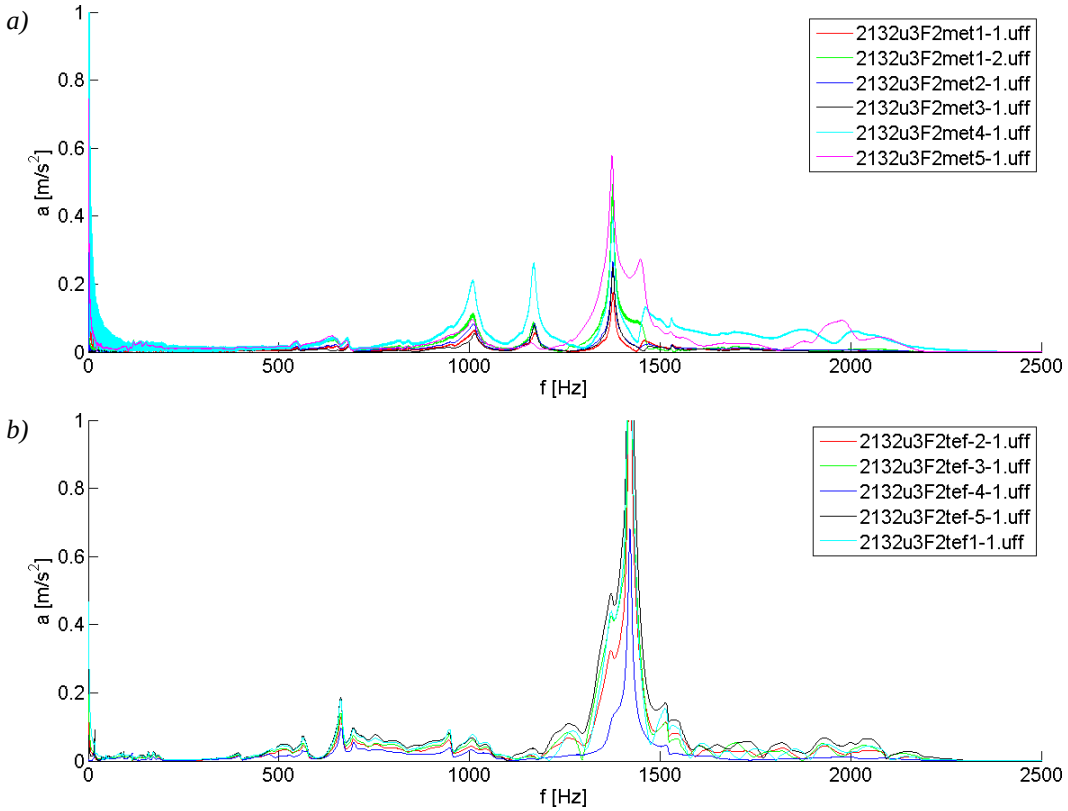
Rys. 3.15. FFT dla pięciu uderzeń z zastosowaniem końcówek a) metalowej i b) teflonowej w punkt uderzenia F2 dla płyty bez połączenia spawanego – 0.



Rys. 3.16. FFT dla pięciu uderzeń młotkiem modalnym z zastosowaniem końcówek a) metalowej i b) teflonowej w punkcie uderzenia F2 dla płyty z połączeniem spawanym bez wad w spoinie – 2202



Rys. 3.17. FFT dla pięciu uderzeń młotkiem modalnym z zastosowaniem końcówek a) metalowej i b) teflonowej w punkt uderzenia F2 dla płyty spawanej z wadą typu przyklejenie brzegowe – 2127



Rys. 3.18. FFT dla pięciu uderzeń młotkiem modalnym zastosowaniem z końcówek a) metalową i b) teflonową w punkt uderzenia F2 dla płyty z wadą typu pęknięcie o zdefiniowanej długości – 2132

Analizując rysunki 3.15-3.18 zaobserwować można zmieniające się wartości amplitud oraz ilość wzbudzonych postaci drgań własnych układu, w zależności od stanu badanej spoiny. Stan techniczny zmienia stopień nieliniowości układu. Im gorsza jakość spoiny tym więcej naprężeń lokalnych ona generuje, co może w konsekwencji powodować zróżnicowane odpowiedzi związanych z postaciami drgań własnych układu. Analiza przedstawionych widm nasuwa również wniosek, że w przypadku braku spoiny nie występuje odpowiedź przy częstotliwości około 1400 Hz. Jest to tym bardziej interesujące, że odpowiedź przy tej częstotliwości występuje przy wszystkich pozostałych widmach, gdzie obiektami badanymi były płyty ze spoinami. Biorąc pod uwagę identyczne wymiary badanych płyt można postawić wniosek, że już samo wystąpienie spoiny powoduje zmianę odpowiedzi układu, ponadto możliwe będzie powiązanie tych odpowiedzi ze stanem spoiny. Na rysunku 3.15 a, widoczna jest powtarzalność widm zarówno w dziedzinie częstotliwości jak i wartości amplitudy. Na rysunku 3.15 b, występują zmiany wartości amplitud maksymalnych, a także częstotliwości ich wystąpienia. Na rysunku 3.18 a, widoczna jest powtarzalność widm zarówno w dziedzinie częstotliwości jak i wartości amplitudy. Na rysunku 3.16 b, występują zmiany wartości amplitud maksymalnych a także częstotliwości ich wystąpienia. Analiza rysunków 3.17 a i b, pozwalana na stwierdzenie, że poza dominującymi odpowiedziami układu, wyraźnie widoczne są zakłócenia w pełnym paśmie pomiarowym. Sytuacja ta występuje zarówno w przypadku zastosowania końcówki metalowej jak teflonowej. Być może wada typu przyklejenie brzegowe (rysunek 3.17) generuje dodatkowe składowe widma, będzie to badane na dalszym etapie pracy. Na rysunkach 3.18 a i b, ponownie zauważalna jest lepsza powtarzalność wartości amplitud przy zastosowaniu metalowej końcówki młotka modalnego. Analiza rysunków 3.15-3.18 pozwala stwierdzić, że najlepszym sposobem wymuszania drgań w badanych płytach jest użycie końcówki metalowej.

Do oceny dopuszczalnego rozrzutu miejsca uderzenia młotkiem modalnym przeprowadzono analizę widm charaktersytyk dynamicznych metodami statystycznymi. Analiza dotyczyła widm obliczonych dla płyty bez połączenia spwanego oraz płyty bez wad w spoinie. W trakcie pomiaru charakterystyk drganiowych dla badanych płyt odnotowano współrzędne uderzenia młotkiem modalnym. Pomiary zostały powtórzone pięć razy, tj. dla każdej końcówki młotka i dwóch typów płyt. Następnie, zastosowano statysytki opisowe do porównania charakterystyk widmowch. Porównania dokonano na podstawie analizy wartości średniej (M) – (3.1), mediany (Me) – (3.2) i przedziału ufności z odchylenia standarowego (Sd)– (3.3) na poziomie 95%.

$$W_m = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} |w(t)dt| \tag{3.1}$$

gdzie: T – okres przebiegu, t_0 – czas początkowy, $|w(t)|$–chwilowe wartości bezwzględne przebiegu, t – czas trwania analizowanego przebiegu.

$$M = \frac{n+1}{2} \tag{3.2}$$

gdzie: n – liczba próbek w badanym przebiegu.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(w_i - \overline{w})^2}{n-1}} \tag{3.3}$$

gdzie: w_i – wartości chwilowe przebiegu, $\overline{w}$ – średnia arytmetyczna próby, n – liczba elementów w próbie.

Taki zestaw statystyk opisowych pozwolił porównać charakterystyki widmowe zarówno w zakresie zmian częstotiliwości jak i modułu amplitudy. W tabeli 3.1 i 3.2 przedstawiono wartości obliczonych statystyk opisowych.

Tabela 3.1. Statystyki opisowe dla płyty jednorodnej – 0u3F2met i 0u3F2tef

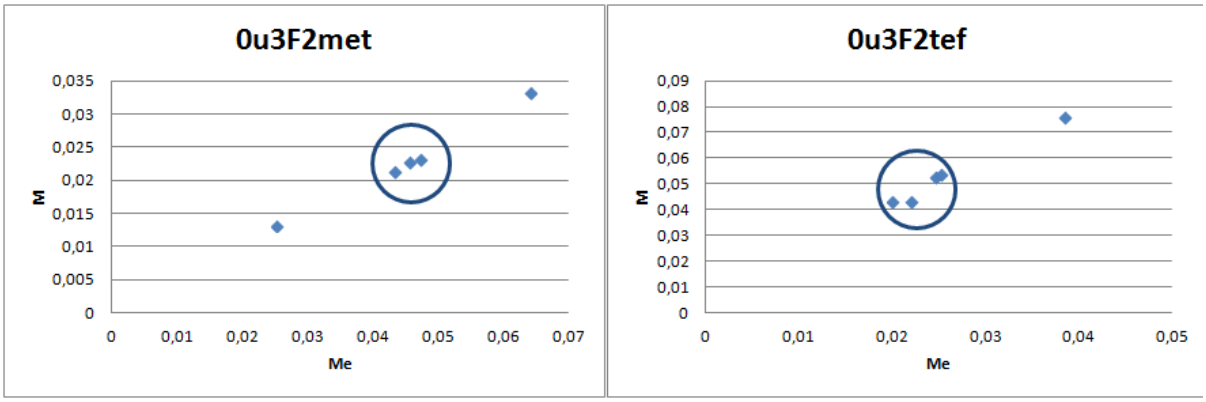
		M	Se	Me	Sd	Min	Max
teflon	1	0,043	2,86E-04	0,020	0,052	8,15E-07	0,255
	2	0,044	2,82E-04	0,022	0,051	1,65E-07	0,263
	3	0,053	4,94E-04	0,025	0,063	6,95E-07	0,322
	4	0,054	5,04E-04	0,025	0,064	1,10E-06	0,297
	5	0,076	6,15E-04	0,038	0,111	3,41E-07	1,502
metal	1	0,046	3,38E-04	0,023	0,061	7,98E-07	0,856
	2	0,025	1,86E-04	0,013	0,034	7,36E-07	0,403
	3	0,043	3,19E-04	0,021	0,058	3,32E-07	0,658
	4	0,047	7,40E-04	0,023	0,189	4,32E-07	11,492
	5	0,064	1,41E-03	0,033	0,256	6,57E-06	15,883

Tabela 3.2. Statystyki opisowe dla płyty spawanej bez wad w spoinie – 2202u3F2met i 2202u3F2tef

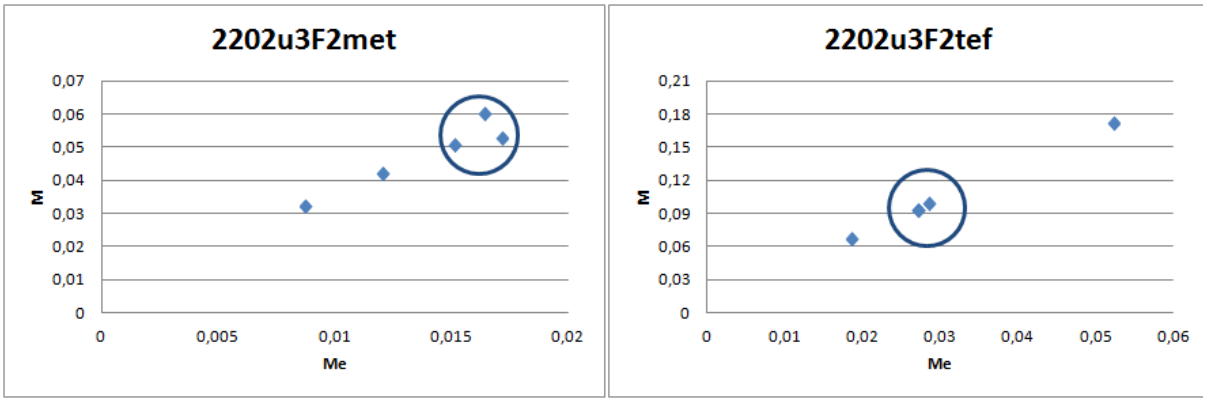
		M	Se	Me	Sd	Min	Max
teflon	1	0,094	1,29E-03	0,027	0,234	8,701E-07	2,687
	2	0,173	2,32E-03	0,052	0,420	1,926E-07	4,808
	3	0,100	1,34E-03	0,028	0,242	6,368E-07	2,481
	4	0,095	1,29E-03	0,027	0,234	7,201E-07	2,654
	5	0,068	1,28E-03	0,019	0,164	4,150E-07	1,793
metal	1	0,060	7,96E-04	0,016	0,144	2,127E-06	1,506
	2	0,053	5,30E-04	0,017	0,136	2,946E-07	5,424
	3	0,051	6,70E-04	0,015	0,121	2,476E-07	1,280
	4	0,032	4,14E-04	0,009	0,075	2,283E-07	0,767
	5	0,042	5,44E-04	0,012	0,098	1,046E-06	0,966

Przy założeniu, że warunki otoczenia oraz montażu próbek, w których odbywały się pomiary były zawsze takie same to główna różnica między obliczonymi charakterystykiami widmowymi przy kolejnych powtórzeniach wynika z rozrzutu miejsca i siły uderzenia młotkiem modalnym. Zmiana uderzenia skutkuje innym impulsem pubudzającym, co w konsekwencji doprowadzić może do innych odpowiedzi badanego układu. Na podstawie przedstawionych statystyk opisowych widać wyraźnie, że widma różnią się między sobą. Różnice są tym większe im bardziej zmienione zostało miejsce uderzenia przy jego powtórzeniu.

Na rysunkach 3.19 i 3.20 przedstawiono koncentrację miejsca uderzenia reprezetowaną przez wartość średnią i medianę. Na podstawie wartości statystyk ustalono, że dopuszczalnym rozrzutem miejsca uderzenia, który w sposób satysfakcjonujący pozwala uzyskać powtarzalność pomiarów jest punkt o średnicy 0,5 cm. Punkty, które spełniają ten warunek zostały otoczone okręgiem na rysunkach 3.19 i 3.20.



Rys. 3.19. Rozrzut punktu uderzenia młotkiem modalnym dla płyty bez połączenia spawanego 0



Rys. 3.20. Rozrzut punktu uderzenia młotkiem modalnym dla płyty spawanej bez wad w spoinie 2202

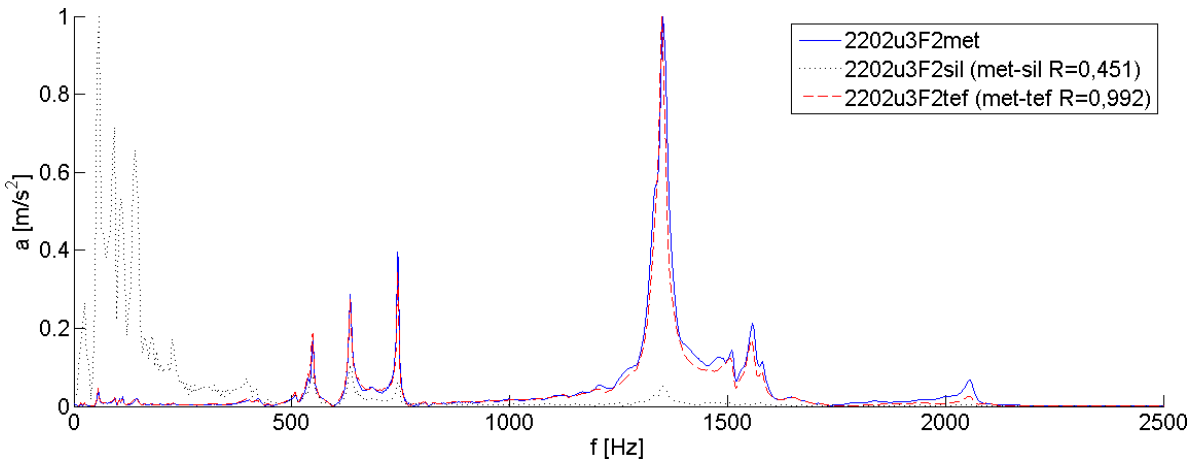
Prezentowane wyniki analiz dają przesłanki do wnioskowania, że zastosowanie metody drganiowej dla połączeń spawanych umożliwi uzyskanie informacji diagnostycznych pozwalające na wnioskowanie o ich stanie i jakości. W kolejnym etapie, badania będą zrealizowane przy pomocy końcówki metalowej i teflonowej w punkcie uderzenia F2 oraz przy innych konfiguracjach rozmieszczenia akcelerometrów.

Na podstawie przeprowadzonej analizy rozrzutu miejsca i siły uderzenia młotkiem modalnym można wnioskować, że w przypadku potrzeby otrzymania powtarzalnych widm dla charakterystyk dynamicznych należy zapewnić mały rozrzut uderzania i podobną jego siłę. W kontekście opracowywanej metody porównawczej, która będzie wykorzystywana do oceny jakości połączeń spawanych, jest to ważny element warunkujący jej stosowanie do identyfikacji niezgodności w spoinach.

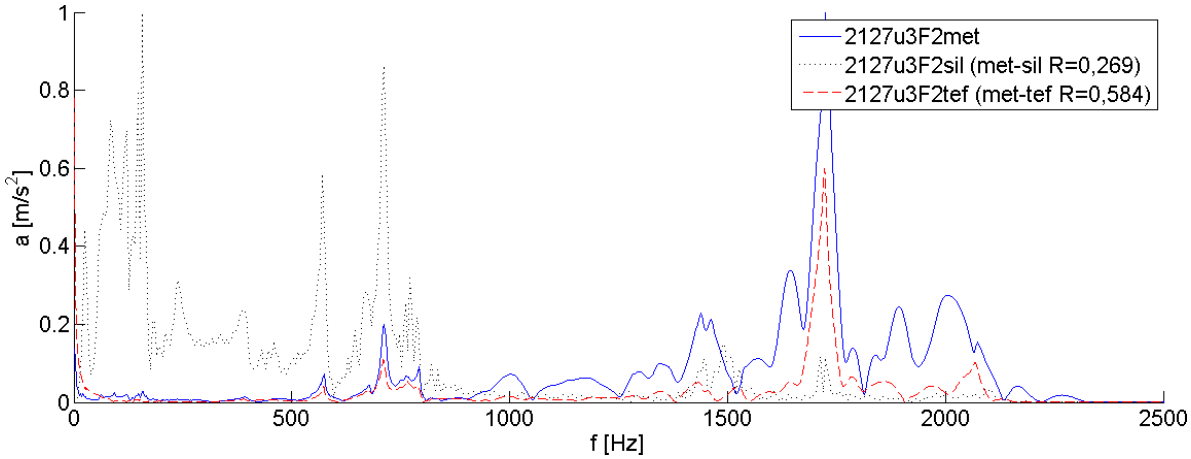
3.3. KLASYCZNA METODA ANALIZ WIBRODIAGNOSTYCZNYCH W OCENIE POŁĄCZEŃ SPAWANYCH

Dotychczas stosowane metody analiz wibrodiagnostycznych bazują głównie na badaniu zmian charakterystyk częstotliwościowych danego układu. Odbywa się to poprzez badania porównawcze wykresów uzyskanych po transformacji FFT. Uzyskane przez autora wyniki pozwalają wnioskować, że właściwie zaplanowane i wykonane badania przy wykorzystaniu klasycznych technik przetwarzania sygnałów typu FFT mogą okazać się wystarczające do wnioskowania o jakościowym stanie technicznym spoiny. Należy podkreślić, że diagnostyka taka będzie miała bardziej charakter jakościowy niż ilościowy. Klasyczna metoda badań wibrodiagnostycznych bazująca na porównaniu widm odpowiedzi układu na wymuszenia różnymi końcówkami młotka zostanie przedstawiona w niniejszym rozdziale.

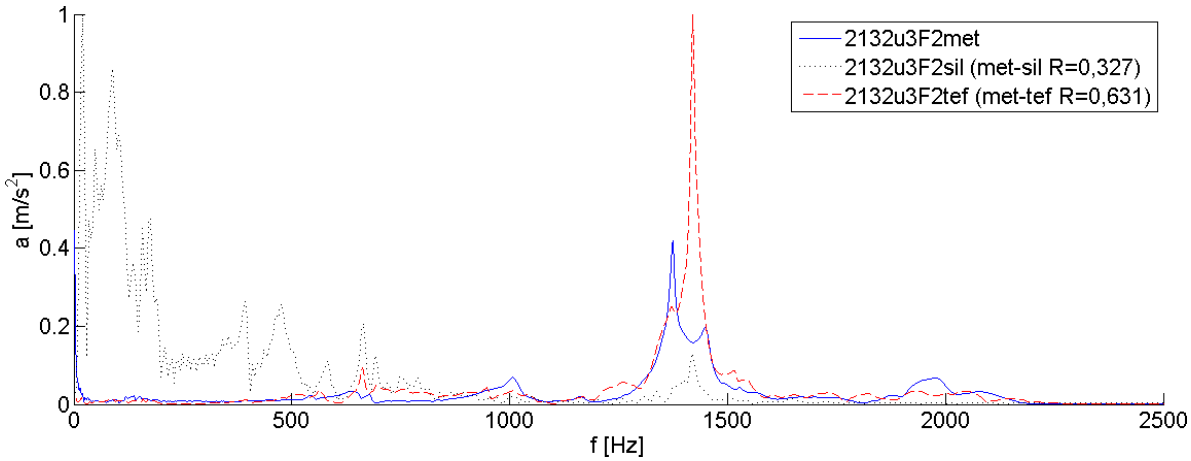
Proponowana koncepcja metody porównawczej do oceny płyt spawanych opiera się na wynikach uzyskanych na etapie porównywania widm amplitudowych uzyskanych dla różnych końcówek młotka modalnego. Na rysunkach 3.21 do 3.23 przedstawiono widma amplitudowe dla drgań w badanych płytach z dobrym spawem, przy wadzie typu przyklejenie brzegowe oraz pęknięcie na całej długości.



Rys. 3.21. Widma amplitudowe drgań płyty spawanej z połączeniem spawanym bez wad w spoinie – 2202 (końcówki: metalowa, silikonowa i teflonowa)



Rys. 3.22. Widma amplitudowe drgań płyty spawanej z wadą typu przyklejenie brzegowe w spoinie –2127 (końcówki: metalowa, silikonowa i teflonowa)



Rys. 3.23 Widma amplitudowe drgań płyty spawanej z wadą typu pęknięcie o zdefiniowanej długości w spoinie – 2132 (końcówki: metalowa, silikonowa i teflonowa)

Na podstawie analizy charakterystyk przedstawionych na rysunkach od 3.21 do 3.23 można stwierdzić, że wyniki otrzymane dla końcówki silikonowej wyraźnie różnią się od wyników uzyskanych dla końcówki teflonowej i metalowej, o czym była mowa we wcześniejszym rozdziale. Analiza przedstawionych charakterystyk pozwala również

zauważyć, że dla płyty z dobrym spawem widma uzyskane końcówkami teflonową i metalową są bardzo podobne, a dla płyty z wadami znacznie różnią się. Oprócz oceny polegającej na wizualnym porównaniu charakterystyk przeprowadzono obliczenia, w których wyznaczono współczynnik R-kwadrat - zwany współczynnikiem determinacji (3.4).

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^{n} (\widehat{w_t} - \overline{w})^2}{\sum_{t=1}^{n} (w_t - \overline{w})^2} \tag{3.4}$$

gdzie: w_t – wartość zmiennej rzeczywistej w momencie t, $\widehat{w_t}$ – wartość teoretyczna zmiennej objaśnianej uzyskana na podstawie przyjętego modelu, $\overline{w}$ – średnia arytmetyczna wartości zmiennej objaśnianej

Współczynnik ten można użyć do porównania i oceny stopnia dopasowania dwóch charakterystyk. W prowadzonych badaniach, za dane objaśniane uznano widma otrzymane dla końcówki metalowej młotka modalnego, natomiast pozostałe charakterystyki były traktowane jako dane objaśniające. Współczynnik R-kwadrat przyjmuje wartości z przedziału (1; 0) co oznacza, że gdy wartość współczynnika zbliża się do jedności to świadczy to o bardzo dobrym dopasowaniu danych objaśniających do objaśnianych. W przypadku, gdy tendencja jest przeciwna, czyli współczynnik zmierza do zera, to wówczas świadczy to o słabym bądź niewielkim dopasowaniu danych. W rozważanych przypadkach okazało się, że największe dopasowanie wykazują wyniki uzyskane dla końcówki metalowej i teflonowej dla płyty z połączeniem spawanym bez wad w spoinie (2202), w pozostałych przypadkach wartość współczynnika determinacji jest dużo niższa, chociaż nie przekracza wartości 0,5. Jako potwierdzenie wcześniejszego stwierdzenia, dla końcówki silikonowej i metalowej obserwujemy małe wartości współczynnika determinacji, które nie przekraczają wartości 0,5.

Do dalszego badania podobieństw i różnic między widmami i końcówkami posłużono się miarami statystycznymi. Wyznaczając wariancję posłużono się równaniem (3.5). W tabelach od 3.3 do 3.5 przedstawiono obliczenia najważniejszych miar statystycznych dla analizowanych charakterystyk.

$$s = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (w_i - \overline{w})^2 \tag{3.5}$$

Tabela 3.3. Zestawienie miar statystycznych dla płyty 2202 (płyta spawana z połączeniem spawanym bez wad w spoinie)

Miara statystyczna	końcówka teflonowa					końcówka metalowa				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Średnia	0,0349	0,0360	0,0402	0,0356	0,0367	0,0400	0,0396	0,0422	0,0438	0,0414
Mediana	0,0101	0,0109	0,0115	0,0102	0,0107	0,0109	0,0118	0,0113	0,0124	0,0116
Odchylenie standardowe	0,0870	0,0874	0,0977	0,0882	0,0901	0,0957	0,0948	0,0977	0,1020	0,0975
Wariancja próbki	0,0076	0,0076	0,0096	0,0078	0,0081	0,0092	0,0090	0,0095	0,0104	0,0095

Tabela 3.4. Zestawienie miar statystycznych dla płyty 2127 (płyta spawana z wadą typu przyklejenie brzegowe w spoinie)

Miara statystyczna	końcówka teflonowa					końcówka metalowa				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Średnia	0,1235	0,0632	0,0967	0,1244	0,1571	0,0766	0,0791	0,0250	0,0231	0,0509
Mediana	0,0436	0,0252	0,0341	0,0529	0,0649	0,0330	0,0283	0,0146	0,0119	0,0220
Odchylenie standardowe	0,2902	0,1348	0,2219	0,2312	0,2729	0,1225	0,1310	0,0373	0,0379	0,0822
Wariancja próbki	0,0842	0,0182	0,0492	0,0534	0,0745	0,0150	0,0172	0,0014	0,0014	0,0088

Tabela 3.5. Zestawienie miar statystycznych dla płyty 2132 (płyta spawana z wadą typu pęknięcie o zdefiniowanej długości w spoinie)

Miara statystyczna	końcówka teflonowa					końcówka metalowa				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Średnia	0,0567	0,0452	0,0526	0,0208	0,0709	0,0115	0,0205	0,0129	0,0093	0,0136
Mediana	0,0252	0,0236	0,0231	0,0089	0,0364	0,0066	0,0104	0,0082	0,0052	0,0076
Odchylenie standardowe	0,1411	0,1092	0,1290	0,0517	0,1646	0,0684	0,0384	0,0211	0,0193	0,0368
Wariancja próbki	0,0199	0,0119	0,0166	0,0027	0,0271	0,0047	0,0015	0,0004	0,0004	0,0017

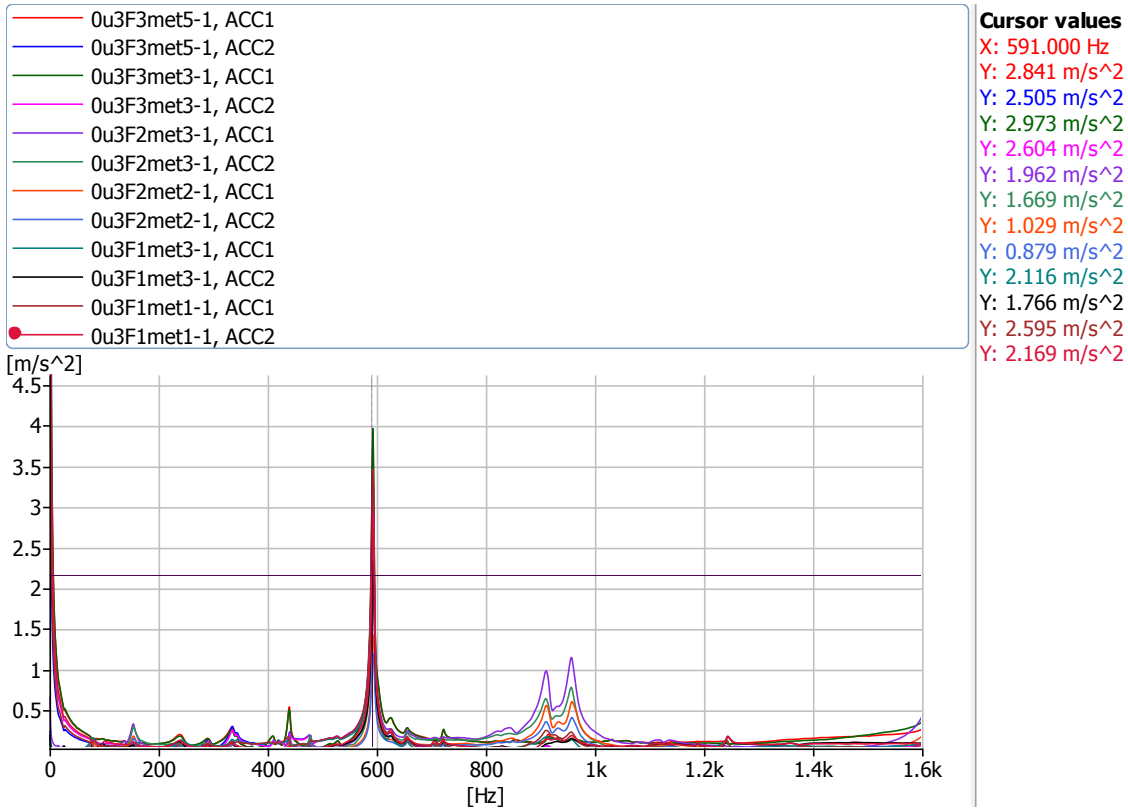
Porównując wyniki przedstawione w tabelach od 3.3 do 3.5 można wnioskować, że dla płyty z spawem bez wad w spoinie miary statystyczne potwierdzają korelację między widmem amplitudowym uzyskanym dla końcówki metalowej i teflonowej. W przypadku końcówki silikonowej takiej prawidłowości nie zaobserwowano.

Przedstawioną koncepcję metody porównawczej do oceny płyt z połączeniami spawanymi należy traktować jedynie jako propozycję. Jednocześnie, należy wskazać na konieczność przeprowadzenia dalszych badań, które powinno przeprowadzić się dla większego zbioru próbek. W szczególności, należałoby potwierdzić zgodność wyników uzyskiwanych dla płyt z dobrym spawem oraz zbadać, jakie charakterystyki widmowe zostaną uzyskane dla innych typów wad, niż przedstawione na wykresach 3.21-3.23. Zagadnienia te zostały rozważone w dalszej części niniejszej dysertacji. Proponowana metoda pozwala na selekcję płyt na te z dobrym spawem oraz z wadami w połączeniu spawanym. Główną zaletą tej metody była by jej szybkość i prostota, która wynika z faktu, że przy stosunkowo małym nakładzie koniecznych obliczeń, wystarczy porównać wybrane miary statystyczne otrzymane dla dwóch pomiarów końcówką metalową i teflonową. W przypadku zbieżności wyników można wnioskować, że spaw jest dobrze wykonany, a przy dużej rozbieżności, którą należy zdefiniować na drodze doświadczalnej, że spaw posiada wady.

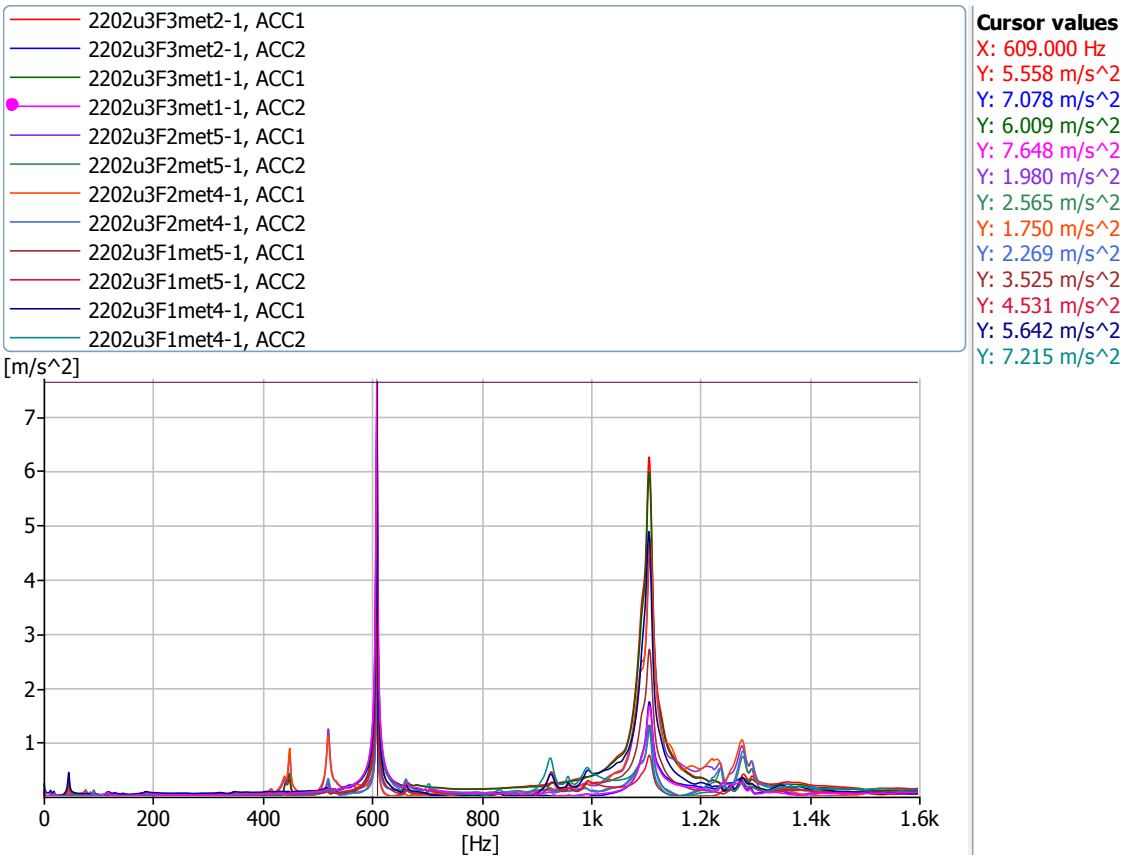
Metoda ta nie pozwala natomiast na rozróżnienie rodzaju wady spawu. Aby uzyskać taką możliwość należy posłużyć się dokładniejszymi metodami, które wymagają bardziej złożonych analiz i obliczeń, np. metodą okien czasowych czy analizą dekrementu tłumienia, którym autor poświęci uwagę w dalszej części swojej pracy.

Równolegle do analiz prowadzonych z użyciem oprogramowania MATLAB prowadzono analizy w programie Pulse Reflex firmy B&K. W programie tym poddano

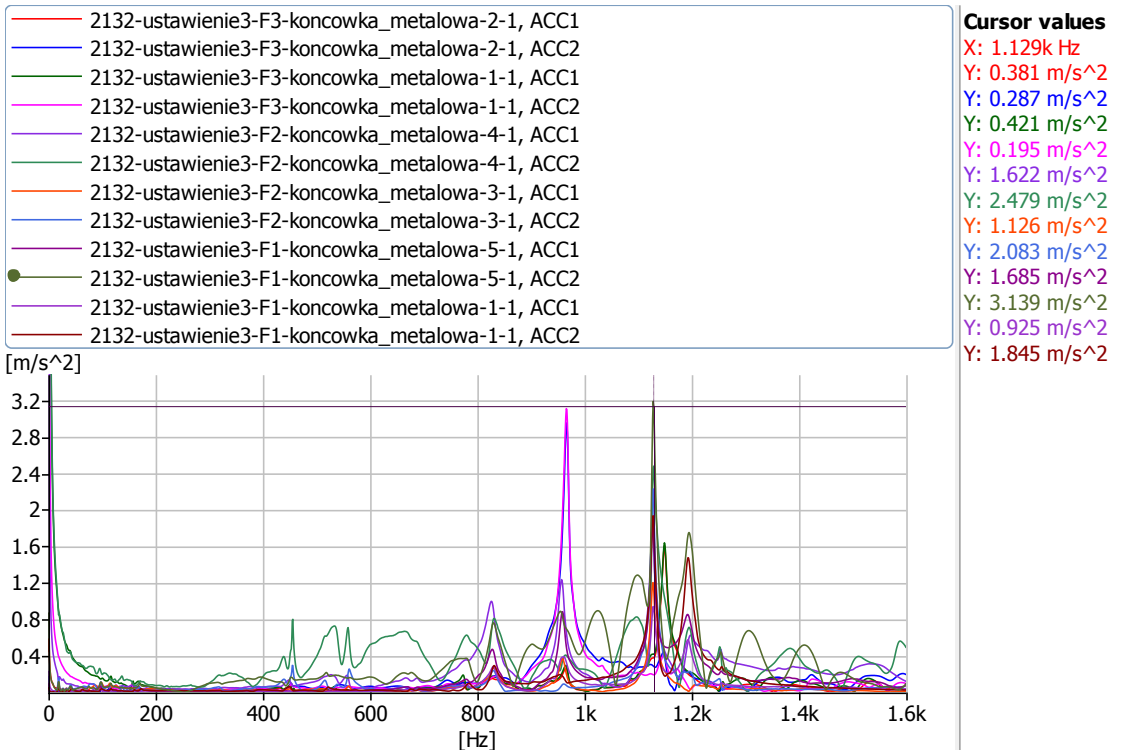
analizie zarejestrowane podczas badań czasowe przebiegi przyspieszeń drgań uzyskane jako odpowiedzi na wymuszenie z użyciem metalowej końcówki młotka modalnego. W programie z użyciem wbudowanego algorytmu FFT dokonano zmiany dziedziny z czasu na częstotliwość. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunkach 3.24-3.26. Na rysunkach zebrano przebiegi uzyskane dla płyt bez połączenia spawanego – 3.24, z połączeniem spawanym bez wad – rysunek 3.25 oraz płyty z wadą w spoinie typu pęknięcie o znanej długości. Przedstawienie 12 widm (po dwa dla każdego z trzech różnych punktów uderzenia – F1, F2, F3 oraz dwóch odpowiedzi zarejestrowanych przez akcelerometry) na każdym z wykresów ma na celu zaprezentowanie niezmienności dominującej amplitudy i częstotliwości rejestrowanych odpowiedzi niezależnie od miejsca wymuszenia oraz miejsca rejestracji odpowiedzi. Jest to dla autora bardzo ważna informacja zwłaszcza, jeżeli zauważy się, że mimo takich samych wymiarów badanych płyt wspomniane wartości różnią się w zależności od stanu spoiny. Ponadto podkreślić należy, że najbardziej powtarzalne widma (podobnie jak podczas analiz w programie MATLAB) uzyskuje się w przypadku, gdy w badanej płycie w ogóle nie występuje spoina stąd też można postawić wniosek, że klasyczne porównywanie widm z kolejnych uderzeń młotka będzie mogło dawać pewne informacje o stanie technicznym spoiny. Biorąc pod uwagę powyższe wnioski oraz dużą ilość składowych wysokoczęstotliwościowych autor w zasadniczej części badań postanowił poddawać analizie amplitudowo-częstotliwościowej oraz porównawczej przebiegi prędkości drgań stosując w tym celu jednokrotne całkowanie zarejestrowanych przebiegów przyspieszeń.



Rys. 3.24. Widma amplitudowo częstotliwościowe przyspieszeń drgań płyty bez spoiny (0) uzyskane dla trzech różnych punktów uderzenia młotkiem i dwóch lokalizacji akcelerometrów.



Rys. 3.25. Widma amplitudowo częstotliwościowe przyspieszeń drgań płyty z spoiną bez wad (2202) uzyskane dla trzech różnych punktów uderzenia młotkiem i dwóch lokalizacji akcelerometrów.



Rys. 3.26. Widma amplitudowo częstotliwościowe przyspieszeń drgań płyty z spoiną o znanej długości pęknięcia (2132) uzyskane dla trzech różnych punktów uderzenia młotkiem i dwóch lokalizacji akcelerometrów.

Zdaniem autora zaprezentowana klasyczna metoda jest obarczona małą rozdzielczością i może być niewystarczająca do automatycznego systemu monitoringu kadłuba statku pracującego w warunkach rzeczywistych (zmienne oddziaływania środowiskowe dają silne zakłócenia sygnałów pomiarowych). Przy pomocy metody klasycznej niemożliwe jest również wskazanie rodzaju uszkodzenia. Z tego powodu autor podjął próbę opracowania nowych technik analiz - nowych miar wibrodiagnostycznych. Prace te zostały przedstawione w dalszej części dysertacji.

3.4 ROZSZERZONE METODY ANALIZ BADAŃ WIBRODIAGNOSTYCZNYCH POŁĄCZEŃ SPAWANYCH

W początkowym etapie prac, przedstawionych w poprzednim rozdziale, wykorzystano metodę FFT do wstępnej analizy sygnałów drganiowych zarejestrowanych akcelerometrami. Dzięki jej zastosowaniu możliwe było wykonanie wstępnej oceny i weryfikacji:

- miejsca uderzenia,
- siły uderzenia,
- rozmieszczenia czujników,
- doboru końcówki młotka modalnego,
- wstępnej oceny klasycznych miar diagnostycznych wykrywających uszkodzenia połączeń spawanych.

W kolejnym etapie prac, zostanie przedstawione kilka niestandardowych - rozszerzonych metod analiz sygnałów drganiowych. Celem autora było znalezienie jednej lub kilku metod możliwych do zastosowania w autonomicznych systemach monitoringu konstrukcji. Metody te muszą odznaczać się dużą czułością oraz niezawodnością w sygnalizowaniu uszkodzeń eksploatowanego obiektu.

3.4.1 ANALIZA CHARAKTERYSTYK CZASOWO – CZĘSTOTLIWOŚCIOWYCH 2D I 3D

Uzupełnieniem przedstawionej klasycznej analizy amplitudowo-częstotliwościowej FFT jest połączenie jej z analizą zmian amplitud przyspieszeń drgań w funkcji czasu. Liniowa konstrukcja nieuszkodzona powinna się charakteryzować niezmiennością charakterystyk dynamicznych w czasie. Wszelkie uszkodzenia powinny wprowadzać do konstrukcji nieliniowości, które mogą się objawić zmianą charakterystyk częstotliwościowych w czasie. Do przedstawienia jednoczesnych zmian modułów odpowiedzi zarejestrowanych akcelerometrami w funkcji czasu i częstotliwości zastosowano zależność (3.6):

$$|X| = g(t, f) \tag{3.6}$$

gdzie:
$|X|$ - moduł drgań obliczony dla odpowiedzi zarejestrowanych akcelerometrami
t - czas,
f - częstotliwość,
$g(t,f)$ - zależność przedstawiająca zmianę modułów drgań w funkcji czasu i częstotliwości.

Stosując wzór na iloczyn kartezjański dla wektorów *t(i)* i *f(j)*, które reprezentują dyskretne wartości czasu i częstotliwość analizowanej odpowiedzi, obliczone zostały macierze (3.7) tworzące siatkę punktów na płaszczyźnie T-F (*T* - czas, *F* – częstotliwość).

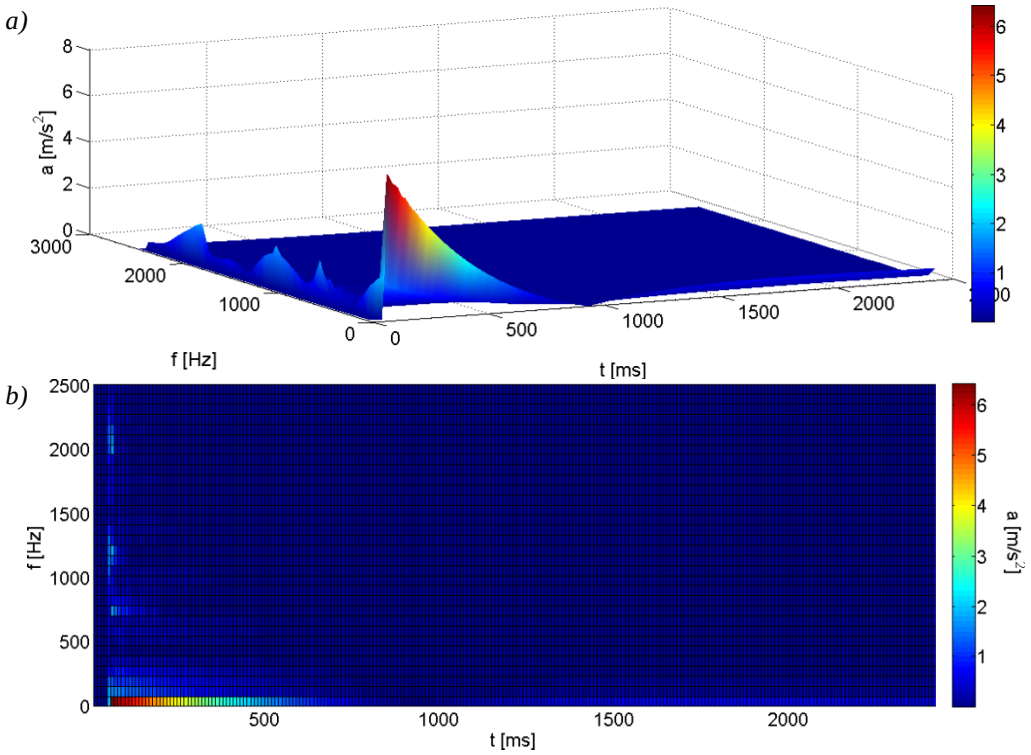
$$(\boldsymbol{T}(i,j),\boldsymbol{F}(i,j)) = (t(i),f(j)) \tag{3.7}$$

gdzie:
i, j – liczba punktów wektora czasu i częstotliwości,
T, ***F***- macierze czasu ***T****(i,j)* i częstotliwości ***F****(i,j)* obliczone ze wzoru na iloczyn kartezjański dla wektorów *t(i) i f(j).*

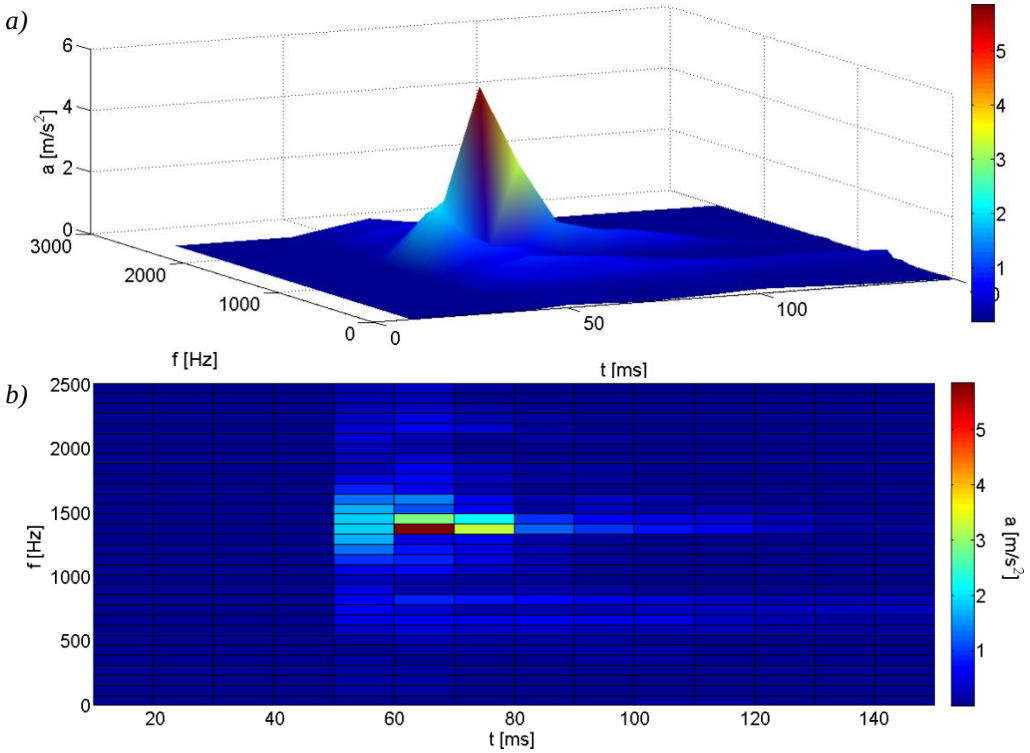
Następnie, dla tak zdefiniowanej siatki, na jej węzły zostały naniesione punkty macierzy FFT (*i,j*) reprezentującej widma amplitudowe drgań zarejestrowanych akcelerometrami. Charakterystyki czasowo – częstotliwościowe 2D i 3D są, więc powierzchniami narysowanymi w przestrzeni określonej przez zbiory punktów (3.8).

$$\{T(i,j),F(i,j),FFT(i,j)\} \tag{3.8}$$

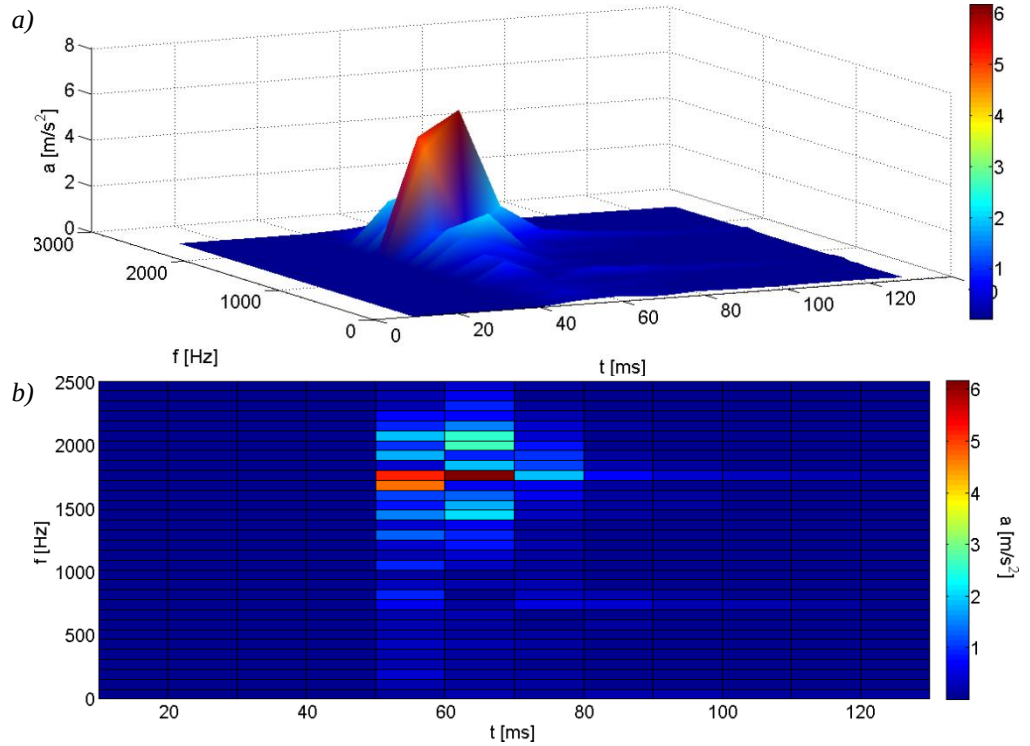
W programie MATLAB, do narysowania w/w płaszczyzn, zostały użyte funkcje *mashgrid*, *surf* (dla 3D) i *pcolor* (dla 2D). W wyniku takiego podejścia, na rysunkach od 3.27 do 3.34 zaproponowano te dwa (2D i 3D) sposoby prezentacji wyników. Na rysunkach, oznaczonych literą a) zostały zamieszczone charakterystyki przestrzenne, które przedstawiają zależność zmiany amplitudy odpowiedzi w dziedzinie czasu i częstotliwości, natomiast rysunki oznaczone literą b) przedstawiają uproszczoną wersję tego podejścia, w którym zmianę amplitudy w czasie reprezentuje kolor na przyjętej skali barw. Analizie poddano trzy płyty: bez połączenia spawanego, z dobrym spawem oraz ze spawem symulującym uszkodzenie na całej długości. W dalszym ciągu porównywano wyniki badań uzyskane przy pomocy wymuszenia młotkiem modalnym o końcówce metalowej oraz silikonowej.



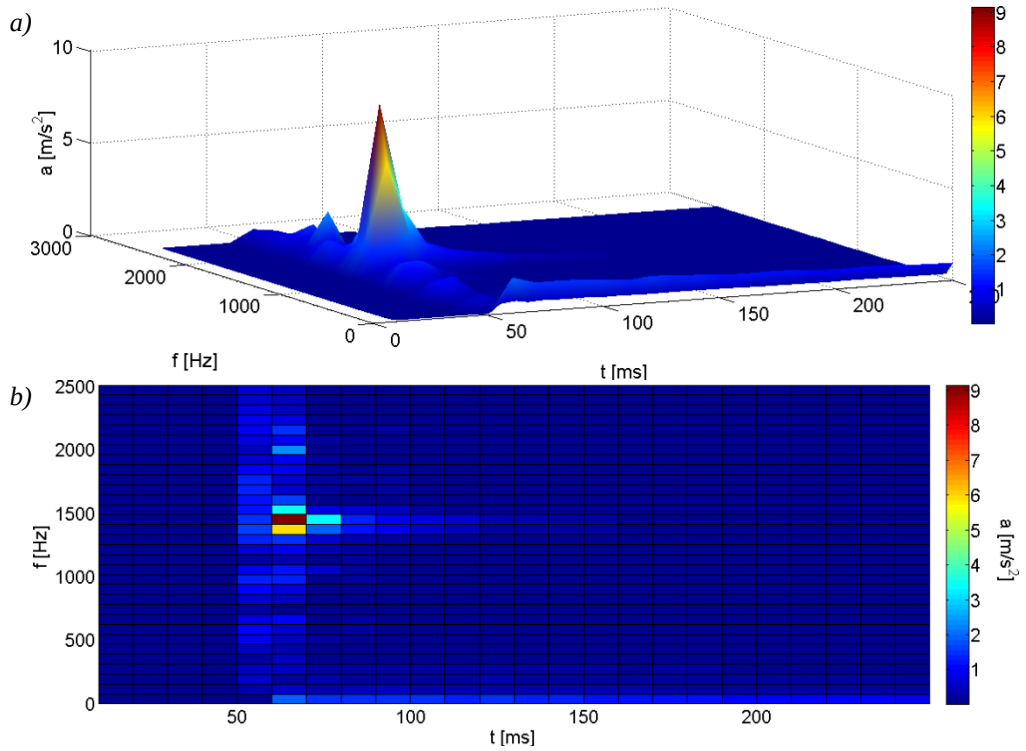
Rys. 3.27. a) Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 3D dla płyty bez połączenia spawanego (0) dla uderzenia wykonanego młotkiem modalnym z końcówką metalową, b) charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 2D dla płyty bez połączenia spawanego (0) dla uderzenia wykonanego młotkiem modalnym z końcówką metalową



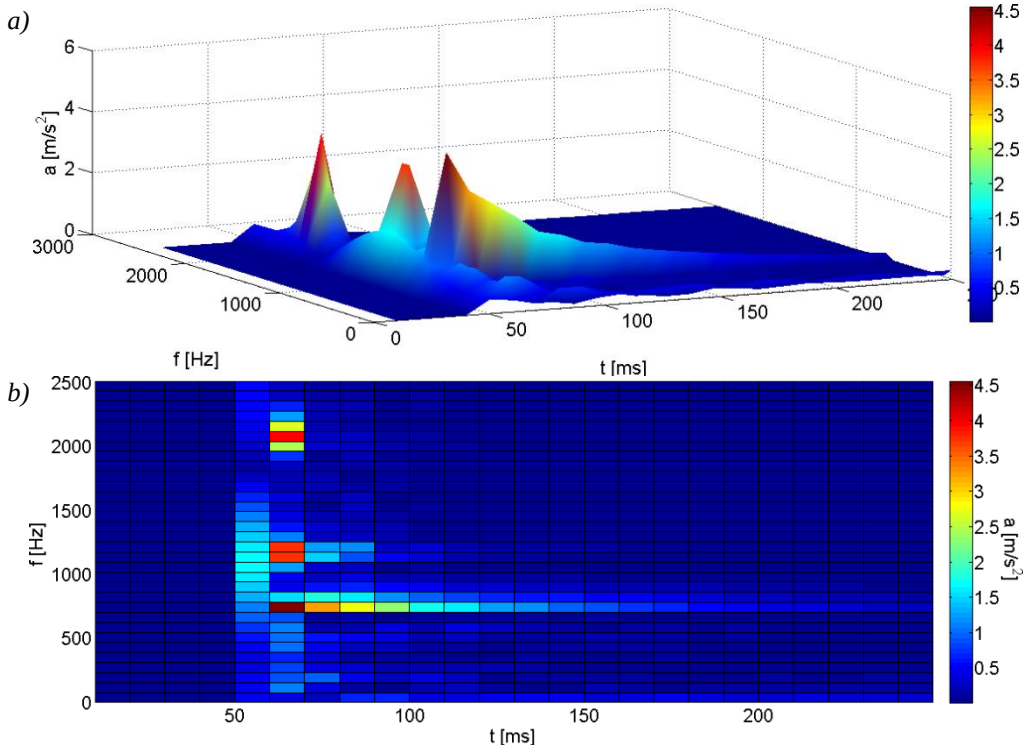
Rys. 3.28. a) Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 3D dla płyty spawanej z połączeniem spawanym bez wad w spoinie (2202), b) charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 2D dla płyty spawanej z połączeniem spawanym bez wad w spoinie (2202) obie dla uderzenia wykonanego młotkiem modalnym z końcówką metalową



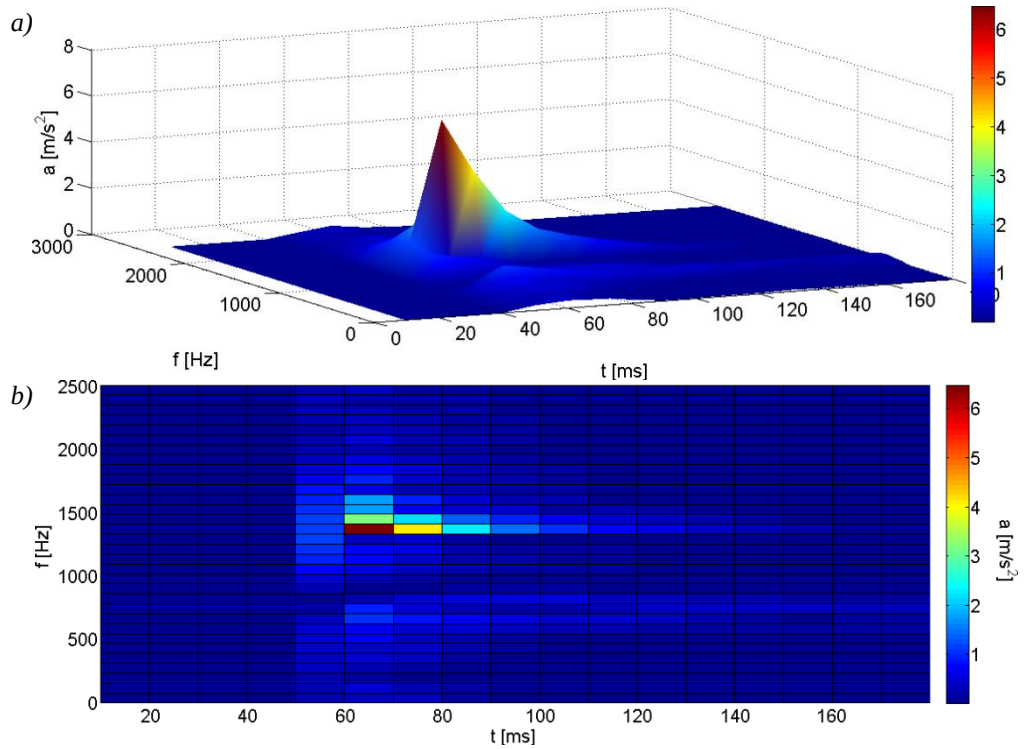
Rys. 3.29. a) Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 3D dla płyty spawanej z wadą typu przyklejenie brzegowe (2127), b) charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 2D dla płyty spawanej z wadą typu przyklejenie brzegowe (2127) obie dla uderzenia wykonanego młotkiem modalnym z końcówką metalową



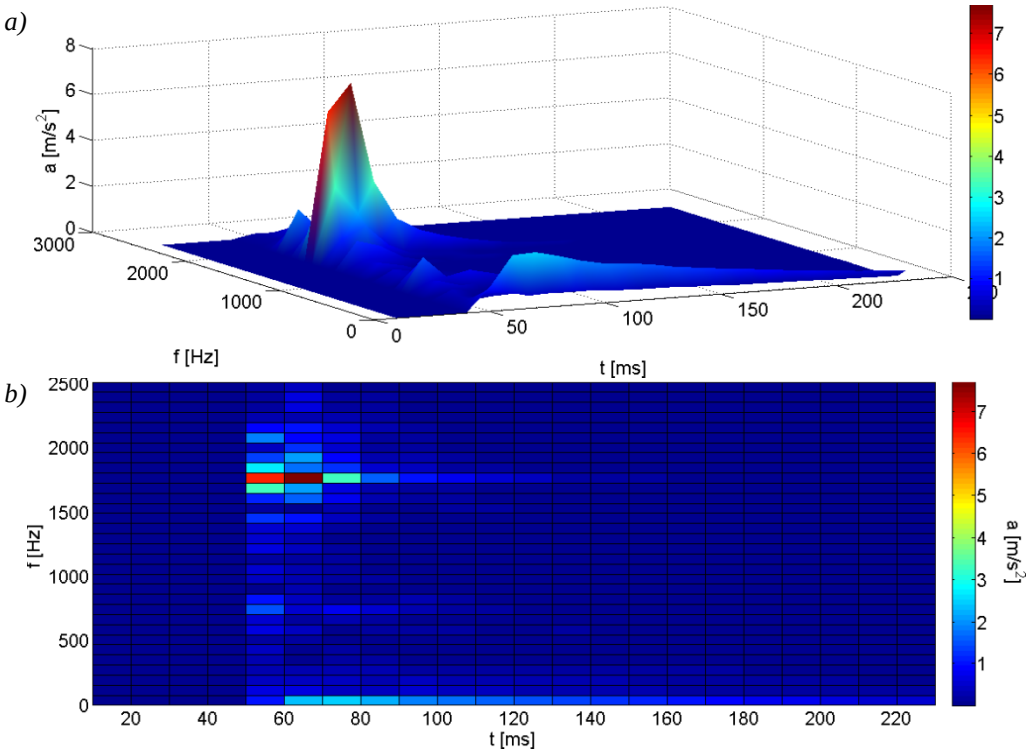
Rys. 3.30. a) Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 3D dla płyty spawanej z wadą typu pęknięcie o zdefiniowanej długości (2132), b) charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 2D dla płyty spawanej z wadą typu pęknięcie o zdefiniowanej długości (2132) obie dla uderzenia wykonanego młotkiem modalnym z końcówką metalową



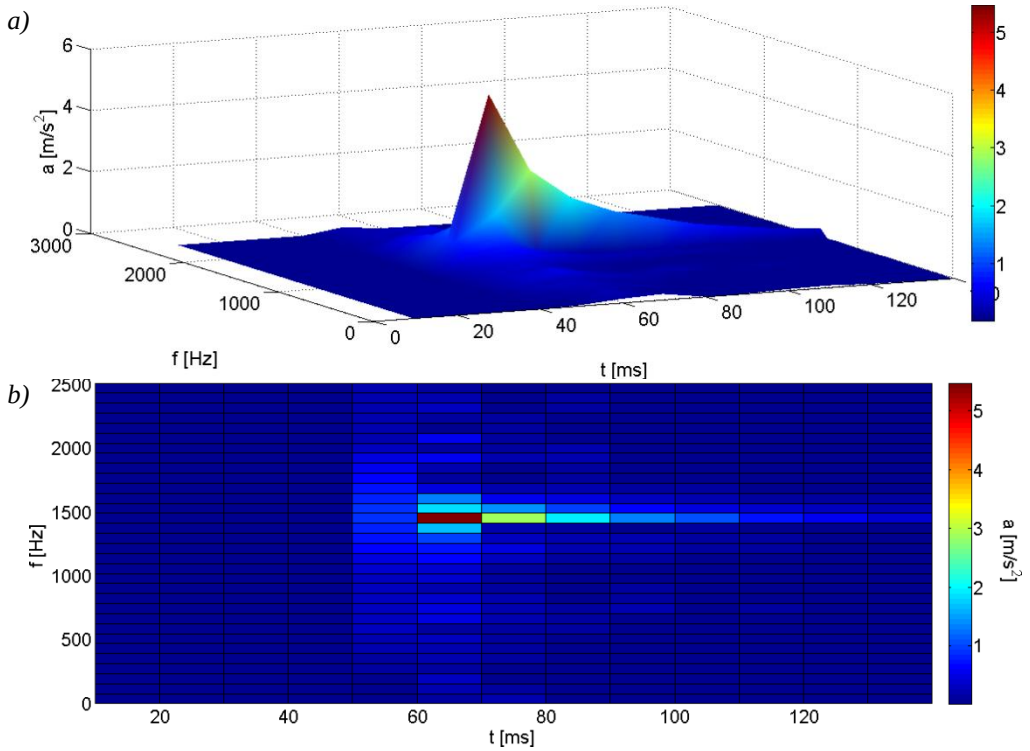
Rys. 3.31. a) Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 3D dla płyty nieposiadającej połączenia spawanego (0), b) charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 2D dla płyty z materiału jednorodnego nieposiadająca połączenia spawanego (0) obie dla uderzenia wykonanego młotkiem modalnym z końcówką teflonową



Rys. 3.32. a) Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 3D dla płyty spawanej z połączeniem spawanym bez wad w spoinie (2202, b) charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 2D dla płyty spawanej z połączeniem spawanym bez wad w spoinie (2202) obie dla uderzenia wykonanego młotkiem modalnym z końcówką teflonową



Rys. 3.33. a) Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 3D dla płyty spawanej z połączeniem spawanym z wadą typu przyklejenie brzegowe w spoinie (2127), b) charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 2D dla płyty spawanej z połączeniem spawanym z wadą typu przyklejenie brzegowe w spoinie (2127) obie dla uderzenia wykonanego młotkiem modalnym z końcówką teflonową



Rys. 3.34. a) Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 3D dla płyty spawanej z połączeniem spawanym z wadą typu pęknięcie o zdefiniowanej długości w spoinie (2132), b) charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 2D dla płyty spawanej z połączeniem spawanym z wadą typu pęknięcie o zdefiniowanej długości w spoinie (2132) obie dla uderzenia wykonanego młotkiem modalnym z końcówką teflonową

Z analizy charakterystyk przedstawionych na rysunkach 3.27 – 3.34 można wnioskować, że jednoczesna prezentacja odpowiedzi z akcelerometrów, na osi czasu i częstotliwości, pozwala ocenić czy badany układ zachowuje liniowość, a tym samym pozwala na ocenę, jakości połączenia spawanego [78, 79]. Interesujący jest zarówno czas zaniku sygnału odpowiedzi (świadczący o wielkości globalnego tłumienia) jak i rozrzut w kierunku pionowym (zmiany w czasie częstotliwości drgań własnych). Dla jednorodnej płyty bez połączenia spawanego (rysunek 3.27) rozkład częstotliwości rezonansowych jest identyczny w każdym przekroju czasowym. Połączenie spawane bez wad (rysunek 3.28) wprowadza nową częstotliwość drgań własnych na poziomie 1500 Hz, ale rozkład kolorów jest niezmienny w czasie. Świadczy to o pełnej liniowości charakterystyk badanej płyty. Natomiast obraz drgań wymuszonych młotkiem modalnym z końcówką metalową, płyty z wadliwą spoiną (przyklejenie brzegowe - rysunek 3.29) wykazuje znaczny rozrzut kolorów obrazujących podwyższony poziom amplitud. Pewne częstotliwości rezonansowe pojawiają się i znikają w funkcji czasu. Świadczy to o silnej nieliniowości badanego obiektu. Opisane zjawisko jest łatwe do zaobserwowania dla wprawnego badacza jednak jego opisanie formułami matematycznymi, użytecznymi w autonomicznych systemach SHM, jest bardzo trudne do jednoznacznej interpretacji. Zdaniem autora jest to możliwe, ale tylko dla konkretnej konstrukcji poprzez zbudowanie szerokiej bazy danych i po dogłębnej analizie statystycznej sygnałów drganiowych dokonywanej on-line w systemie monitoringu.

Na rysunku 3.27 można zauważyć, że czas zaniku amplitudy pobudzonej młotkiem modalnym z końcówką metalową w przypadku płyty bez połączenia spawanego wynosi około 500 ms (od 40 do 540 ms). Za czas zaniku przyjęto czas zmniejszenia się wartości maksymalnej amplitudy trzykrotnie. W przypadku płyty z dobrym spawem czas ten wyniósł 30 ms, od 60 do 90 ms (rysunek 3.28), płyty ze spoiną i przyklejeniem brzegowym 40 ms, od 50 do 90 ms (rysunek 3.29), natomiast w przypadku płyty ze spoiną i wadą typu pęknięcie o zdefiniowanej długości 40 ms, od 60 do 100 ms (rysunek 3.30). Uzyskane wartości pozwalają

na wnioskowanie o możliwości określenia stanu technicznego spoiny na podstawie analizy czasu zaniku odpowiedzi na wymuszenie, czyli analiza tłumienia badanej konstrukcji może być interesująca z diagnostycznego punktu widzenia.

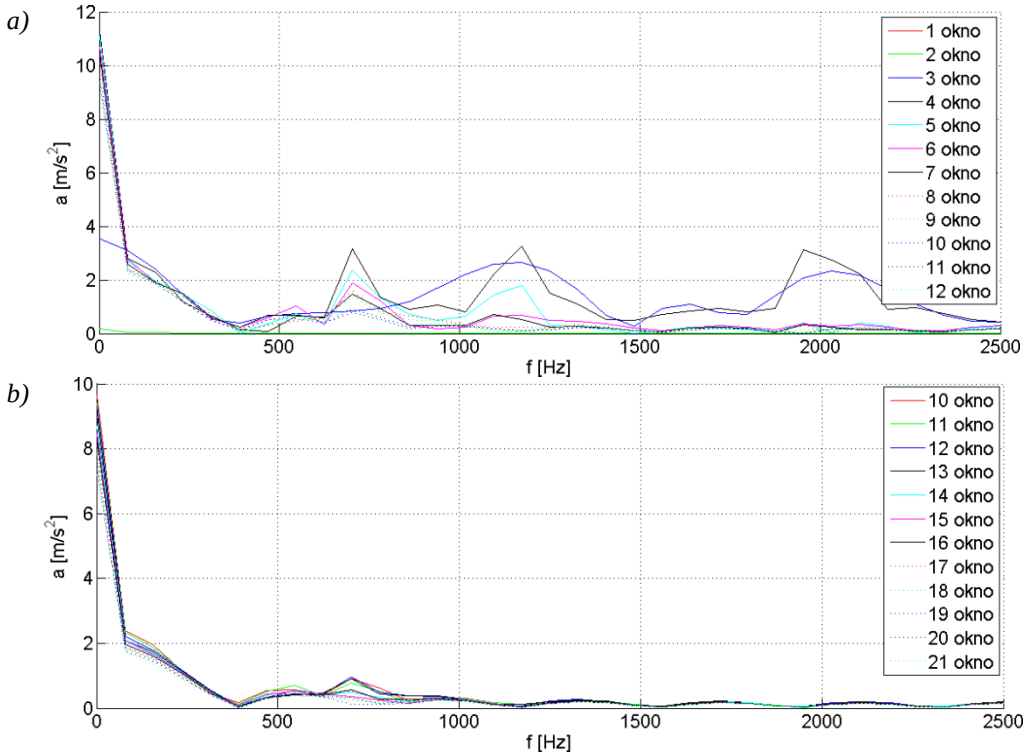
3.4.2 METODA OKIEN CZASOWYCH

W drugiej metodzie analizy możliwości detekcji uszkodzeń połączeń spawanych zastosowano metodę okien czasowych. Metoda okien czasowych umożliwia symulację równoczesnej analizy sygnałów w dziedzinie częstotliwości i czasu. Czyli jest to metoda równoważna do metody zaprezentowanej w poprzednim rozdziale. Przyczyną poszukiwania nowej metody jest fakt, że wykresy FFT w funkcji czasu są łatwe do oceny przez człowieka, natomiast są trudniejsze do zastosowania w układach autonomicznych typu SHM.

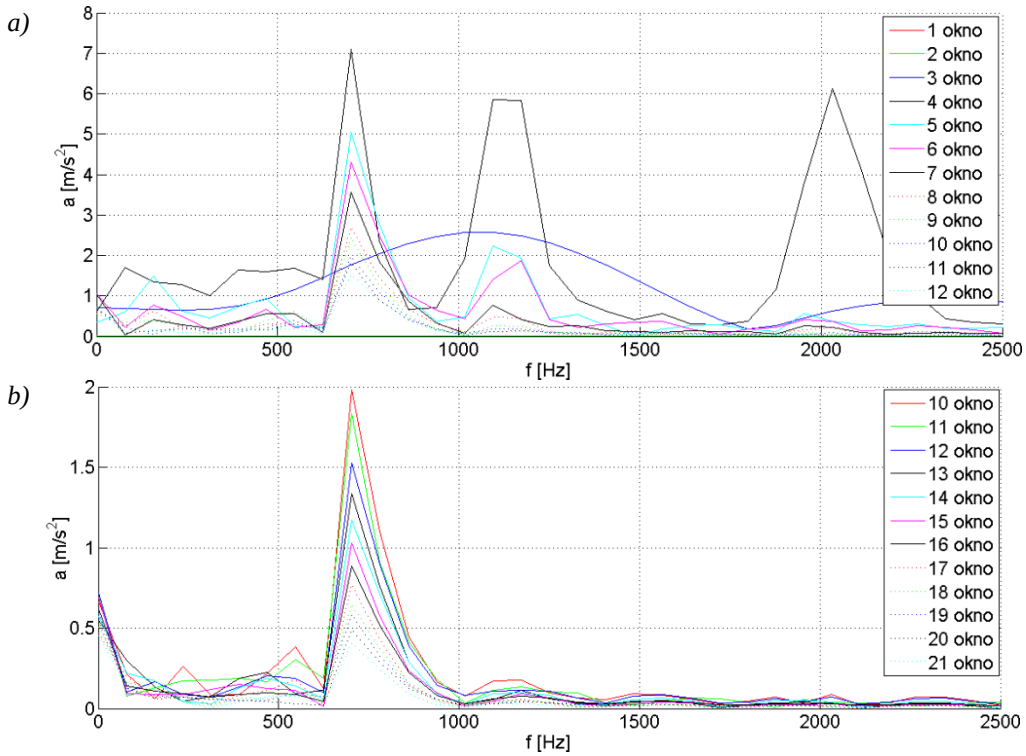
Prezentowana metoda jest często wykorzystywana w analizie dynamiki systemów technicznych, ale głównie elektrycznych lub elektronicznych. Znacznie rzadziej wykorzystuje się ją do badania systemów mechanicznych. W metodzie okien czasowych kluczowym elementem, który rzutuje na jakość uzyskanych wyników, jest właściwy dobór typu i szerokości okna czasowego. Po podziale sygnału, dla każdego okna przeprowadzana jest analiza FFT. W prowadzonych analizach wykorzystano metodę okien czasowych do badania odpowiedzi zarejestrowanych akcelerometrami przyspieszeń drgań. Akcelerometry rozmieszczone były na płytach z połączeniami spawanymi. Badania zostały przeprowadzone dla okna prostokątnego, ponieważ zgodnie ze znaną autorowi literaturą jest to okno najlepsze do analizowania maksymalnych wartości amplitud [99]. Okno prostokątne zostało wybrane głównie, dlatego, aby ograniczyć zniekształcenia zarejestrowanych przebiegów odpowiedzi. Taka sytuacja ma często miejsce przy np. przy często stosowanych oknach Hanninga. Wówczas, za cenę akceptowalnych zmian wprowadzonych do sygnału można przez zastosowanie okienkowania wyeliminować część zakłóceń, czyli tak zwanych przecieków widma wynikających z nieciągłości sygnału na granicach „próbek czasowych", uwzględnianych następnie w algorytmach FFT.

Dla okna prostokątnego testowano różne interwały czasowe. W metodzie okien czasowych bardzo ważne jest właściwe dobranie szerokości okna do przetwarzanego sygnału, który w kolejnym etapie podlega analizie FFT. Dobór szerokości okna zależy od specyfiki analizowanego sygnału, dlatego nie można zastosować tu jednego rozwiązania. Dobór szerokości okna wykonano poprzez analizę przebiegów czasowych zarejestrowanych przez akcelerometry. Przeprowadzone badania testowe miały na celu dobór takiej szerokości okna czasowego, aby w jak najlepszy sposób uwzględnione zostały charakterystyczne wartości odpowiedzi układu na wymuszanie, które mogą świadczyć o jakości spawów i ewentualnych wadach. Ostatecznie dobrano szerokość okna o wartości 10 ms. Badano również inne szerokości okien. Przykładowo, nazbyt szerokie okna, np. 50ms czy 100ms, zbytnio upraszczały widma, a węższe, np. 1ms powodowały, że powstały zbiór wyników był nadmiernie szczegółowy. Podsumowując użycie okien o większej szerokości powoduje utratę informacji w dziedzinie częstotliwości, natomiast mniejsze szerokości okien czasowych powodują niepotrzebne zagęszczenie widma, co utrudnia jego interpretację niedoświadczonemu operatorowi. Ponadto zbyt wąskie okno może spowodować za małą ilość punktów pomiarowych do poprawnej, niezniekształconej analizy FFT.
Na rysunkach od 3.35 do 3.42 przedstawiono zestawienie widm amplitudowych dla okien czasowych w badanych płytach spawanych. Dla zwiększenia czytelności charakterystyk widmowych okien podzielono je na dwa zakresy. Pierwszy zakres obejmuje okna o numerach od 1 do 12 a drugi o numerach od 10 do 21. Obliczenia wykonano dla płyt bez połączenia spawanego (0), płyty spawanej bez wad w spoinie (2202), płyty spawanej z wadą typu przyklejenie brzegowe w spoinie (2127), płyty spawanej z wadą typu pęknięcie

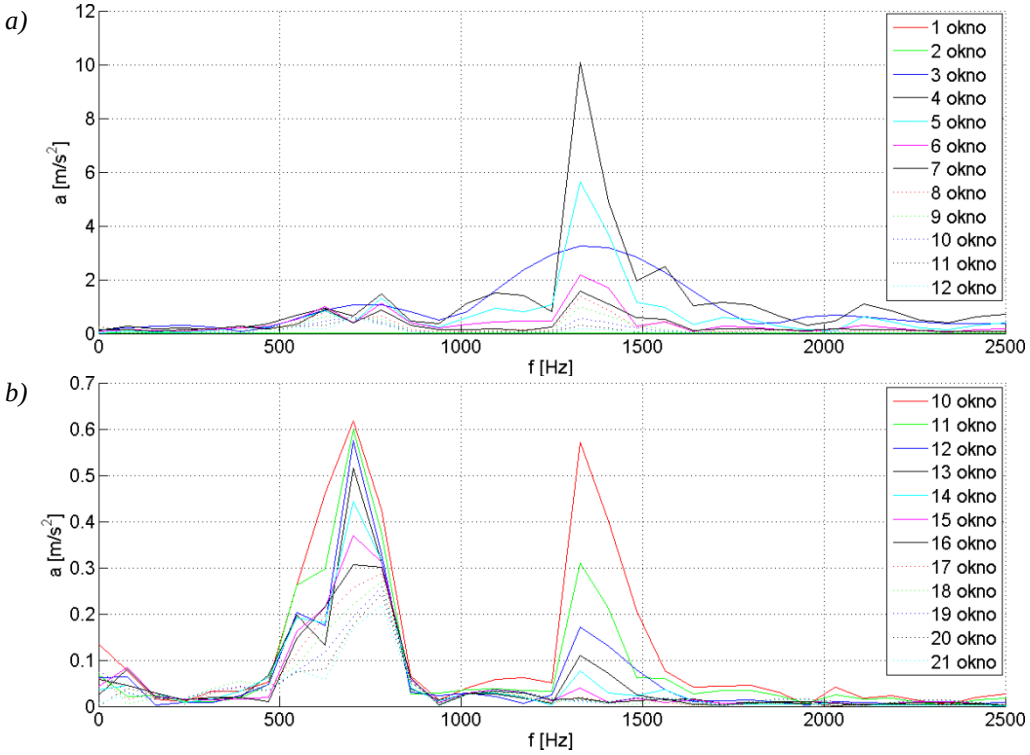
o zdefiniowanej długości w spoinie (2132). Odpowiedzi płyt spawanych objętych analizą powstały na skutek impulsu wywołanego uderzeniem w płytę spawaną młotkiem modalnym z końcówką metalową a następnie teflonową.



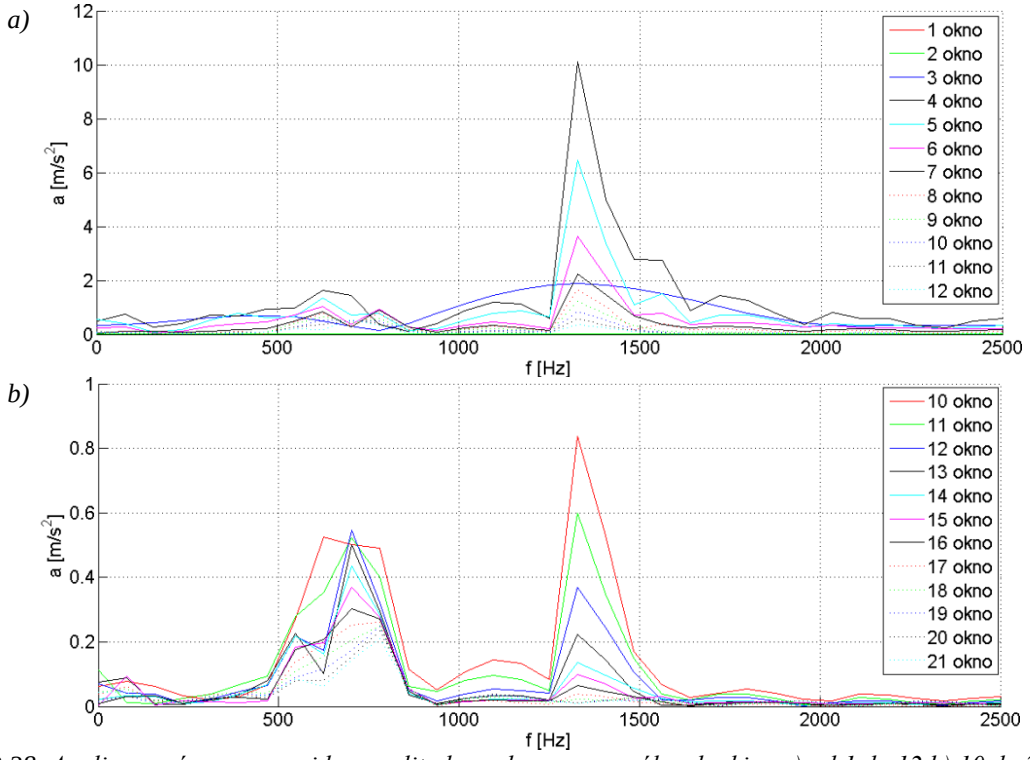
Rys. 3.35. Analiza porównawcza widm amplitudowych z poszczególnych okien a) od 1 do 12 b) 10 do 21 dla płyty bez połączenia spawanego (0) dla uderzenia wykonanego młotkiem modalnym z końcówką metalową



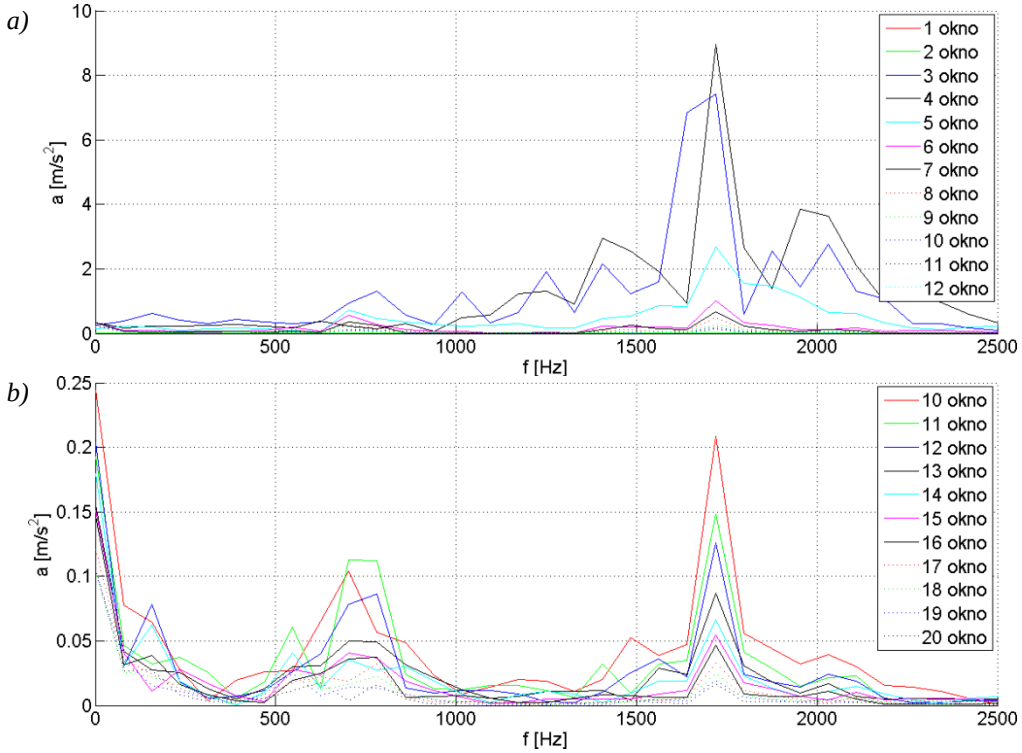
Rys. 3.36. Analiza porównawcza widm amplitudowych z poszczególnych okien a) od 1 do 12 b) 10 do 21 dla płyty bez połączenia spawanego (0) dla uderzenia wykonanego młotkiem modalnym z końcówką teflonową



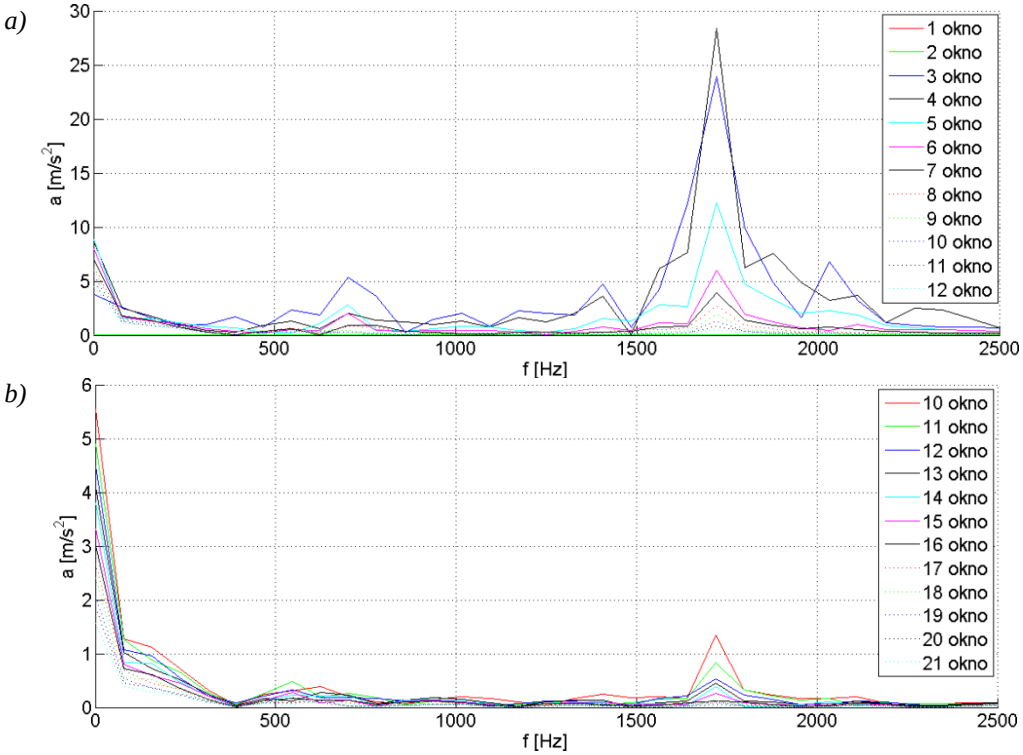
Rys. 3.37. Analiza porównawcza widm amplitudowych z poszczególnych okien a) od 1 do 12 b) 10 do 21 dla płyty z połączeniem spawanym bez wad w spoinie (2202) dla uderzenia wykonanego młotkiem modalnym z końcówką metalową



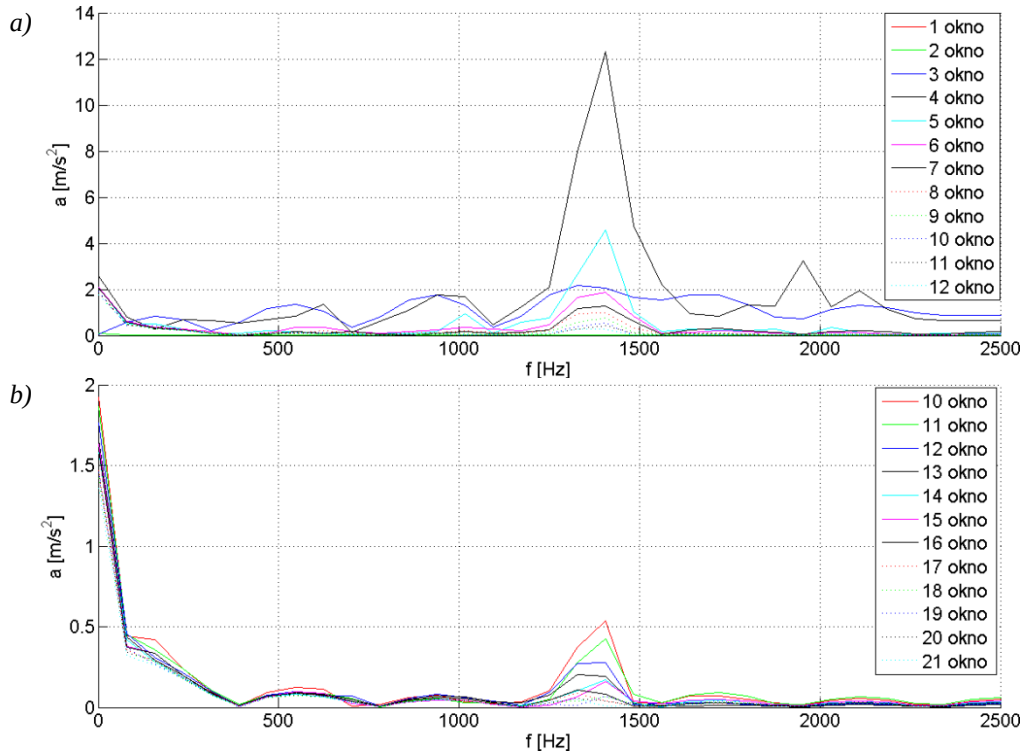
Rys. 3.38. Analiza porównawcza widm amplitudowych z poszczególnych okien a) od 1 do 12 b) 10 do 21 dla płyty z połączeniem spawanym bez wad w spoinie (2202) dla uderzenia wykonanego młotkiem modalnym z końcówką teflonową



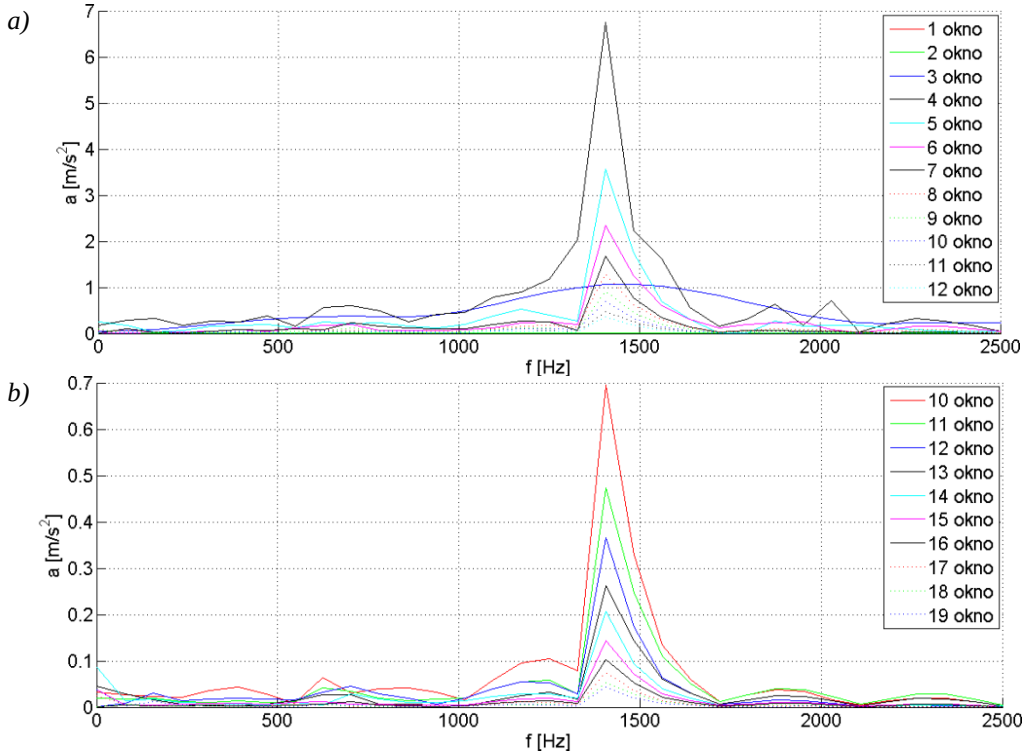
Rys. 3.39. Analiza porównawcza widm amplitudowych z poszczególnych okien a) od 1 do 12 b) 10 do 20 dla płyty spawanej z wadą typu przyklejenie brzegowe w spoinie (2127) dla uderzenia wykonanego młotkiem modalnym z końcówką metalową



Rys. 3.40. Analiza porównawcza widm amplitudowych z poszczególnych okien a) od 1 do 12 b) 10 do 21 dla płyty spawanej z wadą typu przyklejenie brzegowe w spoinie (2127) dla uderzenia wykonanego młotkiem modalnym z końcówką teflonową



Rys. 3.41. Analiza porównawcza widm amplitudowych z poszczególnych okien a) od 1 do 12 b) 10 do 21 dla płyty spawanej z wadą typu pęknięcie o zdefiniowanej długości w spoinie (2132) dla uderzenia wykonanego młotkiem modalnym z końcówką metalową



Rys. 3.42. Analiza porównawcza widm amplitudowych z poszczególnych okien a) od 1 do 12 b) 10 do 19 dla płyty spawanej z wadą typu pęknięcie o zdefiniowanej długości w spoinie (2132) dla uderzenia wykonanego młotkiem modalnym z końcówką teflonową

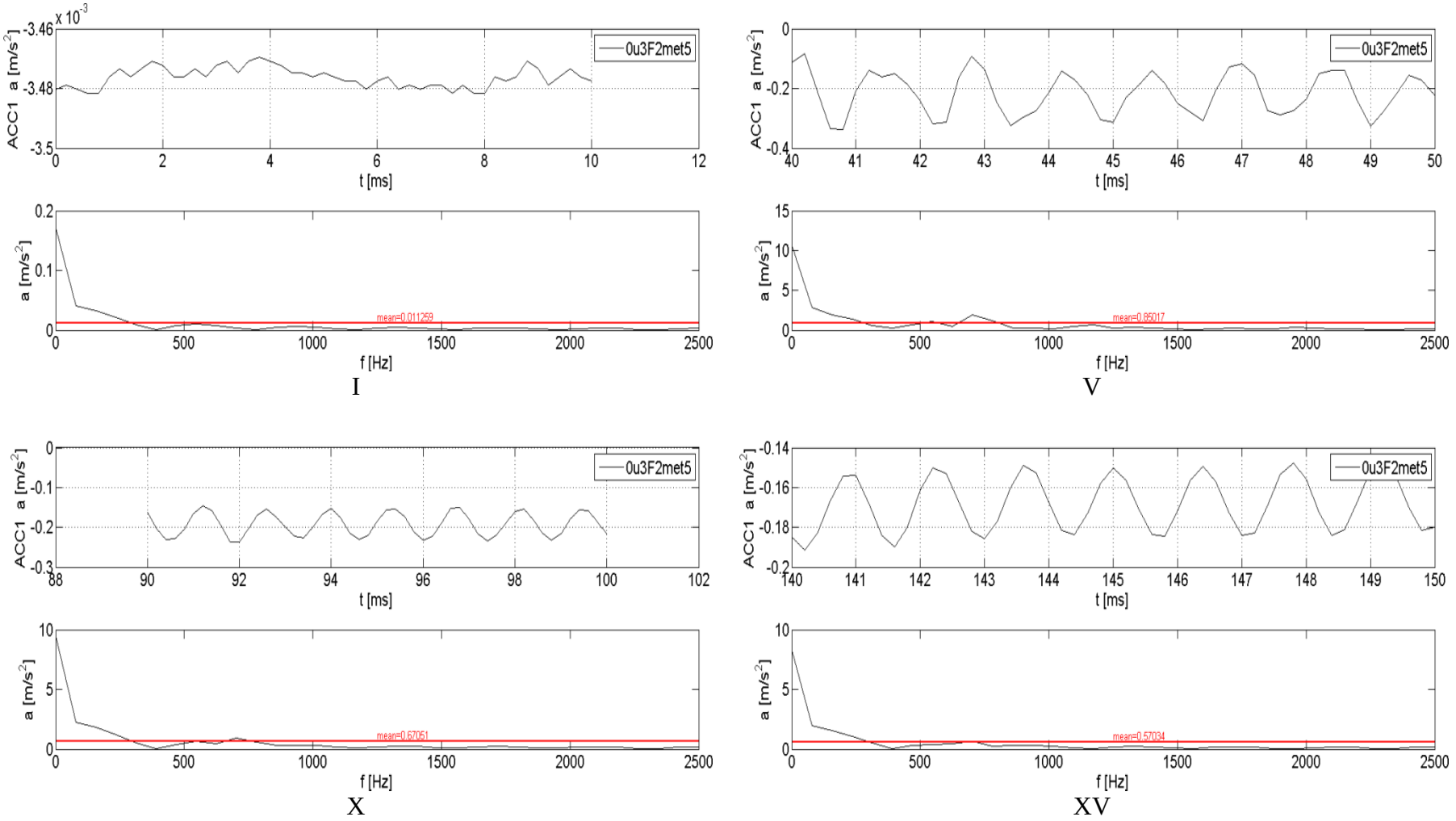
W wyniku zastosowania okien czasowych o szerokości 10 ms uzyskano niską rozdzielczość w dziedzinie częstotliwości (100 Hz). Jest to działanie poniekąd celowe, ponieważ pozwala na uwypuklenie jedynie amplitud dominujących w analizowanych widmach. Analiza wykresów przedstawionych na rysunkach 3.35-3.42 pozwala stwierdzić, że pojawienie się spoiny wpływa na zmianę zasadniczych parametrów dynamicznych badanych obiektów objawia się to brakiem amplitudy o częstotliwości 1400 Hz w przypadku płyty bez spoiny, gdzie w pozostałych przypadkach amplituda ta dominuje w widmach. Sytuacja taka ma miejsce zarówno w przypadku zastosowania młotka modalnego z końcówką metalowa jak i silikonową. Wszelkie różnice charakterystyk częstotliwościowych a głównie zmiana częstotliwości rezonansowych w poszczególnych oknach czasowych świadczą o nieliniowości układu, a więc i o dodatkowej dyssypacji energii drgań. Może to świadczyć o zmianach w badanym obiekcie spowodowanych zmianami stanu spoiny. Dodatkowa dyssypacja energii natomiast wskazuje na niedoskonałość połączenia spawanego. Nieliniowości te są tym mocniejsze im połączenie spawane jest gorszej jakości. Na podstawie wstępnej analizy widm można zauważyć również, że najwięcej informacji diagnostycznych niesie pierwszych dziesięć okien czasowych, czyli, w przypadku badanego obiektu jest to około 100 ms analizowanej odpowiedzi zarejestrowanej akcelerometrami. Długość analizowanego sygnału musi być każdorazowo wyznaczana eksperymentalnie dla danego typu obiektów. Podstawą tego powinna być analiza czasu trwania odpowiedzi badanego układu, dzięki temu możliwe będzie uzyskanie odpowiedniej rozdzielczości w dziedzinie częstotliwości. Widma amplitudowe prezentowane na rysunkach od 3.35 do 3.42 charakteryzują się podobnym charakterem rozkładu (poza płytą bez spoiny), zwłaszcza w odniesieniu do znaczących harmonicznych, więc niosą znikomą ilość informacji diagnostycznej. Natomiast w celu określenia nieliniowości na bazie przedstawionych charakterystyk zaproponowałem rozkład wartości średniej dla widma z danego okna jako parametr wyrażający wartość i charakter nieliniowości.

W celu porównania widm amplitudowych obliczanych dla poszczególnych okien tej samej próbki oraz do oceny nieliniowości wynikającej z powstania spoiny spawanej w płycie, zaproponowano parametr, którym jest wartość średnia. Wartość średnia jest miarą statystyki opisowej, którą w odniesieniu do widma amplitudowo-częstotliwościowego można wyznaczyć z zależności:

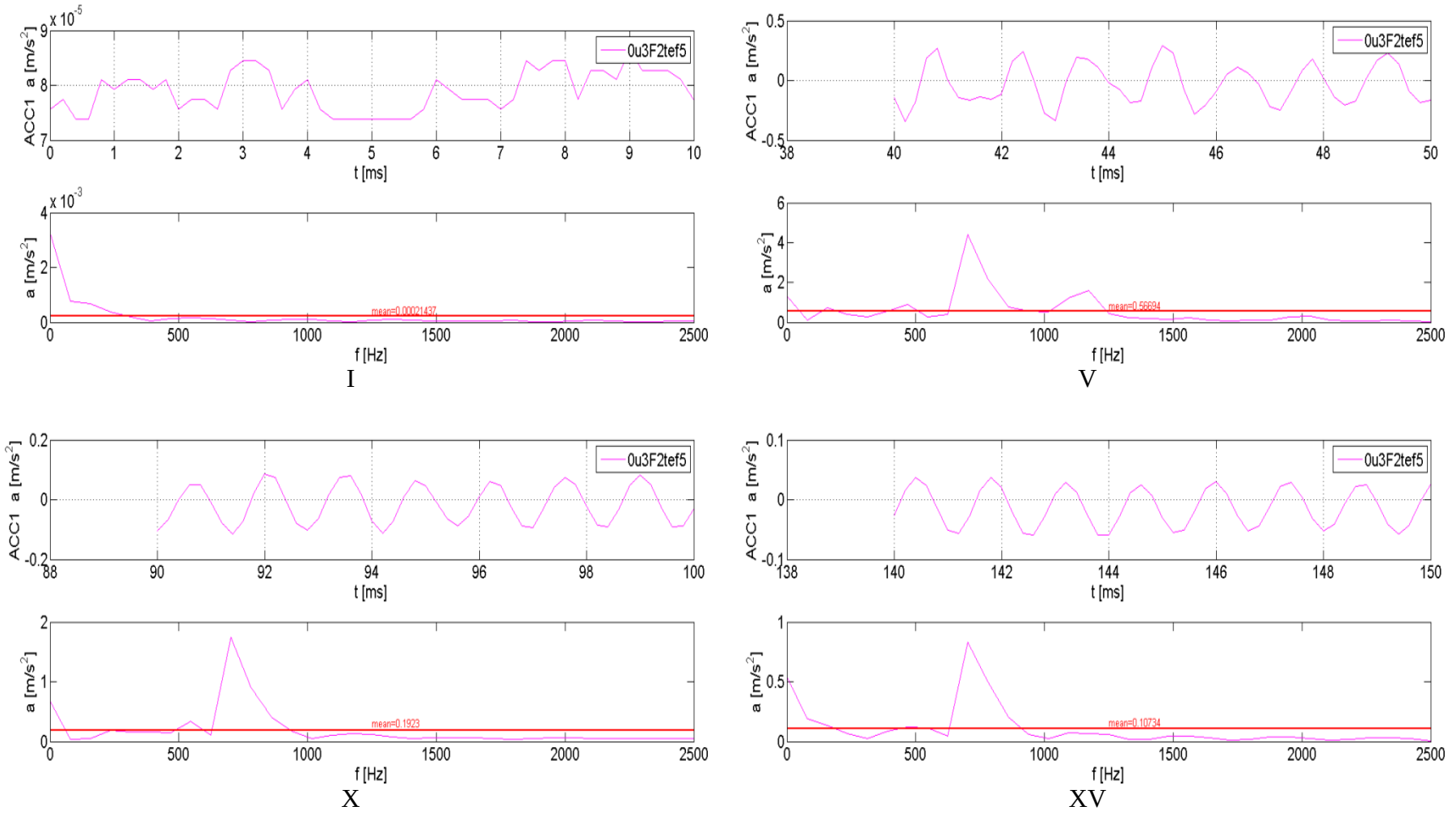
$$\overline{|v|} = \frac{\sum_{i=0}^{N} |v(f_i)|}{N} \tag{3.9}$$

gdzie:
$|v|$ - średnia wartość widma amplitudowego prędkości v obliczona dla okna czasowego,
f_i- częstotliwość i-tej harmonicznej,
N- liczba harmonicznych.

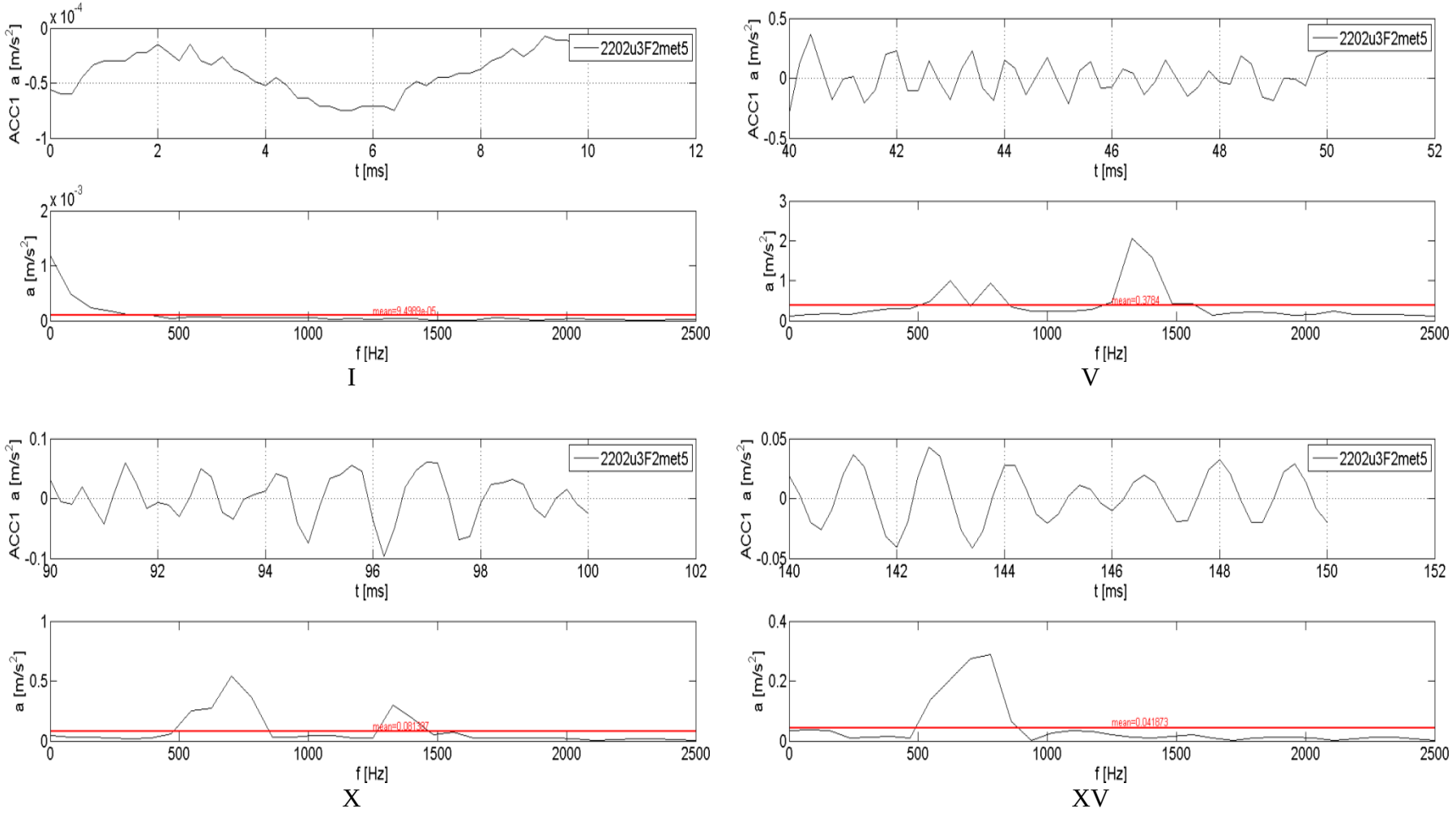
Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że, analiza jedynie wartości średnich jest niewystarczająca. Natomiast istotnych informacji diagnostycznych o jakości połączenia spawanego dostarcza rozkład wartości średniej dla widm uzyskanych z okien czasowych całej odpowiedzi. Na rysunkach od 3.43 do 3.50 przedstawiono przykładowe przebiegi czasowe dla danego okna oraz obliczone dla nich widma amplitudowe i wartości średnie. Przedstawiono jedynie wartości dla okien o numerach 1, 5, 10 oraz 15, natomiast wartości średnie uzyskane z widm wygenerowanych z poszczególnych okien porównano na rysunkach 3.51 i 3.52.



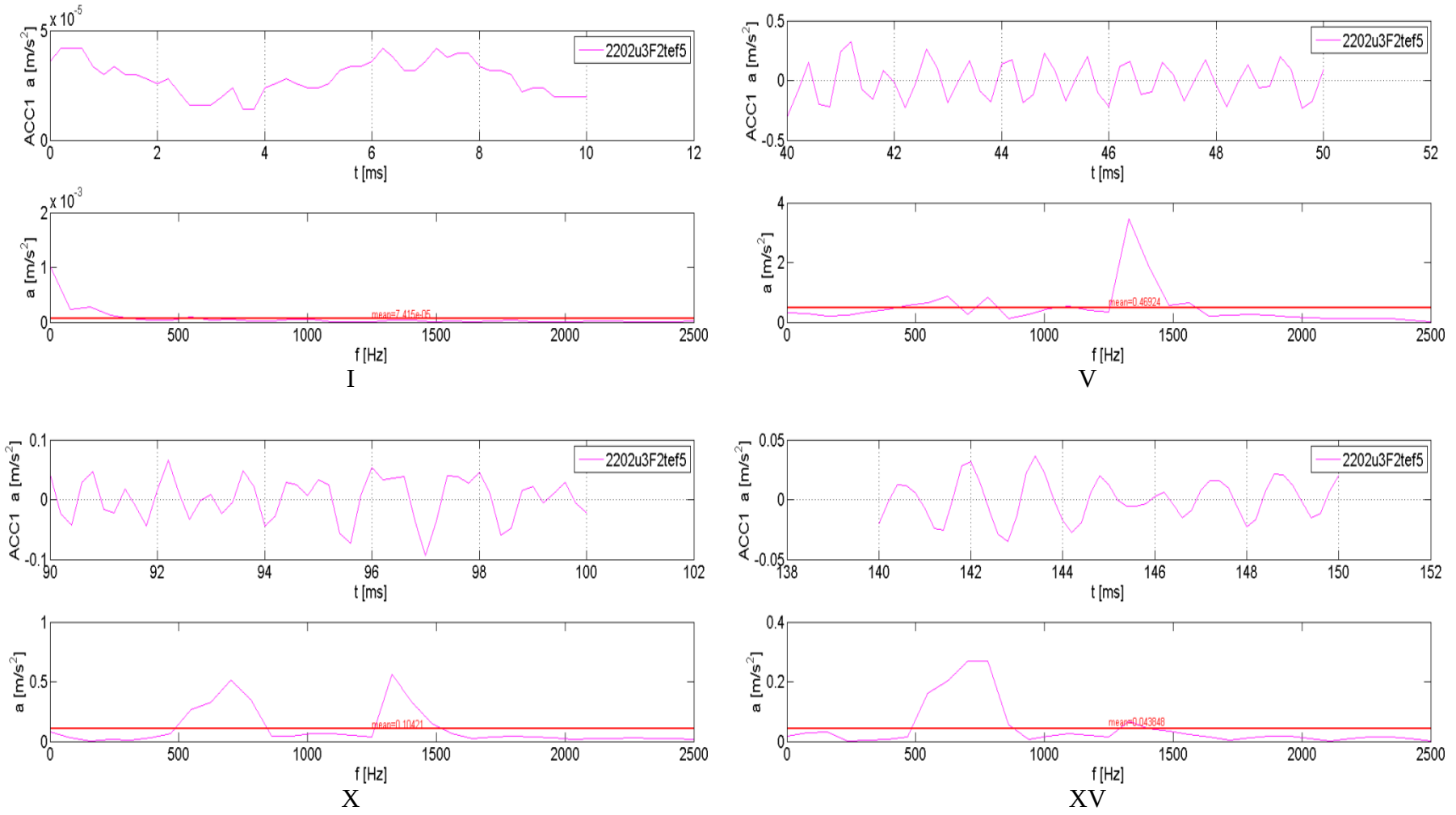
Rys. 3.43. Widma amplitudowe w wybranych oknach z naniesioną wartością średnią przyspieszeń drgań, dla płyty spawanej z połączeniem spawanym bez wad w spoinie (2202) z zastosowaniem końcówki metalowej na młotku modalny podczas badań



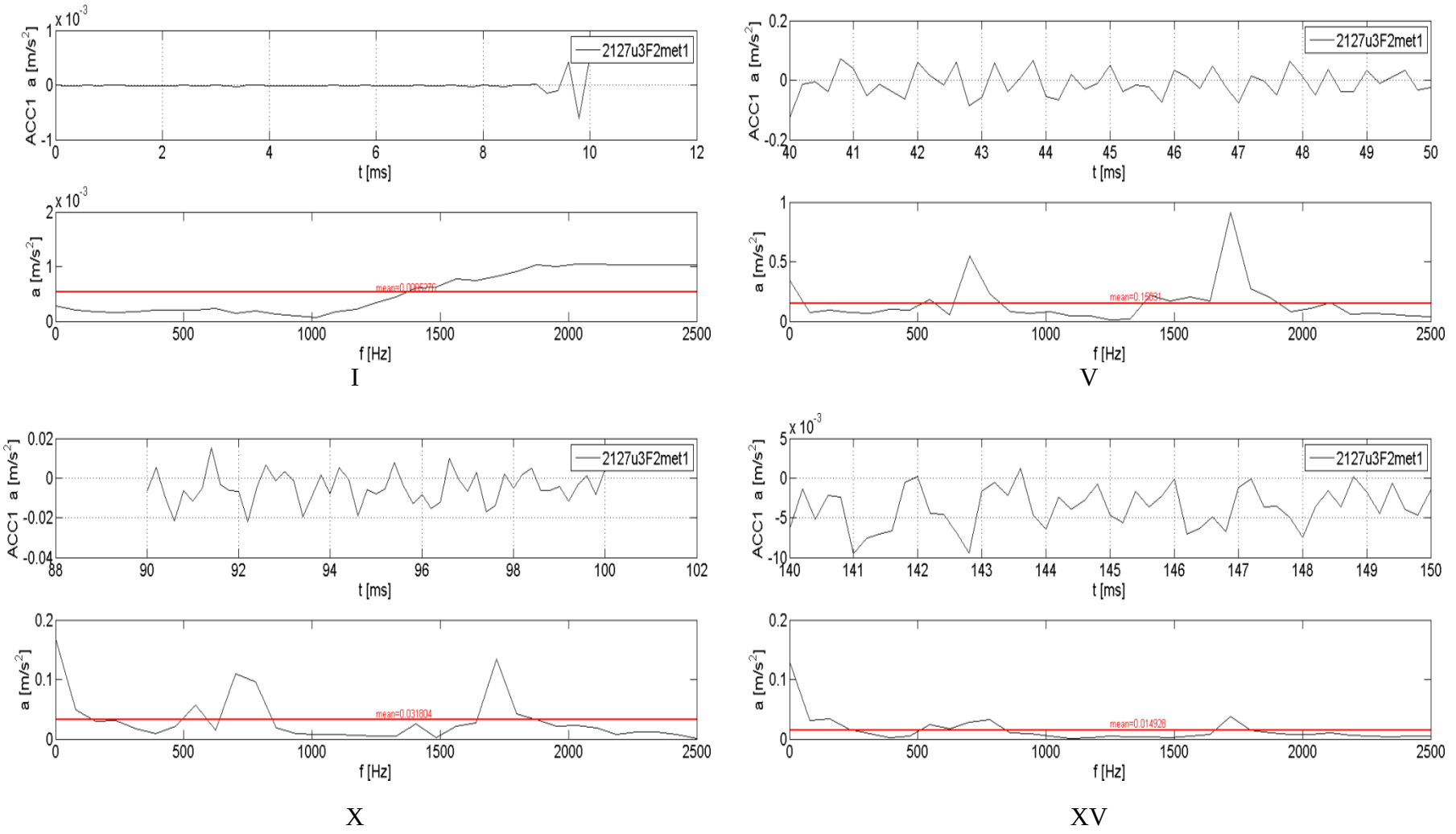
Rys. 3.44. Widma amplitudowe w wybranych oknach z naniesioną wartością średnią przyspieszeń drgań, dla płyty spawanej z połączeniem spawanym bez wad w spoinie (2202) z zastosowaniem końcówki teflonowej na młotku modalny podczas badań



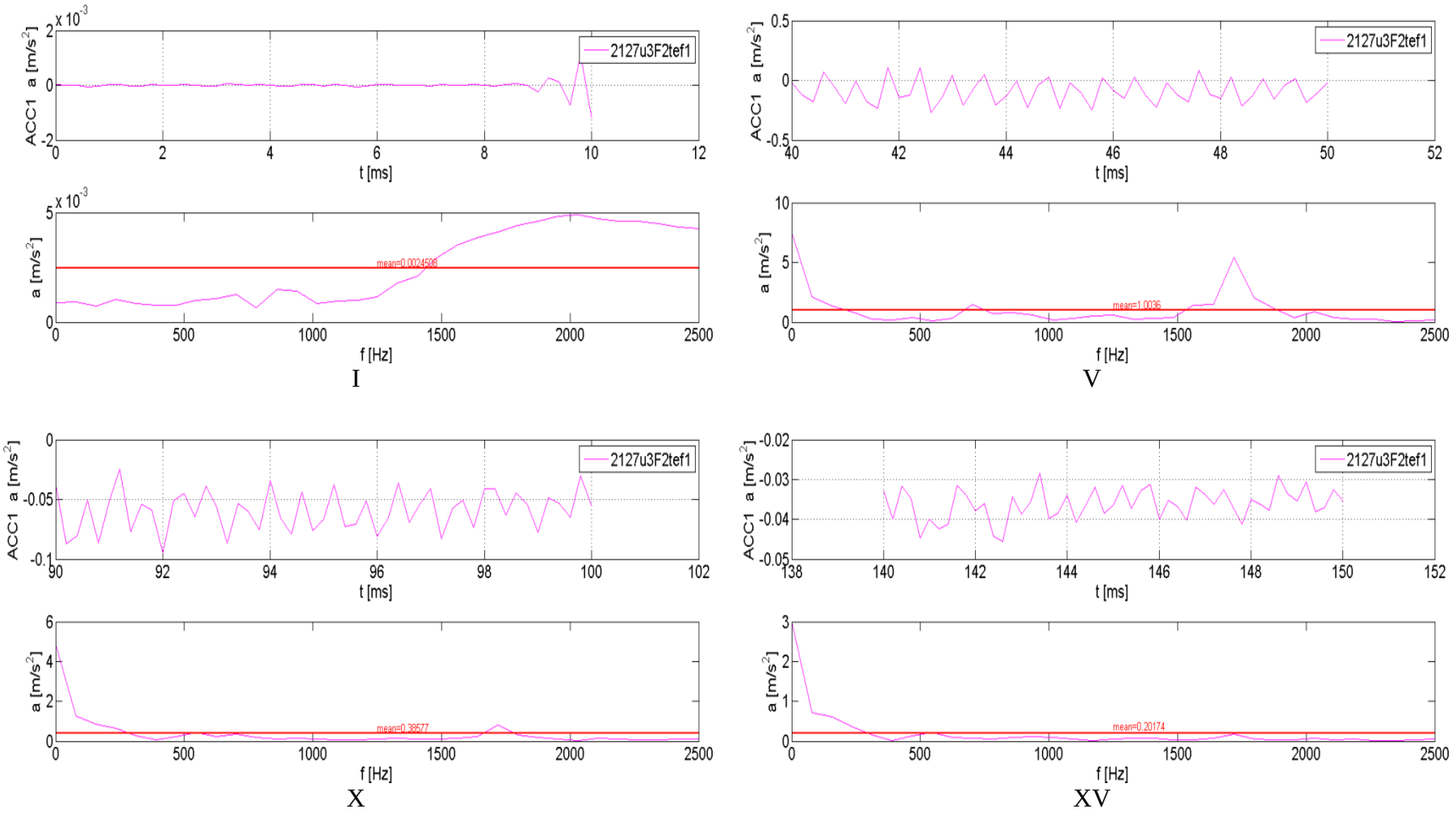
Rys. 3.45. Widma amplitudowe w wybranych oknach z naniesioną wartością średnią przyspieszeń drgań, dla płyty spawanej z połączeniem spawanym bez wad w spoinie (2202) z zastosowaniem końcówki metalowej na młotku modalny podczas badań



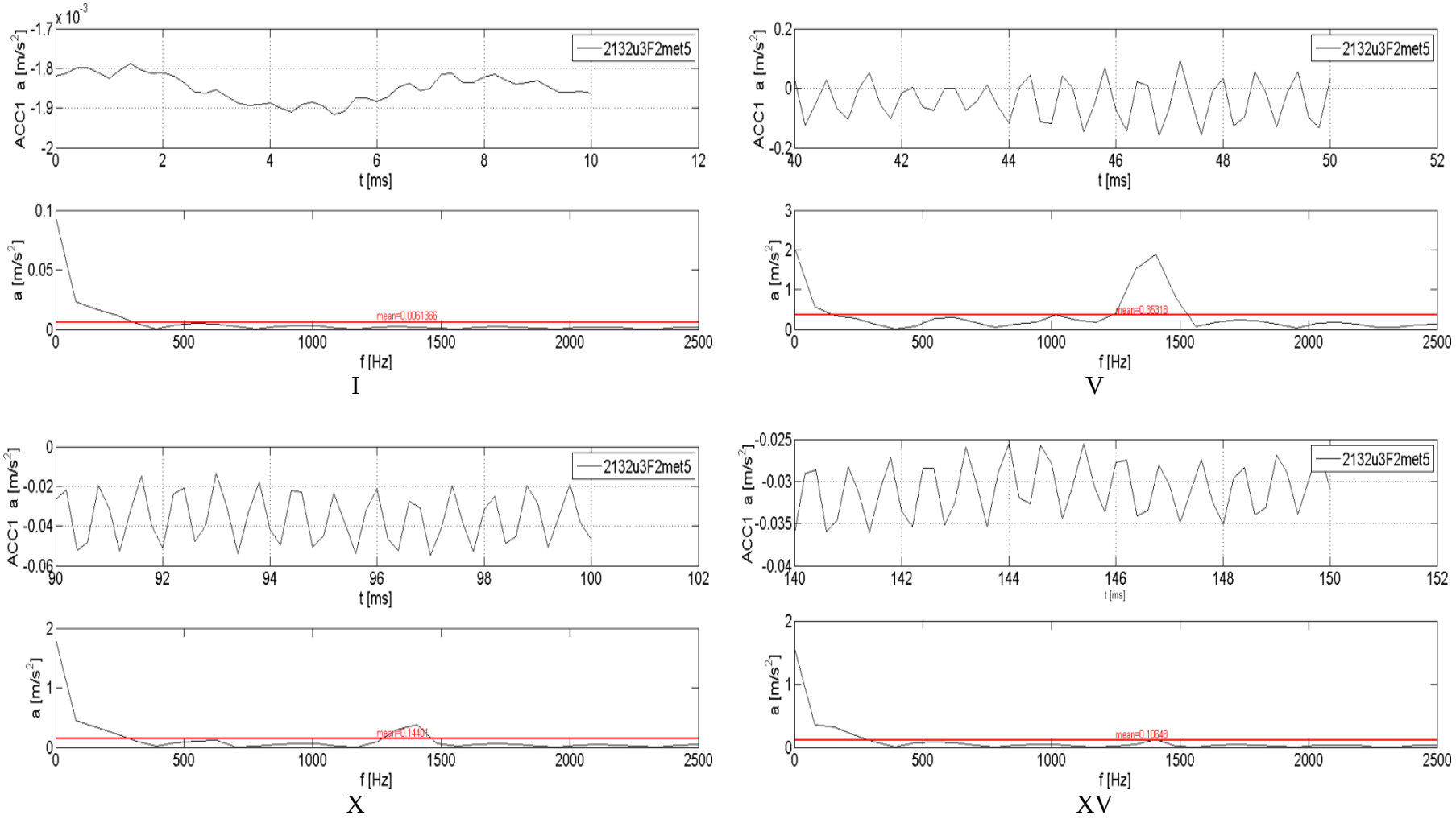
Rys. 3.46. Widma amplitudowe w wybranych oknach z naniesioną wartością średnią przyspieszeń drgań, dla płyty spawanej z połączeniem spawanym bez wad w spoinie (2202) z zastosowaniem końcówki teflonowej na młotku modalny podczas badań



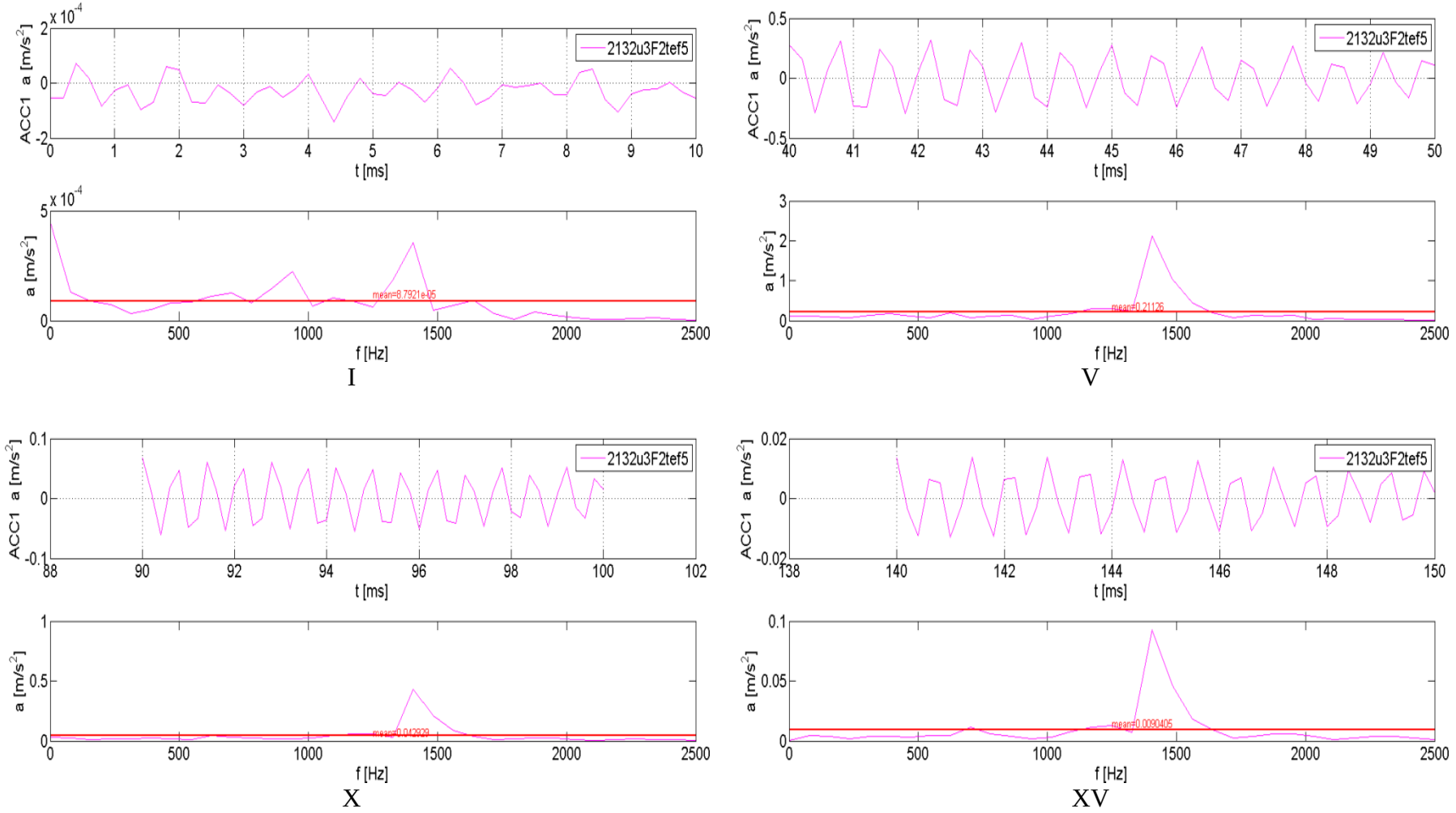
Rys. 3.47. Widma amplitudowe w wybranych oknach z naniesioną wartością średnią przyspieszeń drgań, dla płyty spawanej z wada typu przyklejenie brzegowe (2127) z zastosowaniem końcówki metalowej na młotku modalny podczas badań



Rys. 3.48. Widma amplitudowe w wybranych oknach z naniesioną wartością średnią przyspieszeń drgań, dla płyty spawanej z wada typu przyklejenie brzegowe (2127) z zastosowaniem końcówki teflonowej na młotku modalny podczas badań

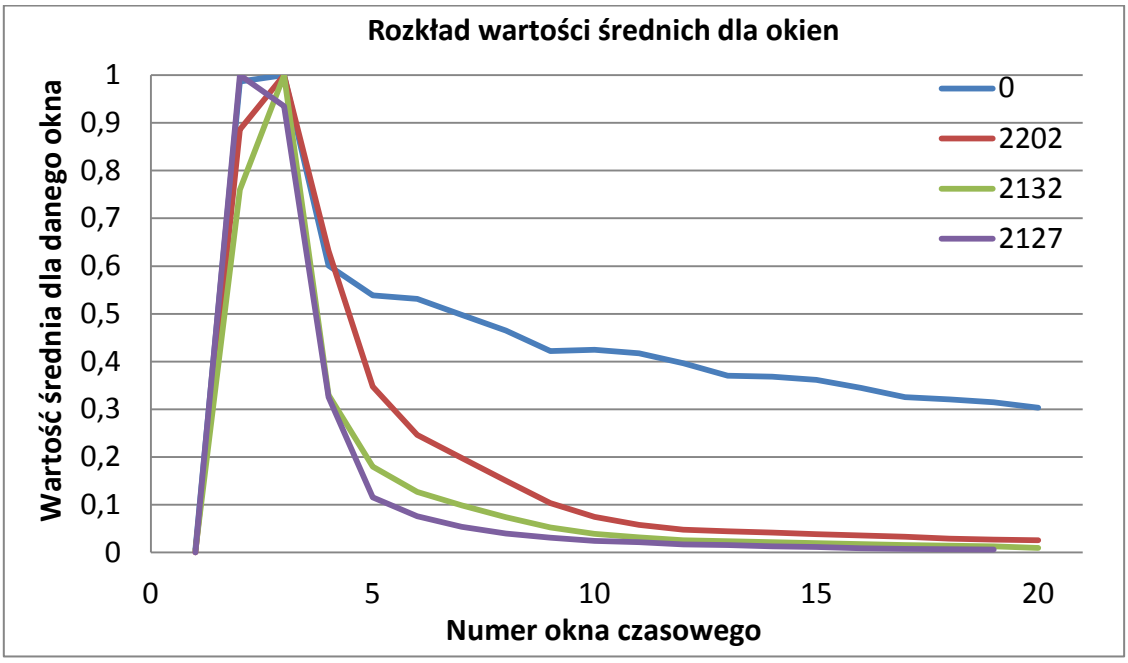


Rys. 3.49. Widma amplitudowe w wybranych oknach z naniesioną wartością średnią przyspieszeń drgań, dla płyty spawanej z wadą typu pęknięcie o zdefiniowanej długości w spoinie (2132) z zastosowaniem końcówki metalowej na młotku modalny podczas badań

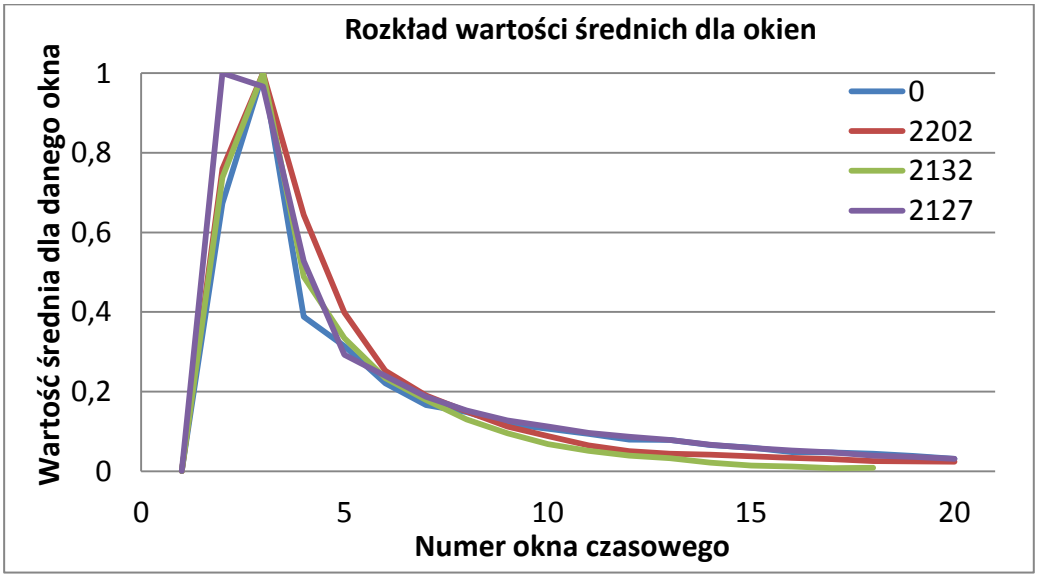


Rys. 3.50. Widma amplitudowe w wybranych oknach z naniesioną wartością średnią przyspieszeń drgań, dla płyty spawanej z wadą typu pęknięcie o zdefiniowanej długości w spoinie (2132) z zastosowaniem końcówki teflonowej na młotku modalny podczas badań

Na rysunkach 3.51 i 3.52 przedstawiono zmianę wartości średniej obliczonej dla widma amplitudowego w zależności od numeru okna których przykłady przedstawiono na rysunkach 3.43 do 3.50. Zaprezentowano wartości uzyskane dla dwóch różnych końcówek młotka modalnego, 3.51 – z zastosowaniem końcówki metalowej, 3.52 – z zastosowaniem końcówki teflonowej. Wartości przypisane poszczególnym oknom uzyskano obliczając średnią arytmetyczną z okien od 1 do 20.



Rys. 3.51. Rozkład wartości średnich widm dla okien w funkcji numeru okna dla badanych płyt z zastosowaniem końcówki metalowej na młotku modalnym, gdzie: 0 - płyta bez połączenia spawanego, 2202 – płyta spawana z połączeniem spawanym bez wad w spoinie, 2127 – płyta spawana z wadą typu przeklejenie brzegowe w spoinie, 2132 - płyta spawana z wadą typu pęknięcie o zdefiniowanej długości w spoinie



Rys. 3.52. Rozkład wartości średnich widm dla okien w funkcji numeru okna dla badanych płyt z zastosowaniem końcówki teflonowej na młotku modalnym, gdzie: 0 - płyta bez połączenia spawanego, 2202 – płyta spawana z połączeniem spawanym bez wad w spoinie, 2127 – płyta spawana z wadą typu przeklejenie brzegowe w spoinie, 2132 - płyta spawana z wadą typu pęknięcie

Na rysunku 3.51 można zauważyć, że rozkład wartości średniej dla okien obliczonych w przypadku płyty bez połączenia spawanego (oznaczona: 0) znacząco różni się w stosunku do pozostałych płyt spawanych ze spawem bez wad w spoinie (2202) lub z wadą w spoinie (oznaczone: 2127, 2132). Różnica ta dotyczy szczególnie poziomu wartości średnich i cyklicznej zmiany wartości między lokalnymi maksimami i minimami. Na przedstawionych rozkładach można również zauważyć, że rozkłady wartości średnich dla próbek ze spawem i wadą charakteryzują się niższą wartością niż dla płyty ze spawem bez wad. Informacje diagnostyczne uzyskane w wyniku analizy rozkładu wartości średnich widm obliczonych dla okien czasowych dla danej płyty z połączeniem spawanym, umożliwia wnioskowanie o stanie i jakości spoiny. Możliwe jest również zastosowanie tego parametru do detekcji uszkodzeń (pęknięcia) spawów w systemach do automatycznego monitoringu konstrukcji typu SHM.

Podobnie jak we wcześniejszych analizach najlepsze wyniki uzyskuje się w przypadku zastosowania końcówki metalowej. W tym przypadku wartości średniej amplitudy dla kolejnych okien czasowych oddalając się od maksymalnej amplitudy w dziedzinie czasu są większe dla płyty bez spawu o około 500 % w stosunku do pozostałych obiektów badań. Można na tej podstawie wnioskować, że tłumienie w tej płycie jest najmniejsze. Dyssypacja energii impulsu wymuszającego jest większa, jak można zauważyć na rysunku 3.51, w przypadku występowania uszkodzeń spoin. Prawdopodobne jest zatem powiązanie rozpatrywanej tutaj wartości średniej ze stanem badanej spoiny.

3.4.3. DEKREMENT TŁUMIENIA W OCENIE POŁĄCZEŃ SPAWANYCH

W badaniu połączeń spawanych metodą drganiową analizowane są poziomy drgań konstrukcji (mierzonych zwykle, jako przebieg amplitud przyspieszeń drgań) w wybranych punktach i wzbudzonych młotkiem modalnym. W trakcie badania można rejestrować jednocześnie poziom drgań w kilku punktach pomiarowych, liczba użytych punktów pomiarowych ograniczona jest liczbą kanałów dostępnych w kasecie pomiarowej. Rejestrowane odpowiedzi mają charakter tłumionego przebiegu oscylacyjnego [60]. Uszkodzony spaw, który łączy dwie płyty, jest źródłem dodatkowego tłumienia materiałowego, które może być zmienne w czasie (w przypadku istotnych uszkodzeń będących źródłem nieliniowości konstrukcji). Z tego powodu autor postanowił zbadać możliwość oceny połączenia spawanego przy pomocy analizy dekrementu tłumienia. W przypadku konstrukcji nieuszkodzonej, dekrement tłumienia powinien mieć wartość stałą w czasie. Natomiast w konstrukcjach uszkodzonych spodziewana jest zmienność tłumienia (nieliniowość układu) w czasie i z tego powodu nie można zastosować tradycyjnego wzoru na logarytmiczny dekrement tłumienia, a należy go zmodyfikować tak, aby można było wyznaczyć funkcję tłumienia zmiennego w czasie. W pracy wyprowadzono dwie zależności opisujące logarytmiczny dekrement tłumienia, które przedstawiono jako 3.10 i 3.11. Równanie (3.10) służy do wyznaczania uśrednionego tłumienia konstrukcji względem maksymalnej amplitudy, natomiast równanie (3.11) służy do oceny lokalnej zmiany tłumienia przy założeniu znajomości dwóch dowolnych amplitud tego samego przebiegu.

$$\Psi_I = \frac{1}{n} \cdot \ln\left(\frac{A_0}{A_n}\right) \tag{3.10}$$

$$\Psi_{II} = \frac{1}{n-m} \cdot \ln\left(\frac{A_m}{A_n}\right) \tag{3.11}$$

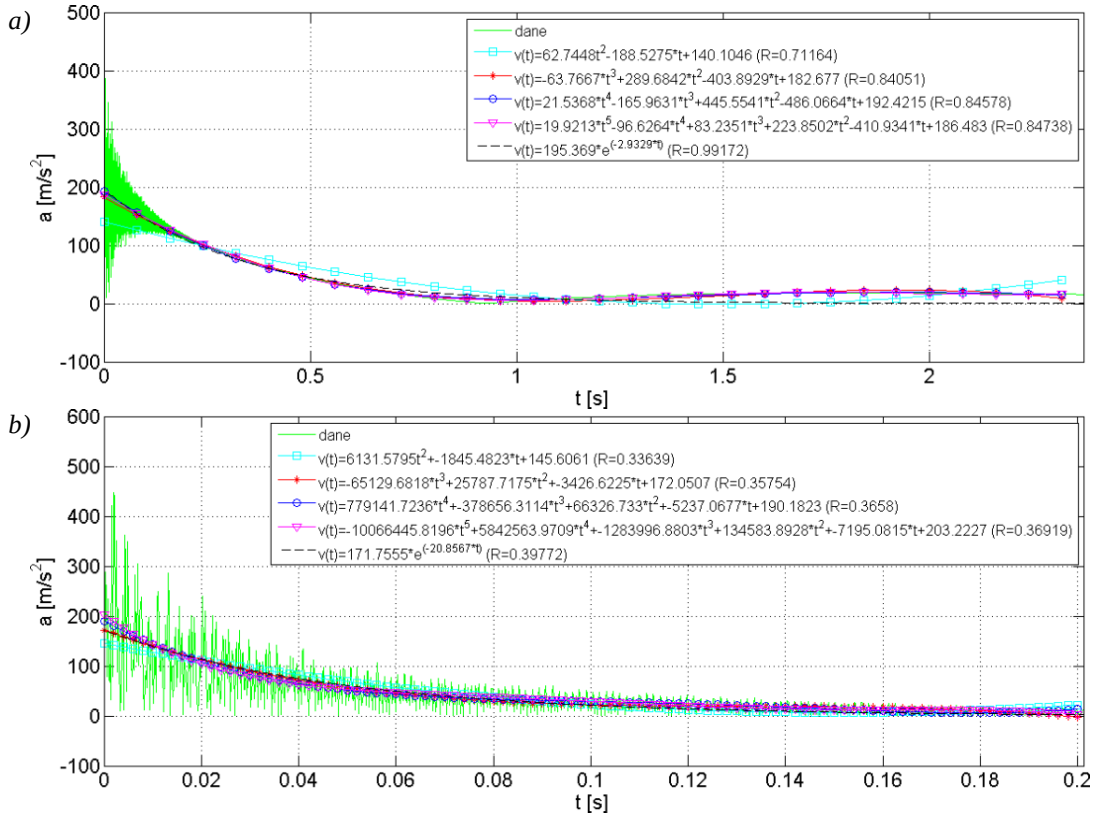
gdzie:
ψ - logarytmiczny dekement tłumienia, $A_{0\text{-}n,m}$– kolejne wartości szczytowe amplitud,
n, m – kolejny numer amplitudy.

W przypadku połączeń spawanych, tłumione przebiegi oscylacyjne odpowiedzi rejestrowanych akcelerometrami charakteryzują się nierównomiernym rozkładem maksimów i minimów, co znacznie utrudnia wyznaczenie przebiegu zmian tłumienia w czasie. Ze względu na zmiany przyspieszeń (lub prędkości) drgań i potrzebę obliczenia dekrementu tłumienia zbadano możliwość aproksymacji przebiegu odpowiedzi za pomocą funkcji, które w ogólnej postaci przedstawiono równaniem (3.12). W celu wyboru właściwej funkcji aproksymującej przeprowadzono ich analizę porównawczą, w której zestawiono aproksymacje otrzymane za pomocą wielomianów stopnia od 2 do 5 oraz funkcję ekspotencjalną – wszystkie użyte równania zostały przedstawione na wykresach. Stopień dopasowania funkcji aproksymującej do danych rzeczywistych oceniono stosując współczynnik R^2 zwany też współczynnikiem determinacji (opisany równaniem 3.4). Jego wartość mieści się w przedziale od 0 do 1, gdzie wartość bliska 1 oznacza, że funkcja aproksymująca bardzo dobrze reprezentuje dane rzeczywiste, a wartość bliska 0, że jest odwrotnie, czyli funkcja aproksymująca bardzo słabo odwzorowuje dane rzeczywiste. Współczynnik R^2 nie tylko został użyty do oceny dopasowania funkcji aproksymującej do danych rzeczywistych, ale również pozwolił porównać użyte funkcje między sobą (4):

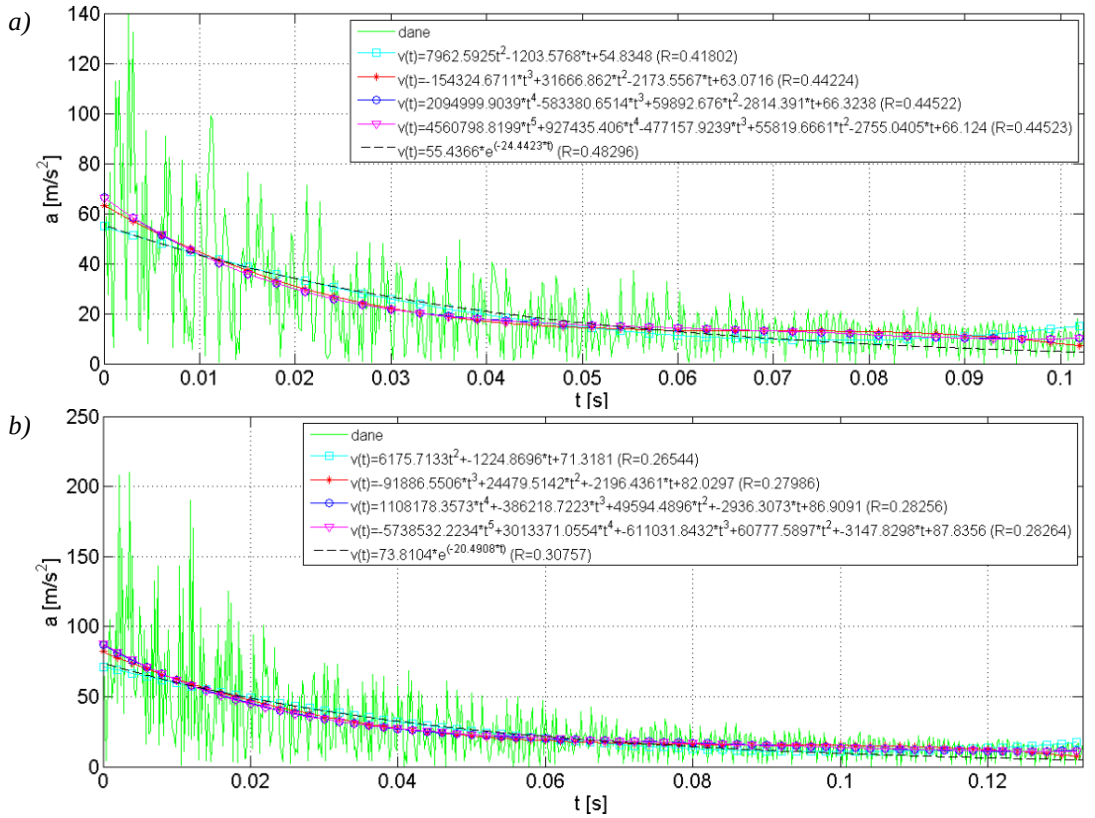
$$v_1(t) = \sum_{i=0}^{N} a_i \cdot t^i \qquad (3.12)$$
$$v_2(t) = b \cdot \exp(-c \cdot t)$$

gdzie:
$v(t)$ - fukcja aproksymujaca przebieg prędkości, a_i - i-ta stała dla wielomianu, b, c - stałe dla fukcji ekspotencjalnej.

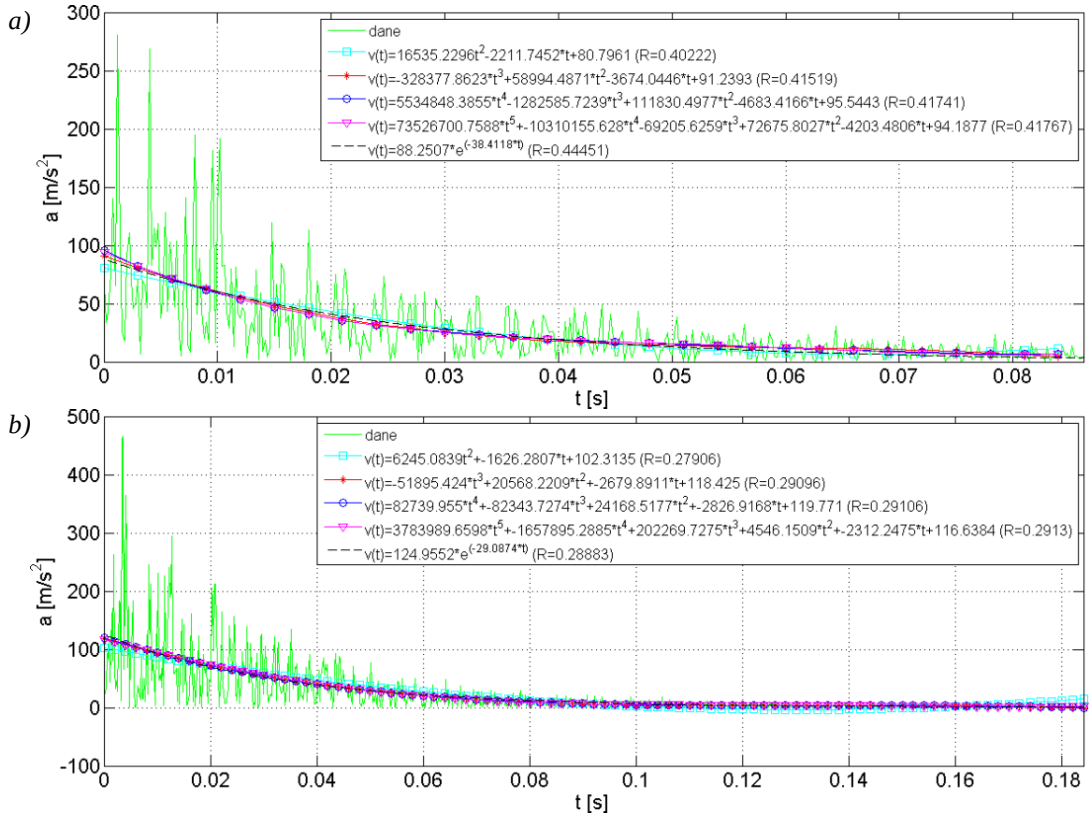
Na rysunkach od 3.53 do 3.56 przedstawiono przykładowy wynik aproksymiacji dla odpowiedzi zajrestrowanych dla badanych płyt spawanych podczas przeprowadzenia badań z zastosowaniem końcówki metalowej i teflonowej na młotku modalnym. Analiza rysunków 3.53-3.56 pozwala zauważyć, że zmiany uzyskanych wartości niezaleznie od użytej funkcji amprosymującej są stosunkow niewielkie, jadnak zostanie podjęta próba wskazania funkcji aproksymującej będącej najlepszą z punktu widzenia diagnostyki spoin.



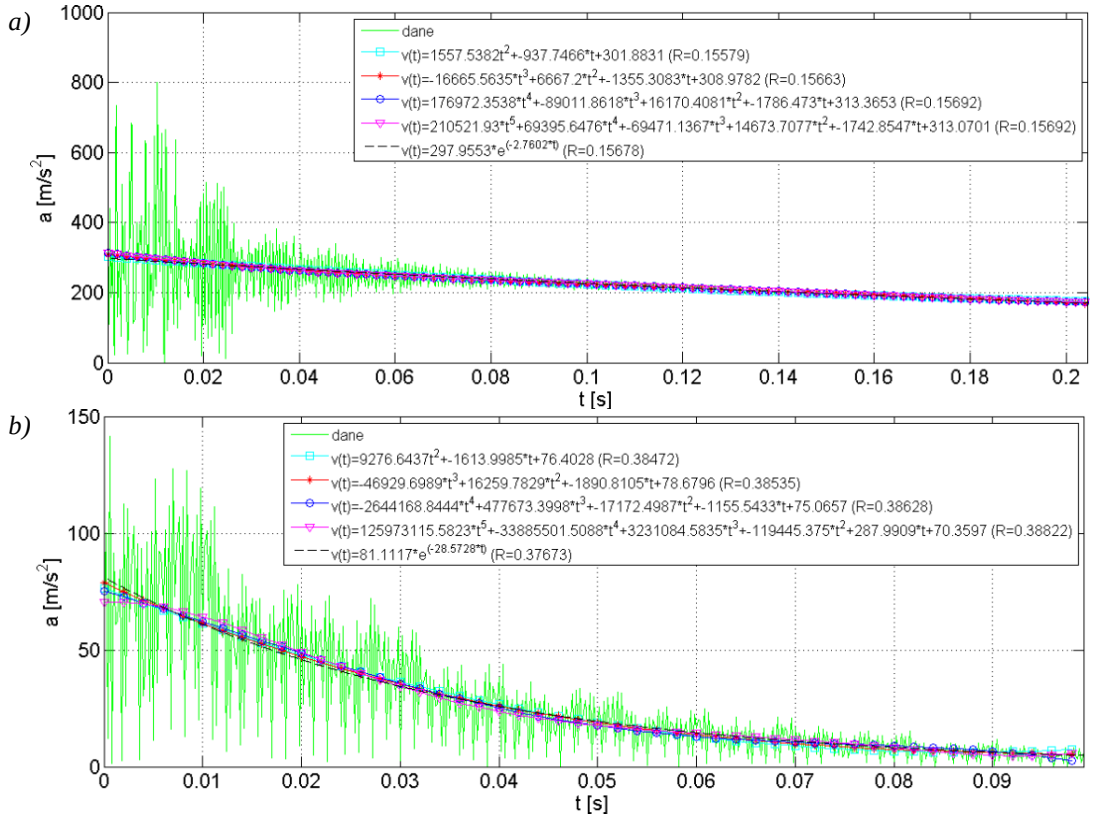
Rys. 3.53. Aproksymacja odpowiedzi otrzymanej z akcelerometrów dla płyty bez połączenia spawanego 0 z zastosowaniem końcówki a) metalowej, b) teflonowej



Rys. 3.54. Aproksymacja odpowiedzi otrzymanej z akcelerometrów dla płyty spawanej z połączeniem spawanym bez wad spoinie 2202 z zastosowaniem końcówki a) metalowej, b) teflonowej



Rys. 3.55. Aproksymacja odpowiedzi otrzymanej z akcelerometrów dla płyty spawanej z wad typu przyklejenie brzegowe 2127 w spoinie z zastosowaniem końcówki a) metalowej, b) teflonowej

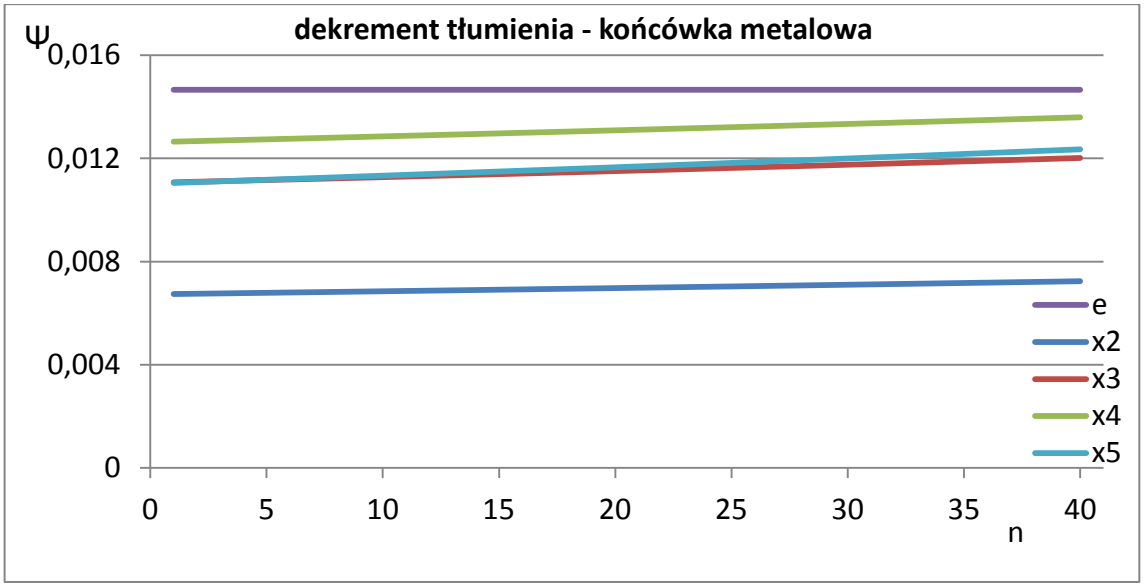


Rys. 3.56. Aproksymacja odpowiedzi otrzymanej z akcelerometrów dla płyty spawanej z wad typu pęknięcie o zdefiniowanej długości 2132 w spoinie z zastosowaniem końcówki a) metalowej, b) teflonowej

Z porównania wyników aproksymacji wynika, że najgorszą wartość R^2 otrzymano dla wielomianu kwadratowego, natomiast najlepszą wartość dla funkcji ekspotencjalnej. Uzyskane dla poszczególnych funkcji aprosymujących wartości R^2 przedstawiono na każdym z wykresów w nawiasie za użytą funkcją. Na podstawie współczynika R^2 można również zaobserwować, że zadowalający wynik aproksymacji można uzyskać wielomianem trzeciego stopnia natomiast zwiększanie stopnia wielomianu do czwatrwego lub piątego nie przynosi już znaczącej poprawy aproksymacji.

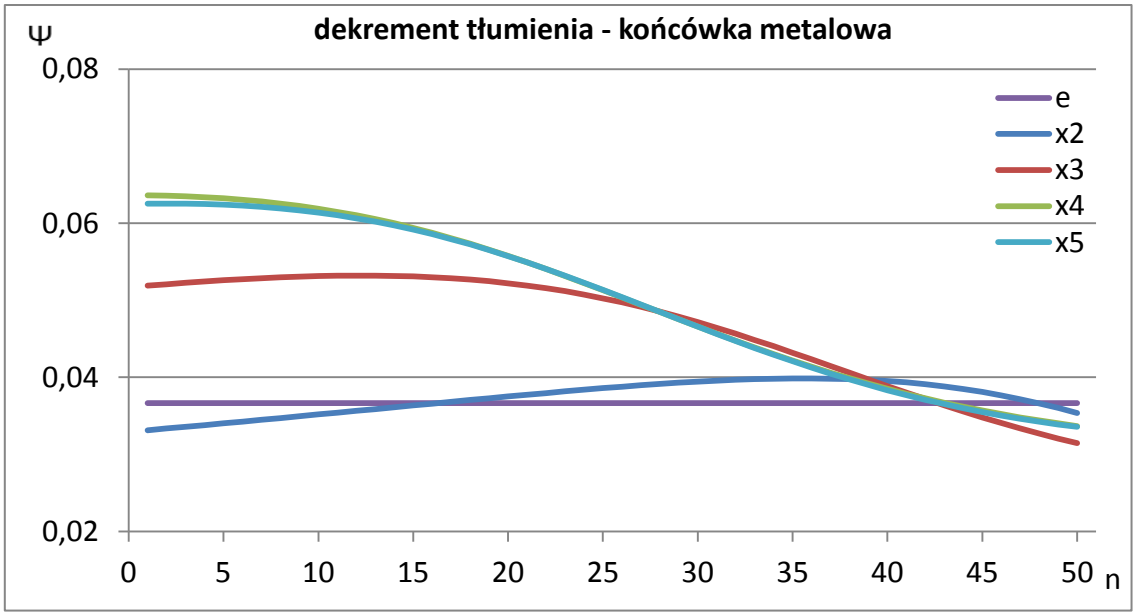
Do obliczenia dekrementu tłumienia można wykorzystać równania 3.10 i 3.11. W pierwszym etapie badań wstępnych opracowano wyniki na podstawie pierwszego z nich. Wzór (3.10) pozwala na obliczenie rozkładu dekrementu względem maksymalnej amplitudy, natomiast drugi w przypadku, gdy znanym dwie dowolne amplitudy z przebiegu (oraz kolejność ich wystąpienia).

Dla wyników otrzymanych z każdej funkcji aproksymującej obliczono wartość dekrementu tłumienia względem wartości maksymalnej (A_o). Dekrement tłumienia uzyskany przy aproksymacji funkcją ekspotencjalną charakteryzuje się liniową zmianą i uznany został za referencyjny, do jego wartości zostały odniesione pozostałe wyniki. Na rysunkach od 3.57 do 3.60 przedstawiono zmiany dekrementu tłumienia dla badanych płyt spawanych przy różnych funkcjach aproksymujących. Na osiach pionowych umieszczono wartości badanego dekrementu, natomiast osi poziomej numery kolejnych amplitud badanego przebiegu. Można zauważyć, że dla płyty bez połączenia spawanego 0 rozkład dekrementów tłumienia otrzymany podczas realizacji badań z zastosowaniem końcówki metalowej na młotku modalnym jest zbliżony do równoległego, w stosunku do dekrementu uzyskanego na podstawie funkcji ekspotencjalnej (rysunek 3.57). Świadczy to o niezmiennym w czasie tłumieniu, które obserwuje się dla płyt bez połączenia spawanego 0.



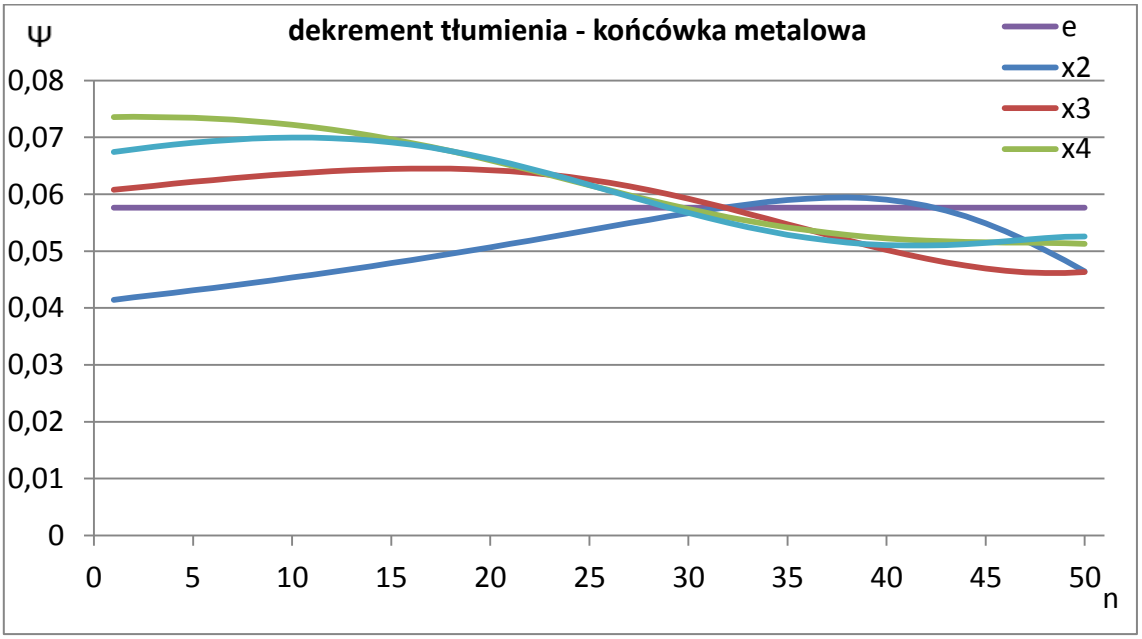
Rys. 3.57. Dekrement tłumienia dla płyty bez połączenia spawanego (0) wyznaczony względem wartości maksymalnej dla badania z zastosowaniem końcówki: metalowej na młotku modalnym

Dla płyty spawanej bez wad w spoinie z zastosowaniem podczas badania końcówki metalowej na młotku modalnym można zaobserwować większe tłumienie (rys 3.58). Dlatego przebiegi dekrementów ulegają wyraźnemu zakrzywieniu i przy 41 amplitudzie dochodzi do pokrycia się ich wartości z referencyjną charakterystyką dekrementu tłumienia uzyskaną w użyciem funkcji ekspotencjalnej i równania (3.10).



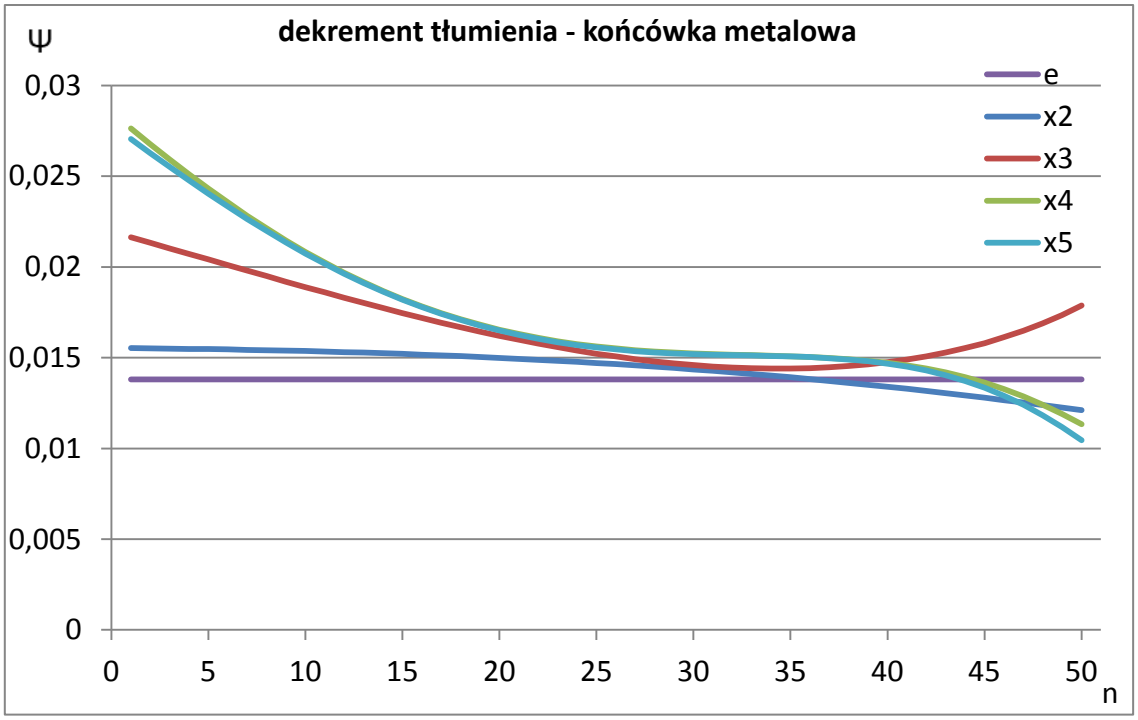
Rys. 3.58. Dekrement tłumienia dla płyty spawanej bez wad w spoinie (2202) wyznaczony względem wartości maksymalnej dla badania z zastosowaniem końcówki metalowej na młotku modalnym

Dla płyty spawanej z wadą typu przyklejenie brzegowe – rysunek 3.59, podczas zastosowania końcówki metalowej na młotku modalnym efekt zakrzywienia jest jeszcze bardziej zauważalny, ponieważ do przecięcia z charakterystyką referencyjną dekrementu doszło już przy 31 amplitudzie odpowiedzi.



Rys. 3.59. Dekrement tłumienia dla płyty spawanej wadą typu przyklejenie brzegowe w spoinie (2127) względem wartości maksymalnej dla badania z zastosowaniem końcówki metalowej na młotku modalnym.

Pomimo innego charakteru zmian w przypadku wystąpienia w spoinie defektu w postaci pęknięcia o zdefiniowanej długości tutaj również wyraźnie obserwowalna jest sytuacja przecięcia charakterystyk dekrementów tłumienia uzyskanych wielomianami stopnia 2 do 5 z referencyjną charakterystyką określoną funkcją ekspotencjalną.



Rys. 3.60. Dekrement tłumienia dla płyty spawanej wadą typu pęknięcie o zdefiniowanej długości (2132) względem wartości maksymalnej dla badania z zastosowaniem końcówki metalowej na młotku modalnym

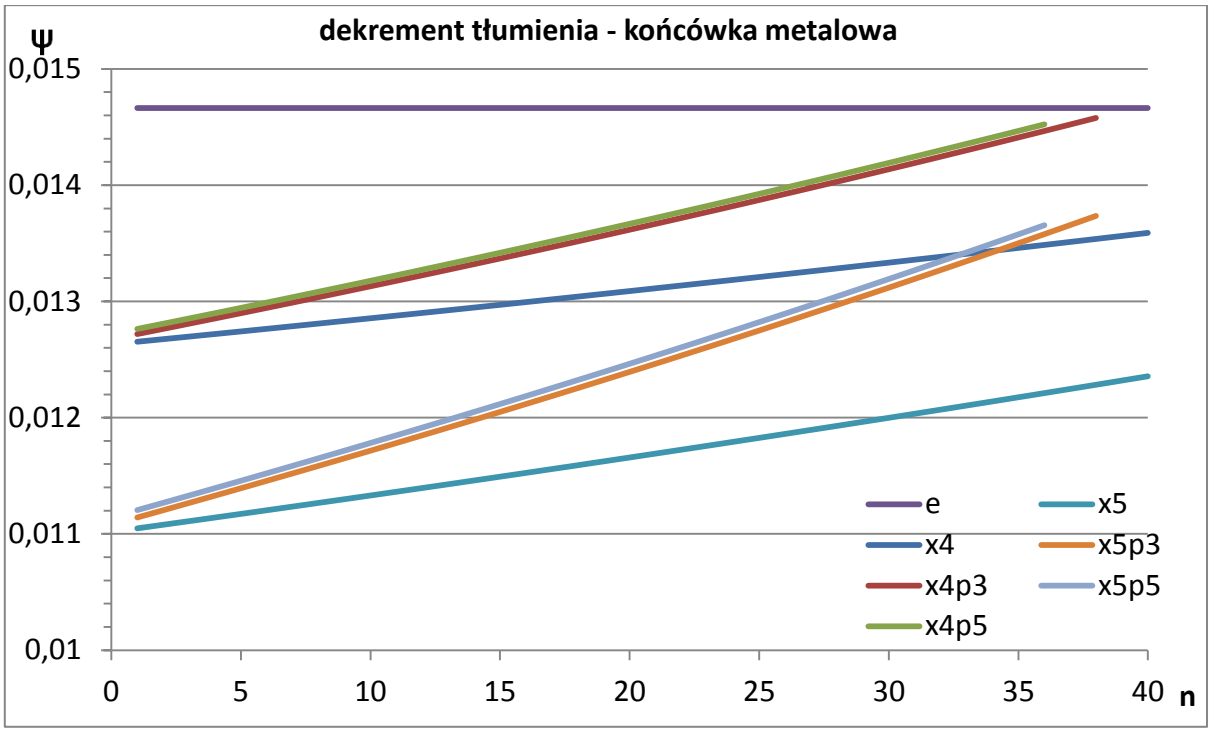
Analiza rysunków 3.57 do 3.60 pozwala na postawienie wstępnego wniosku o możliwości wykorzystania proponowanej metody do wykrywania defektów spoin. Charakterystyki wszystkich dekrementów tłumienia uzyskane w przypadku płyty bez połączenia spawanego nie przecinają się w badanym zakresie liczby amplitud. Istotnym jest, że pozostałych przypadkach, gdzie występowały różnego rodzaju uszkodzenia spoin sytuacja jest odwrotna. Można to tłumaczyć zmianą wartości dekrementu tłumienia wskutek występowania defektów w postaci nieciągłości materiału w uszkodzonej spoinie. Na obecnym etapie badań można również rozważać sytuację, w której wywołane wymuszeniem drgania powodują minimalne zmiany kształtu spoiny oddziaływujące na wartość rozpraszanej w spoinie energii.

Kolejny etap analiz prowadzono stosując równanie (3.11) umożliwiające ocenę zmian tłumienia dla wybranych amplitud przebiegu. Rysunki od 3.57 do 3.60 przedstawiają charakterystyki rozkładu dekrementu tłumienia obliczone dla dwóch wielomianów stopnia 4 i 5 i są to pierwsze symbole użyte do oznaczenia poszczególnych przebiegów Oznaczenia na drugiej pozycji odnoszą się do uwzględnionych w obliczeniach numerów i wartości amplitud. Dla cyfry trzy brano pod uwagę np. amplitudę o numerach 8 i 11 a dla cyfry 5 o numerach 10 i 15. Pozostałe oznaczenia to e – rozkład dekrementu tłumienia otrzymany ze wzoru (3.11) dla funkcji aproksymującej w postaci ekspotencjalnej, x4 dla wielomianu stopnia 4 z wykorzystaniem równania (3.10), x5 dla wielomianu stopnia 5 z wykorzystaniem równania (3.10).

Rozkład dekrementu tłumienia obliczony dla danych uzyskanych w wyniku aproksymacji odpowiedzi funkcją ekspotencjalną charakteryzuje się liniowością. Taki charakter ma rozkład dekrementu obliczony zarówno z użyciem równania 3.10 i 3.11 Dlatego rozkład dekrementu tłumienia obliczony dla aproksymacji funkcją ekspotencjalną uznany został za referencyjny i posłużył do porównania z nim pozostałych wyników.

Na rysunku 3.61 przedstawiono zmiany dekrementu tłumienia dla płyty bez połączenia spawanego 0, przy różnych funkcjach aproksymujących. Można zauważyć, że dla płyty bez połączenia spawanego wyznaczone rozkłady dekrementów tłumienia zarówno

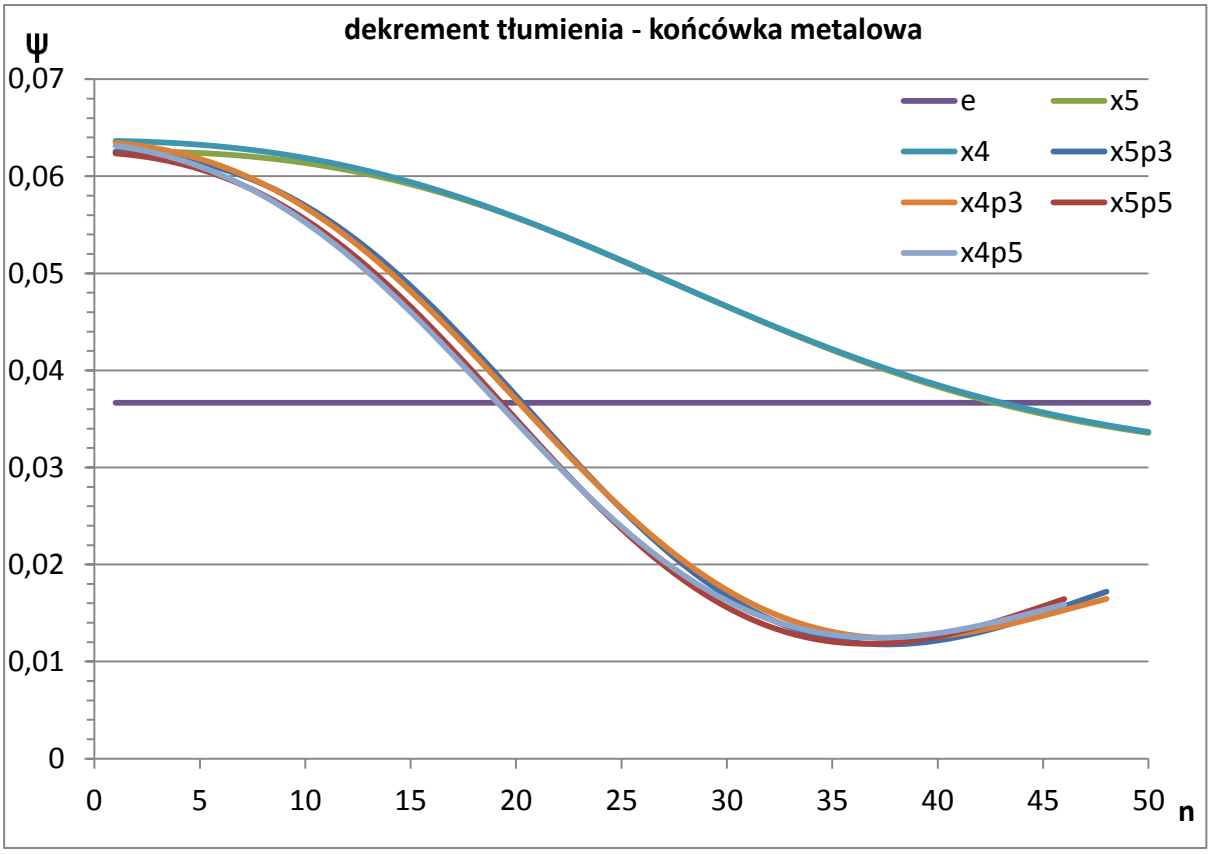
wzorem (3.10) jak i (3.11) są typu liniowego. Świadczy to o równomiernym tłumieniu, które obserwuje się dla płyt wykazujących cechy konstrukcji liniowej zarówno materiałowo jak i geometrycznie. W przypadku wyników otrzymanych dla płyty bez połączenia spawanego można również zauważyć widoczne różnice dla aproksymacji między wielomianem stopnia 4 (rozkłady: x4, x4p3 i x4p5) i wielomianem stopnia 5 (rozkłady: x5, x5p3 i x5p5). Natomiast nie obserwuje się znaczącej różnicy w przypadku, gdy stosując wzór (3.11) wykonano obliczenia dla 3 i 5 amplitudy, czyli są to rozkłady oznaczone x4p3 oraz x4p5 dla wielomianu stopnia 4 i x5p3 oraz x5p5 dla wielomianu stopnia 5.



Rys. 3.61. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty bez spawu (0) otrzymane dwoma metodami

Dla płyty spawanej ze spoiną bez wad można zaobserwować większe tłumienie, zmienne w czasie (rysunek 3.61). Dlatego rozkłady dekrementów ulegają wyraźnemu zakrzywieniu i stają się zbieżne do dekrementu obliczonego z funkcji ekspotencjalnej. Do przecięcia z charakterystyką referencyjną dekrementu przy zastosowaniu pierwszego wzoru (3.10) dochodzi przy 41 szczytowej amplitudzie odpowiedzi a przy zastosowaniu drugiego wzoru (3.11) przy około 19 amplitudzie szczytowej.

Porównując rozkłady dekrementów tłumienia otrzymanych z użyciem równań (3.10) i (3.11) w zależności od liczby próbek (3 lub 5) można zauważyć zmianę tendencji jaka miała miejsce w wcześniejszym przypadku. Z rozkładów dekrementu tłumienia przedstawionego na rysunku 3.62 widać, że niezależnie od stopnia wielomianu aproksymacji (4 lub 5) wynik jest podobny dla zarówno dla (3.10) jak i (3.11). Podobną zbieżność rozkładów otrzymujemy w przypadku zastosowania wzoru (3.10) i różnych liczb próbek (3 i 5). Uzyskany wynik można wyjaśnić w taki sposób, że obszar spawu o wysokiej, jakości charakteryzuje się właściwościami konstrukcji liniowej pod względem materiałowym jak i geometrycznym. Dla dobrze wykonanego spawu rozkład dekrementu tłumienia obliczony wzorem (3.10) lub (3.11) daje podobny wynik, nawet gdy przyjęty zostanie różny stopień wielomianu lub liczba okresów we wzorze (3.11) – rysunek 3.62.

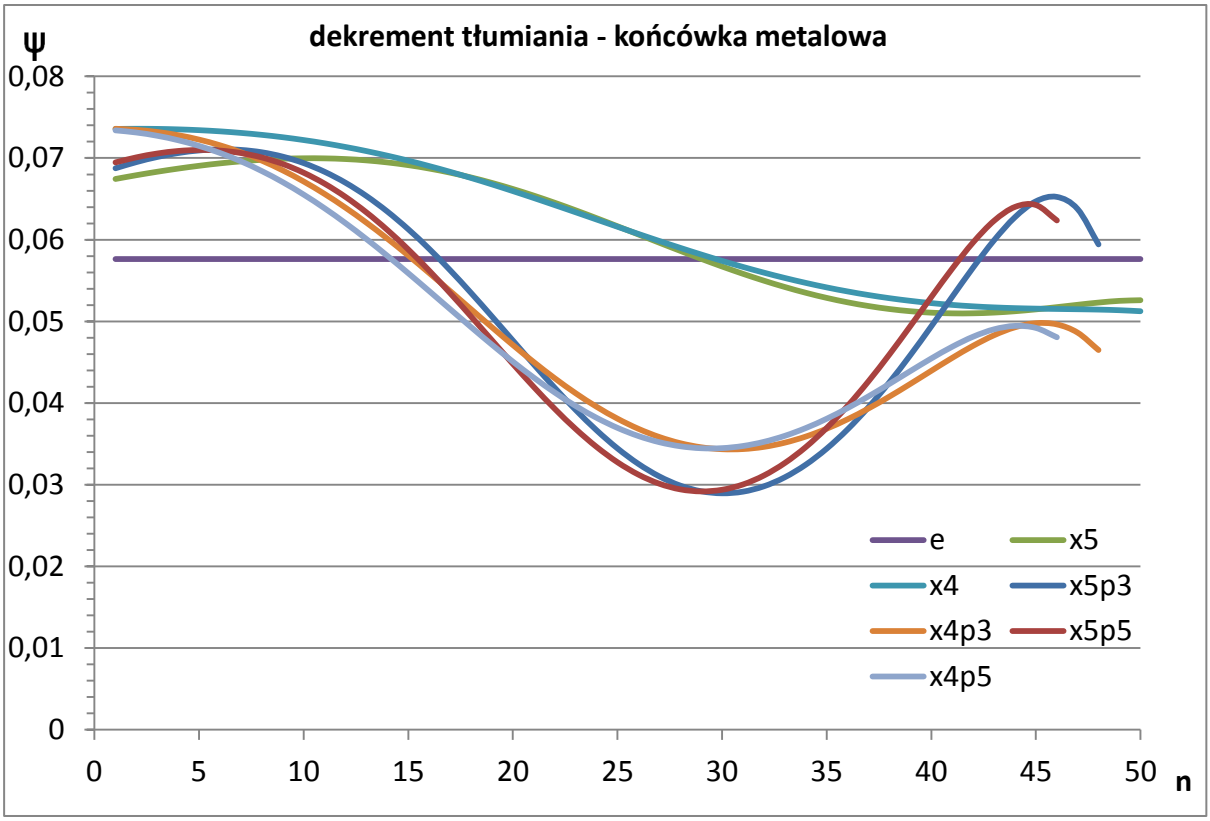


Rys. 3.62. Rozkłady dekeremntów tłumienia dla płyty spawnej z spawem bez wad w spoinie (2202) otrzymane dwoma metodami

Dla płyty spawanej z wadą typu przeklejenie brzegowe efekt ten jest jeszcze bardziej zauważalny, ponieważ do przecięcia z charakterystyką referencyjną dekrementu przy zastosowaniu pierwszego wzoru (3.10) doszło już przy 31 amplitudzie odpowiedzi, a przy zastosowaniu drugiego wzoru (3.11) przy około 16 amplitudzie szczytowej.

Porównując rozkłady dekrementów tłumienia otrzymanych wzorami (3.10) i (3.11) - w przypadku wzoru (3.11) w zależności od kolejnych amplitud (3 lub 5), dla płyty ze spawem złej jakości można zauważyć kolejną zmianę tendencji jaka miała miejsce w przypadku wyników otrzymanych dla płyty z dobrym jakościowo spawem. Z rozkładów dekrementów tłumienia przedstawionych na rysunku 3.63 można zauważyć, że niezależnie od stopnia wielomianu aproksymującego (4 lub 5) wynik jest podobny do wyniku otrzymanego ze wzoru (3.10) ale różny, gdy zastosowany zostanie wzór (3.11).

W przypadku zastosowania wzoru (3.11) oraz zmiany stopnia wielomianu i liczby okresów można zauważyć, że rozkłady oscylują wokół numeru szczytów amplitud od 14 do 17. Uzyskany wynik można wyjaśnić w taki sposób, że obszar spawu o niskiej jakości wykonania charakteryzuje się właściwościami konstrukcji nieliniowej pod względem materiałowym jak i geometrycznym.

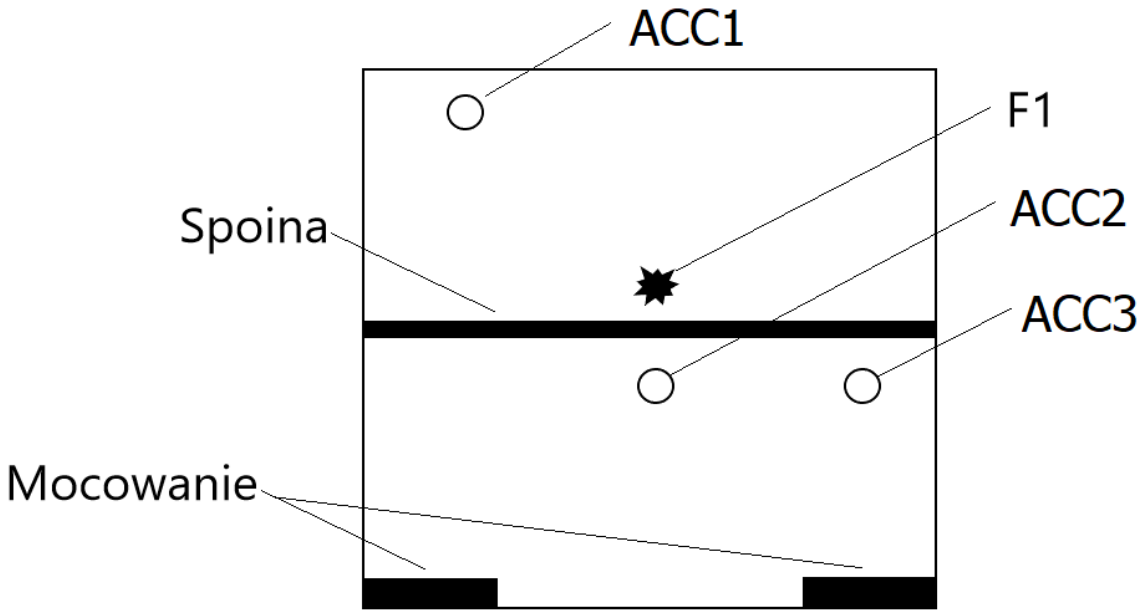


Rys. 3.63. Rozkłady dekeremntów tłumienia dla płyty spawnej w wadą typu przeklejnie brzegowe (2127) otrzymane dwoma metodami

Uzyskane wyniki wskazują, że niezależnie od metody uzyskania wartości dekrementu tłumienia (zgodnie z równaniem 3.10 lub 3.11) istnieje możliwość wykrycia uszkodzeń występujących w spoinach. W celu powiązania konkretnych zależności z różnego typu uszkodzeniami spoin niezbędne jest wykonanie szeregu dodatkowych badań.

4. BADANIA BLACH KONSTRUKCJI CIENKOŚCIENNYCH

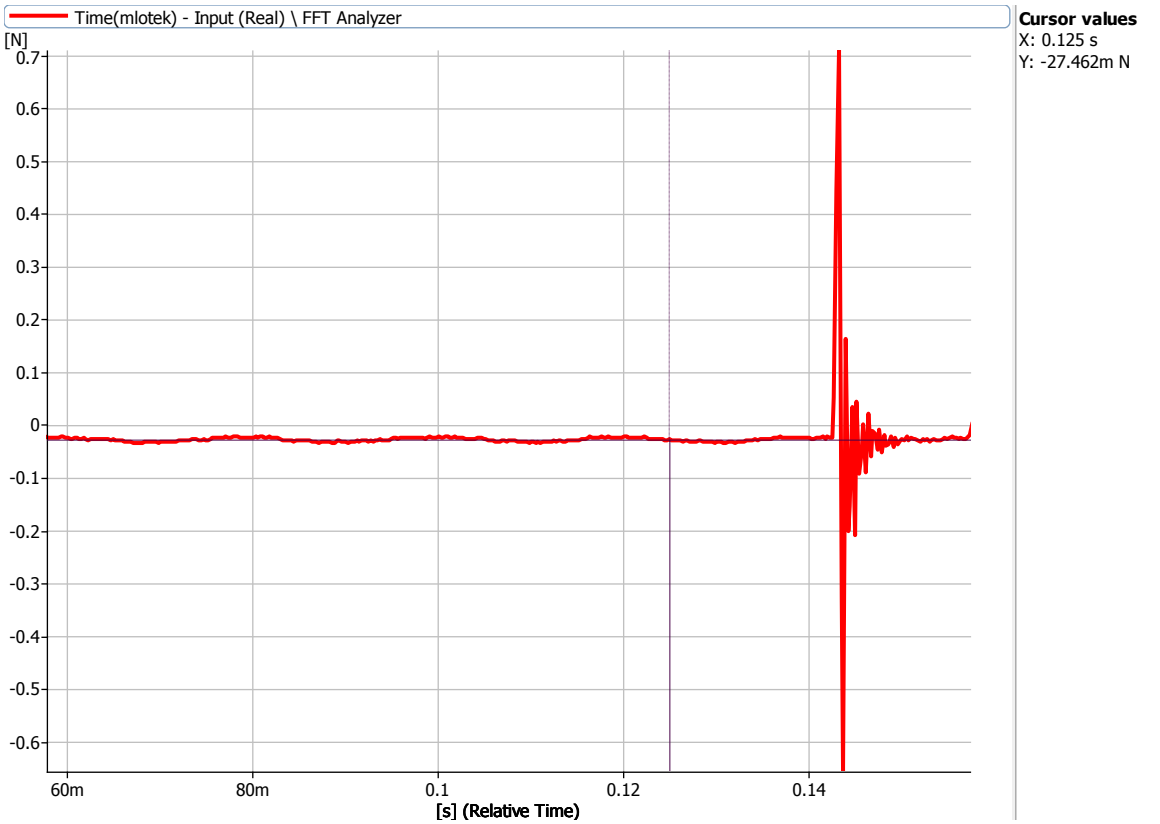
Po uzyskaniu obiecujących wyników dla płyt o znacznej grubości, autor pozyskał siedem blach poszycia o mniejszej grubości względnej - blach cienkich, będących fragmentami konstrukcji obiektów rzeczywistych Wszystkie spawy były wykonywane przez spawaczy z uprawnieniami, czyli badaniom poddano obiekty występujące w praktyce przemysłowej. Niektóre z badanych płyt mają wadliwie wykonane spawy, które zostały negatywnie zweryfikowane przy pomocy komercyjnych technik NDT, w jednej z pomorskich stoczni. Założeniem tego etapu badań, było przygotowanie płyt o innych wymiarach i stanie spoin niż w pierwszym etapie badań. Badane płyty o wymiarach 500x500x4 mm są, jeżeli chodzi o ich grubość zbliżone do obiektów rzeczywistych. Mniejsza względna grubość płyty ma wpływ na zmianę ich charakterystyk dynamicznych i może mieć wpływ na czułość opracowanych miar diagnostycznych. Celem dwóch etapów badań, które zostały przedstawione w pracy, była weryfikacja proponowanych metod oceny stanu połączeń spawanych w odniesieniu do różnych grubości blach. Istotne jest również to, że badane w tym etapie płyty były płytami wykonanymi przez zawodowych spawaczy, a powstałe uszkodzenia nie były ich zamierzonym działaniem. Płyty użyte podczas pierwszego etapu badań miały wymiary 350x250x15 mm, płyty stosowane podczas drugiego etapu badań miały wymiary 500x500x4 mm. Podczas badań użyto opisanej już wcześniej *(rozdział 2)* w pracy aparatury. Przetworniki montowano zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 4.1. W odróżnieniu do badań płyt o znacznej grubości, podczas drugiego etapu badań zastosowano trzy czujniki piezoelektryczne: ACC1, ACC2 i ACC3, montując dodatkowy czujnik oznaczony jako ACC2. Podczas badań prowadzono również rejestrację przemieszczeń płyt z użyciem czujników laserowych. Amplitudy przemieszczeń drgań, uzyskiwane z czujników laserowych, dają więcej informacji diagnostycznej dla niskich częstotliwości w porównaniu z amplitudami przyśpieszeń uzyskiwanymi z akcelerometrów. W przypadku analizowanej konstrukcji korzystniejsze jest stosowanie czujników przyśpieszeń, również z uwagi na praktyczne możliwości ich zastosowania w autonomicznych systemach SHM. Zastosowanie kilkunastu bądź kilkudziesięciu czujników laserowych w systemie SHM byłoby niezwykle trudne zarówno z powodów technicznych jak i ekonomicznych. Na rysunku 4.2 przedstawiono fotografię wykonaną podczas badań jednej z płyt. Jest na niej widoczne rozmieszczenie przetworników piezoelektrycznych użytych do pomiaru odpowiedzi płyty na wymuszenie z użyciem młotka modalnego. Na podstawie analizy oddziaływania typu końcówki młotka modalnego na jakość prowadzonych badań, w tym etapie badań zastosowano jedynie końcówkę metalową.



Rys. 4.1. Rozmieszczenie przetworników podczas drugiej serii badań. ACC1- akcelerometr (kanał 1 – góra), ACC2 – akcelerometr (kanał 2 – dół środek), ACC3 – akcelerometr (kanał 3 – dół prawo), F1 – miejsce uderzenia młotkiem modalnym.

Rys. 4.2. Zdjęcie wykonane podczas drugiej serii badań

Użycie kompatybilnego z systemem pomiarowym młotka modalnego pozwoliło na dokładny pomiar wartości siły wymuszającej której przykładowy przebieg przedstawiono na rysunku 4.3.

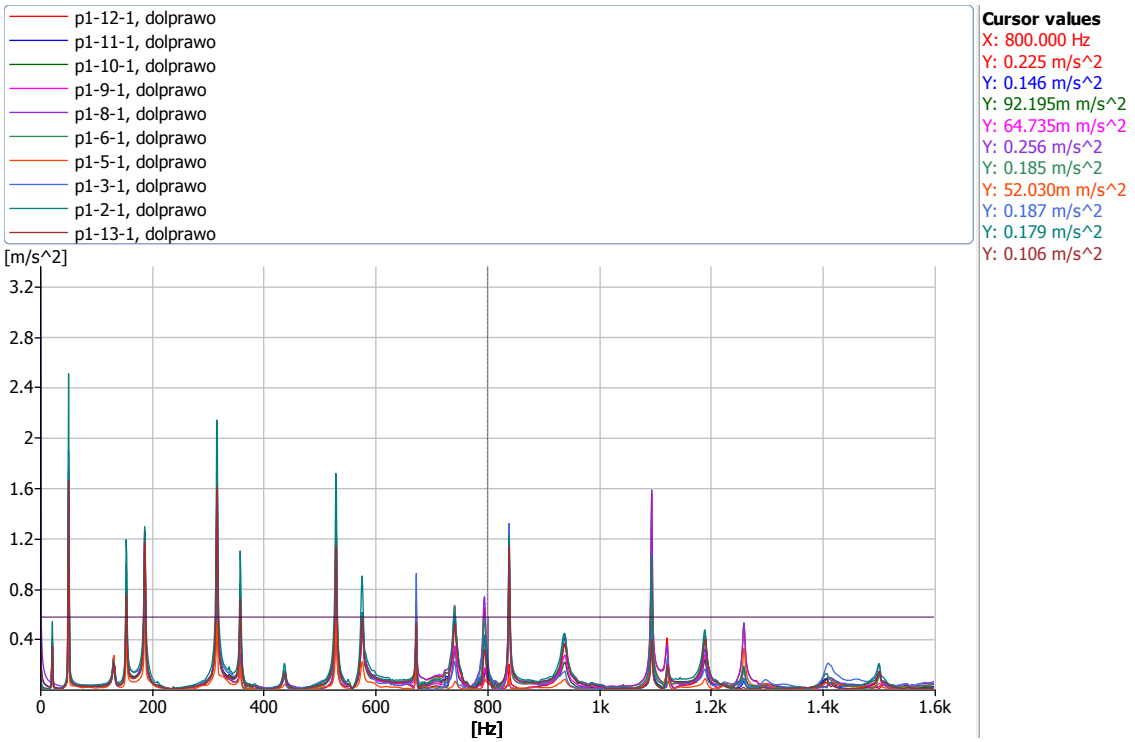


Rys. 4.3. Przebieg czasowy wartości siły wymuszającej rejestrowany przez czujnik siły w młotku modalnym

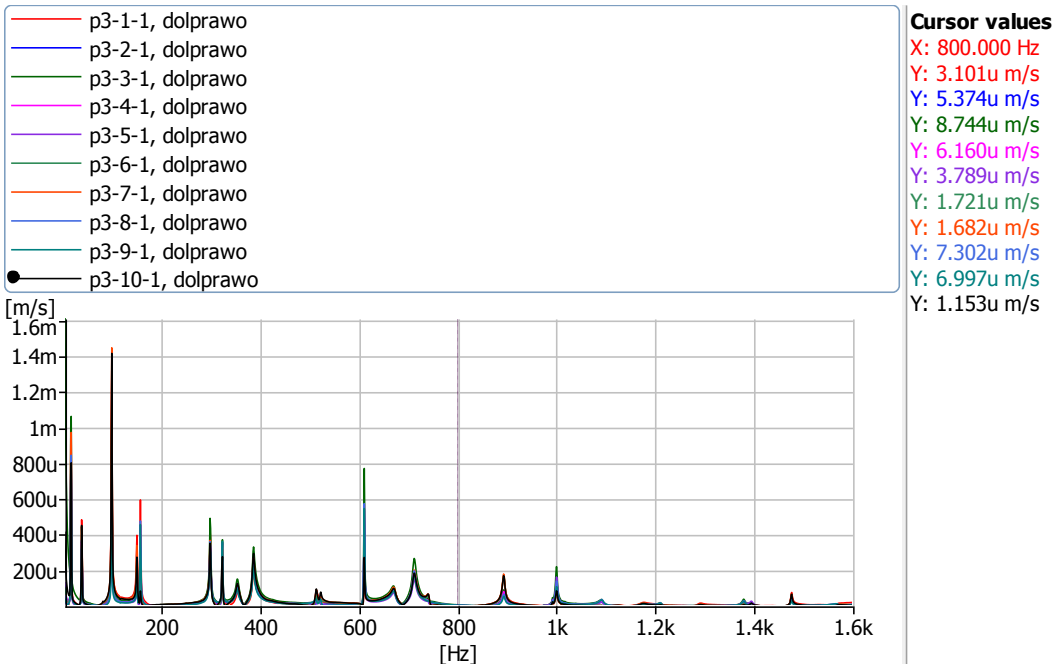
Analizie poddano parametry drganiowe uzyskane w wyniku pomiarów prowadzonych na siedmiu płytach charakteryzujących się różnym stanem spoin. W większości wybrano złącza o spoinach niedopuszczonych do eksploatacji. Wykonane połączenia poddano ocenie z użyciem metody radiograficznej. Wykryto następujące rodzaje uszkodzeń w spoinach:

- płyta P1 – płyta bez połączenia spawanego,
- płyta P2 – brak przetopu,
- płyta P3 – nielicznie pęcherze kuliste, połączenie uznaje się za dobre,
- płyta P4 – brak przetopu,
- płyta P5 – brak przetopu,
- płyta P6 – brak przetopu, przyklejenie brzegowe, pęcherz podłużny,
- płyta P7 – brak przetopu, przyklejenie brzegowe, pęcherz podłużny,

Wszystkie badania były wykonane zgodnie z zachowaniem zasad dobrej praktyki. Należy do nich m.in. kalibracja użytej aparatury. Procedurę kalibracji opisano dokładniej w rozdziale 2. W pierwszym etapie badań sprawdzono powtarzalność uzyskiwanych wyników. Porównano charakterystyki dynamiczne badanych obiektów wykonane poprzez wielokrotne przeprowadzenie danego badania z różną siłą wymuszającą. Brak powtarzalności mógłby świadczyć o niewłaściwym zamocowaniu obiektu badań bądź błędach w obróbce sygnału pomiarowego. Porównanie widm płyty P1 dla kolejnych 10 uderzeń młotkiem modalnym przedstawiono na rysunku 4.4 oraz 4.6. Na rysunku 4.5 oraz 4.7 znajduje się podobne porównanie odnoszące się do płyty P3. Na rysunku 4.8 znajdują się widma 10 kolejnych uderzeń w przypadku płyty P7 charakteryzującej się znacznymi defektami w płycie.



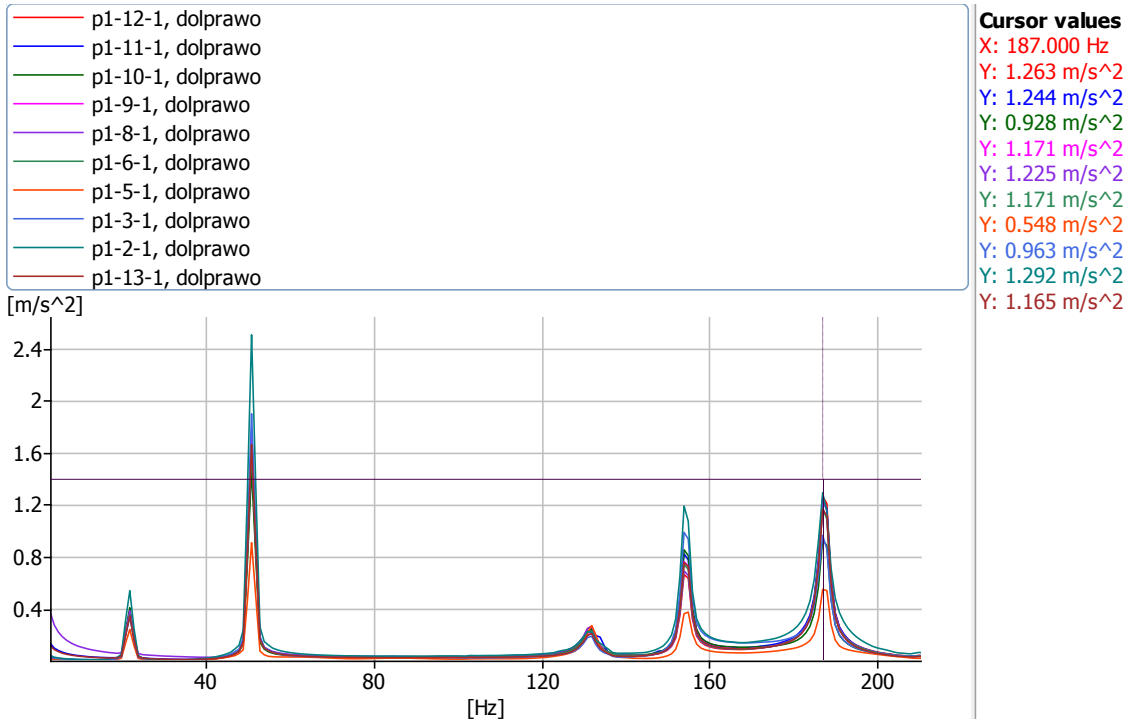
Rys. 4.4. Widma przyspieszeń drgań odpowiedzi na wymuszenie młotkiem modalnym dla 10 kolejnych uderzeń płyty P1



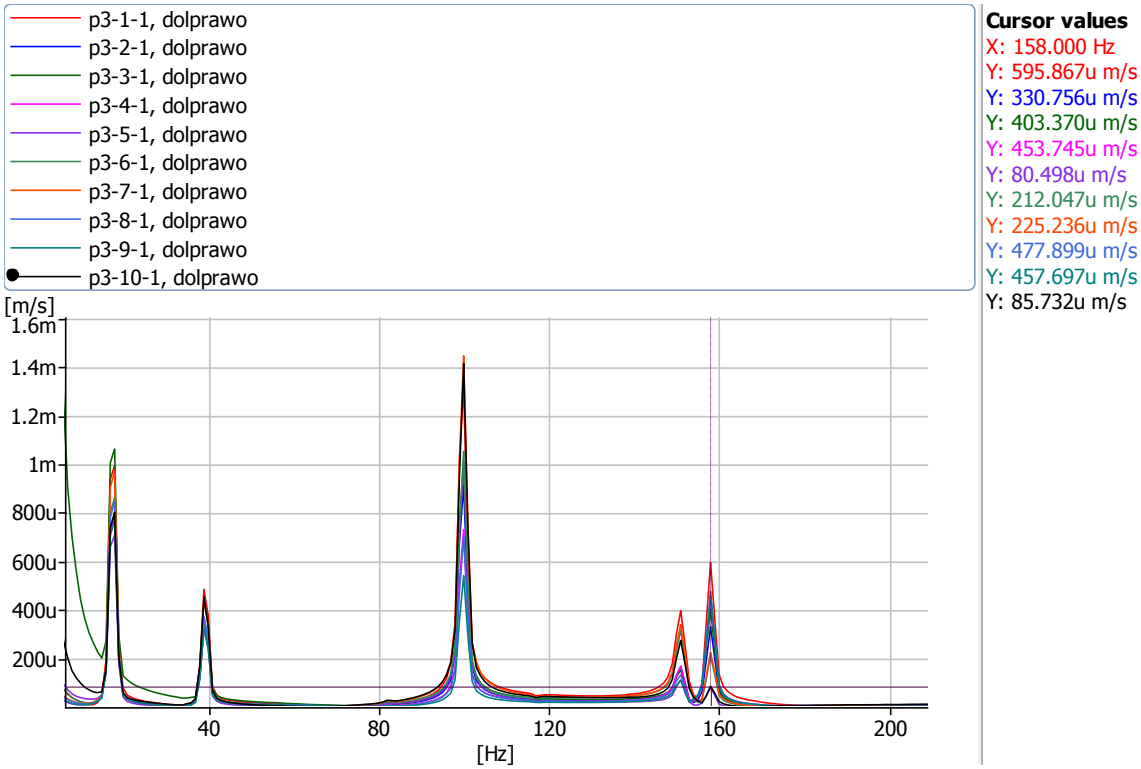
Rys. 4.5. Widma przyspieszeń drgań odpowiedzi na wymuszenie młotkiem modalnym dla 10 kolejnych uderzeń płyty P3

Na rysunku 4.6 autor zakres częstotliwości widm płyty P1 do 200 Hz, dzięki czemu możliwe jest odczytanie wartości postaci drgań własnych płyty bez spoiny. Wynoszą one odpowiednio 22 Hz, 51 Hz, 132 Hz, 154 Hz oraz 187 Hz. Wartości częstotliwości dalszych postaci nie odczytywano, ponieważ w warunkach normalnej eksploatacji jednostek pływających nie występują pobudzenia o tak wysokich częstotliwościach. Częstotliwości kolejnych postaci drgań własnych w przypadku płyty ze spoiną, którą można uznać za poprawną (P3) wynoszą zgodnie z rysunkiem 4.7 odpowiednio 18 Hz, 39 Hz, 100 Hz, 151 Hz oraz 158 Hz.

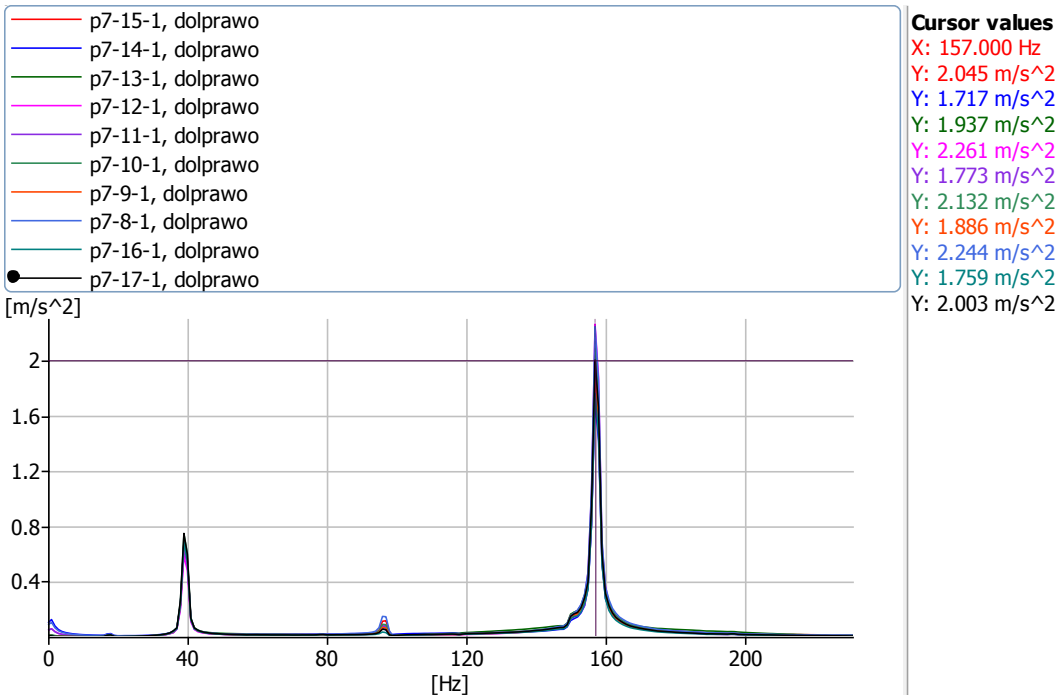
Odczytane z widm na wykresie wartości 3.8 wartości częstotliwości w przypadku płyty P7 wynoszą odpowiednio 39 Hz, 97 Hz oraz 157 Hz. Widoczny jest zatem wpływ występowania spoiny i jej stanu na wartości częstotliwości drgań własnych jak również na wartości amplitudy odpowiedzi. Wpływ ten obrazują również widma na wykresie 4.9.



Rys. 4.6. Zbliżenie widm przyspieszeń drgań odpowiedzi na wymuszenie młotkiem modalnym dla 10 kolejnych uderzeń płyty P1

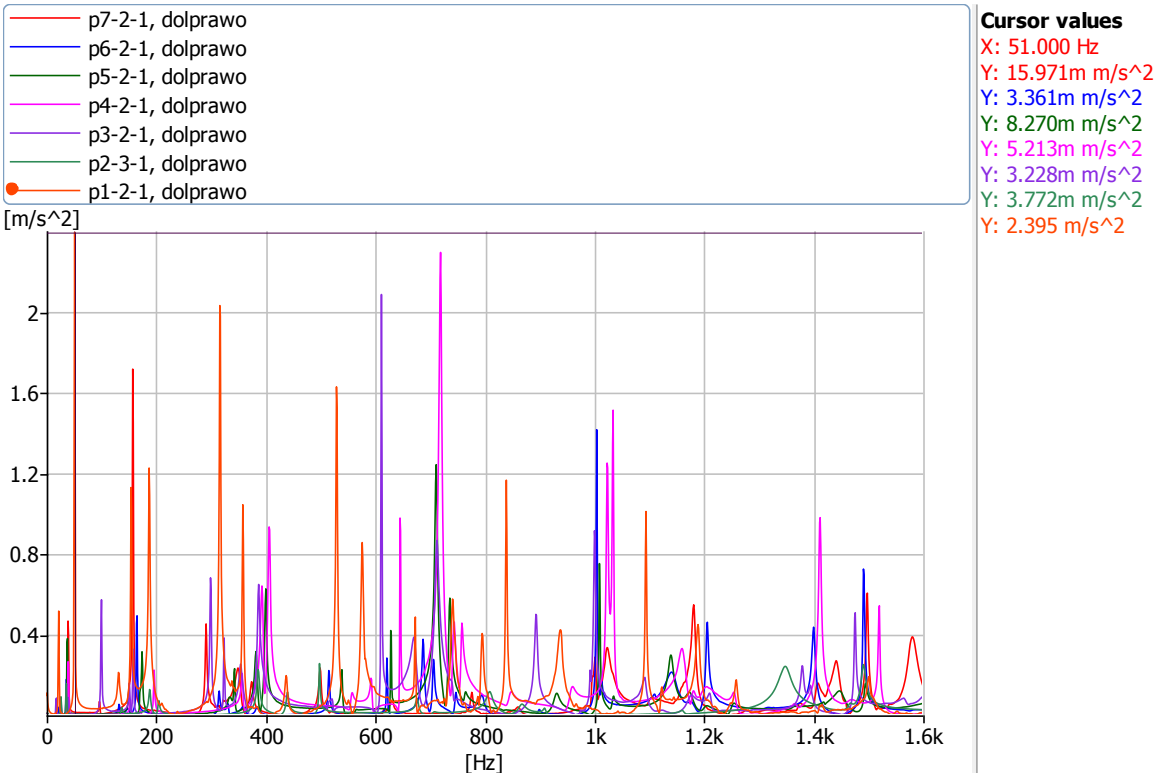


Rys. 4.7. Zbliżenie widm przyspieszeń drgań odpowiedzi na wymuszenie młotkiem modalnym dla 10 kolejnych uderzeń płyty P3



Rys. 4.8. Zbliżenie widm przyspieszeń drgań odpowiedzi na wymuszenie młotkiem modalnym dla 10 kolejnych uderzeń płyty P7

Na rysunku 4.9 przedstawiono porównanie widm uzyskanych podczas badań wszystkich płyt.



Rys. 4.9. Porównanie widm przyspieszeń drgań wszystkich badanych płyt

Przedstawione porównanie, wykonane w programie Pulse Reflex firmy B&K, daje przesłanki do stwierdzenia, że badania zostały przeprowadzone prawidłowo. Wniosek taki nasuwa się po przeprowadzeniu analizy w dziedzinie częstotliwości, gdzie na rysunku 4.4 wszystkie przebiegi mają zgodne częstotliwości dominujących amplitud. Na rysunkach 4.6-4.8 oraz

zbiorczo na rysunku 4.9 można zaobserwować występujący wpływ uszkodzenia spoiny na charakterystyki częstotliwościowe badanych płyt – pomimo identycznego sposobu montażu płyt oraz identycznej metody przeprowadzania badań. Sytuacja ta wynika z różnego stanu spoin w badanych płytach, a w konsekwencji innych odpowiedzi rezonansowych.

4.1. WERYFIKACJA NUMERYCZNA BADAŃ POMIAROWYCH

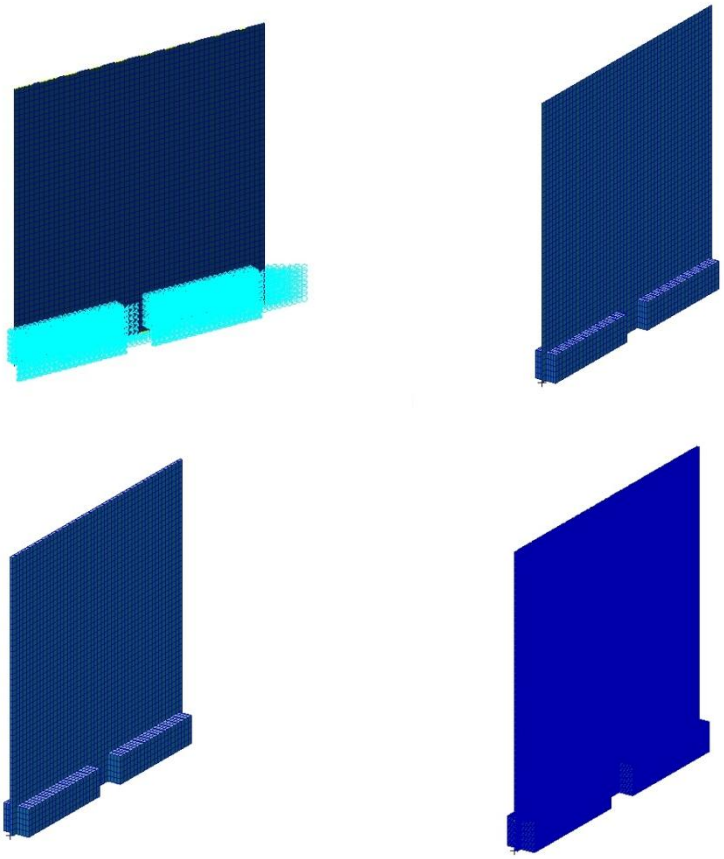
Przed przystąpieniem do szczegółowych analiz badań pomiarowych, autor postanowił zweryfikować wykonane pomiary poprzez porównanie z obliczeniami numerycznymi. Obliczenia numeryczne zostały wykonane przy pomocy pakietu programów firmy MSC Software: Patran-Nastran. Programy te bazują na metodzie elementów skończonych.

W pierwszej kolejności odwzorowano numerycznie płytę nieuszkodzoną bez spawu, przedstawioną na rysunku 4.10. Wyniki pomiarów dla tej płyty zostały przedstawione na rysunku 4.7. Podstawowy (najczęściej stosowany) model płyty bazuje na elementach dwuwymiarowych (2-D) typu shell z odpowiednio dobranymi warunkami brzegowymi modelującymi zamocowanie. Model ten może być zbyt prosty do dokładnego odwzorowania charakterystyk dynamicznych płyty. W szczególności warunki brzegowe mają duży wpływ na dokładność wyników. Wykonano drugi model, w którym szczęki imadeł zostały zamodelowane elementami trójwymiarowymi (3-D) typu solid. W kolejnym podejściu postanowiono zamodelować całość płyty elementami 3-D, aby umożliwić modelowanie spawów i uszkodzeń. Pierwszy model w pełni 3-D posiada jedną warstwę elementów po grubości płyty. Wydaje się to być wystarczające dla odwzorowania dynamiki płyty, ale jest z pewnością niewystarczające dla analiz rozkładów naprężeń po grubości płyty i do modelowania jej uszkodzeń. W związku z tym wykonano jeszcze jeden model, w którym są zdefiniowane trzy elementy po grubości płyty. Należy zwrócić uwagę na fakt, że ostatni model ma ponad 1,5 miliona stopni swobody. Bardziej dokładny model jest niemożliwy do analizy bez użycia superkomputerów połączonych w sieć. Parametry omówionych modeli zostały przedstawione w tabeli 4.1 a ich obraz został przedstawiony na rysunku 4.11. Szczegóły modelowania warunków brzegowych zostały przedstawione na rysunku 4.12. W modelach wykorzystano podstawowe elementy skończone: 2-D typu shell (Quad 4 - przenoszący zginanie i rozciąganie) o czterech węzłach na element oraz 3-D typu solid heksagonalny o ośmiu węzłach na element (Hex 8).

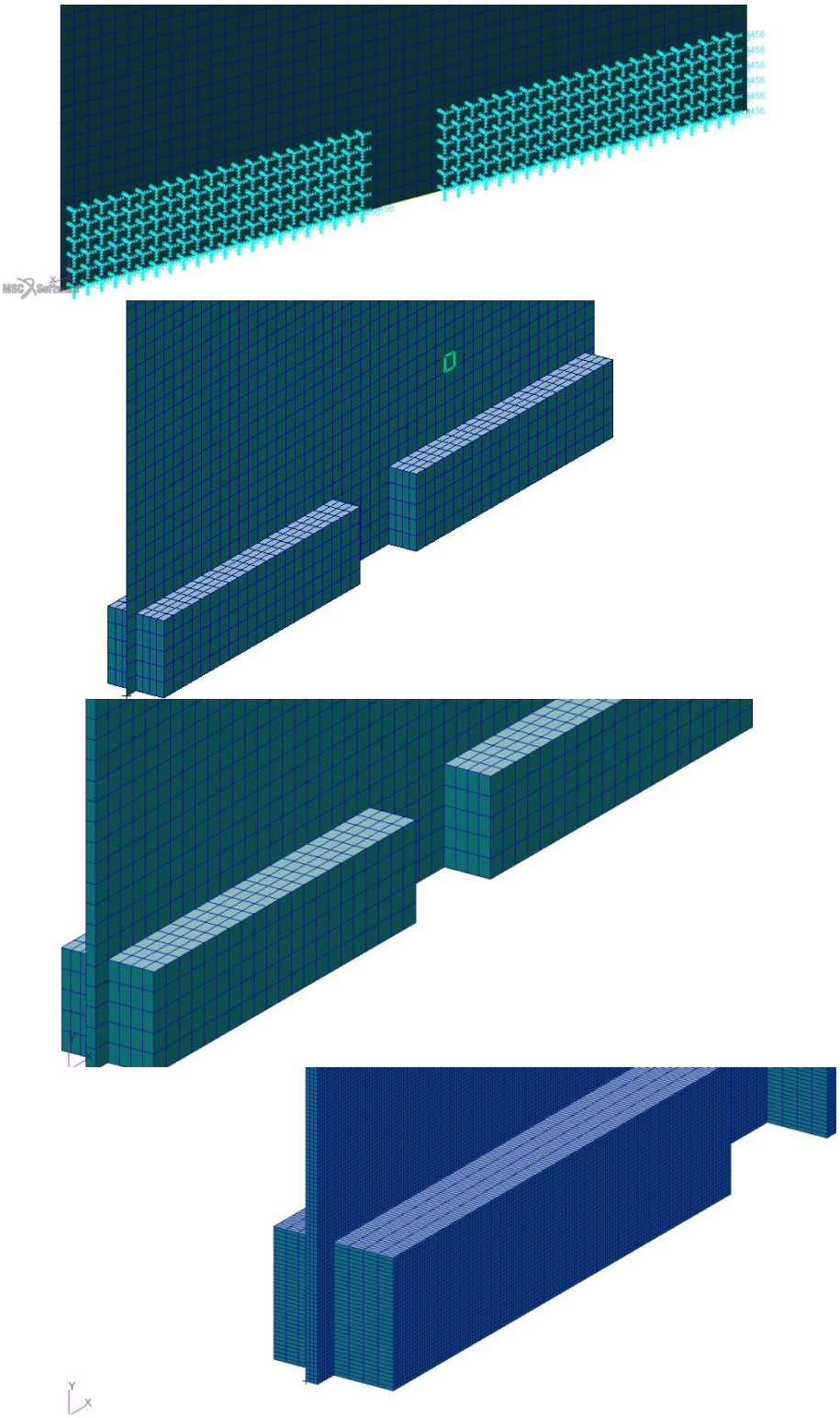
Rys. 4.10. Analizowana płyta i jej zamocowanie (warunki brzegowe)

Tabela 4.1. Parametry modeli obliczeniowych

	Typ modelu			
	Model 2D	Model 2-3D	Model 3-D	Model 3-D det.
Liczba elementów typu shell	2500	2500	-	-
Liczba elementów typu solid	-	2100	4180	407586
Liczba stopni swobody modelu	14 022	20 358	21 942	1 572 795

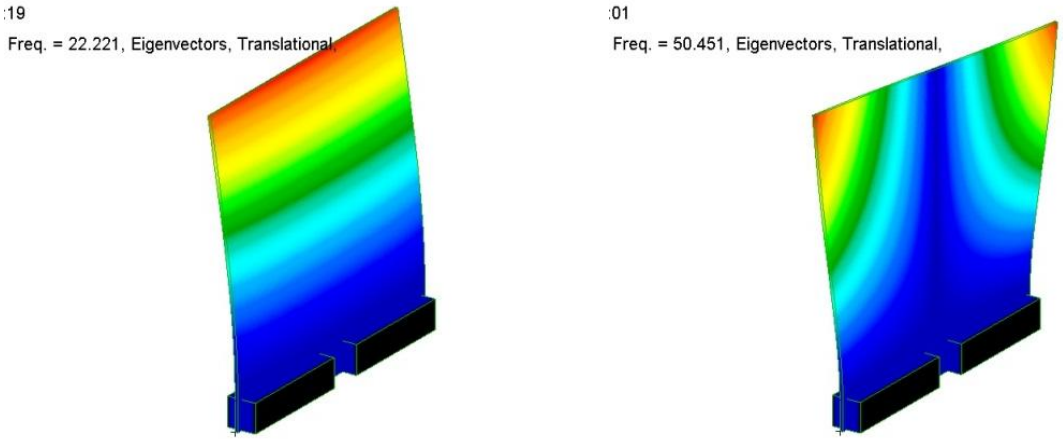


Rys. 4.11. Modele obliczeniowe badanej płyty, kolejno: model 2D, 2-3D, 3-D oraz 3-D det.

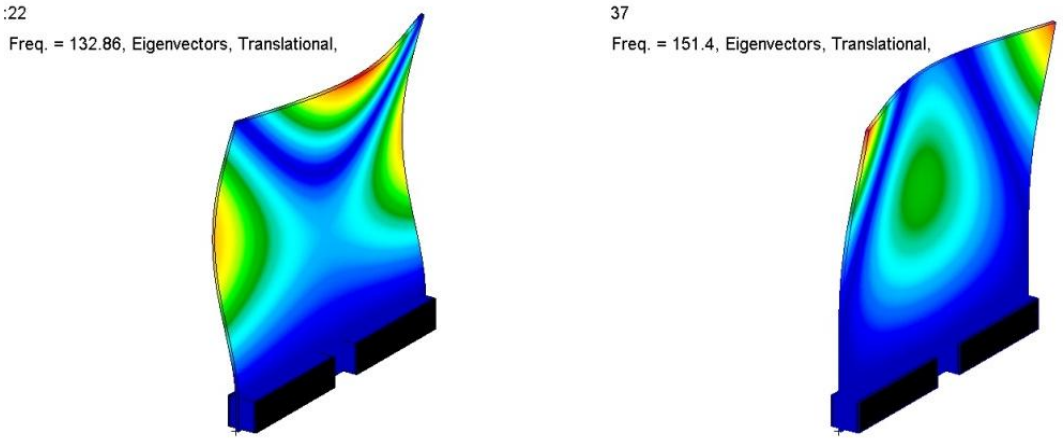


Rys. 4.12. Warunki brzegowe dla poszczególnych modeli płyty: 2D, 2-3D, 3-D oraz 3-D det.

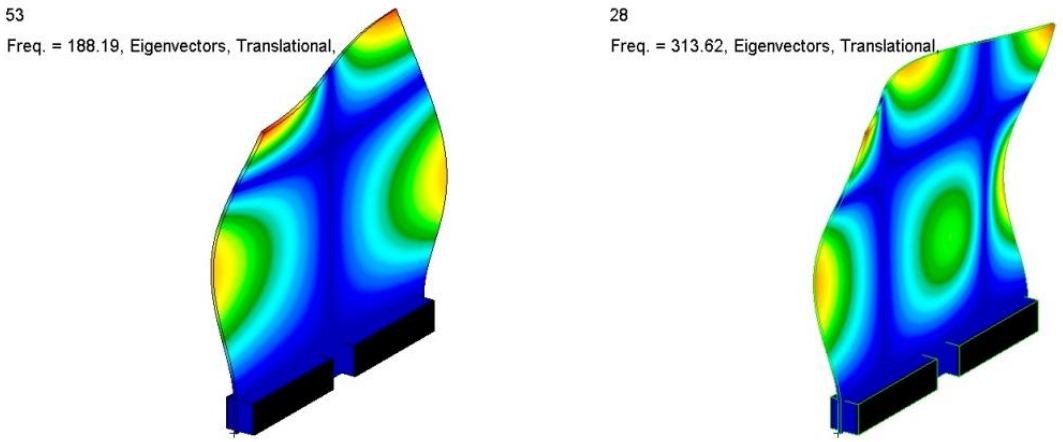
Obrazy postaci drgań własnych dla poszczególnych modeli są bardzo zbliżone, w związku z tym na rysunkach 4.13 - 4.17 przedstawiono pierwszych dziesięć postaci jedynie dla najdokładniejszego modelu 3-D det.



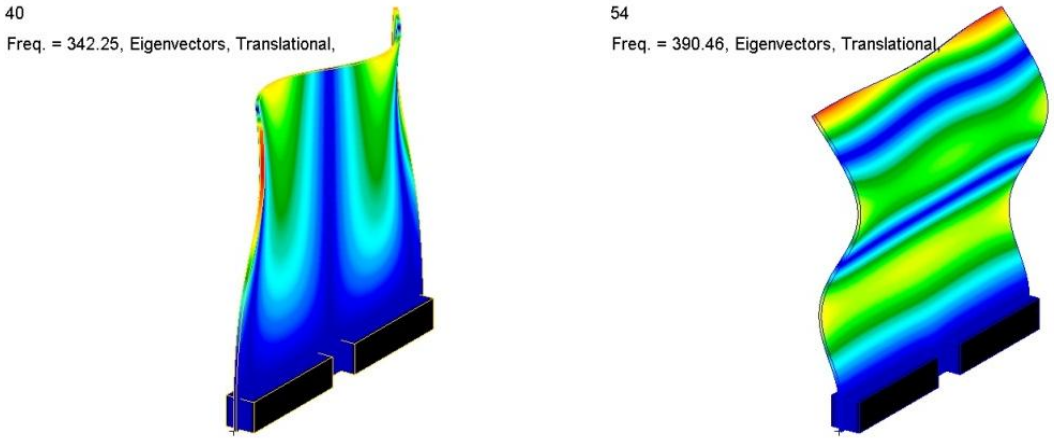
Rys. 4.13. Pierwsza i druga postać drgań własnych analizowanej płyty



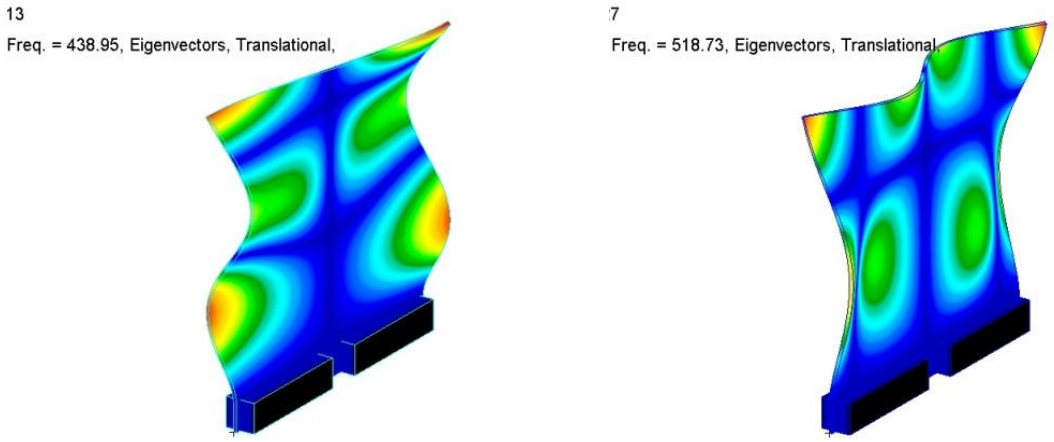
Rys. 4.14. Trzecia i czwarta postać drgań własnych analizowanej płyty



Rys. 4.15. Piąta i szósta postać drgań własnych analizowanej płyty



Rys. 4.16. Siódma i ósma postać drgań własnych analizowanej płyty



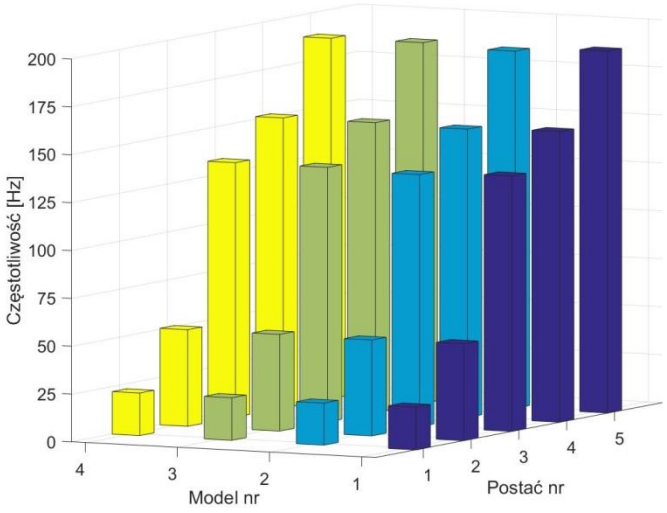
Rys. 4.17. Dziewiąta i dziesiąta postać drgań własnych analizowanej płyty

Można zaobserwować, że postacie drgań własnych, począwszy od szóstej są trudno-wymuszalne, o dużo wyższej częstotliwości (przekraczającej 300 Hz). Trudności z wymuszeniem wyższych postaci wynika z większej liczby linii węzłowych drgań (np. dla szóstej postaci można zaobserwować dwie pionowe linie węzłów drgań). W związku z tym liczba maksimów lokalnych amplitud drgań jest większa (np. dla szóstej postaci występuje sześć maksimów). W związku z tym, do wymuszenia tak złożonych postaci drgań, niezbędne byłoby przyłożenie co najmniej kilku sił i momentów pozostających w odpowiednich zależnościach fazowych. W dalszych analizach rozważane będą tylko pierwsze pięć postaci. Wniosek ten znalazł potwierdzenie w badaniach pomiarowych, w których określono - zaobserwowano (w wyniku analizy FFT) pierwszych pięć postaci drgań własnych. Wyniki obliczeń częstotliwości drgań własnych poszczególnych modeli wraz z porównaniem z badaniami pomiarowymi przedstawiono w tabeli 4.2. Wielkości błędów obliczeniowych (w relacji do badań pomiarowych) przedstawiono na rysunku 4.18. Częstotliwość w badaniach pomiarowych wyznaczono z rozdzielczością 0,125 Hz, co daje względny błąd pomiarowy na poziomie do 0,6% dla pierwszej częstotliwości drgań własnych. Na rysunku 4.18 przedstawiono wykreślnie wyznaczone numerycznie postacie drgań własnych dla wszystkich modeli. Natomiast na rysunku 4.19 przedstawiono poziom błędów względnych (względem badań pomiarowych) dla wszystkich analizowanych modeli. Należy

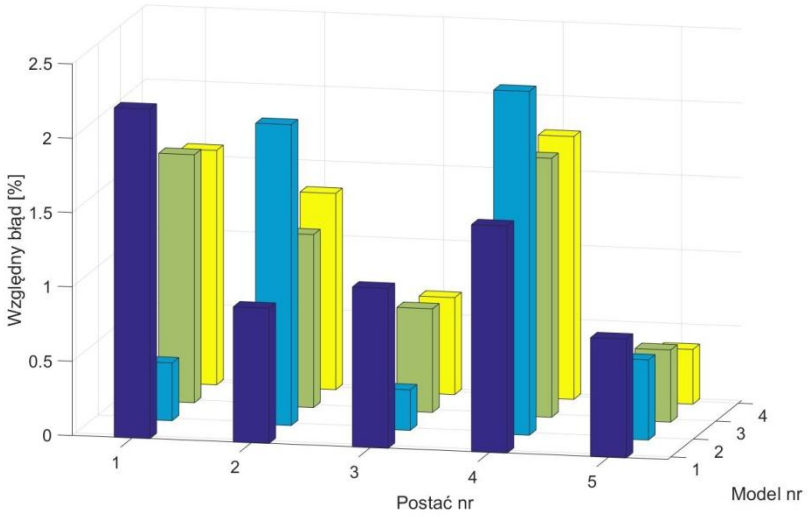
podkreślić, że wszystkie błędy obliczeniowe poniżej błędów pomiarowych powinny być traktowane jako zerowe. Tak więc największy błąd względny obliczeń występujący dla najprostszego modelu 2-D i dla pierwszej postaci drgań własnych tylko nieznacznie przekracza 1,6%.

Tabela 4.2. Parametry modeli obliczeniowych

	Częstotliwość drgań własnych dla modelu: [Hz]				Badania pomiarowe [Hz]
	Model 2D	Model 2-3D	Model 3-D	Model 3-D det.	
Postać nr 1	22,36	21,96	22,24	22,22	**21,875**
Postać nr 2	50,66	50,09	50,53	50,45	**51,125**
Postać nr 3	133,42	131,64	132,92	132,86	**132,00**
Postać nr 4	151,77	150,56	151,44	151,40	**154,125**
Postać nr 5	189,00	186,49	188,41	188,19	**187,500**



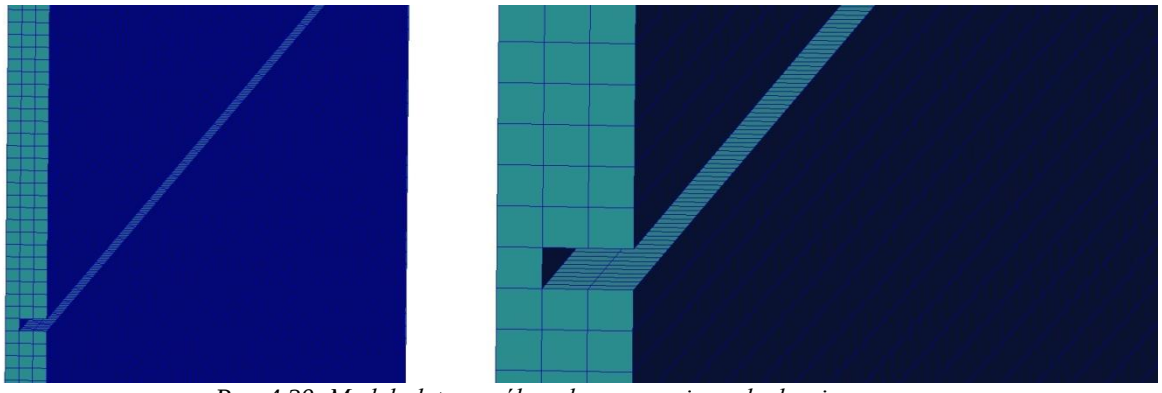
Rys. 4.18. Częstotliwości drgań własnych analizowanej płyty w zależności od modelu matematycznego



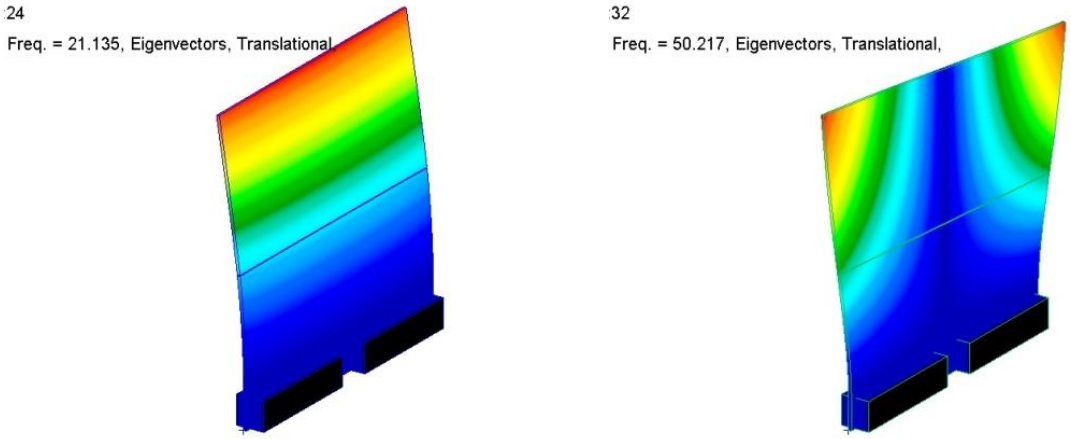
Rys. 4.19. Względne błędy obliczeń częstotliwości drgań własnych analizowanej płyty

Wszystkie modele numeryczne, włącznie z najprostszym modelem 2D, dobrze odwzorowują charakterystyki dynamiczne rzeczywistej płyty, pomimo że każdy z nich ma swoje wady. Najprostszy model 2D nie uwzględnia sztywności zamocowania (szczęk imadła). Stąd występujący względnie duży błąd dla pierwszej, giętnej postaci drgań własnych. W modelu 2-3D problemem są znane kłopoty numeryczne przy połączeniu elementów płytowych z bryłowymi; elementy płytowe charakteryzują się sześcioma stopniami na węzeł natomiast w elementach bryłowych nie uwzględnia się obrotowych stopni swobody (trzy stopnie swobody na węzeł). Wynika stąd względnie duży błąd dla postaci drgań (drugiej i czwartej) związanych ze skręcaniem płyty. Wadą modelu w pełni 3D jest słabe odwzorowanie rozkładów deformacji po grubości płyty z uwagi na liniową funkcję kształtu oraz jeden element na grubość płyty. Dokładny model 3D det powinien być pozbawiony wszystkich powyższych wad, jednakże jest on wielokrotnie większy od pozostałych modeli. Znacznie zwiększony koszt obliczeń numerycznych nie pokrywa zwiększonej dokładności obliczeń. Obliczenia numeryczne dodatkowo zweryfikowały i udowodniły poprawność przeprowadzonych badań pomiarowych.

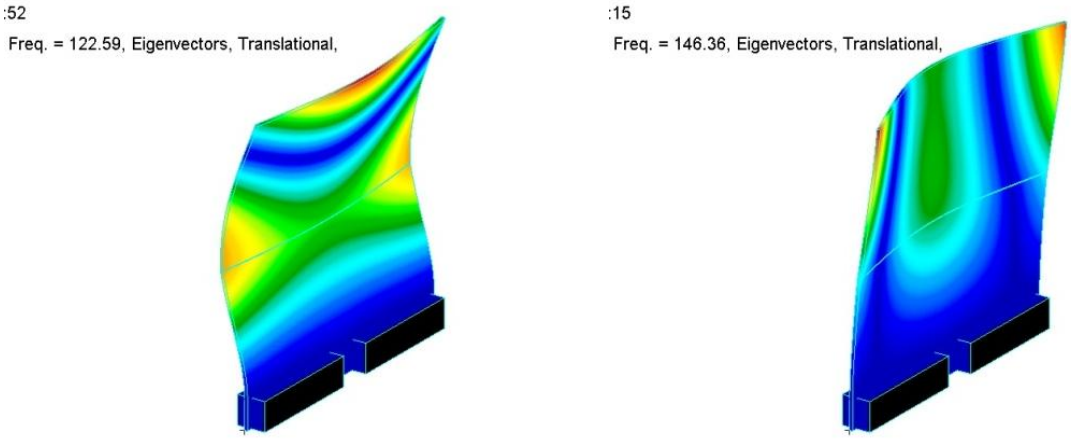
Celem niniejszej dysertacji jest badanie możliwości monitoringu konstrukcji (SHM) z wykorzystaniem metod drganiowych, czyli możliwości wykrywania ewentualnych uszkodzeń eksploatacyjnych. Częstotliwości drgań własnych płyty z mocno uszkodzonym spawem mają zdecydowanie inne wartości od płyty bez uszkodzenia. Autor postanowił zbadać czy systemy monitoringu konstrukcji spawanych mogą się opierać na bazach danych opartych o obliczenia numeryczne. W teorii drgań liniowych tłumienie konstrukcji ma minimalny wpływ na częstotliwości i postacie drgań własnych. W związku z tym w modelu matematycznym możemy uwzględniać jedynie zmiany w macierzy mas oraz sztywności. Rozkład mas płyty spawanej (niezależnie od jakości spawu) jest praktycznie niezmienny w stosunku do jednolitej płyty. W związku z tym postanowiono zmienić zasadniczo lokalną (w miejscu spawu) sztywność płyty, poprzez usunięcie dwóch z istniejących trzech warstw elementów bryłowych w modelu 3D det. Zmiana ta jest drastyczna, ponieważ sztywność giętna płyty (związana ze wskaźnikiem wytrzymałości na zginanie) w tym rejonie maleje dziewięciokrotnie. Opisaną zmianę modelu MES przedstawiono na rysunku 4.20. Na rysunkach 4.21 – 4.23 przedstawiono pierwszych pięć postaci drgań własnych płyty uszkodzonej.



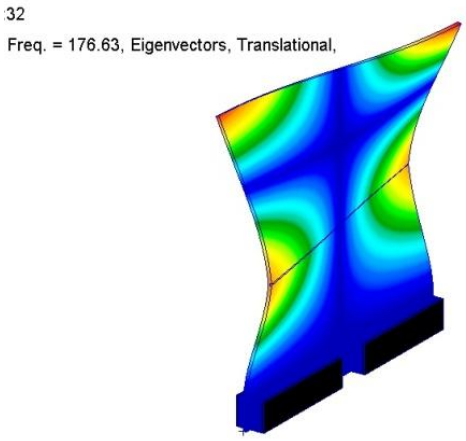
Rys. 4.20. Model płyty z próbą odwzorowania uszkodzenia spawu



Rys. 4.21. Pierwsza i druga postać drgań własnych płyty uszkodzonej



Rys. 4.22. Trzecia i czwarta postać drgań własnych płyty uszkodzonej

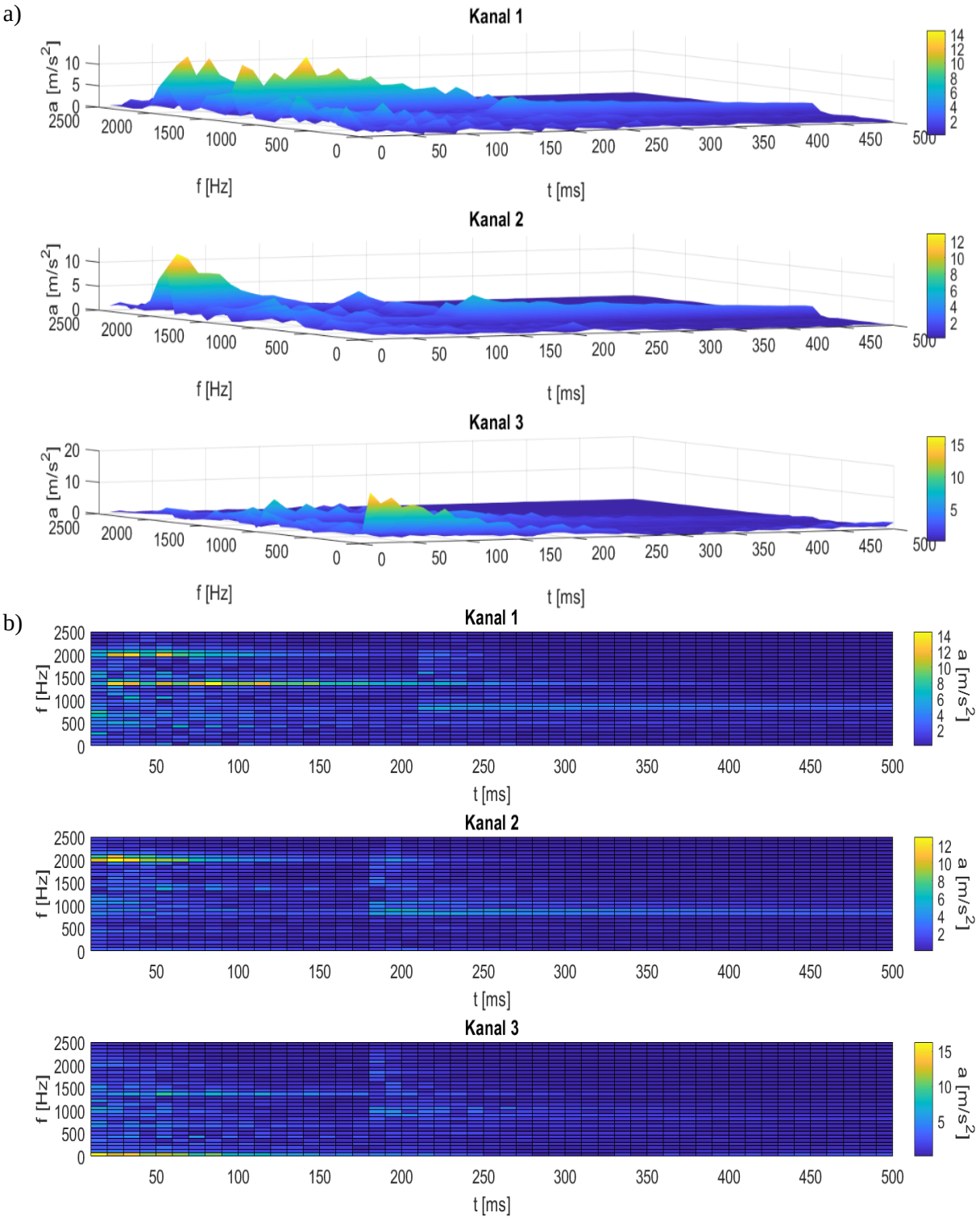


Rys. 4.23. Piąta postać drgań własnych płyty uszkodzonej

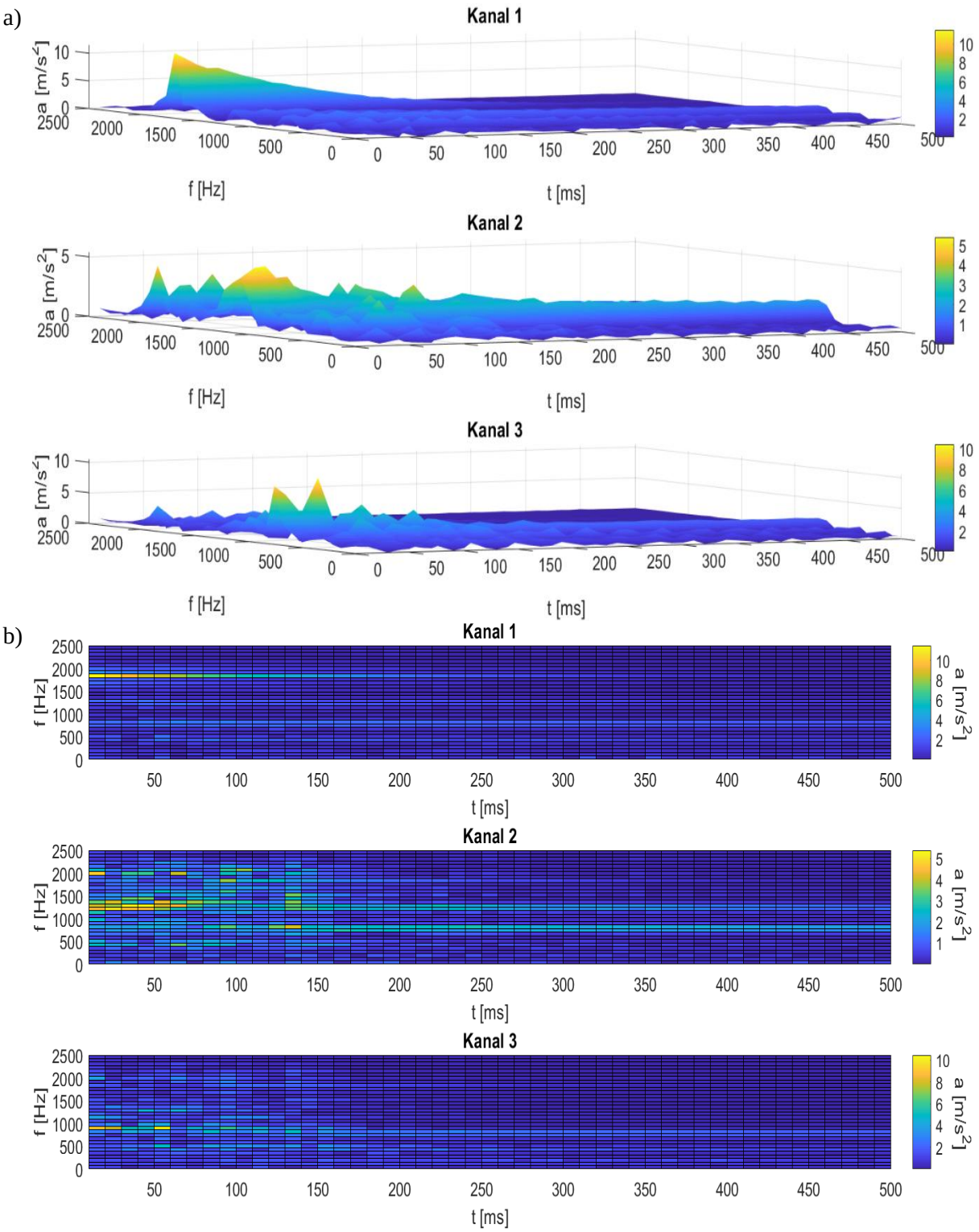
Pomimo tak drastycznej zmiany lokalnej sztywności płyty, jej postacie drgań własnych różnią się nieznacznie. Również częstotliwości drgań własnych nie zmieniły się drastycznie; wszystkie one spadły o odpowiednio (począwszy od pierwszej postaci) 4,9%, 0,5%, 7,7%, 3,3% oraz 6.1%. Nie odwzorowuje to w żaden sposób badań pomiarowych. Przede wszystkim badania pomiarowe nie stwierdziły istnienia pierwszej giętnej postaci drgań własnych (około 22 Hz) natomiast częstotliwość drugiej postaci drgań własnych spadła o 23%. Świadczy to o występowaniu istotnych nieliniowości w charakterystykach uszkodzonych spawów. W związku z tym modelowanie numeryczne uszkodzonych, spawanych konstrukcji jest bardzo utrudnione i staje się wręcz niemożliwe przy zachowaniu wymogu wysokiej dokładności, jaka jest niezbędna w automatycznych systemach monitoringu konstrukcji. Systemy takie powinny się opierać na szerokich bazach danych uzyskanych na podstawie badań pomiarowych. Ważnym wnioskiem jest istnienie nieliniowości w konstrukcjach spawanych z uszkodzeniami. Analiza badań pomiarowych powinna skupiać się na poszukiwaniu nieliniowości w charakterystykach dynamicznych konstrukcji. Potwierdza to wstępne założenia dysertacji, w których postanowiono badać zmiany w charakterystykach częstotliwościowych w funkcji czasu, zmiany tłumienia konstrukcji, czy też zmiany rozkładu średniej wielkości amplitudy metodą okien czasowych. Wszystkie wymienione analizy zostały przeprowadzone w kolejnych rozdziałach dysertacji.

4.2. ANALIZA CHARAKTERYSTYK CZASOWO – CZĘSTOTLIWOŚCIOWYCH 2D I 3D

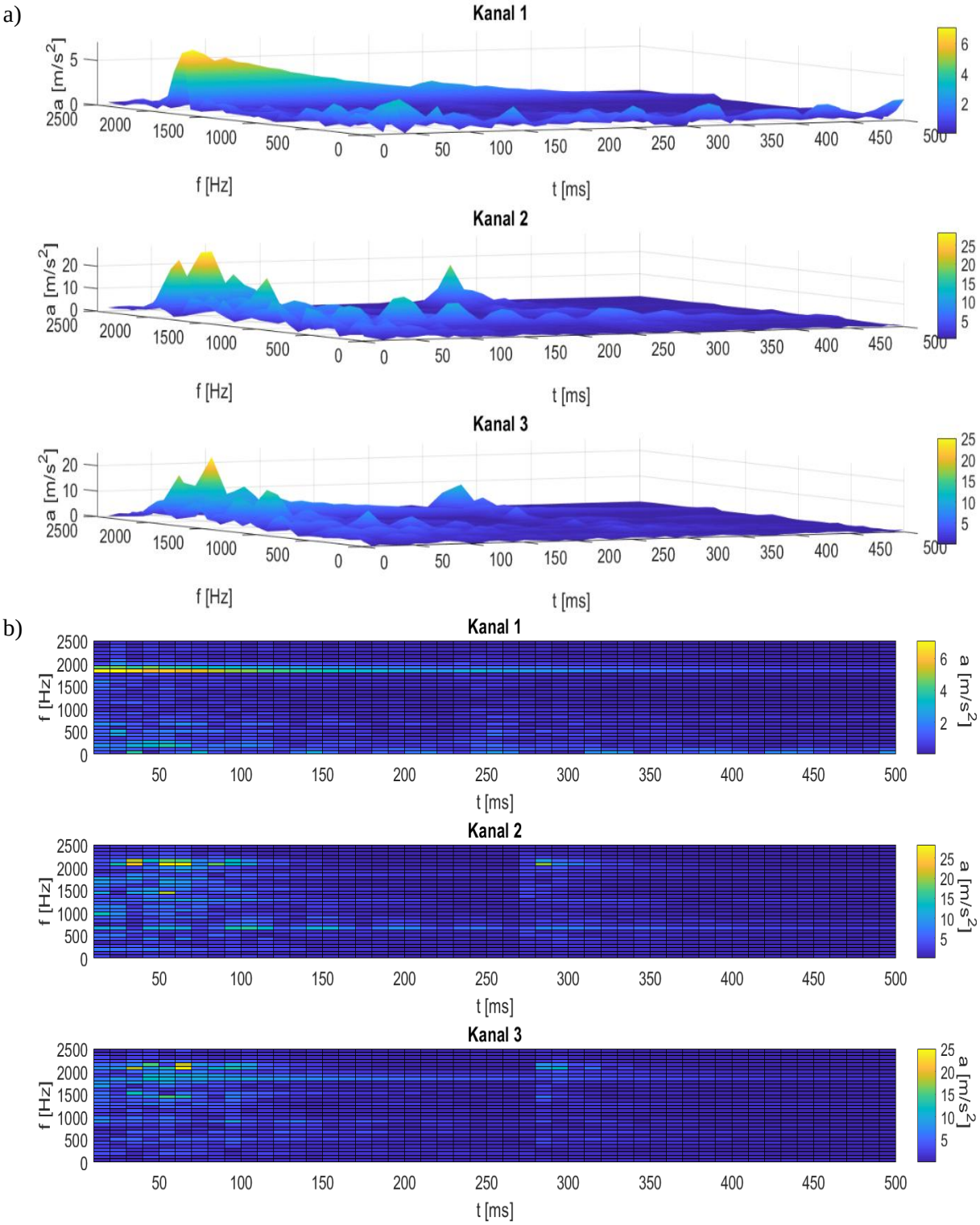
Metoda analiza charakterystyk czasowo-częstotliwościowych 2D i 3D opisano w rozdziale 2. W wyniku analiz uzyskanych przebiegów stwierdzono, że czas zaniku istotnych składowych w przypadku badanych płyt, charakteryzujących się mniejszą grubością, niż poprzednio jest znacznie dłuższy. Świadczy to o niższym tłumieniu tego typu płyt. Zestaw charakterystyk czasowo-częstotliwościowych dla płyty (P1) przedstawiono na rysunku 4.24, dla płyty P3 na rysunku 4.25 oraz dla płyty (P6) na rysunku 4.26.



Rys. 4.24. a) Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 3D dla płyty bez połączenia spawanego - P1, b) charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 2D dla płyty bez połączenia spawanego – P1



Rys. 4.25. a) Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 3D dla płyty spawanej z nielicznymi pęcherzami kulistymi w połączeniu spawanym, połączenie uznaje się za akceptowalne – *P3, b) charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 2D dla płyty spawanej z nielicznymi pęcherzami kulistymi w połączeniu spawanym, połączenie uznaje się za akceptowalne – P3*

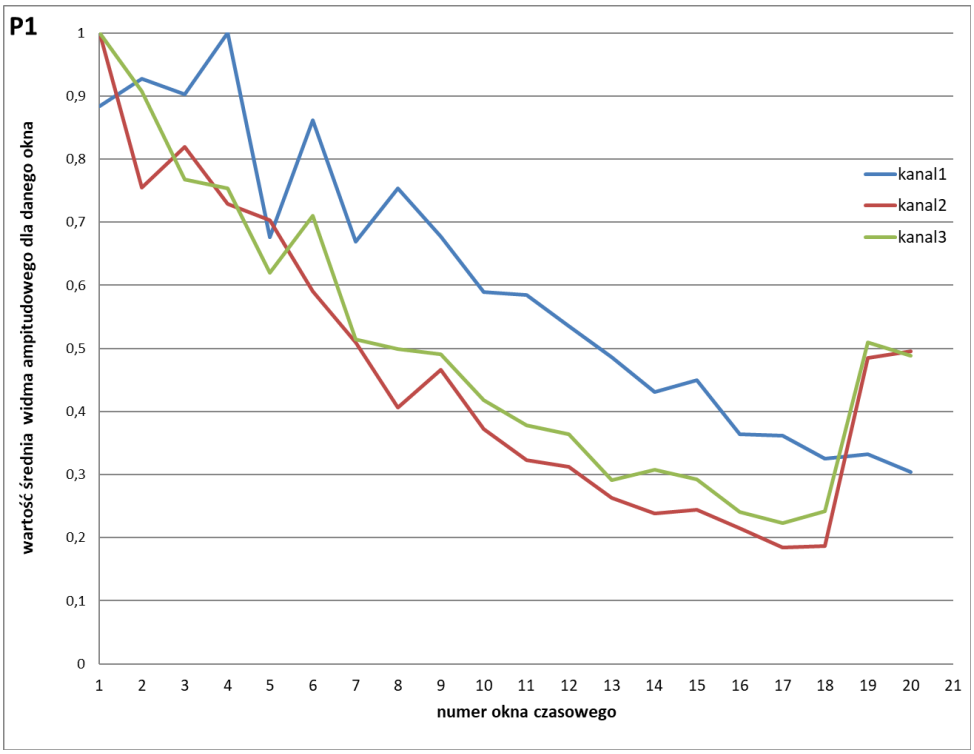


Rys. 4.26. a) Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 3D dla płyty charakteryzującej się brakiem przetopu, pęcherzem podłużnym, przyklejeniem brzegowym w spoinie (P6), b) charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 2D płyty charakteryzującej się brakiem przetopu, pęcherzem podłużnym, przyklejeniem brzegowym w spoinie (P6)

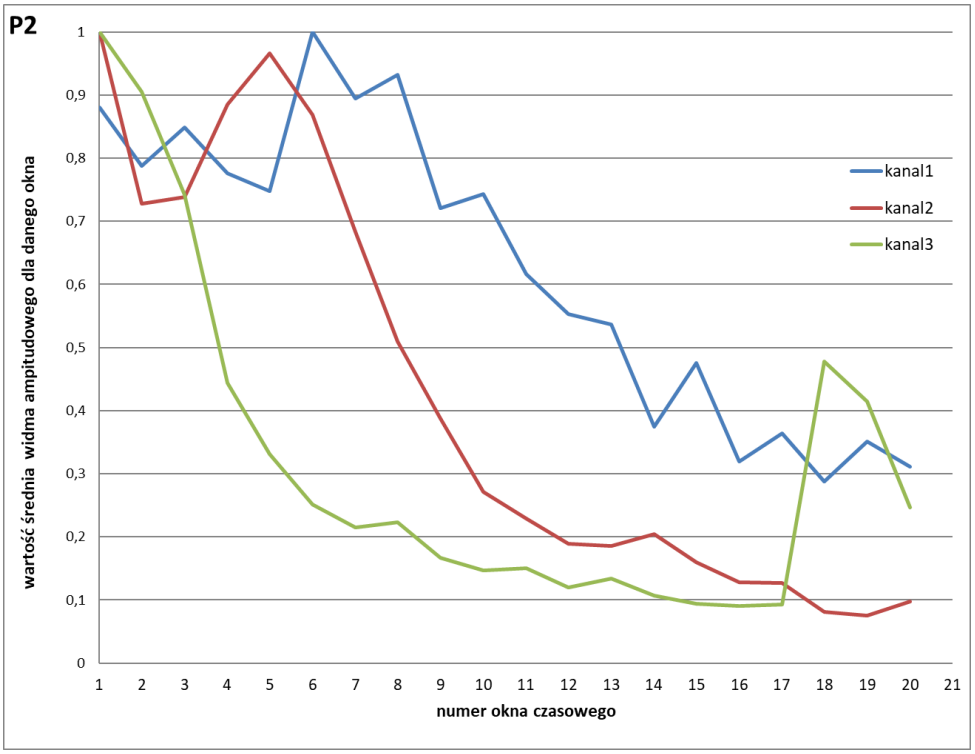
Przedstawienie przebiegów jedynie dla trzech płyt wynika z ograniczeń objętościowych niniejszej dysertacji. Pozostałe przebiegi zebrano w załączniku 1. Analiza uzyskanych charakterystyk pozwala podobnie jak w pierwszym etapie badań stwierdzić, że wartości amplitud i czas zaniku w przypadku płyty bez połączenia spawanego są znacząco większe w odniesieniu do pozostałych płyt. Należy tutaj jednak zauważyć, że interpretacja wyników przedstawionych w takiej formie w przypadku płyt charakteryzujących się mniejszą grubością nie jest już tak prosta jak w przypadku płyt poddanych eksperymentom podczas badań płyt o znacznej grubości. Główną przyczyną tego faktu jest występowanie większej liczby składowych niż w przypadku uprzednio prezentowanych widm. Po przeprowadzeniu badań płyt będących elementami rzeczywistych konstrukcji okrętowych stwierdzić należy, że omawiana w tym rozdziale metoda oceny stanu spoin wymaga dostosowania jej do konkretnej konstrukcji (nie jest to metoda uniwersalna) oraz wymaga oceny eksperta, w związku z tym mniej się nadaje do systemów automatycznego monitoringu typu SHM. Przedstawione w dalszej części dysertacji, metody rozkładu średniej z okien czasowych i rozkładu logarytmicznego dekrementu tłumienia pozwalają na szybciej i trafniej określić stan połączeń spawanych.

4.3. METODA ROZKŁADU ŚREDNIEJ Z OKIEN CZASOWYCH

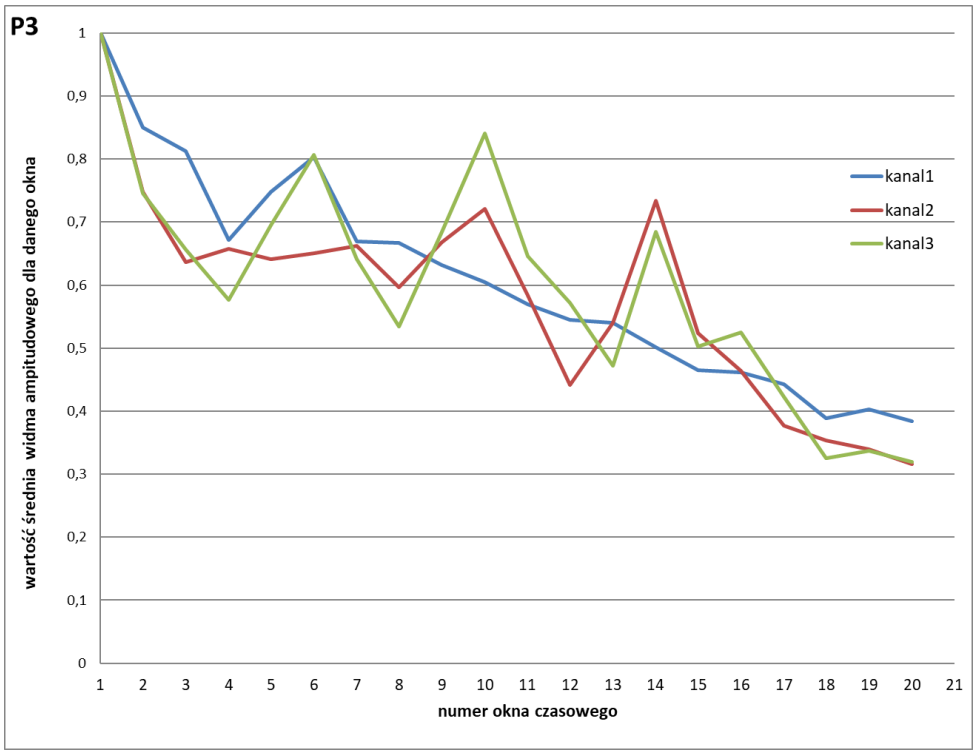
Stosując opisaną w rozdziale drugim metodę okien czasowych ograniczono się do prezentacji rozkładów wartości średnich widm dla kolejnych okien. Metodyka przeprowadzania analiz jest identyczna jak przedstawiona w rozdziale 3.4.1. Na rysunkach 4.27-4.33 przedstawiono wartości średnie uzyskane z kolejnych okien czasowych. Podobnie jak na przebiegach prezentujących wyniki w pierwszym etapie badań tak i tym razem uzyskane wyniki odniesiono do wartości maksymalnej, przyjmując ją jako 100% (na wykresach wartość 1). Na rysunku 4.27 przedstawiono wartości uzyskane podczas badania płyty bez połączenia spawanego, w związku z czym należy je uznać za wyniki referencyjne, do których zostały odniesione wyniki uzyskane z pozostałych sześciu płyt. W prezentowanych wynikach odnoszących się do płyty P1 zauważyć można, że w żadnym oknie wartości nie są niższe niż 0,19 i sytuacja ta dotyczy wszystkich kanałów. Natomiast na rysunkach 4.28 – 4.33 przedstawiono wykresy uzyskane dla pozostałych badanych płyt.



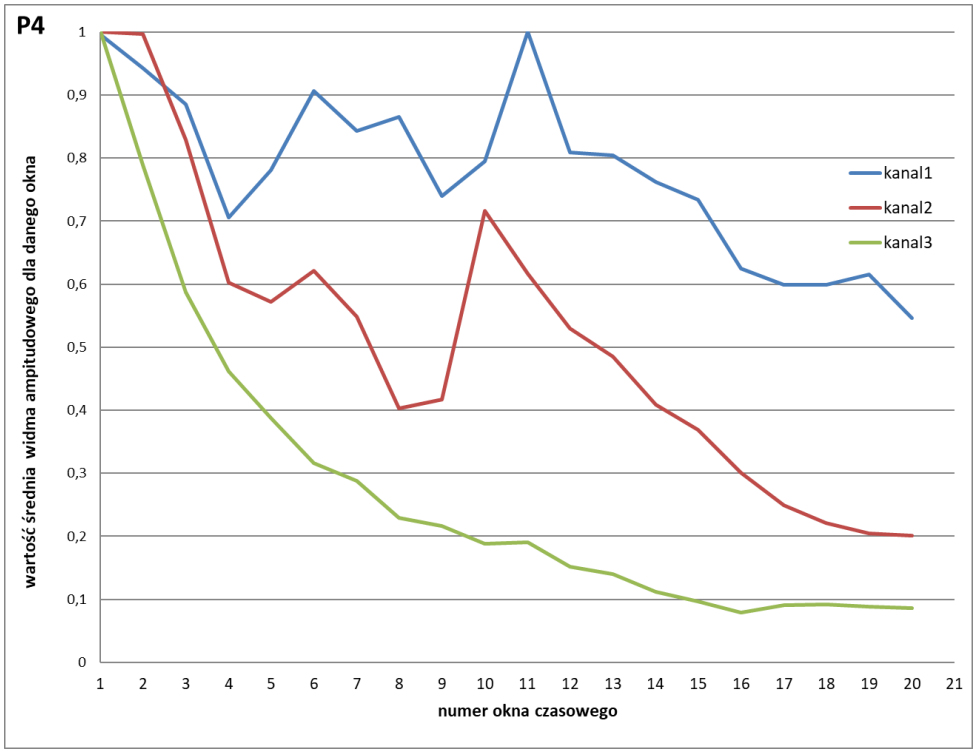
Rys. 4.27. Rozkład wartości średnich dla okien w funkcji numeru okna -płyta P1, uzyskane z trzech akcelerometrów



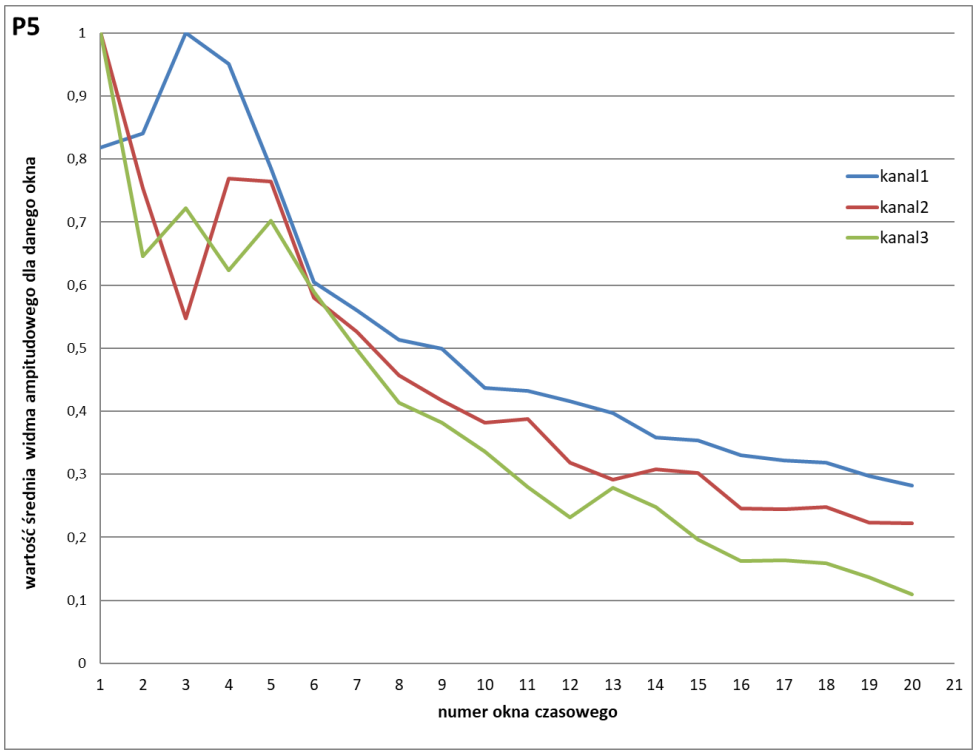
Rys. 4.28. Rozkład wartości średnich dla okien w funkcji numeru okna - płyta P2, uzyskane z trzech akcelerometrów



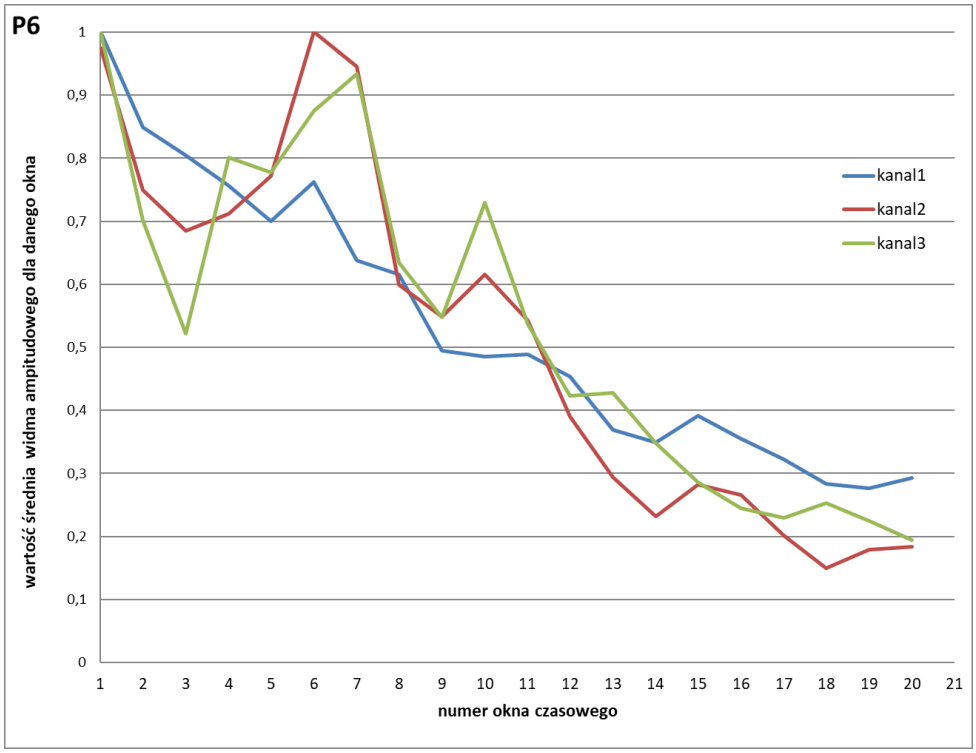
Rys. 4.29. Rozkład wartości średnich dla okien w funkcji numeru okna - płyta P3, uzyskane z trzech akcelerometrów



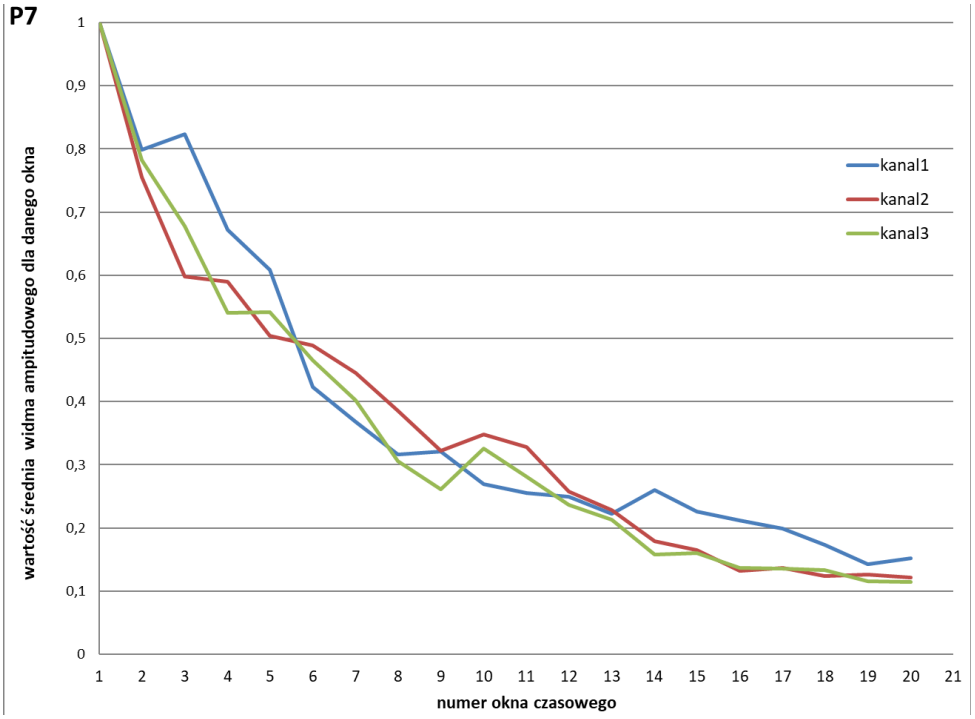
Rys. 4.30. Rozkład wartości średnich dla okien w funkcji numeru okna - płyta P4, uzyskane z trzech akcelerometrów



Rys. 4.31. Rozkład wartości średnich dla okien w funkcji numeru okna - płyta P5, uzyskane z trzech akcelerometrów



Rys. 4.32. Rozkład wartości średnich dla okien w funkcji numeru okna - płyta P6, uzyskane z trzech akcelerometrów

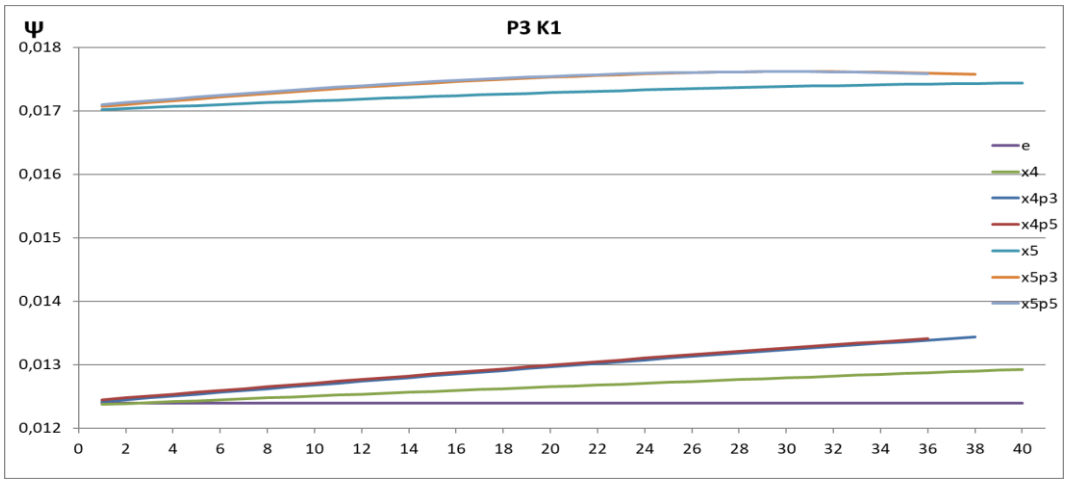


Rys. 4.33. Rozkład wartości średnich dla okien w funkcji numeru okna - płyta P7, uzyskane z trzech akcelerometrów

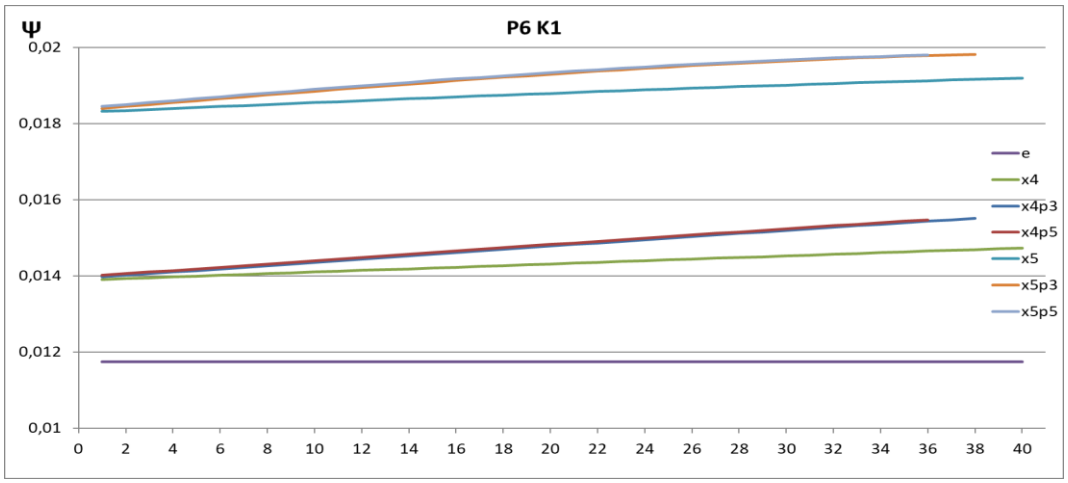
Analiza wykresów przedstawionych na rysunkach 4.27 do 4.33 pozwala stwierdzić, że płyty P1 i P3 charakteryzują się największymi wartościami minimów w analizowanym obszarze 21 okien. Jak wspomniano w przypadku płyty bez połączenia spawanego wartości właściwe dla wszystkich kanałów nie osiągają wartości poniżej 0,19. Efekt ten jest jeszcze bardziej widoczny w przypadku badania płyty z dobrym spawem, czyli płyty P3, gdzie opisane parametry nie osiągają wartości niższych od 0,3. W przypadku pozostałych płyt, z wadliwymi spawami, zawsze wartość przynajmniej jednego kanału osiąga wartości niższe od opisanych powyżej. Przedstawione zależności pokrywają się z opisanymi już w pracy, w związku z czym należy oczekiwać, że zaistnieje możliwość zaimplementowania tego sposobu analizy połączeń spawanych w przemyśle. Warunkiem tego jest posiadanie wartości referencyjnych dla serii połączeń spawanych wykonanych dla materiału o znanej grubości i znanym stanie spoiny, właściwie za istotne wskazać należy konieczność znajomości wartości tożsamych z dobrym połączeniem spawanym. Na chwilę obecną autor przy zastosowaniu metody okien czasowych nie przewiduje możliwości określenia rodzaju powstałego w spoinie uszkodzenia a jedynie wskazanie czy spoina może być dopuszczona do dalszej eksploatacji czy też nie - czy występuje zagrożenie katastrofalnego uszkodzenia monitorowanego obiektu. Omawianą metodę należy zakwalifikować jako metodę jakościową. W prezentowanych wynikach badań nie zaobserwowano innych zależności występujących w przypadku płyt charakteryzujących się znaczącymi uszkodzeniami w spoinach (badania pierwszego etapu). Przyczyną tego faktu są zapewne wysokie kwalifikacje zawodowych spawaczy, którzy wykonują zasadniczo dobre spoiny, a powstające w nich przypadkowe uszkodzenia nie są tak intensywne jak te wykonane celowo i których badania przedstawiono w pracy. Podczas dalszych badań przewiduje się prowadzenie pomiarów na nowobudowanych konstrukcjach bez zamontowanego wyposażenia, co umożliwi wyeliminowanie wpływu tłumienia innego niż tłumienie materiałowe. W przypadku projektowania systemu SHM dla konkretnej konstrukcji należy rozbudować bazę danych wartości referencyjnych (spoin dobrych i uszkodzonych). Znacząco to ułatwi identyfikację powstających w trakcie eksploatacji uszkodzeń.

4.4. ROZKŁAD LOGARYTMICZNEGO DEKREMENTU TŁUMIENIA W OCENIE POŁĄCZEŃ SPAWANYCH – WERYFIKACJA

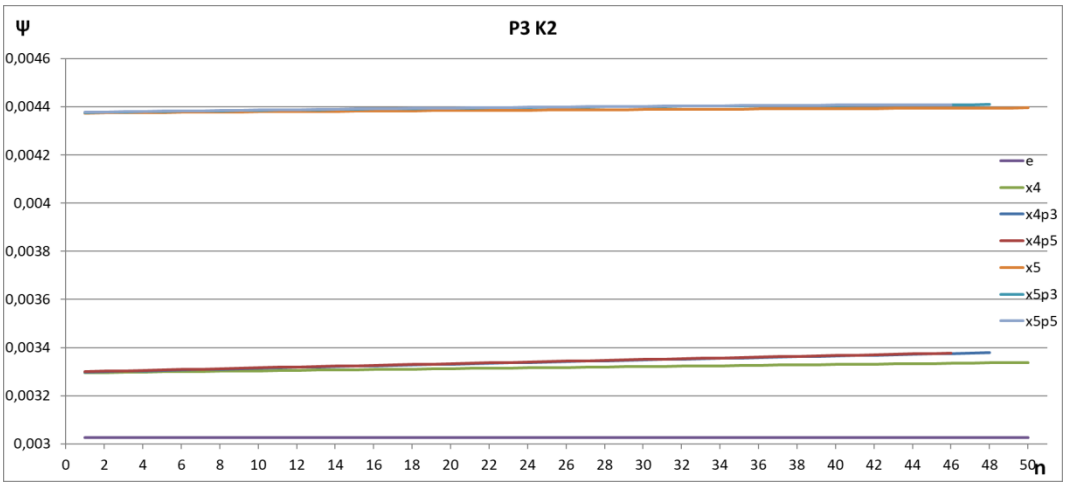
Podobnie jak w przypadku dwóch wcześniejszych metod tak jak i w przypadku stosowania rozkładu logarytmicznego dekrementu tłumienia w ocenie połączeń spawanych podjęto próbę oceny możliwości implementacji tej metody do płyt z obiektów rzeczywistych. Procedura obróbki zarejestrowanych przebiegów czasowych przyspieszeń drgań była taka sama jak opisana w rozdziale 2. Wybrane wyniki porównujące rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty z dobrym spawem (P3) oraz płyty z uszkodzeniami (P6) przedstawiono na rysunkach 4.34 - 4.39. Graficzne przedstawienie wartości rozkładów logarytmicznych dekrementów tłumienia dla pozostałych płyt zebrano w załączniku nr 2. Wartości rozkładu logarytmicznego dekrementu tłumienia przybliżono następującymi metodami: e – aproksymowany funkcją ekspotencjalną, x4 – aproksymowany wielomianem czwartego stopnia, x5 – aproksymowany wielomianem piątego stopnia, x4p3 – aproksymowany wielomianem czwartego stopnia dla amplitud oddalonych od siebie o 3, x4p5 – aproksymowany wielomianem czwartego stopnia dla amplitud oddalonych od siebie o 5, x5p3 – aproksymowany wielomianem piątego stopnia dla amplitud oddalonych od siebie o 3, x5p5 – aproksymowany wielomianem piątego stopnia dla amplitud oddalonych od siebie o 5. Oddalenie amplitud oznacza ich odległość od siebie w rozpatrując je w dziedzinie czasu tzn. oddalone o 3 to np. amplituda 3 i 5, a oddalone o 5 to np. amplituda 3 i 7.



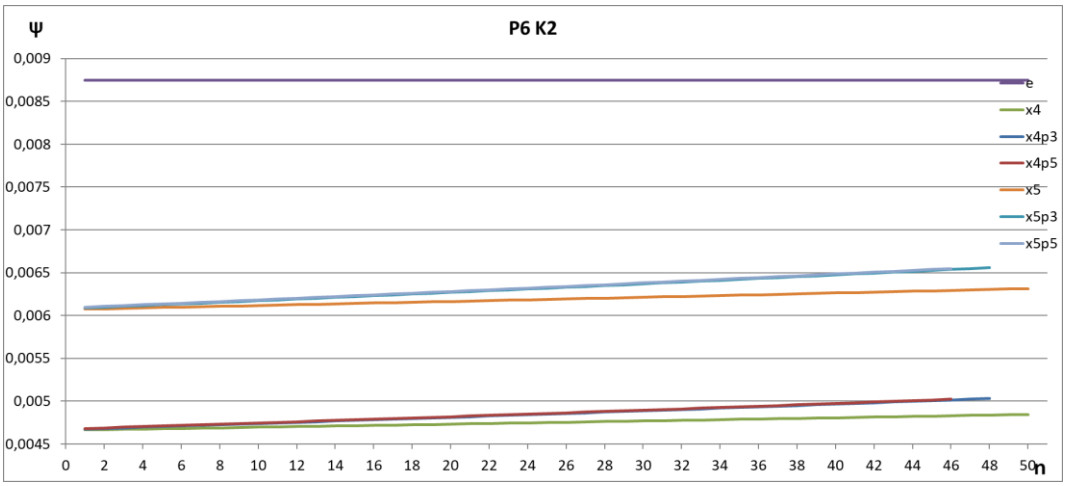
Rys. 4.34. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty z dobrym spawem (P3) – kanał 1



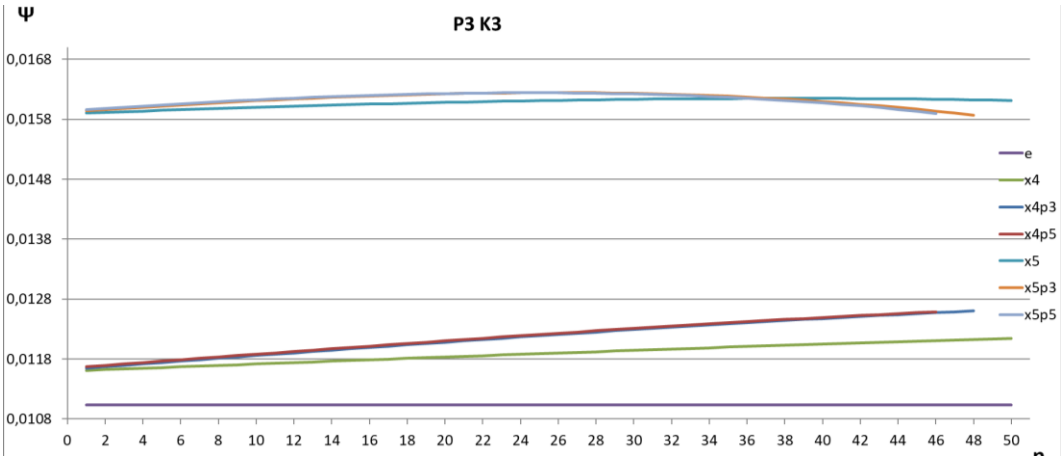
Rys. 4.35. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty z uszkodzonym spawem (P6) – kanał 1



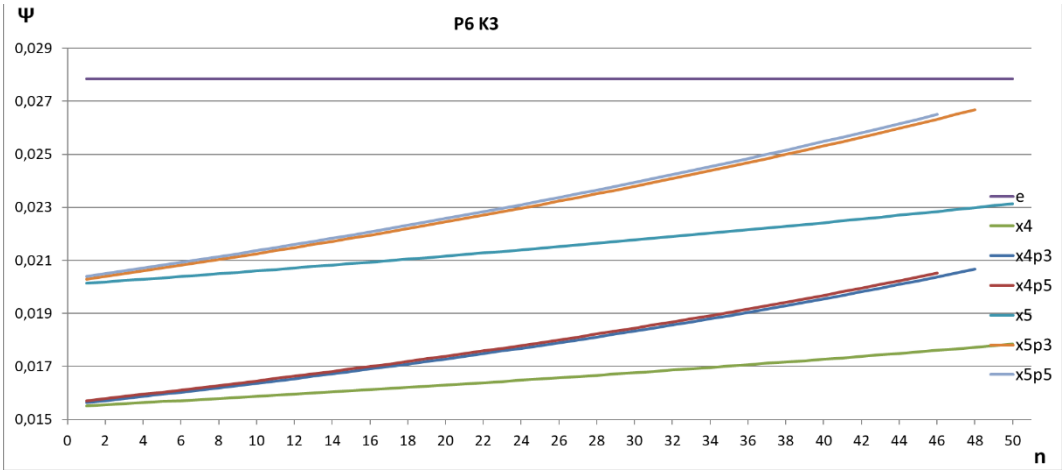
Rys. 4.36. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty z dobrym spawem (P3) – kanał 2



Rys. 4.37. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty z uszkodzonym spawem (P6) – kanał 2

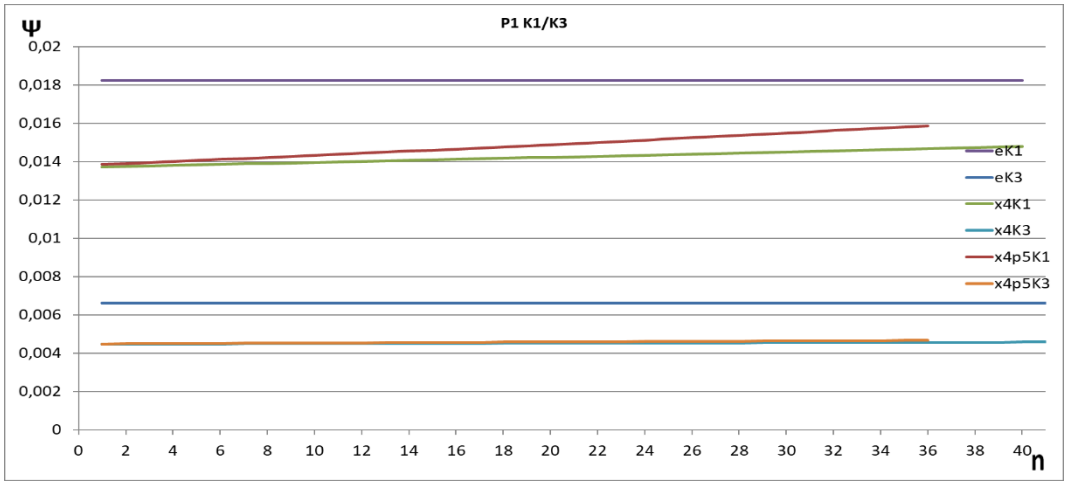


Rys. 4.38. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty z dobrym spawem (P3) – kanał 3

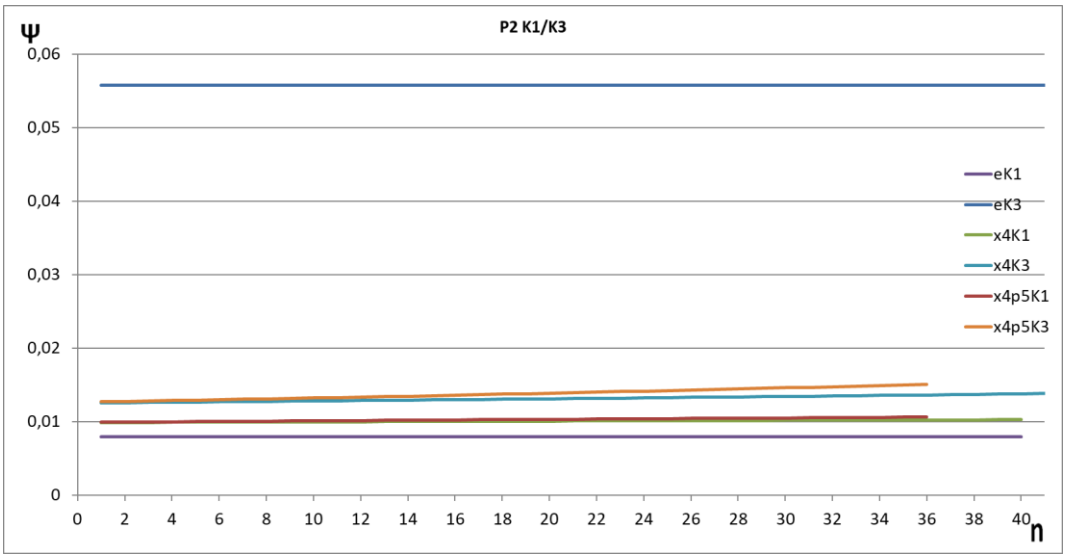


Rys. 4.39. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty z uszkodzonym spawem (P6) – kanał 3

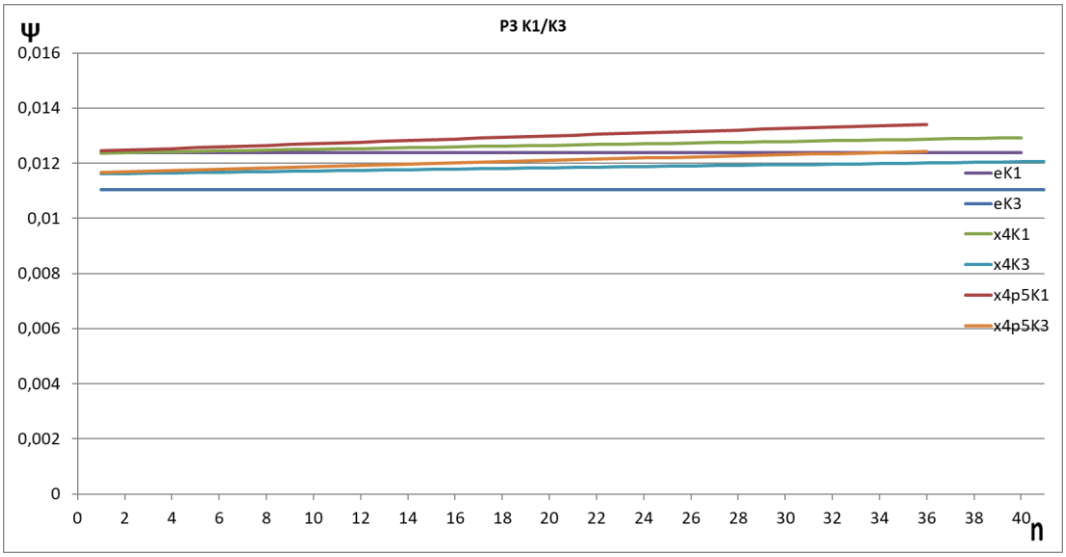
Analiza uzyskanych rezultatów pozwala jednoznacznie stwierdzić, że zależności określone dla płyt o większej grubości w przypadku nowych płyt nie występują. Wynika to zapewne z mniejszego tłumienia materiałowego w przypadku płyt cienkich, jest to wyraźnie widoczne, jeżeli porównamy wykresy 2D i 3D dla obu rodzajów badanych płyt – czas zaniku impulsu zadanego młotkiem modalnym w przypadku płyt o mniejszej grubości jest znacznie dłuższy. Zauważano jednak pewną istotną zależność. W przypadku gdy wyznaczano dekrement tłumienia dla płyty z dobrym spawem to zauważono, że jego wartości uzyskane z użyciem funkcji ekspotencjalnej były zawsze niższe od dekretów wyznaczonych pozostałymi metodami. W przypadku gdy badano wartości rozkładu logarytmicznego dekrementu tłumienia właściwe dla płyty ze spawem o dużym nagromadzeniu uszkodzeń wartość ta dominowała wśród pozostałych. Podobną sytuację stwierdzono również w większości przypadków pozostałych uszkodzeń. Użycie rozkładu logarytmicznego dekrementu tłumienia do diagnostyki połączeń spawanych w formie zastosowanej w niniejszej pracy wymaga jeszcze szeregu badań. Na chwilę obecną można wyciągnąć wniosek, że metoda ta jest skuteczna jednak występuje konieczność znalezienia wrażliwych symptomów dla poszczególnych grup płyt. Nie jest to zatem metoda uniwersalna. W toku dalszych badań prowadzonych przez autora przeprowadzono porównanie wartości logarytmicznych dekrementów tłumienia uzyskanych w wyniku analiz sygnałów przyspieszeń drgań zarejestrowanych z użyciem akcelerometrów nr 1 i 3 (w przeciwieństwie do wcześniej zastosowanej analizy przebiegów dekrementów tłumienia z pojedynczych kanałów – rysunki 4.34 - 4.39). Tak przygotowane wyniki przedstawiono na rysunkach 4.40 – 4.46



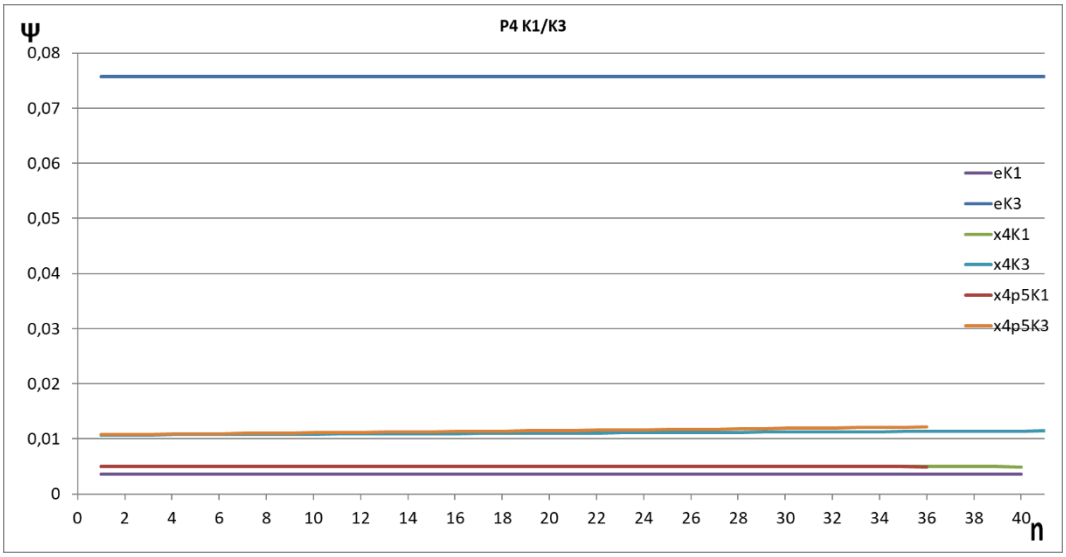
Rys. 4.40. Stosunki rozkładów dekrementów tłumienia właściwe dla kanałów 1 i 3 uzyskane podczas badań płyty P1



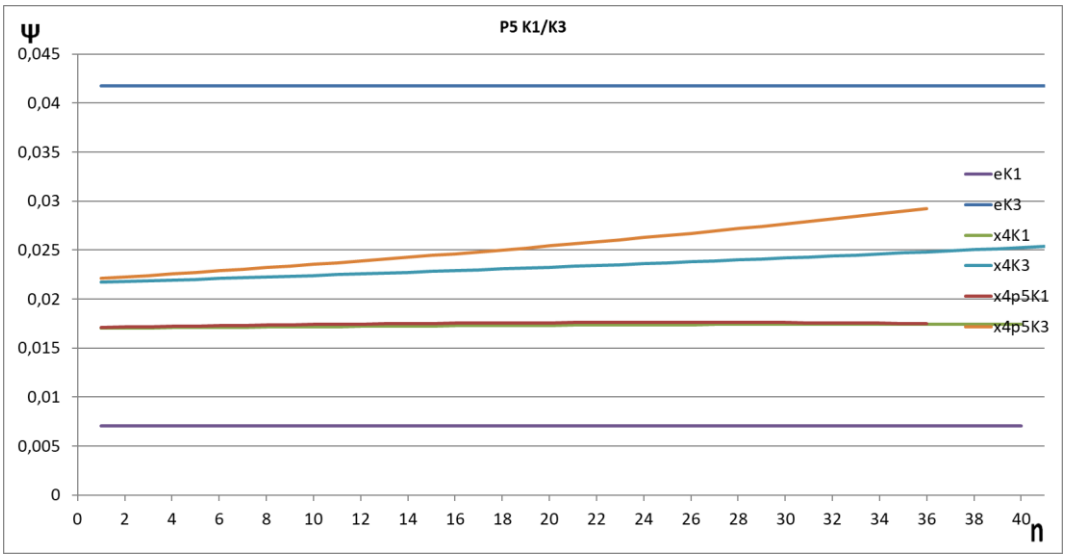
Rys. 4.41. Stosunki rozkładów dekrementów tłumienia właściwe dla kanałów 1 i 3 uzyskane podczas badań płyty P2



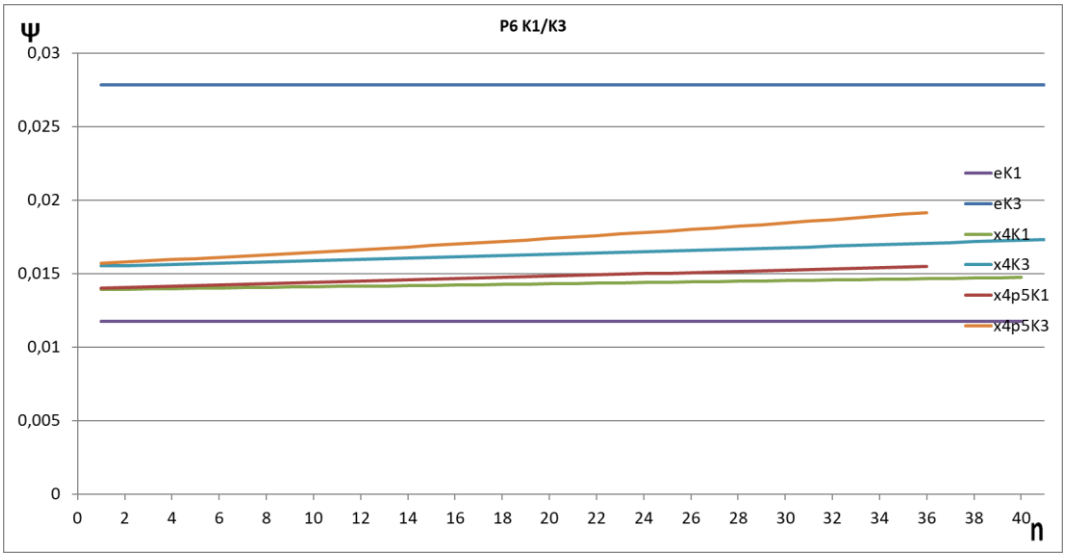
Rys. 4.42. Stosunki rozkładów dekrementów tłumienia właściwe dla kanałów 1 i 3 uzyskane podczas badań płyty P3



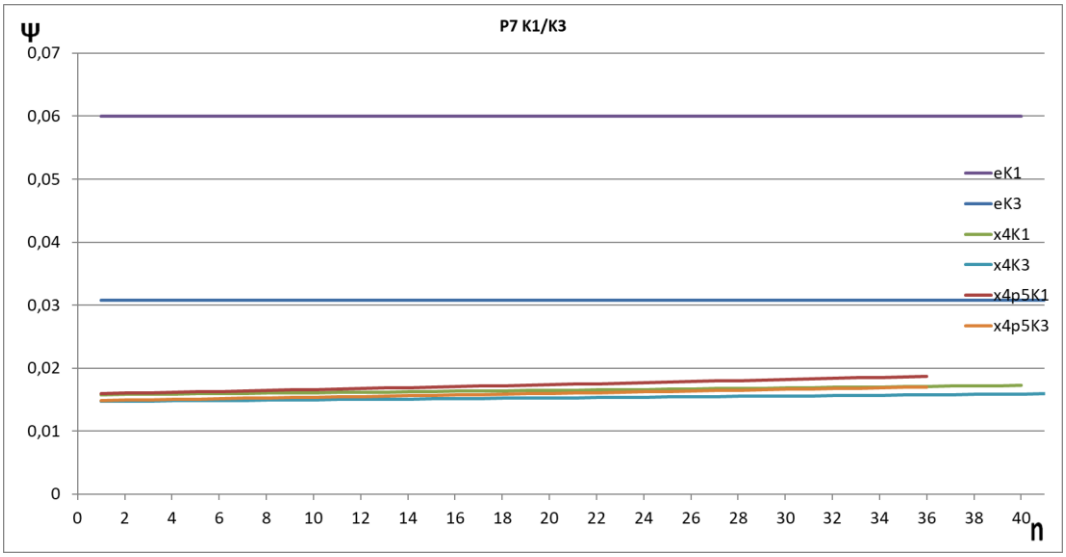
Rys. 4.43. Stosunki rozkładów dekrementów tłumienia właściwe dla kanałów 1 i 3 uzyskane podczas badań płyty P4



Rys. 4.44. Stosunki rozkładów dekrementów tłumienia właściwe dla kanałów 1 i 3 uzyskane podczas badań płyty P5



Rys. 4.45. Stosunki rozkładów dekrementów tłumienia właściwe dla kanałów 1 i 3 uzyskane podczas badań płyty P6



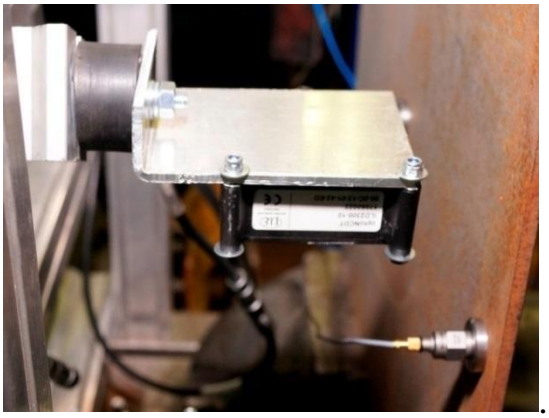
Rys. 4.46. Stosunki rozkładów dekrementów tłumienia właściwe dla kanałów 1 i 3 uzyskane podczas badań płyty P7

Wykonany przez autora zabieg polegający na dzieleniu wartości dekrementu tłumienia z kanału K1 i K2 pozwolił na określenie zależności mogącej mieć praktyczne zastosowanie. Analiza wartości rozkładów logarytmicznych dekrementów tłumienia widocznych na rysunkach 4.40 – 4.46 pozwala zauważyć skupienie ich wartości w przypadku płyty z dobrym spawem niezależnie od metody jego wyznaczenia. W pozostałych przypadkach rezultaty przynajmniej jednej z metod mają znacząco inne wartości powodując rozrzut przedstawionych krzywych. Można zatem wnioskować, że duże skupienie krzywych rozkładów logarytmicznych dekrementów tłumienia świadczy o poprawnie wykonanej spoinie. Może to być dodatkowa miara diagnostyczna w projektowanym systemie SHM.

Przedstawiona metoda ma duże szanse na implementację jako szybka i tania metoda oceny stanu połączeń spawanych. Zastosowanie metody opierającej się o określanie wartości rozkładu logarytmicznego dekrementu tłumienia, daje możliwość wykrycia wady bez jej konkretnego wskazania. Można jednak przyjąć, że po zebraniu odpowiednio dużej bazy danych, na podstawie której opracowane zostaną poziomy referencyjne dla różnych grup grubościowych blach (uwzględniające również rożne materiały stosowane w okrętownictwie) proponowana metoda będzie wystarczająca do jednoznacznego określenia przydatności spoiny do dalszej eksploatacji, po wystąpieniu zdarzenia krytycznego.

4.5. BADANIA AMPLITUD PRZEMIESZCZEŃ DRGAŃ

Równolegle z pomiarami amplitud przyspieszeń, prowadzono pomiary amplitud przemieszczeń. Rejestracji zmian położenia płyt w czasie prowadzono z użyciem z triangulacyjnego czujnika laserowego firmy optoNCDT typu ILD2300-10. W celu wyeliminowania ewentualnych drgań elementu pomiarowego, mogących negatywnie wpłynąć na uzyskane wyniki, czujnik laserowy zamontowano na specjalnym wsporniku, z użyciem metalowo-gumowego amortyzatora (rysunek 4.47).



Rys. 4.47. Laserowy czujnik przemieszczeń na stanowisku badań

Zastosowany laserowy czujnik bezkontaktowego pomiaru przemieszczeń działa na zasadzie triangulacji. Promień lasera pada na punkt wybrany na powierzchni mierzonej. Następnie promień zostaje odbity (częściowo rozproszony) a światło odbite od miejsca pomiaru jest kierowane na światłoczułą matrycę, gdzie jest przetwarzane w czasie rzeczywistym – rysunek 4.48. Określenie kąta pomiędzy promieniem padania lasera a jego odbicia pozwala na pomiar odległości pomiędzy źródłem lasera a obiektem mierzonym. Bezpośrednia metoda pomiaru przemieszczeń nie powoduje powstawania błędu całkowania, w związku z czym jest lepsza od numerycznego wyznaczania przemieszczeń na podstawie pomiarów przyspieszeń akcelerometrami [80].

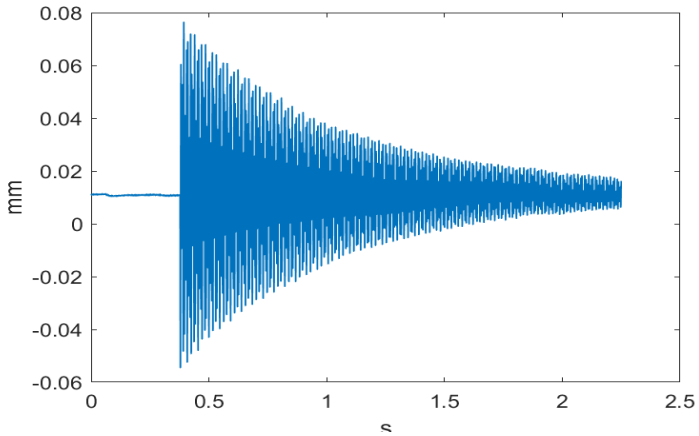
Rys. 4.48. Zasada pomiaru z użyciem laserowego czujnika przemieszczeń. 1 – dioda laserowa, 2 promień odbity padających na matrycę światłoczułą, 3 – element mierzony.

Zastosowany czujnik charakteryzuje się dużą odpornością na zakłócenia zewnętrzne jak również zabudowaną w czujniku elektroniką ustalającą położenie obiektu z częstotliwością próbkowania do 49,02 kHz. Na wyjściu z czujnika uzyskujemy dyskretny sygnał napięciowy. Podstawowe dane czujnika ILD2300-10 przedstawiono w tabeli 4.3.

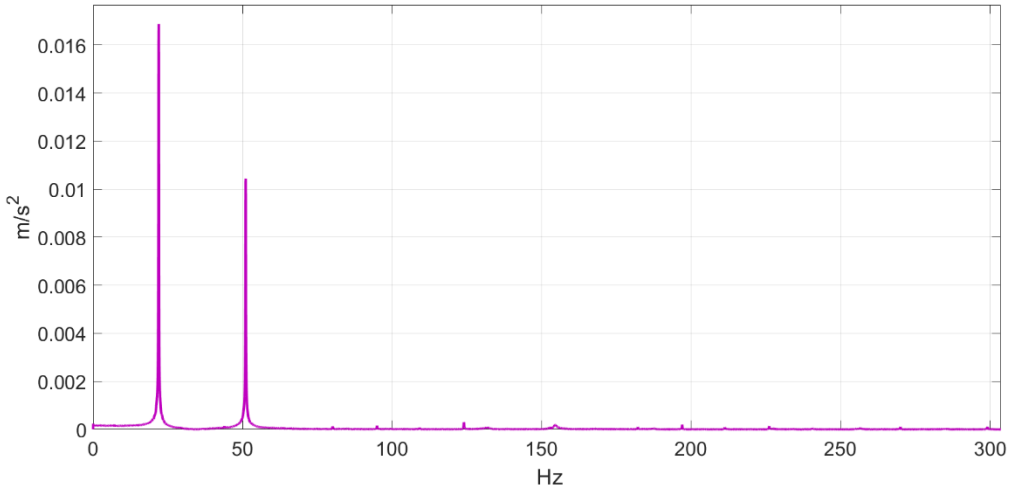
Tabela 4.3. Dane czujnika ILD2300-10

Typ ILD 2300-10	
Zakres pomiarowy [mm]	10 (początek pomiaru 30, koniec pomiaru 40)
Rozdzielczość dla 20 kHz [µm]	0.15
Źródło światła	Dioda laserowa o mocy 1 mW i długości fali emitowanego światła 670 nm
Zasilnie [V]	24
Wielkość znacznika na początku zakresu pomiarowego [µm]	75x85
Wielkość znacznika na końcu zakresu pomiarowego [µm]	110x160

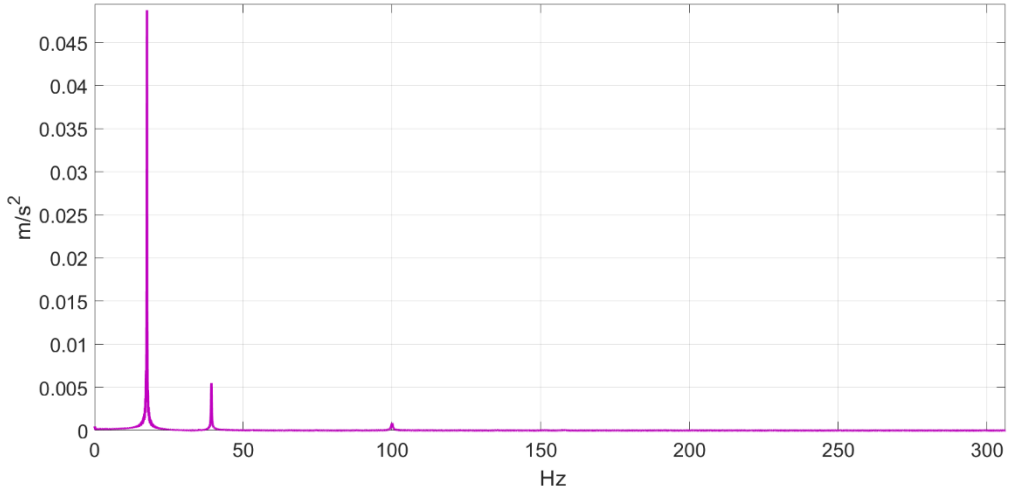
Rejestrację danych prowadzono z wykorzystaniem dedykowanego przez producenta oprogramowania. W trakcie badań zastosowano częstotliwość próbkowania wynoszącą 1500 Hz. Uzyskane przebiegi czasowe analizowano następnie w oprogramowaniu Matlab. Przykład przebiegu czasowego przemieszczeń drgań podczas pomiarów płyty P2 przedstawiono na rysunku 4.49. Na rysunku 4.50 widoczne jest widmo częstotliwościowe uzyskane z przebiegu przedstawionego na rysunku 4.49. Podobne widma dla płyty z poprawnym spawem oraz ze spawem mocno uszkodzonym przedstawiono na rysunkach 4.51 oraz 4.52.



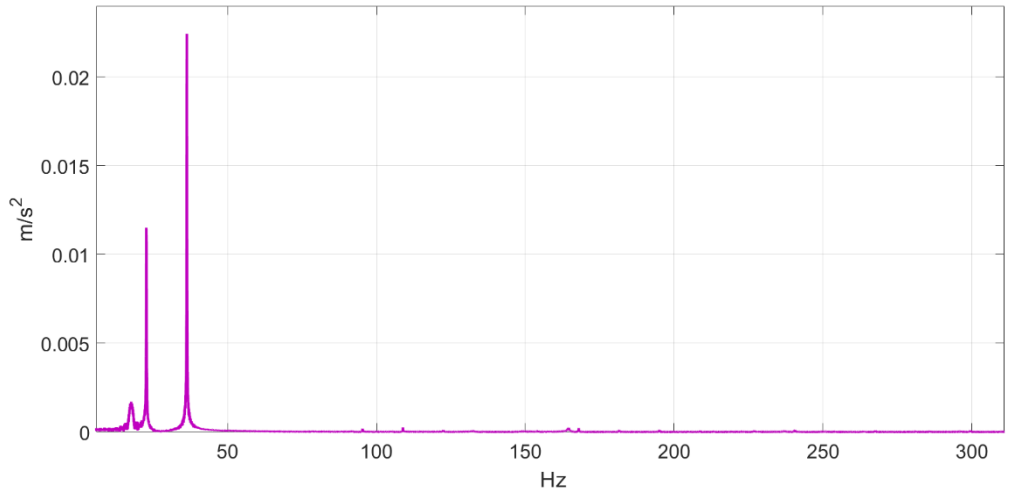
Rys. 4.49. Czasowy przebieg zmian przemieszczeń płyty P2 po uderzeniu młotkiem modalnym



Rys. 4.50. Widmo częstotliwościowe płyty P1



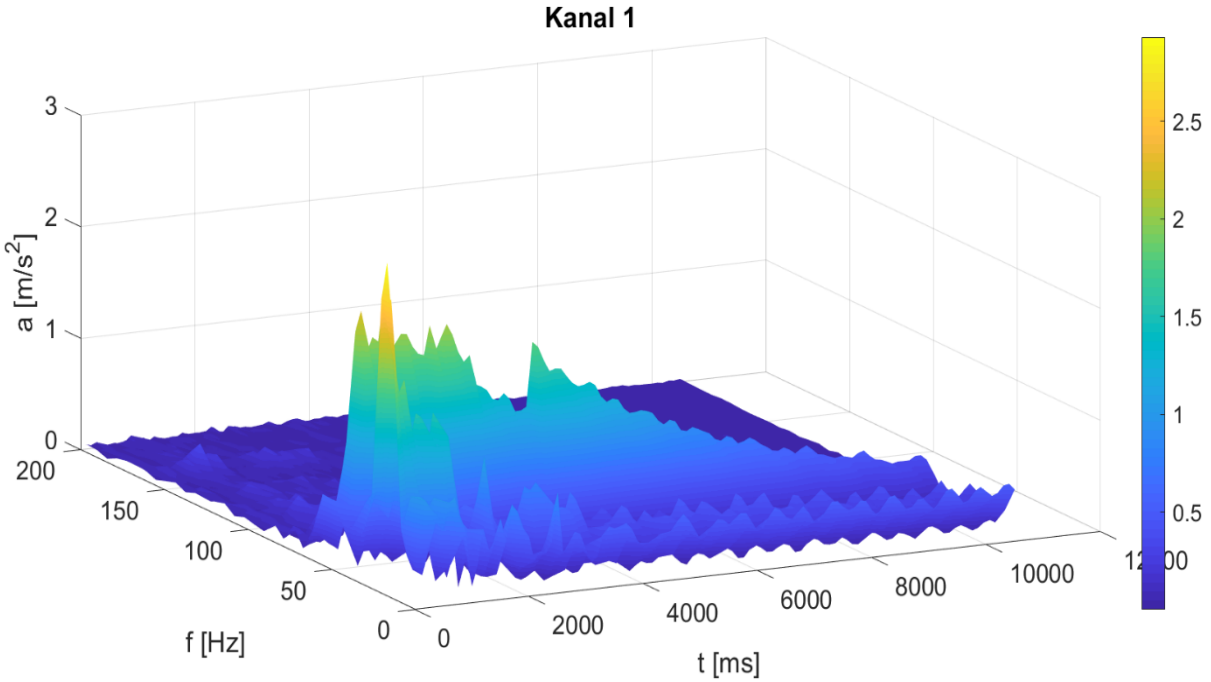
Rys. 4.51. Widmo częstotliwościowe płyty P3



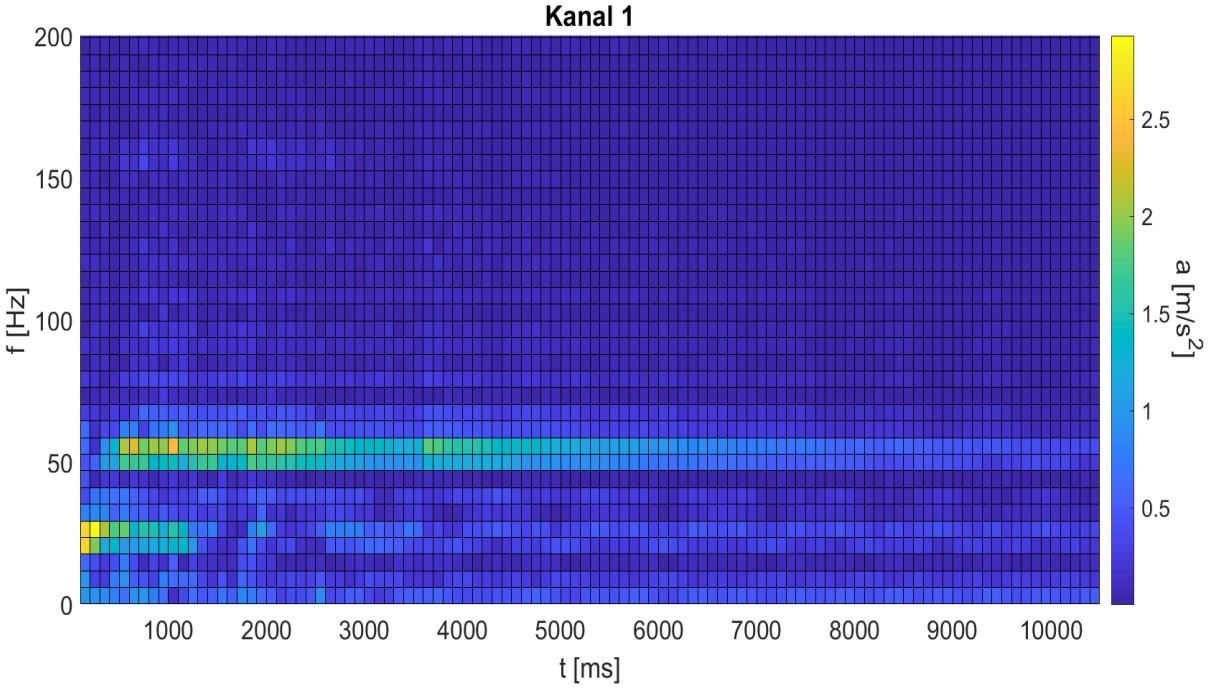
Rys. 4.52. Widmo częstotliwościowe płyty P6

Charakterystyka częstotliwościowa płyty P1 (bez połączenia spawanego) wykazuje zmiany rozkładu wartości częstotliwości amplitud. Jednak podczas analiz kolejnych pomiarów nie stwierdzono powtarzalności uzyskanych wyników. Efekt ten może stanowić nową miarę diagnostyczną, której jednak autor w dalszej części swojej pracy nie badał.

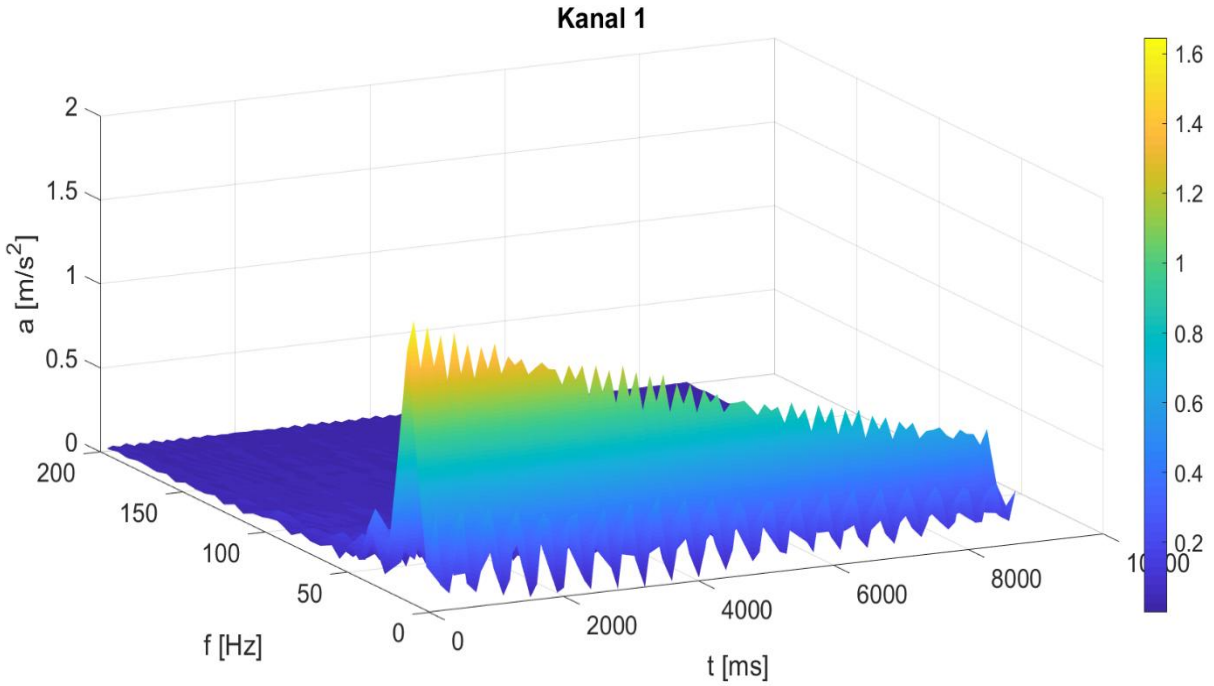
Zaniechanie dalszej analizy wynika z głównej mierze z trudności wynikających z użycia czujników laserowych w autonomicznych systemach SHM. Podobną sytuację zaobserwowano w przypadku widm uzyskanych podczas pomiarów kolejnych płyt, co przedstawiono na przykładzie płyt P1 i P3 na rysunkach 4.51 i 4.52. Uzyskane widma przeanalizowano również z wykorzystaniem metod 2D i 3D – rysunki 4.53 - 4.58.



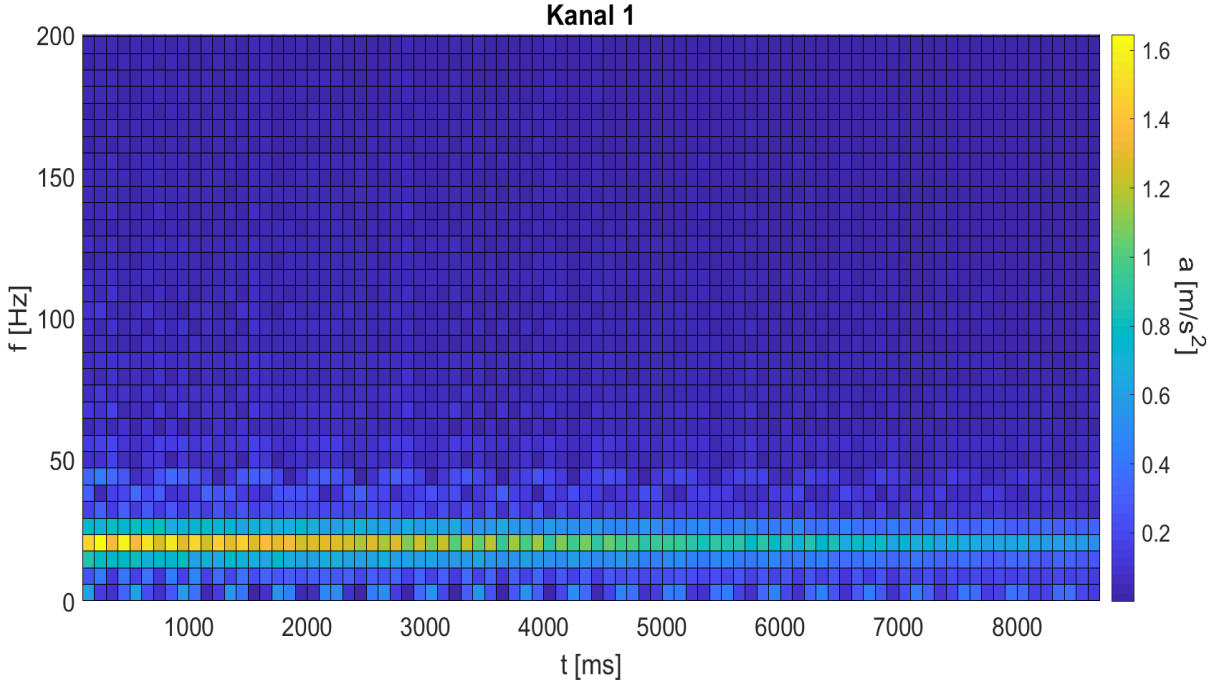
Rys. 4.53. Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 3D płyty P1



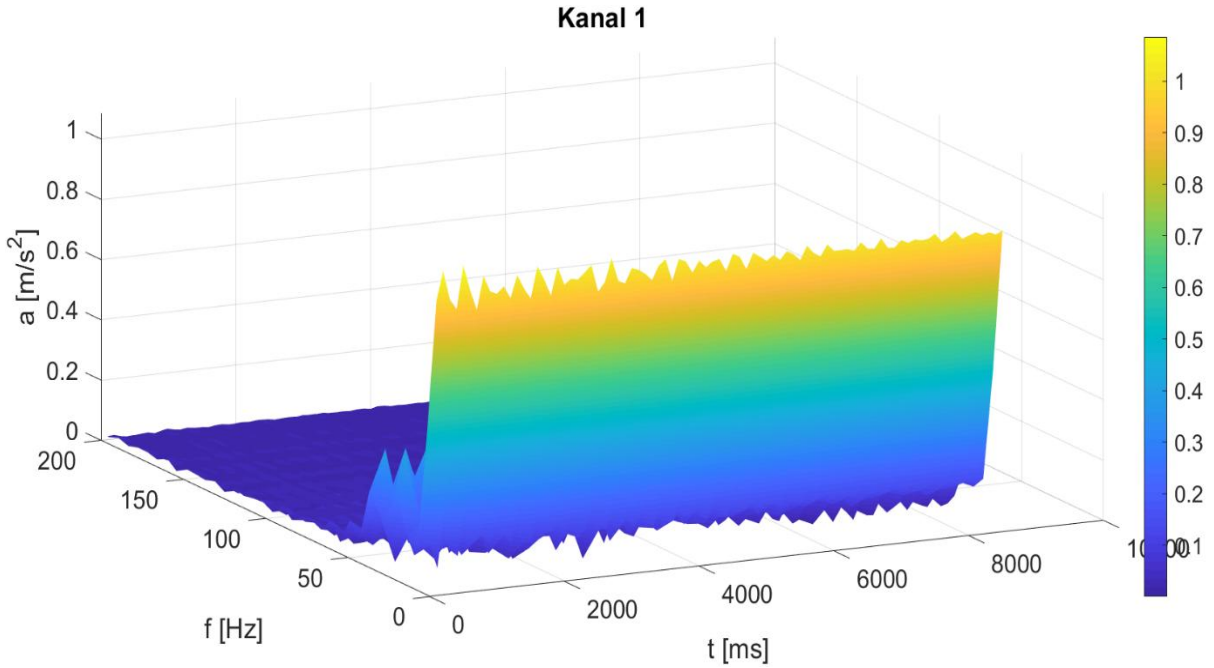
Rys. 4.54. Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 2D płyty P1



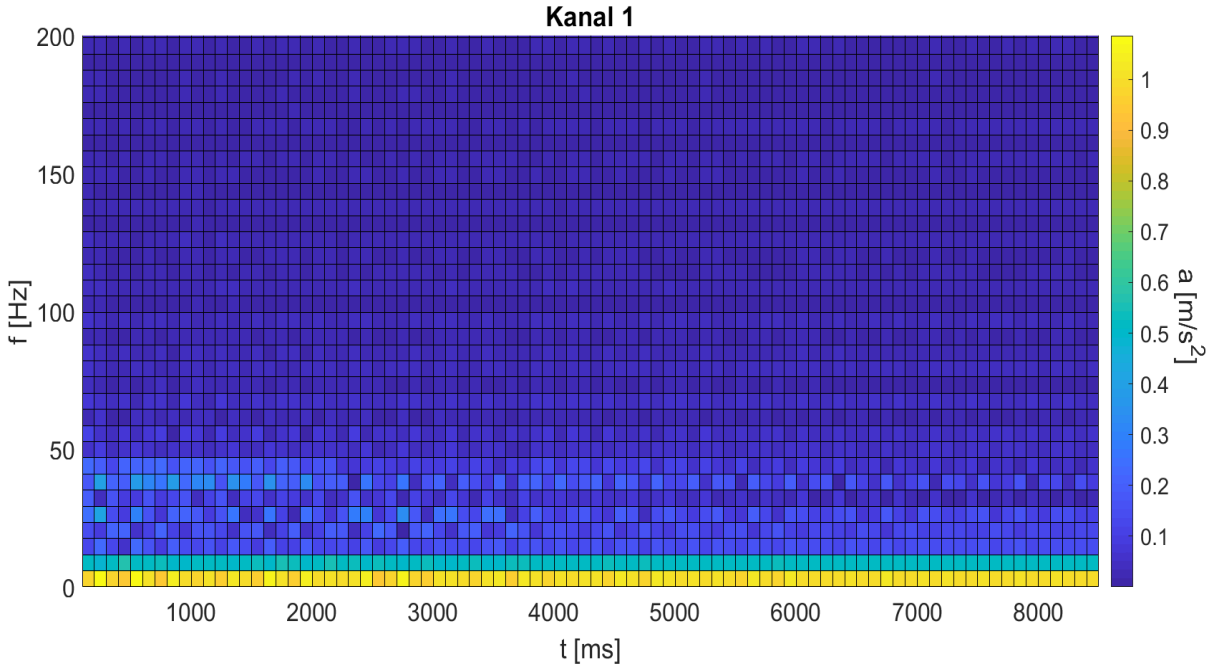
Rys. 4.55. Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 3D płyty P3



Rys. 4.56. Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 2D płyty P3



Rys. 4.57. Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 3D płyty P6



Rys. 4.58. Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 2D płyty P6

Podobnie jak w przypadku klasycznego przedstawiania wyników transformacji Fouriera wykorzystanie metod 2D i 3D nie pozwoliło na uzyskanie zadowalającej powtarzalności dla kolejnych pomiarów. W związku z powyższym autor postanowił nie analizować w dalszej części swojej pracy sygnałów przemieszeń uzyskanych z użyciem laserowych czujników. Zdaniem autora brak powtarzalności wyników może być również spowodowany zastosowaniem amortyzatora metalowo-gumowego o niewłaściwej sztywności co skutkowało nadmiernymi drganiami samego czujnika laserowego. Zakłócenia generowane podczas pomiarów mogły znacząco oddziaływać na uzyskane wyniki. Analiza sygnałów oraz procesu rejestracji z wykorzystaniem laserowych czujników przemieszczeń wymaga dalszych badań.

WNIOSKI I CELE DALSZYCH BADAŃ

Celem rozprawy doktorskiej było opracowanie metod skutecznego monitoringu cienkościennych konstrukcji spawanych - kadłuba statku. Przeprowadzona analiza literatury dotyczącej monitorowania stanu technicznego konstrukcji (SHM) ze szczególnym uwzględnieniem kadłubów jednostek pływających, skłoniła autora do tezy, *że możliwe jest zdefiniowanie nowych parametrów i charakterystyk dynamicznych konstrukcji okrętowych opartych na analizach badań wibrodiagnostycznych pozwalających na wskazanie powstania uszkodzeń w połączeniach spawanych*. W ramach pracy nad systemem SHM niezbędne jest opracowanie procedury, efektywnej z punktu widzenia naukowego i utylitarnego, przeprowadzania badań wibrodiagnostycznych połączeń spawanych, poprzez określenie: sposobu i miejsca wymuszenia konstrukcji, optymalnego pozycjonowania czujników, parametrów pomiarowych takich jak czas czy częstotliwość próbkowania. Podczas prowadzonych badań i ich późniejszych analiz stwierdzono, że w przyszłym systemie SHM może nie być wystarczające zastosowanie jednego czujnika do monitorowania jednego kluczowego elementu. W przypadku skomplikowanej konstrukcji spawanej, jaką jest kadłub statku dokładne określenie liczby czujników będzie każdorazowo wymagało dodatkowej analizy. Układ czujników powinien składać się z co najmniej kilkunastu akcelerometrów umieszczonych głównie w rejonie owręża. Na etapie badań laboratoryjnych, jako wymuszenie stosowano impuls z młotka modalnego i było ono wystarczające, jednak podczas badań na obiektach rzeczywistych autor planuje wykorzystać pobudzenia kadłuba wynikające z jego normalnej eksploatacji (praca na fali, czy też pobudzenia pochodzące od pracujących mechanizmów). Autor dopuszcza możliwość, że wspomniane, naturalne wymuszenia nie będą wystarczające dla projektowanego systemu monitoringu. W związku z tym opracowano **urządzenie do wykrywania uszkodzeń konstrukcji cienkościennych**, które zostało zgłoszone do opatentowania (zgłoszenie nr P.428505). Zgłoszone urządzenie jest rezonansowym miernikiem drgań konstrukcji, które jest wyposażone w impulsowy wzbudnik drgań oraz akcelerometryczne czujniki drgań. Pozwala to na automatyczne wymuszenie drgań we fragmencie konstrukcji oraz jednoczesną rejestrację sygnału diagnostycznego.

Dotychczas stosowane metody badań SHM wykorzystujące pomiary parametrów dynamicznych konstrukcji bazują głównie na analizie zmian częstotliwości drgań własnych. W dysertacji potwierdzono, że metody te są jak najbardziej poprawne. Przeprowadzono analizy odpowiedzi elementów spawanych na wymuszenia młotkiem modalnym uzyskując różne częstotliwości drgań własnych takich samych elementów dla różnych stanów technicznych występujących w nich spoin. Jednakże potwierdzono, że czułość takiej metody badań jest ograniczona. Nie ograniczono się jedynie do potwierdzenia słuszności założeń już występujących systemów SHM a podjęto próbę zdefiniowania i wyznaczenia nowych parametrów dynamiki badanego obiektu i jego charakterystyk, które miałyby większy potencjał badawczy. Przedstawiono wyniki badań wstępnych dotyczące płyt spawanych o znacznej grubości, gdzie uszkodzenia spoin wykazywały dużą intensywność. Następnie zaprezentowano wyniki uzyskane podczas badań płyt o mniejszej grubości, których spoiny wykonane przez zawodowych spawaczy charakteryzowały się typowymi, trudno wykrywalnymi uszkodzeniami o mniejszej intensywności. W przypadku wszystkich płyt rejestrowano przebiegi przyspieszeń drgań powstałych w wyniku ich odpowiedzi na wymuszenie z użyciem młotka modalnego. Tak uzyskane sygnały podawano wstępnej analizie w komercyjnym programie Pulse Reflex. Jednakże zasadniczą część obróbki sygnałów prowadzono w programie Matlab. Analizy z programu komercyjnego miały za zadanie jedynie weryfikację analiz prowadzonych przy pomocy własnych skryptów programu

MATLAB. Sygnały w pierwszej kolejności analizowano pod kątem zmian występujących w charakterystykach czasowo częstotliwościowych (2D i 3D), następnie stosowano metodę rozkładu średniej z okien czasowych, a finalnie analizowano rozkłady logarytmicznego dekrementu tłumienia poszczególnych sygnałów. Wszystkie zastosowane metody charakteryzują się cechami umożliwiającymi ich wdrożenie do systemu SHM na jednostkach pływających.

Wiarygodność analiz danych pomiarowych badanych obiektów inżynierskich zależy od jakości projektu systemu monitoringu. Aby taki system opracować, należy zidentyfikować potencjalne zagrożenia, dobrać stosowną technologię pomiarową oraz przyjąć model opracowania wyników pomiarów. Najbardziej praktycznym rozwiązaniem jest zbudowanie modelu systemu eksperckiego dedykowanego konkretnemu obiektowi. Jest to możliwe dzięki integracji danych z różnych źródeł. Dotychczas stosowane systemy pozwalają na prowadzenie obserwacji w uprzednio zdefiniowanych interwałach. Jak wskazuje praktyka, ustalenia takie dokonywane są często intuicyjnie, bazując na doświadczeniach specjalisty obsługującego system. Proponowany system ma być systemem on-line monitorującym konstrukcję w trybie ciągłym. Zdaniem autora właściwie zaprojektowany i działający system SHM powinien automatycznie i niezawodnie wykrywać uszkodzenia w monitorowanej konstrukcji (kadłubie jednostki pływającej) przy jednoczesny niewielkim nakładzie sił i środków. Ponieważ omawiane systemy nie są jak dotychczas wymagane przez żadne towarzystwa klasyfikacyjne ich implementacja na jednostkach musi wynikać z prostego rachunku zysków i strat przedstawionego armatorowi. Inaczej mówiąc tani system ma zapewnić armatorowi potencjalnie duże zyski (lub uniknięcie dużych strat). Ponieważ w wyniku przeprowadzonego modelowania udowodniono, że numeryczne, poprawne odwzorowanie uszkodzeń w spoinie jest bardzo trudne (lub nawet niemożliwe) autor proponuje opierać system na szerokich bazach danych uzyskanych na podstawie badań pomiarowych. Najważniejszym elementem przygotowania systemu działającego w oparciu o zaproponowane przez autora metody jest pozyskanie sygnałów referencyjnych dla jednostek nowych odbywających próby morskie. Zbudowanie bazy danych dla nowej konstrukcji pozwoli na pewną identyfikację uszkodzeń. Istotne jest równoczesne stosowanie wszystkich trzech zaproponowanych przez autora metod. Na obecnym etapie nie przewiduje się możliwości identyfikacji jakiego rodzaju uszkodzenie zostanie wykryte a jedynie sytuację przekroczenia ewentualnego progu alarmowego. Przy odpowiednim doborze rozmieszczenia czujników w miejscach newralgicznych możliwe będzie zlokalizowanie uszkodzenia i jego weryfikacja z wykorzystaniem dokładniejszych metod np. metody ultradźwiękowej. Pozwoli to na uniknięcie potencjalnie wysokich kosztów naprawy w przypadku, gdy defekt wywołujący alarm okaże się niezagrażający dalszej normalnej eksploatacji.

Reasumując, w ramach dysertacji badano możliwości wykrywania uszkodzeń nieliniowych złączy spawanych poprzez znalezienie metod wykrywania nieliniowości charakterystyk dynamicznych cienkościennych konstrukcji okrętowych. Przeprowadzone badania umożliwiły stworzenie metod do szybkiej diagnostyki cienkościennych elementów konstrukcji ze złączami spawanymi. W związku z tym opracowano:

- nową miarę diagnostyczną opartą o analizę czasowo-częstotliwościową amplitud przyspieszeń drgań przydatną do wstępnej weryfikacji złączy,
- nową metodę diagnostyczną bazującą na oknach czasowych możliwą do zastosowania w metodach SHM,
- nową metodę diagnostyczną analizującą zmiany dekrementu tłumienia w czasie.

Autor pracy planuje rozwój zaprezentowanych badań głównie poprzez próbę zastosowania praktycznego opracowanych metod diagnostycznych. Głównym celem jest zbudowanie w pełni funkcjonalnego systemu SHM. Opracowane metody analiz są tylko jednym z elementów takiego systemu. W ramach monitoringu konstrukcji konieczna jest detekcja i lokalizacja uszkodzenia, a następnie określenie żywotności badanego obiektu. Zaprezentowana praca skupia się głównie na pierwszym elemencie systemu SHM. W ramach dalszych prac autor planuje:

- rozwój metod analiz sygnałów diagnostycznych uzyskanych przy pomocy innych typów czujników, głównie laserowych czujników przemieszczeń (spodziewane jest lepsze odwzorowanie dynamiki konstrukcji w niższych częstotliwościach) oraz czujników odkształceń (badanie pól naprężeń prowadzących bezpośrednio do uszkodzenia konstrukcji) głównie bazujących na technikach światłowodowych (np. czujniki typu FBG - Fibre Bragg Grating);
- rozszerzenie badanych obiektów o typowe fragmenty konstrukcji okrętowych - typowe wiązania okrętowe (np. połączenie wręgu ramowego z pokładnikiem wraz z fragmentem burty oraz pokładu);
- przeprowadzenie badań poligonowych kadłubów statków będących w trakcie budowy (bez zakłócającego wyposażenia);
- przeprowadzenie badań na statku w trakcie rejsu w ekstremalnych warunkach pogodowych (rejs Uniwersyteckiego statku Horyzont II na Spitsbergen);
- wykonanie prototypowego systemu SHM bazującego na czujnikach piezoelektrycznych wspieranych oceną stanu naprężeń metodami "fibre optic".

LITERATURA

1. Ansari F.: State-of-the-art in the applications of fibre-optic sensors of cementitious composites, *Cem. Concr. Compos.*, 1997
2. Badania nieniszczące w nowoczesnym wydaniu EC System sp. zoo 2012
3. Bainbridge H.: BEST PRACTICE FOR THE PROCUREMENT AND CONDUCT OF NON-DESTRUCTIVE TESTING, Part 2: Magnetic Particle and Dye Penetrant Inspection, HSE, 2013
4. Batko W., Dąbrowski Z., Engel Z., Kiciński J., Weyna S.: Nowoczesne metody badania procesów wibroakustycznych. Część I. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB. Radom 2005
5. Beattie A. G.: Acoustic Emission Non-Destructive Testing of Structures using Source Location Techniques, SANDIA, 2013
6. Bień J.: Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych Wydawnictwo WKŁ Warszawa 2010
7. Biernacki B., Jawor R., Kozak T., Lipnicki M., Marchwicki M., Niezborała J. Puchaczewski N., Świątkowski R.: Badania metodami nieniszczącymi. Laboratorium Badań Nieniszczących KOLI, Gdańsk 1991
8. Borowiecka A.: Badania penetracyjne. Biuro Gamma, Warszawa 2000
9. Carestream: NDT Images An Overview – Your guide to proper processing and interpretation of radiography films for Non-Destructive Testing (NDT), 2014
10. Cartz L, Nondestructive Testing: Radiography, Ultrasonics, Liquid Penetrant, Magnetic Particle, Eddy Current, ASM Intl; ISBN: 0871705176
11. Cicholska M., Czechowski M.: Materiałoznawstwo okrętowe Wydawnictwo: Dział Wydawniczy Wyższej Szkoły Morskiej Gdynia 1999
12. Claus-Peter Fritzen, Vibration-Based Methods for SHM, Institute of Mechanics and Control Engineering - Mechatronics and Center of Sensor Systems (ZESS), University of Siegen, GERMANY, claus-peter.fritzen@uni-siegen.de
13. Cyca M.: Vibration-Induced Fatigue – A Risk-Based Approach, 7th Biennial Inspection Summit (Texas), 2002
14. Czuchryj J.: Badania złączy spawanych wg. norm europejskich. Biuro Gamma, Warszawa 2003
15. Czurchryj J., Papkala H., Winiowski A.: Niezgodności w złączach spajanych, Instytut Spawalnictwa Gliwice 2005
16. Czurchryj J., Sikora S.: Badania wizualne złączy spawanych, Instytut Spawalnictwa Gliwice 2009
17. Dąbrowski Z., Dziurdź J., Skórski W.W.: Drgania masztów kompozytowych, Wydawnictwo ITE - PIB, 2007.
18. Dąbrowski Z., Dziurdź J., Skórski W.W.: Próba analizy stanu profili kompozytowych metodami wibroakustycznymi. XXIX Sympozjum Diagnostyki Maszyn, 2002.
19. Dąbrowski Z., Dziurdź J.: Simultaneous Analysis of Noise and Vibration of Machines in Vibroacoustic Diagnostics, w: Archives of Acoustics, vol. 41, nr 4, 2016, ss. 783-789
20. Deprins E.: Computed Radiography in NDT Applications, Insight-Non-Destructive Testing and Condition Assessment, 2004
21. Dudzik S.: Wyznaczenie głębokości defektów materiałowych z zastosowaniem aktywnej termografii dynamicznej i sztucznych sieci neuronowych. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej Częstochowa 2013

22. Findeis D., Gryzagoridis J., Gerona L. M.: Vibration Excitation Methods Applied to Digittal Shearography and ESPI, Integration between a dynamically growing crack with stuff and compliant inclusions using DIC and high-speed photography, 2013
23. FUJIFILM: FUJIFILM Technical Handbook: The Fundamentals of Industrial Radiography, Fujifilm USA, 2009
24. GE Inspection Technologies: Industrial Radiography Image forming techniques, General Electric Company, 2006
25. Harara W.: Digital Rafiography in Industry, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 2008
26. Harris C.M, editor, Piersol A.G, editor. "Harris' shock and vibration handbook",—5th edition ISBN 0-07-137081-1
27. Hijazi A.: Introduction to Non-Destructive Testing Techniques (Radiographic Testing), 2016
28. Hlebowicz J.: Badania wizualne. Zasady ogólne i przykłady zastosowań. Biuro Gamma, Warszawa 1997
29. Huynh D., Tran D.: A Non-Destructive Crack Detection Technique Using Vibration Tests, Structural Integrity and Fracture International Conference (SIF'04), 2004
30. IAEA: Guidelines on Training, Examination and Certification in Digital Industrial Radiology Testing (RT-D), 2015
31. Introduction to Radiation, the Health Physics Society, The University of Michigan, http://www.umich.edu/~radinfo/introduction/
32. Jalili M. M., Mousavi S. Y., Pirayeshfar A. S.: Flexural free vibration as a non-destructive test for evaluation of viscoelastic properties of polymeric composites in bending direction, 2014
33. Kaynak M.: Non-Destructive Testing od Columns Under Axial Compression using Transverse Vibration Technique and Ultrasonic approaches, METU, 2004
34. Keshtgar A., Modarres M.: Detecting Crack Initiation Based on Acoustic Emission, Chemical Engineering Transactions (Vol. 33), 2013
35. Kiciński J., Batko W., Dąbrowski Z.: Zjawiska nieliniowe w diagnostyce wibroakustycznej. Instytut Technologii Eksploatacji. Radom 2008
36. Klewski A., Sanacki J., Socha P.: Nowe rozwiązania techniki termalnej zastosowane do diagnostyki urządzeń. Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie EXPO – SHIP 2004
37. Kohantorabi M., Hossein M. A., Shahverdi M., Roohnia M.: Vibration Based NDT Methods to Verify Wood Drying Efficiency, Wood Industry / DrvnaIndustrija (Vol. 66), 2015
38. Krajewski A., Hudycz M.: Zapewnienie jakości i kontrola złączy spajanych, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2015
39. Krause M., Dackermann U., Jianchun Li: Elastic wave modes for the assessment of structural timber: Ultrasonic echo for building elements and guided waves for pole and pile structures, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2015
40. Król A., Majewska K., Mieloszyk M, Murawski L., Ostachowicz W., Weintrit A.: *Fibre Bragg Grating Sensor Grids for Structural Health Monitoring of the Foremast of STS Dar Mlodziezy*. C-Journal of Mechanical Engineering Science, Vol.227, pp.1665-1680, 2013.
41. Lacey S., Lipperst J., Esmen N., Marsh G.: Magnetic Field Exposure in a Nondestructive Testing Operation, Arch Environ Occup Health, 2007
42. Lewicka – Romicka A.: Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii. Wydawnictwo Naukowo – Techniczne Warszawa 2001

43. Lin Y. B., Lai J. S., Chang K. C., Li L. S.: Flood scour monitoring system using fibre bragg grating sensors, *Smarter Mater. Struct*, 2006
44. Lin Y. B., Pan C. L., Kuo Y. H., Chang K. C.: Online Monitoring of highway bridge construction using fibrebragg grating sensors, *Smart Mater. Struct*, 2005
45. Malecki I., Ranachowski J.: Emisja akustyczna źródła, metody, zastosowania. Biuro Pascal, Warszawa 1994
46. Markuszewski D.: Badania diagnostyczne masztów kompozytowo-węglowych metodami wibroakustycznymi. Wydawnictwo Politechnika Warszawska. Warszawa 2013
47. Masayasu Ohtsu: Innovative AE and NDT Techniques for On-Site Measurement of Concrete and Masonry Structures, Springer Netherlands, 2016
48. Miller S.: Practical NDT/PDT Methods for Bridge Inspection, Michigan Bridge Conference, 2016
49. Mizerski J.: Spawanie w osłonie gazów metodami MAG i MIG, Wydawnictwo REA Warszawa 2005
50. Mizerski J.: Spawanie wiadomości podstawowe, Wydawnictwo REA Warszawa 2005
51. Muc A., Murawski L., Szeleziński A.: Methods of cracks detection in marine structures' welded joints based on signals' time waveform analysis. Brodogradnja/Shipbilding Volumne 69 Number 3 2018
52. Muravin B.: Acoustic Emission Method for Diagnostic and Structural Health Monitoring of Critical Structures During Operation, HDKBR INFO Magazin (Vol. 2), 2012
53. Murawski L., Opoka S., Ostachowicz W., Wandowski T., Malinowski P.: *Practical application of SHM system based on FBG sensors for offshore platform*. 8th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN–2011., 4–6 July 2011, Leuven, Belgium, pp. 2052–2059 (Nr arch. 359/2011). ISBN 978-90-760-1931-4
54. Murawski L., Opoka S., Ostachowicz W.: Investigation on stability, sensivity and applicability of SHM system based on FBG sensors. 22nd International Congress Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, COMADEM–2009, 9–11 June 2009, San Sebastian, Spain, pp. 473–480.
55. Murawski L., Ostachowicz W., Opoka S., Mieloszyk M, Majewska K.: *Practical application of monitoring system based on optical sensors for marine constructions*. Key Engineering Materials, Vol. 518 (2012), pp 261-270.
56. Murawski L.: Static and dynamic analyses of marine propulsion systems. Wydawctwo: Politechnika Warszawska, Warszawa 2003
57. Murawski L.: Thermal displacement of crankshaft axis of slow-speed marine engine, Brodogradnja, 2016
58. Murawski L.: Thermal interaction between main engine body and ship hull, OCEAN ENGINEERING, 2018
59. Murawski L.: *Methodology of threat autonomous assessment and forecasting the lifetime of the marine structure*. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 22, No 2, pp. 163-168. ISSN 1231-4005, European Science Society of Powertrain and Transport Publication, Warsaw 2015.
60. Osiński Z.: Tłumienie drgań. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997
61. Osiński Z.: Teoria drgań. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1980
62. Paul E. Mix: Introduction to Nondestructive Testing, A Training Guide, WILEY-INTERSCIENCE
63. Pincu R., Kleinberger-Riedrich O.: Advanced Digital Radiography for Field NDT, International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography, 2011

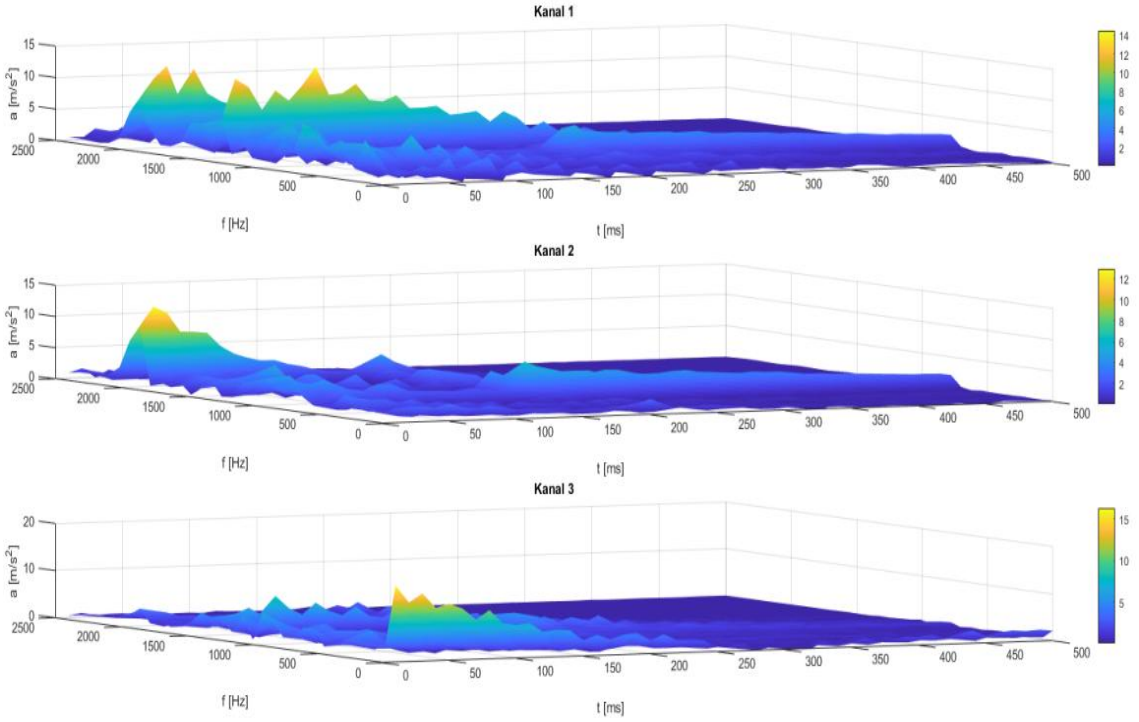
64. PN-EN 571-1:1999. Badania nieniszczące. Badania penetracyjne. Zasady ogólne
65. PN-EN 970:1999. Spawalnictwo. Badania nieniszczące złączy spawanych. Badania wizualne.
66. Pollock A.: Probability of Detection for Acoustic Emission, Journal of Acoustic Emission, 2007
67. Radiography in Modern Industry, Fourth Edition, Eastman Kodak Company, Rochester, New York, 1980
68. Rodwell P. C.: Industrial Radiography Safety: Best Practices, AMMTIAC Quarterly, 2008
69. Rolbovsky M.: Vibration-based damage detection in concrete structures using modal force residuals, Slovak Journal of Civil Engineering, 2008
70. Ross R. J., Geske E. A., Larson G. H., Murphy J. F.: Transverse Vibration Nondestuctive Testing Using a Personal Computer, U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1991
71. Rudowski G. Termowizja i jej zastosowanie. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności Warszawa 1978
72. Runnemalm A.: Vibration Induced Disturbances in Automatic Non-destructive Testing, 18th World Conference on Nondestructive Testing, 2012
73. Sanchez P. S., Negro P. L., Garcia-Fogeda P.: Vibration-Based Method for Damage Detection at Welded Beams and Rods, Latin American Journal of Solids and Structures, 2016
74. Sim C. W., Chau F. S., Toh S. L.: Vibration analysis and non-destructive testing with real-time shearography, Optics & Laser Technology, 1995
75. Sosiński A.: Spawanie metodą MAG nie tylko dla początkujących. Wydawnictwo: LIWONA, Warszawa 2013
76. Svoboda V., Zemlicka F.: Continuous Monitoring of Storage Tank by Acoustic Emission Method, 30th European Conference on Acoustic Emission Testing & 7th International Conference on Acoustic Emission University of Granada, 2012
77. Świderski W.: Metody i techniki termografii w podczerwieni w badaniach nieniszczących materiałów kompozytowych, Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia
78. Szeleziński A. Muc A., Murawski L.: Time - frequency dynamic characteristics 2d in the quality assesment of welded joints Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 25, No. 2, European Science Society of Powertrain and Transport Publication, Warsaw 2018
79. Szeleziński A., Muc A., Murawski L.: 2 D and 3 D time – frequency dynamic characteristics in the quality assessment of welded joints. Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin, no. 56 / 2018
80. Szeleziński A., Muc A., Murawski L.: Vibrodiagnostic of welded thin-walled plates with the usage of laser sensors in network infrastructure Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 25, No 4, European Science Society of Powertrain and Transport Publication, Warsaw 2018
81. Szeleziński A., Murawski L., Muc A., Gessela G.: Wybór końcówki młotka modalnego i miejsca uderzenia w badaniach metodą drganiową płyt spawanych. Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni 96/16
82. Szeleziński A., Muc A., Murawski L.: *Analysis concerning changes of structure damping in welded joints diagnostics*. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 24, No 4, pp. 314-320. ISSN 1231-4005, European Science Society of Powertrain and Transport Publication, Warsaw 2017.

83. Szeleziński A., Muc A., Murawski L.: Quality assessment of welded joints using the mean value distribution of amplitude spectrums calculated by the time window method. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 24, No 2, pp. 263-270. ISSN 1231-4005, European Science Society of Powertrain and Transport Publication, Warsaw 2017.
84. Szeleziński A., Murawski L., Muc A.: *Analysis of ability to detect defects in welding structures with usage of dynamic characteristics spectrums*. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 23, No 2, pp. 365-372. ISSN 1231-4005, European Science Society of Powertrain and Transport Publication, Warsaw 2016.
85. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients, NIST Physics Laboratory, http://www.nist.gov/physlab/data/xraycoef/index.cfm
86. Tay A. K., Wilson D. A., Wood R. L.: Microdamage and optical signal analysis of impact induced fracture in smart structures, *Proc. SPIE*, 1990
87. Tennyson R. C., Mufti A. A., Rizkalla S., Tadros G., Benmokrane B.: Structural health monitoring of innovative bridges in canada with fibre optic sensors, *Smart Mater. Struct*, 2001
88. Uhl T., Szwedo M.: Active Thermografy and it's application for damage detection in mechanical structure, Diagnostyka'4, 2007
89. Uhl T.: Współczesne metody monitorowania i diagnozowania konstrukcji. Wyd. Fundacja im. Wojciecha Świętosławskiego na Rzecz Wspierania Nauki i Rozwoju Potencjału Naukowego w Polsce, Gliwice, 2010, 193–254.
90. Vospernig M., Reiterer M., Vill M.: Simplified Crack Appearance Monitoring at Welded Joints with Strain Gauges, 6th European Workshop on Structural Health Monitoring, 2013
91. Vukelić, Goran; Murawski, Lech; Recho, Naman; Vizentin, Goran: *Marine structural failures: causes and analysis tools*. 18th Annual General Assembly of the International Association of Maritime Universities, Varna, Bulgaria, Global perspectives in MET: Towards Sustainable, Green and Integrated Maritime Transport, pp. 77-86 (ISBN: 978-954-8991-98-8), 11-14.10.2017.
92. Więcek B., Perkowski J., Wysocki M.: Zastosowanie termowizji do badań architektonicznych obiektów zabytkowych. Prace Instytutu Elektrotechniki, zeszyt 245, 2010
93. www.e-spawalnik.pl
94. www.nde-ed.org
95. www.ndt.pl
96. Wysocka-Fotek O.: Szacowanie wielkości i położenia defektów podpowierzchniowych za pomocą impulsowej termografii podczerwieni, Instytut podstawowych problemów techniki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa, 2011
97. Xin Li: Eddy Current Techniques for Non-destructive Testing of Carbon Fibre Reinforced Plastic (CFRP), The University of Manchester, 2012
98. Zergoug M., Lebaila S., Kamel G.: Characterization of the corrosion by eddy current, IEIA, 2005
99. Zieliński T.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów, Wydawnictwo WKŁ, 2009 r., ISBN: 978-83-206-1640-8

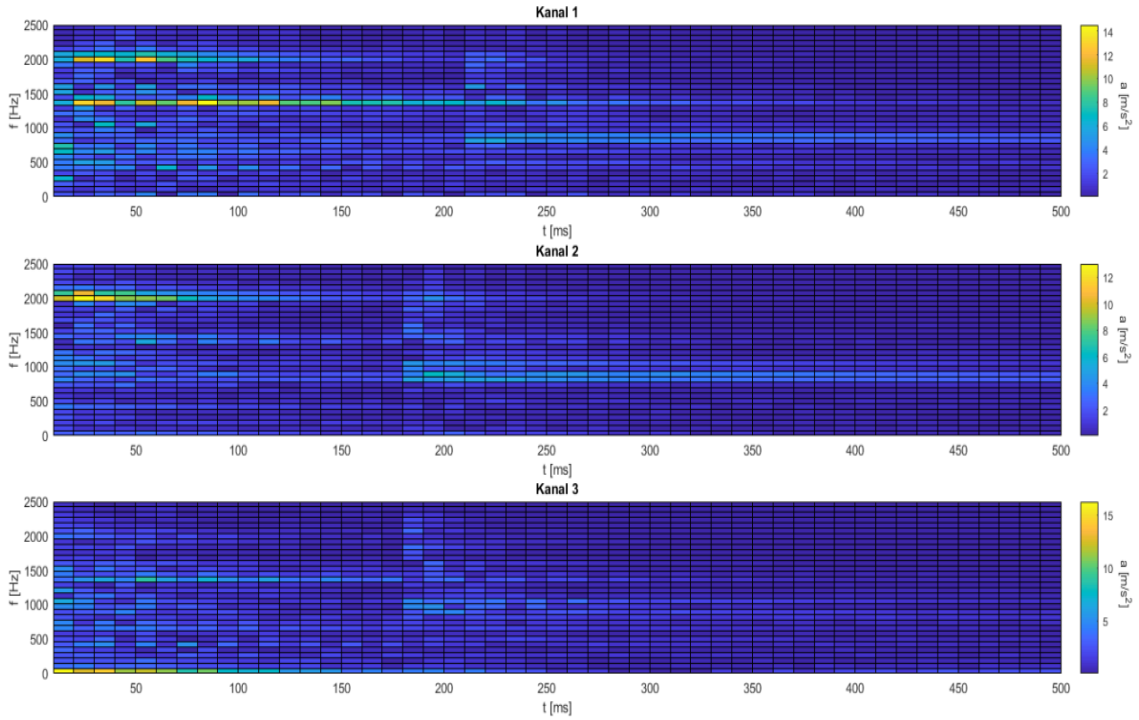
ZAŁĄCZNIKI

Załącznik nr 1. Charakterystyki czasowo – częstotliwościowa 3D i 2D uzyskane podczas badań płyt P1-P7

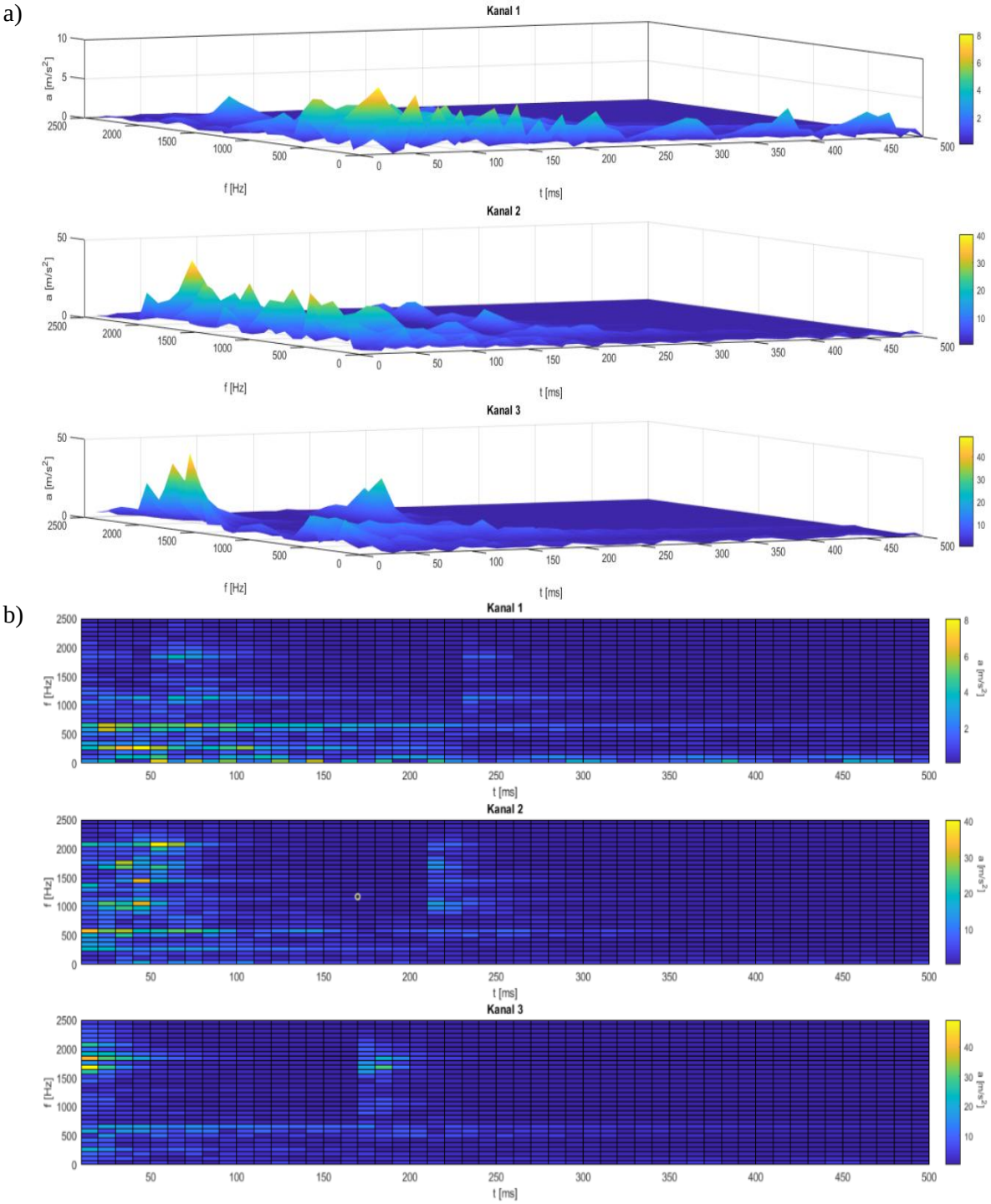
a)



b)

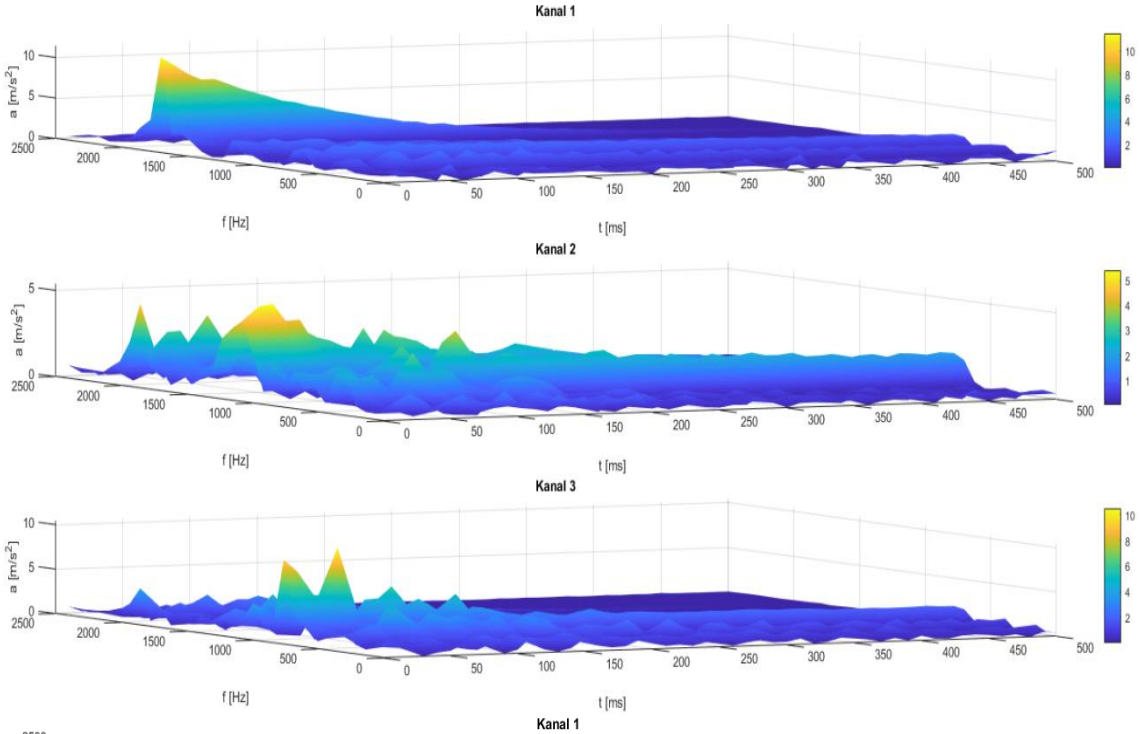


Rys. Z1.1. a) Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 3D dla płyty bez połączenia spawanego - P1, b) charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 2D dla płyty bez połączenia spawanego – P1

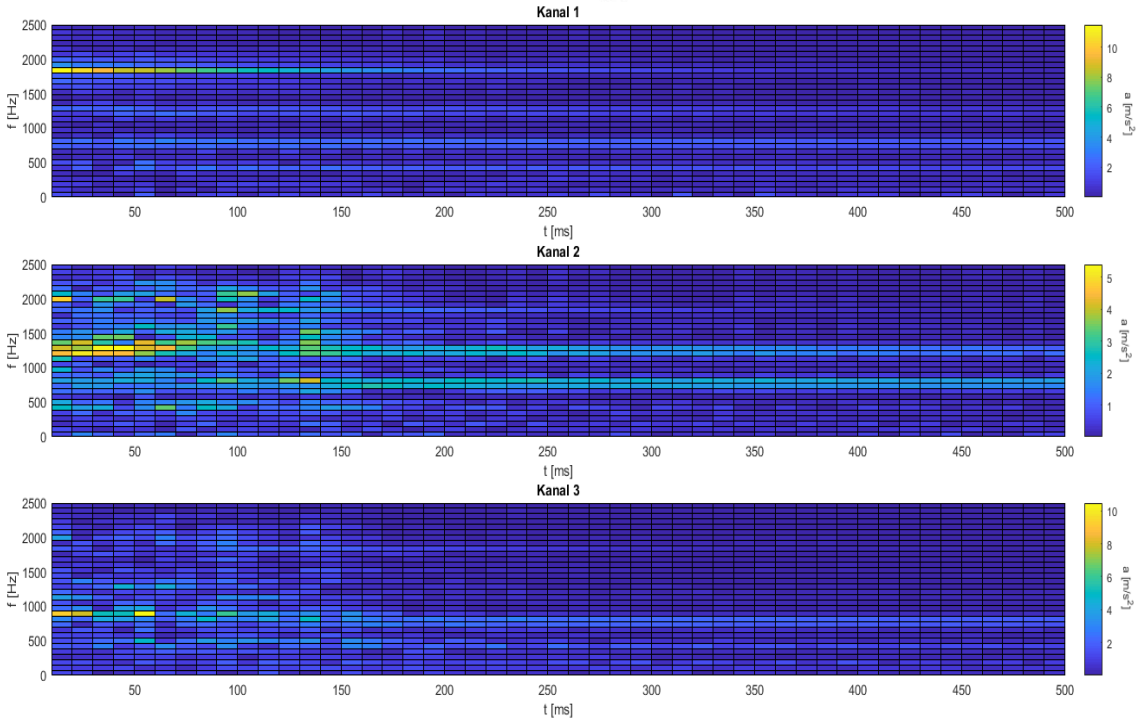


Rys. Z1.2. a) Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 3D dla płyty P2 b) charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 2D płyty P2

a)

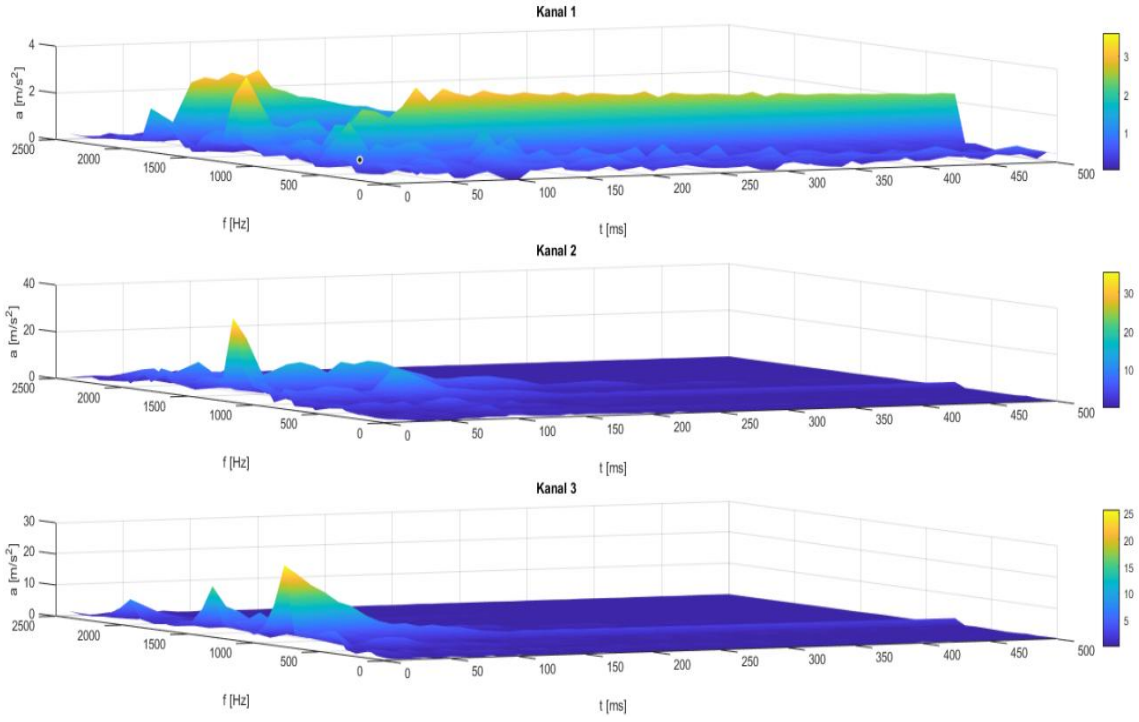


b)

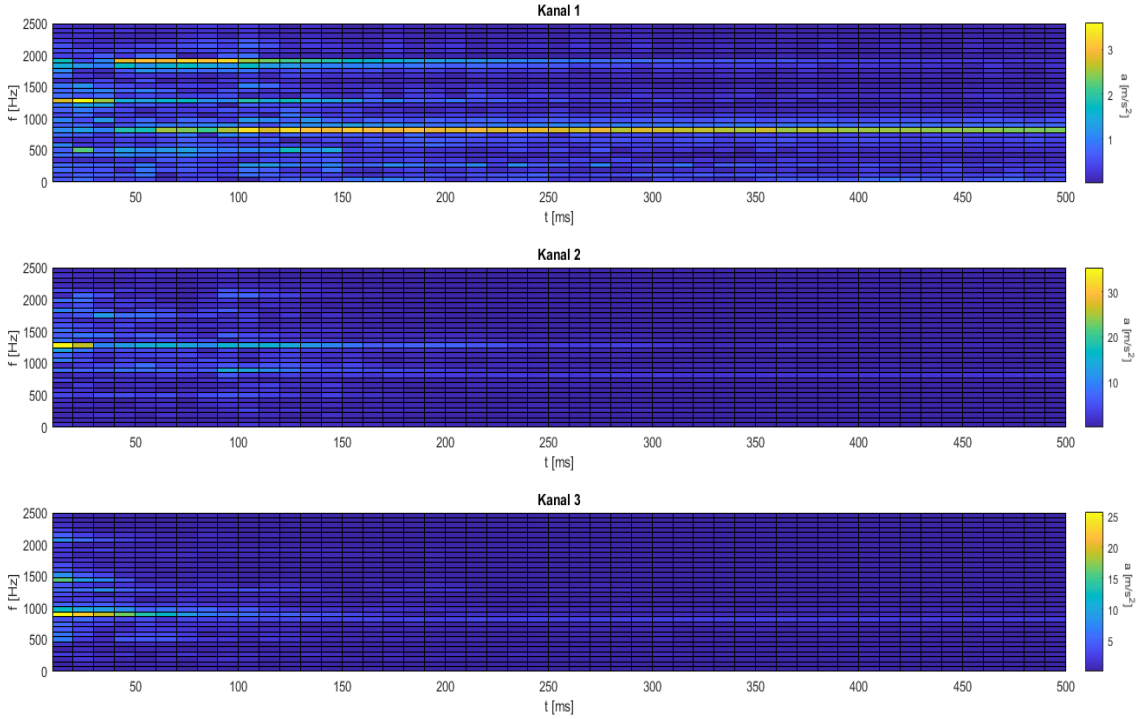


Rys. Z1.3. a) Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 3D dla płyty P3 b) charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 2D płyty P3

a)

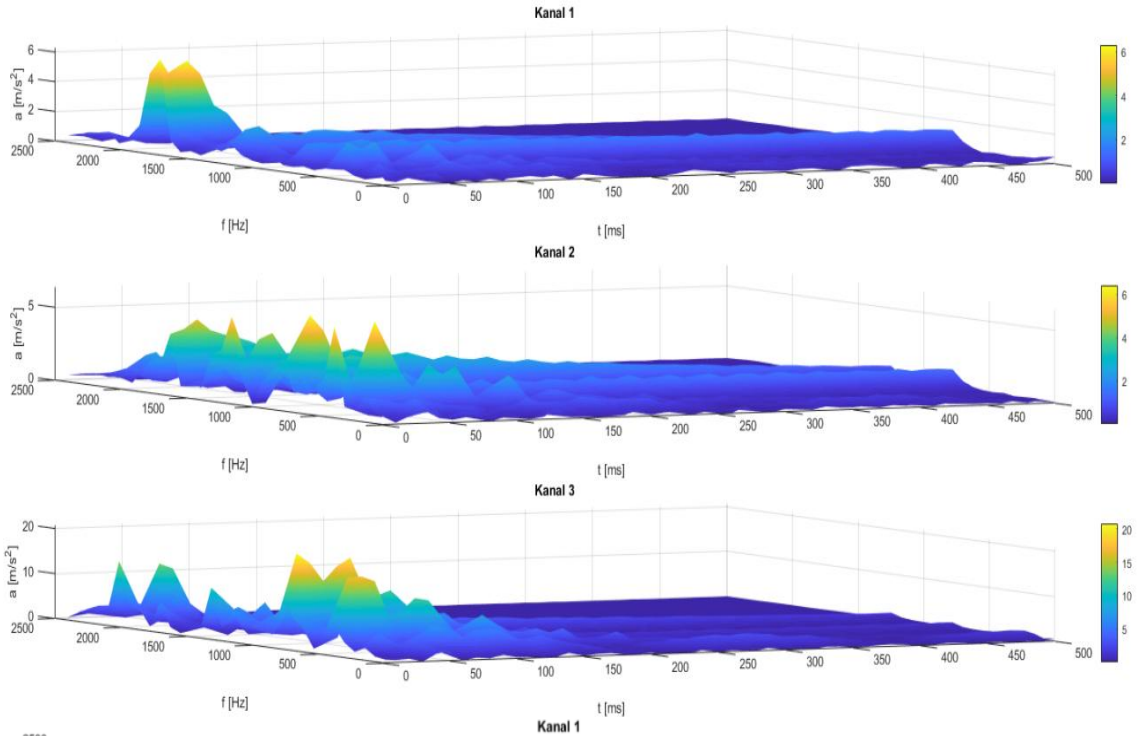


b)

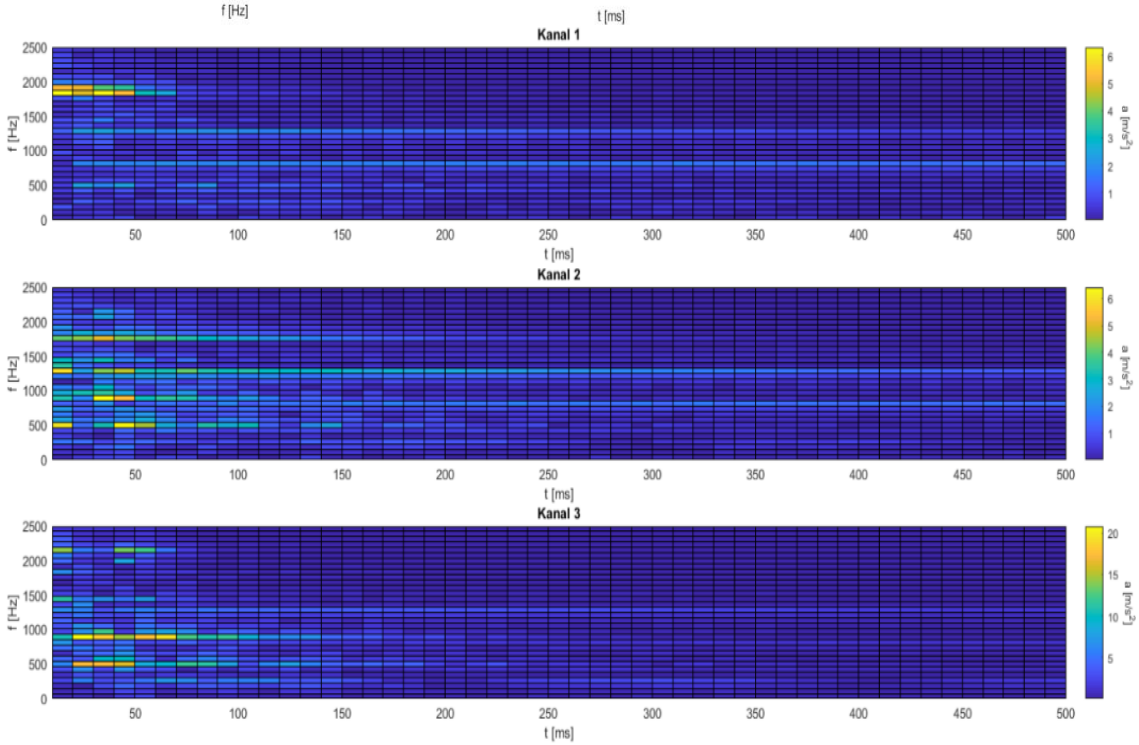


Rys. Z1.4. a) Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 3D dla płyty P4 b) charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 2D płyty P4

a)

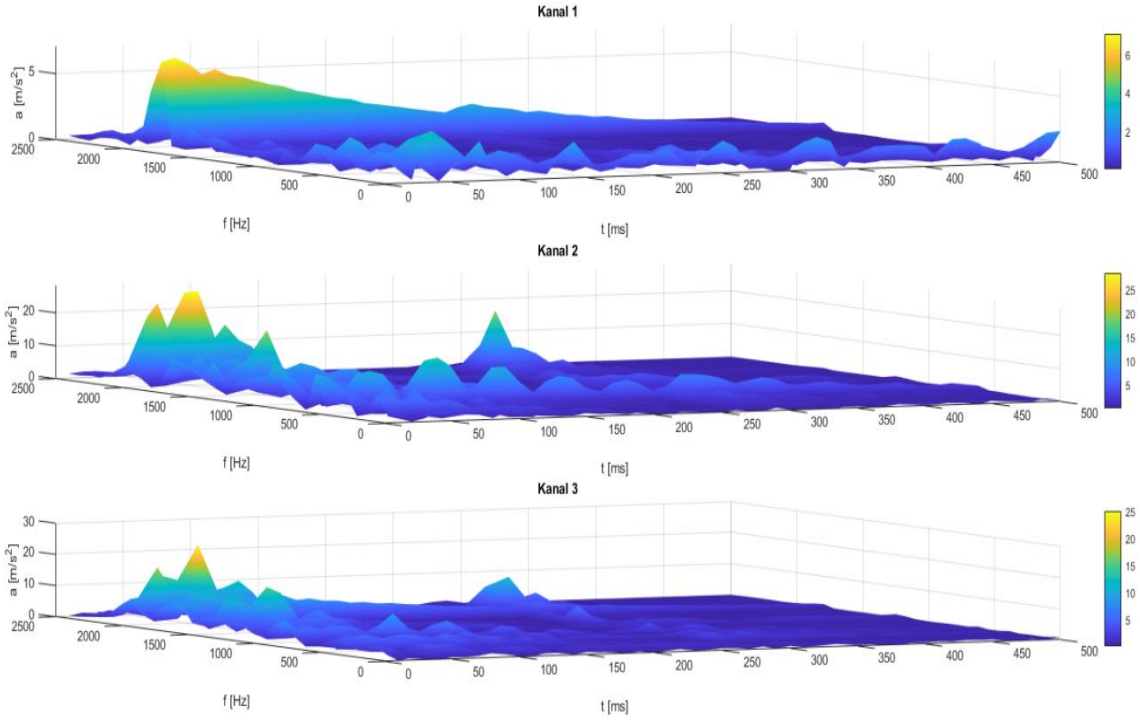


b)

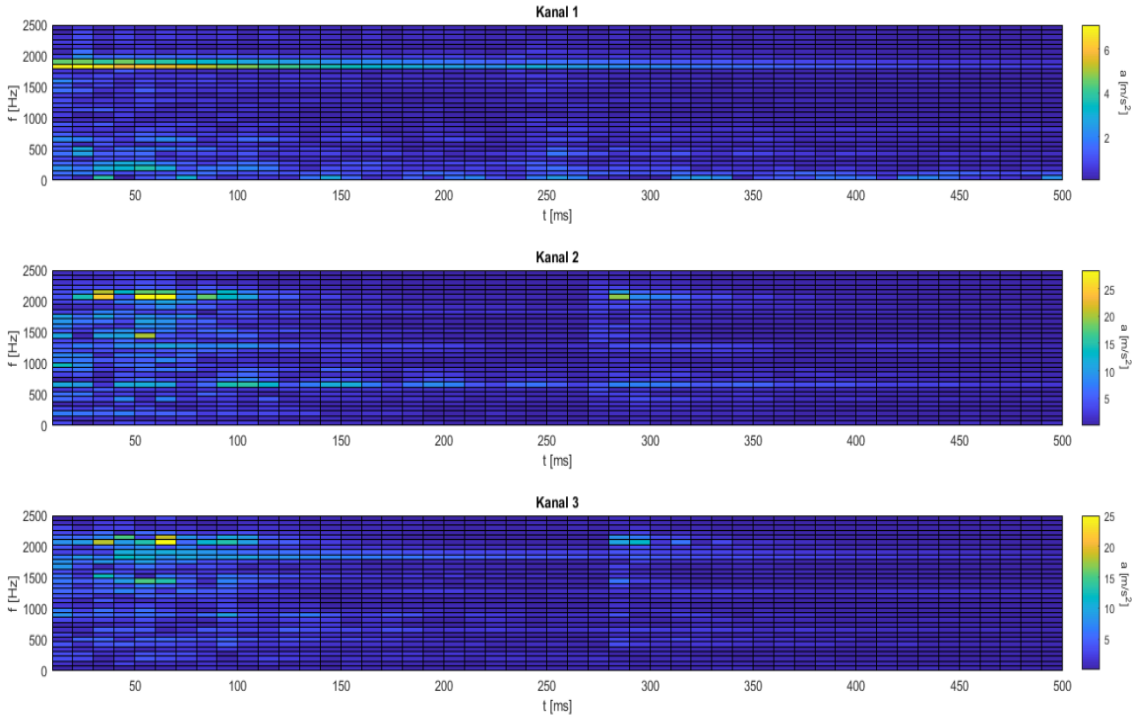


Rys. Z1.5. a) Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 3D dla płyty P5 b) charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 2D płyty P5

a)

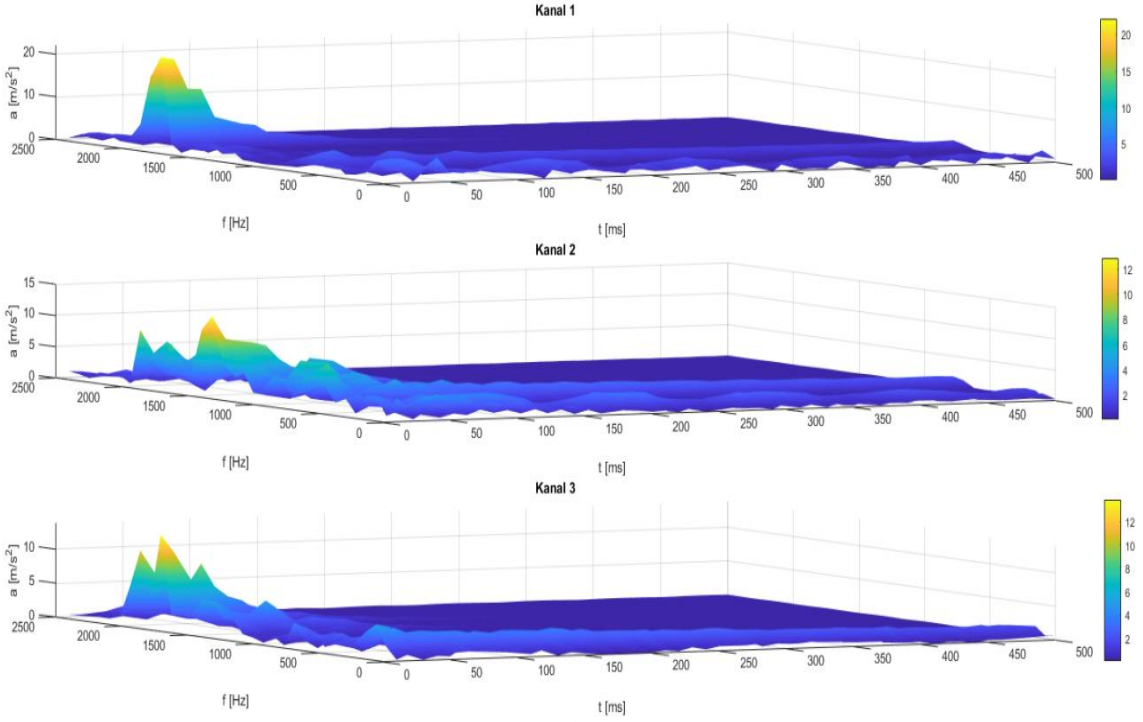


b)

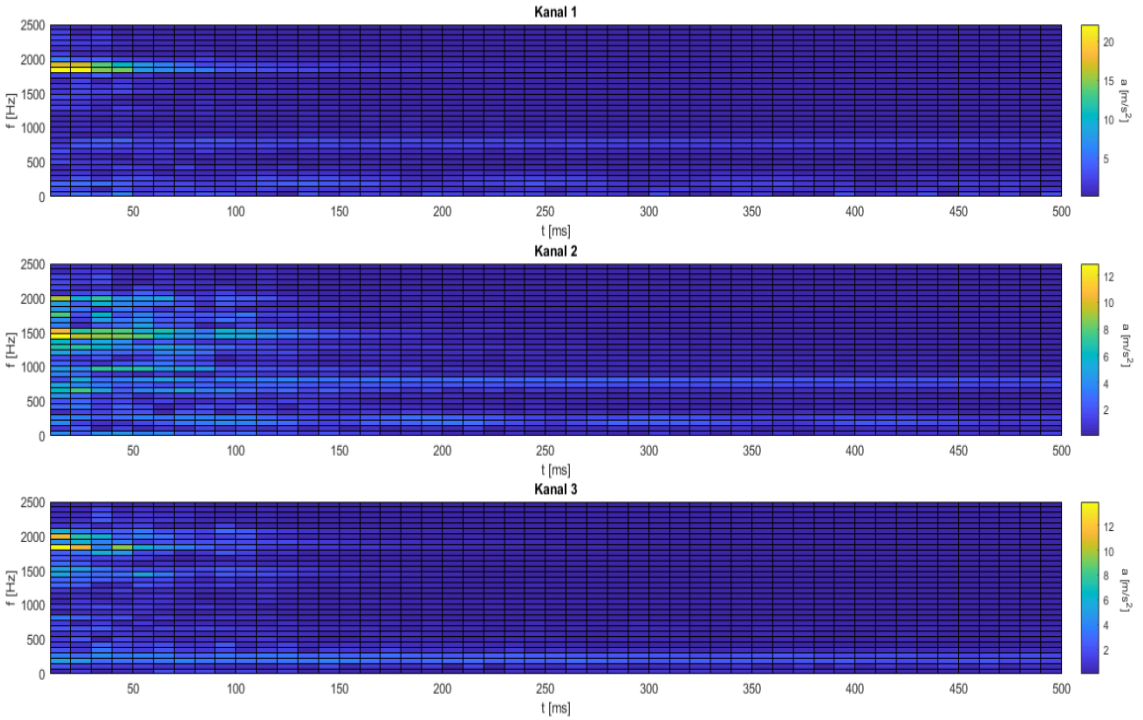


Rys. Z1.6. a) Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 3D dla płyty P6 b) charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 2D płyty P6

a)

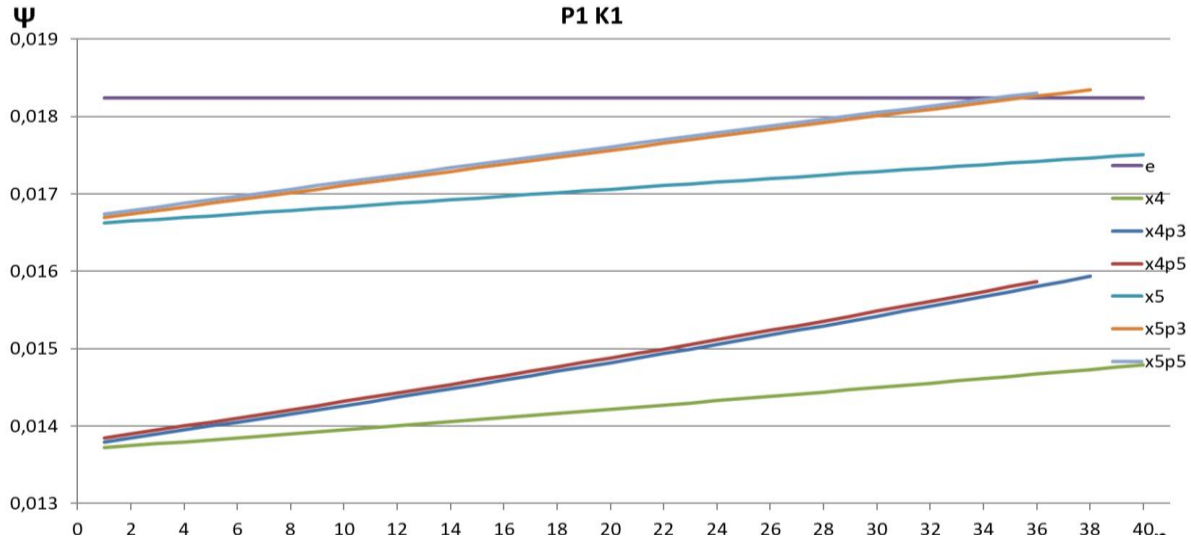


b)

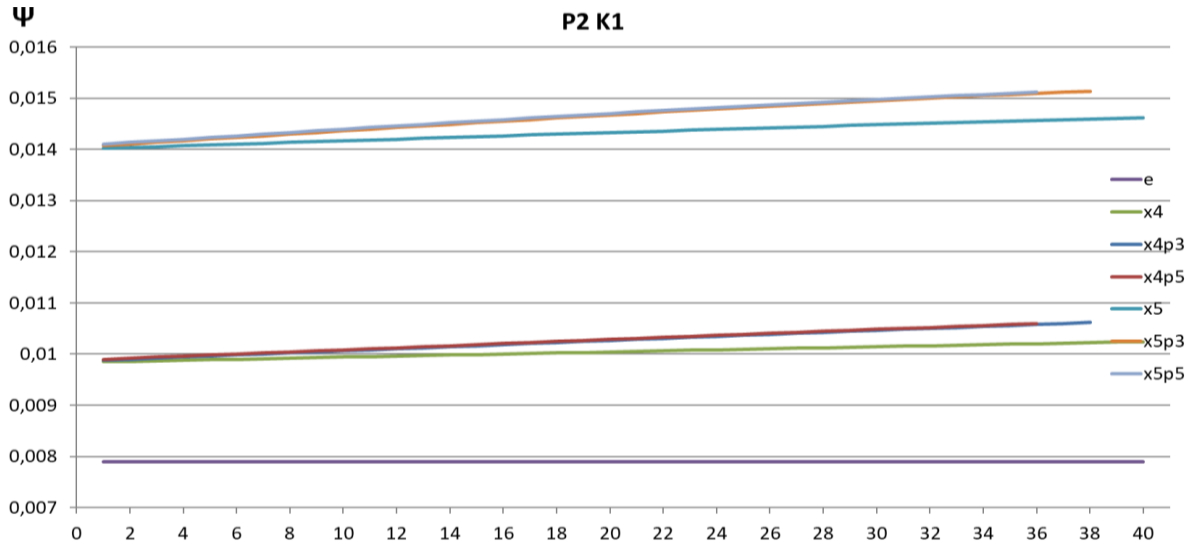


Rys. Z1.7. a) Charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 3D dla płyty P7 b) charakterystyka czasowo – częstotliwościowa 2D płyty P7

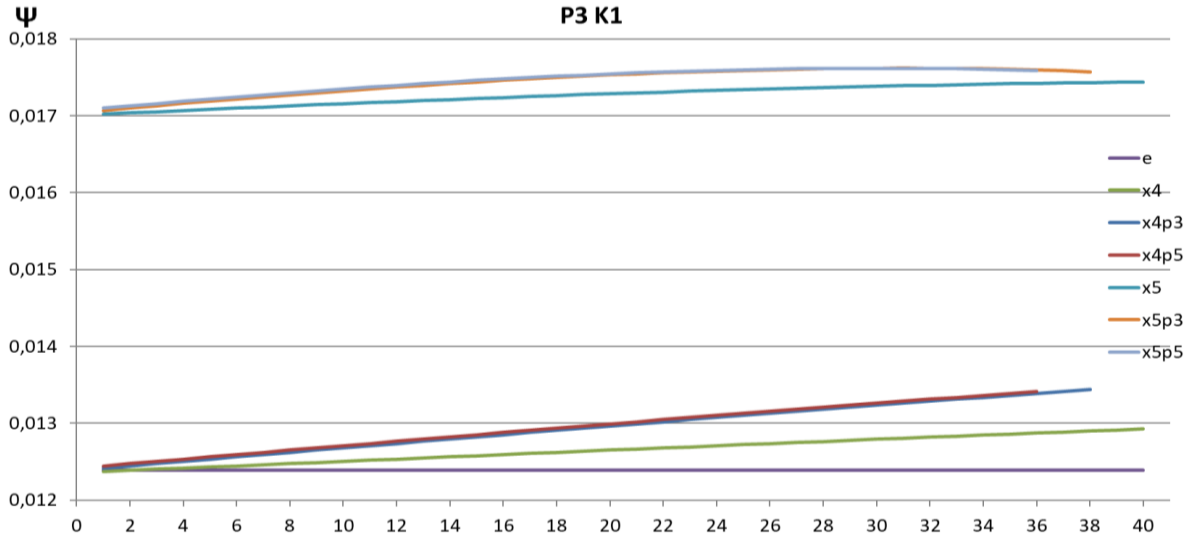
Załącznik nr 2. Rozkłady dekrementów tłumienia dla uzyskane podczas badań płyt P1-P7



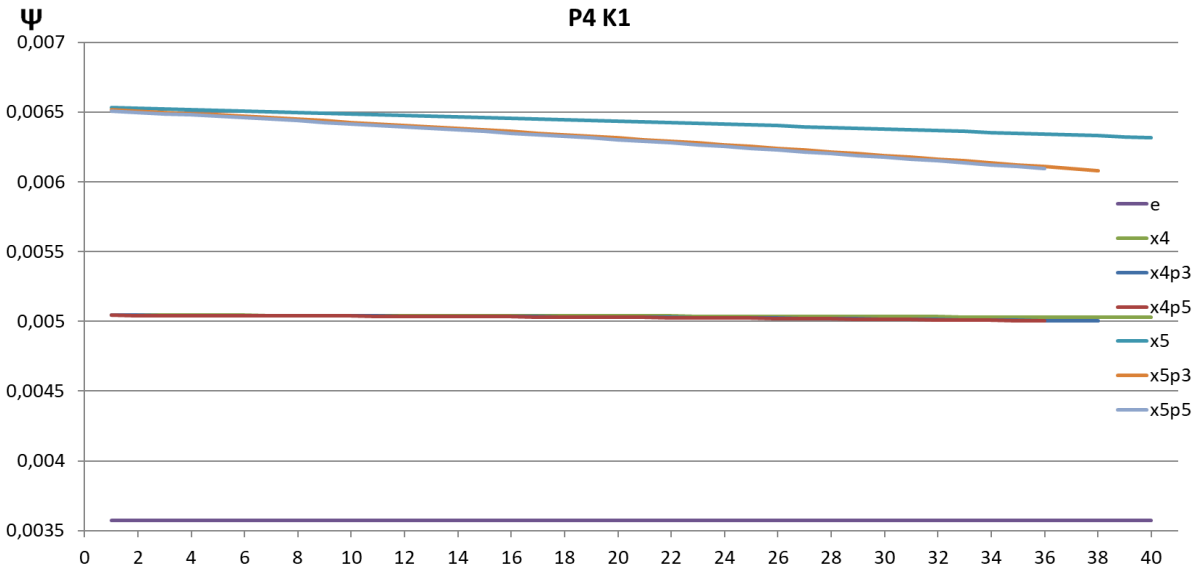
Rys. Z2.1. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty P1 – kanał 1



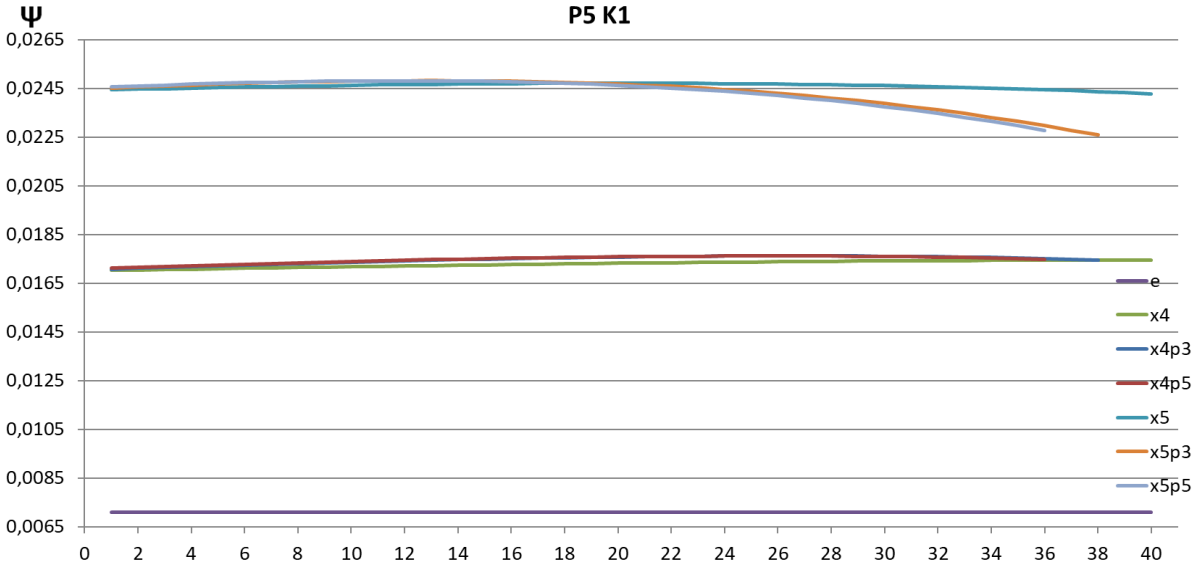
Rys. Z2.2. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty P2 – kanał 1



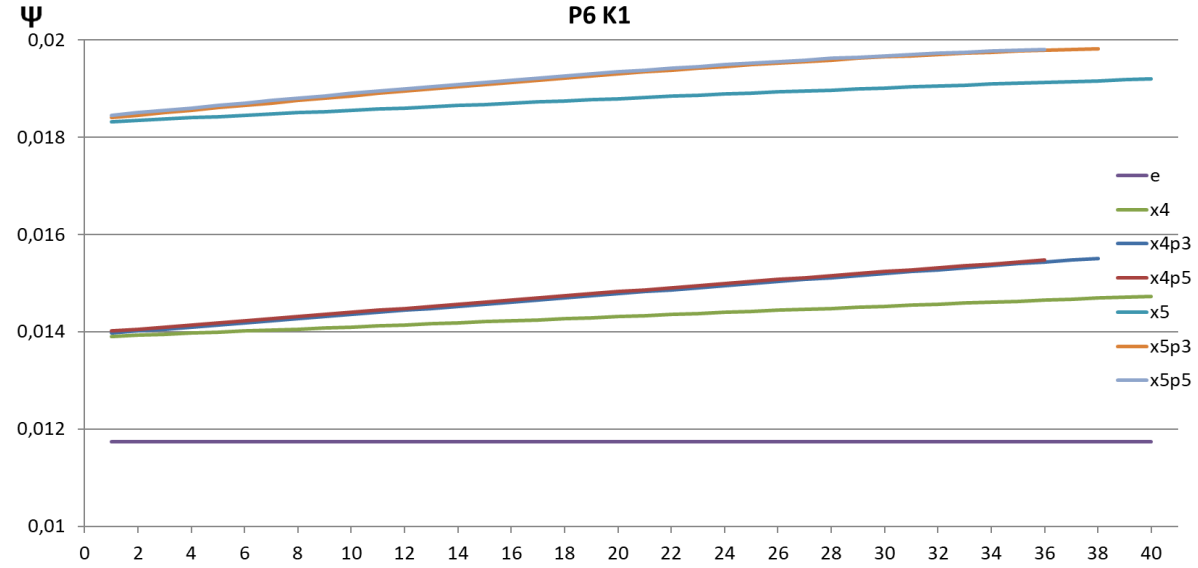
Rys. Z2.3. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty P3 – kanał 1



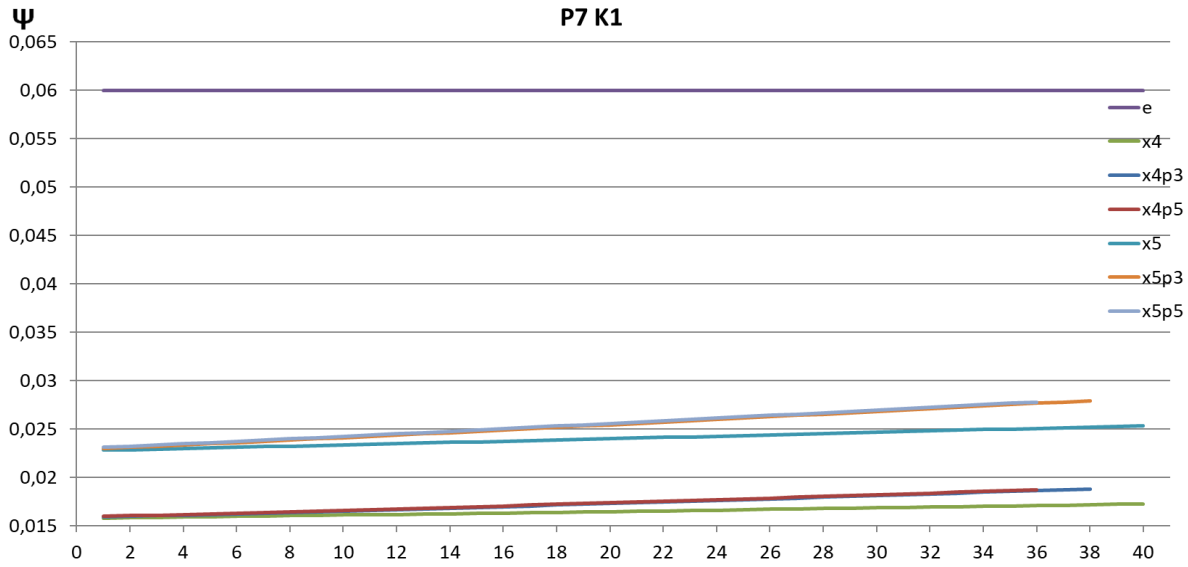
Rys. Z2.4. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty P4 – kanał 1



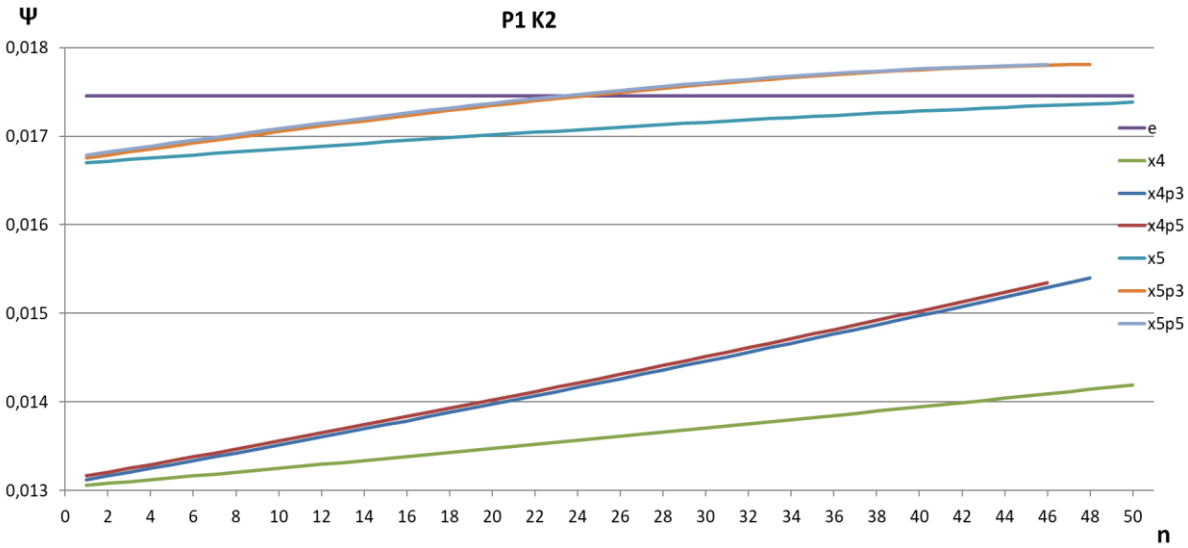
Rys. Z2.5. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty P5 – kanał 1



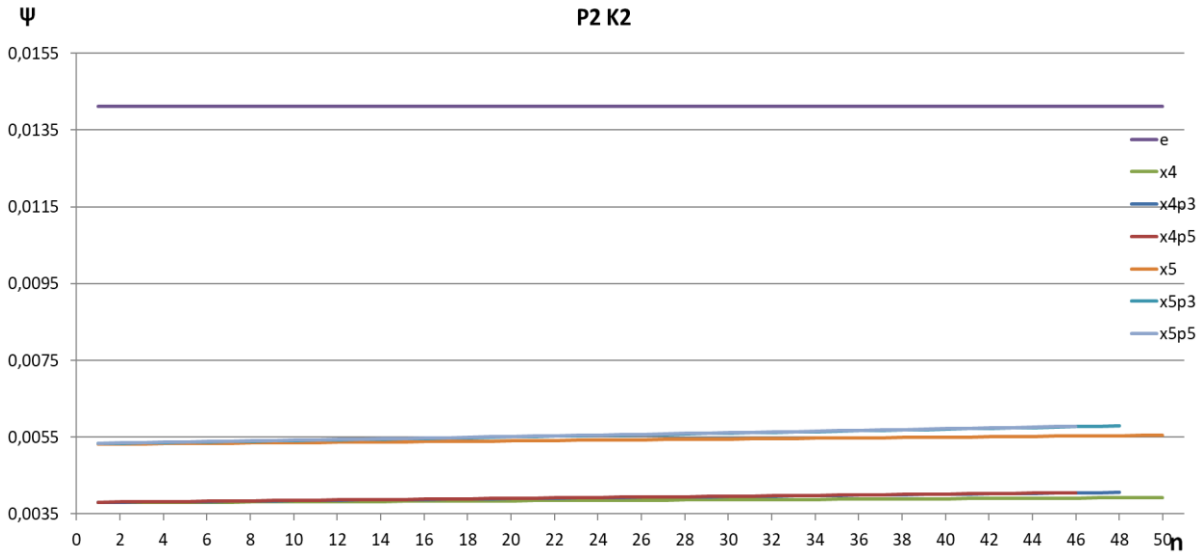
Rys. Z2.6. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty P6 – kanał 1



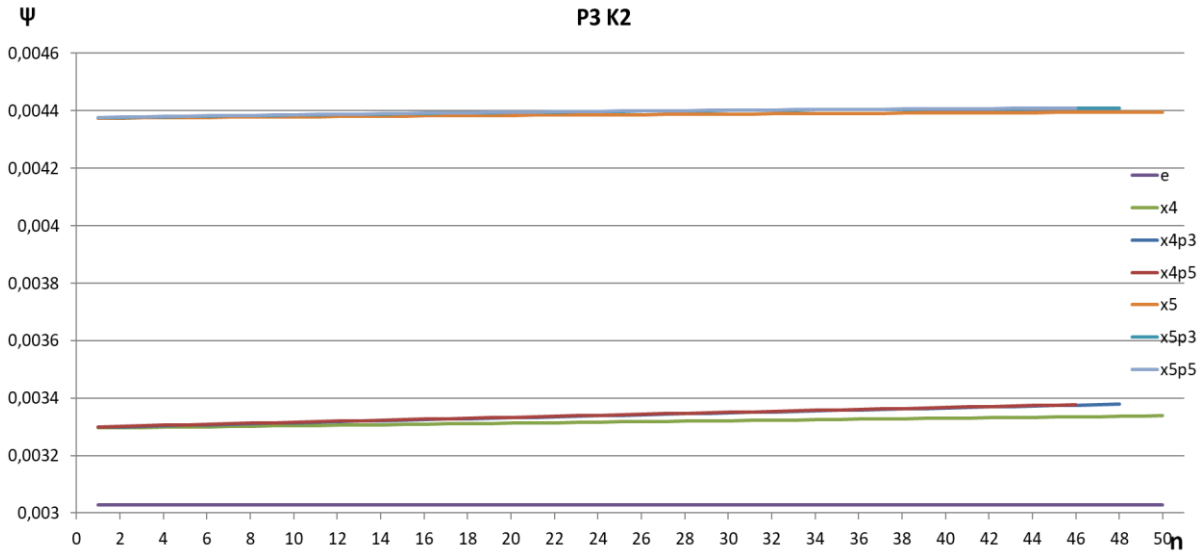
Rys. Z2.7. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty P7 – kanał 1



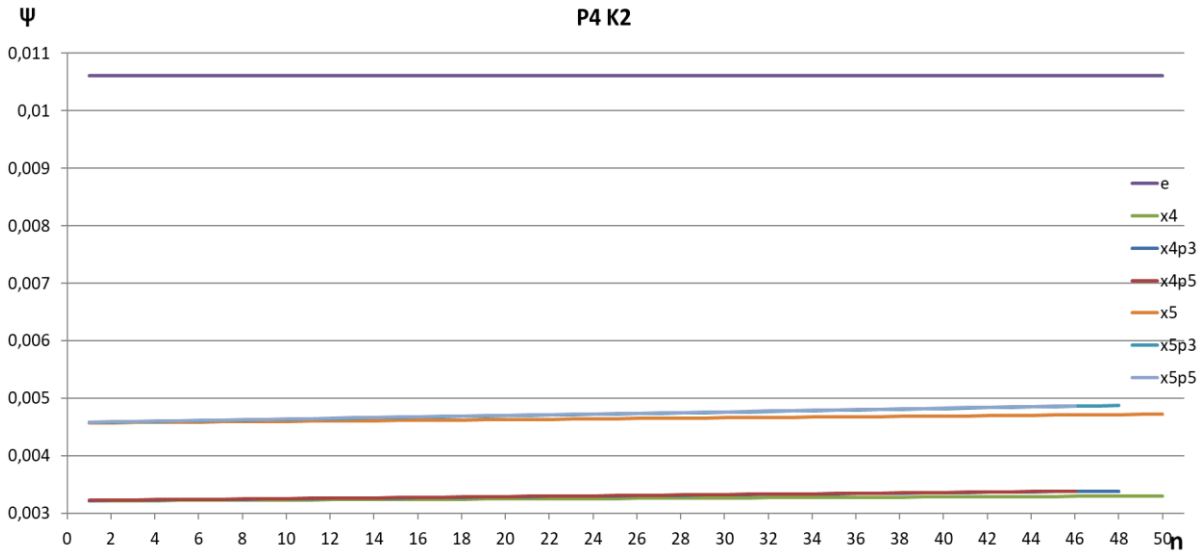
Rys. Z2.8. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty P1 – kanał 2



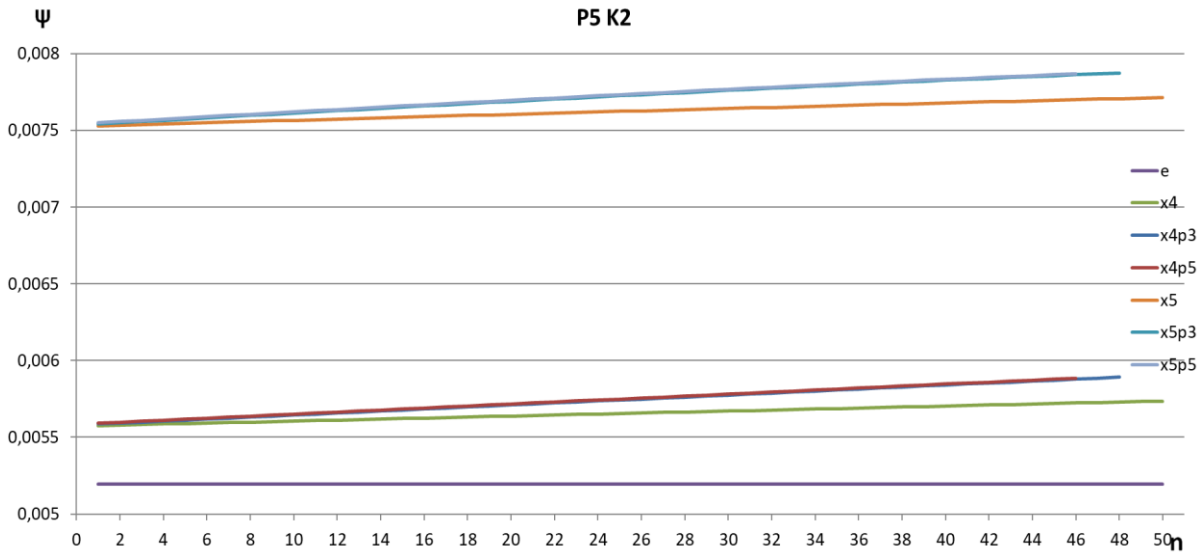
Rys. Z2.9. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty P2 – kanał 2



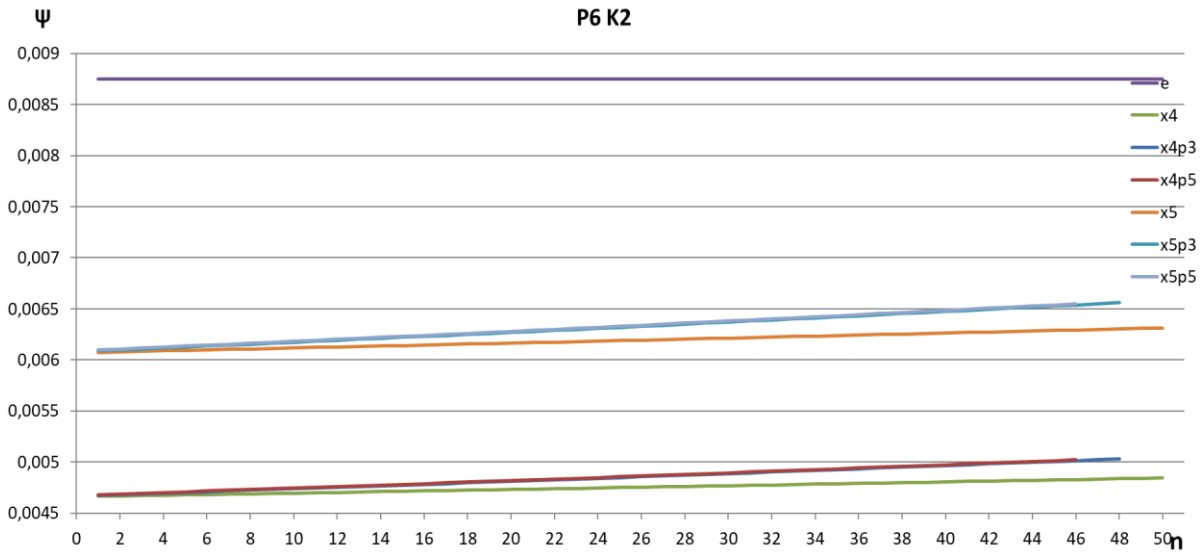
Rys. Z2.10. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty P3 – kanał 2



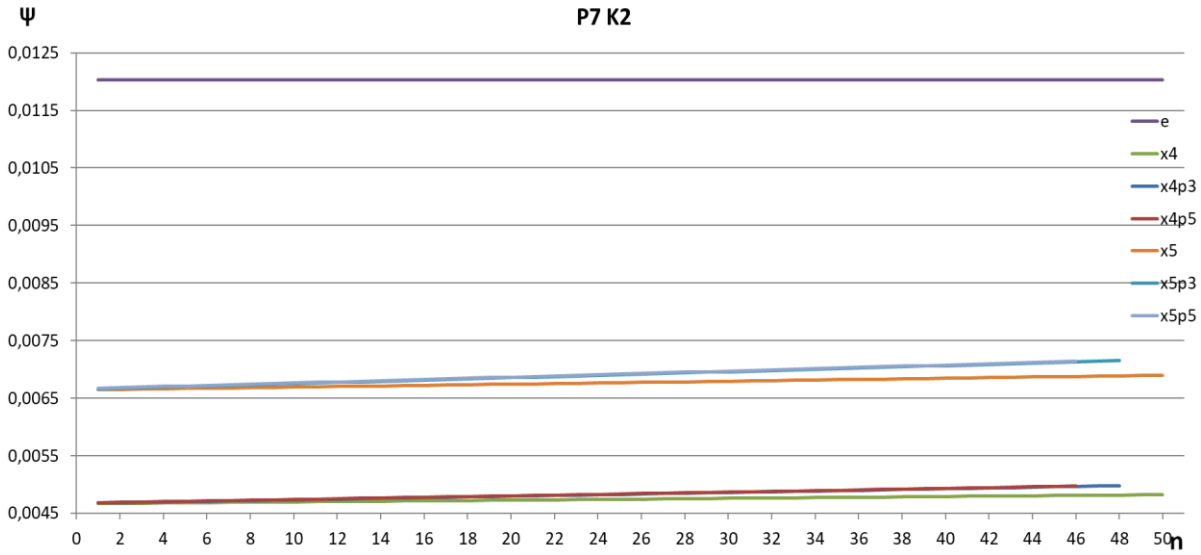
Rys. Z2.11. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty P4 – kanał 2



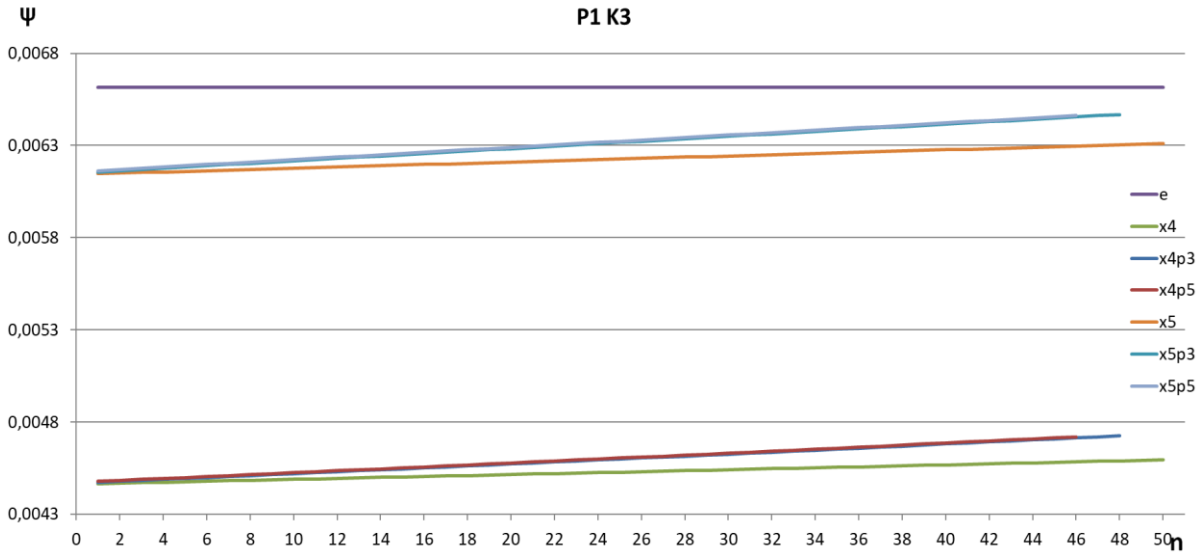
Rys. Z2.12. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty P5 – kanał 2



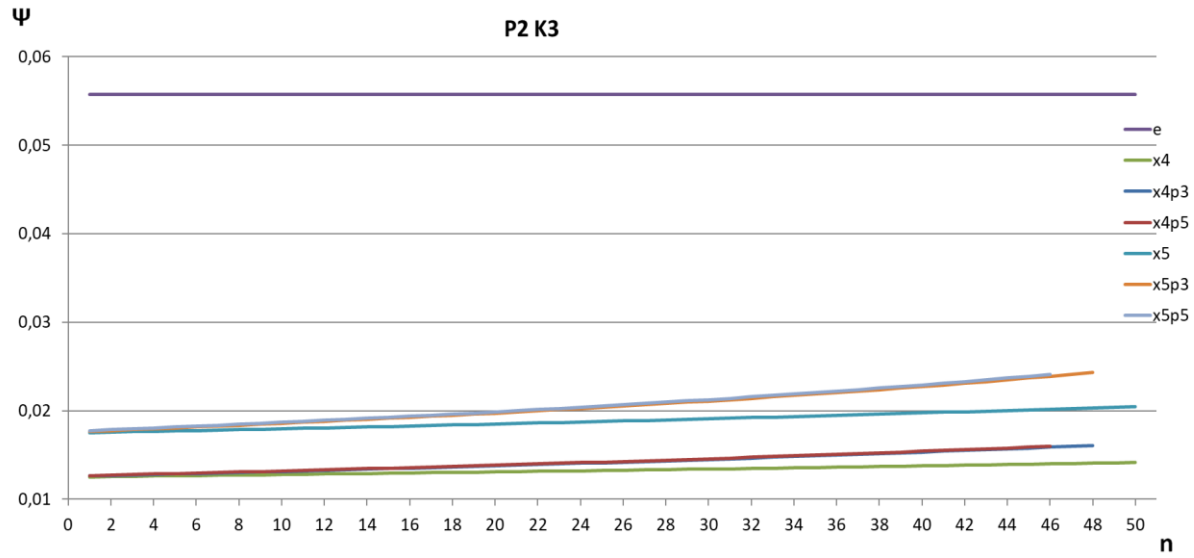
Rys. Z2.13. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty P6 – kanał 2



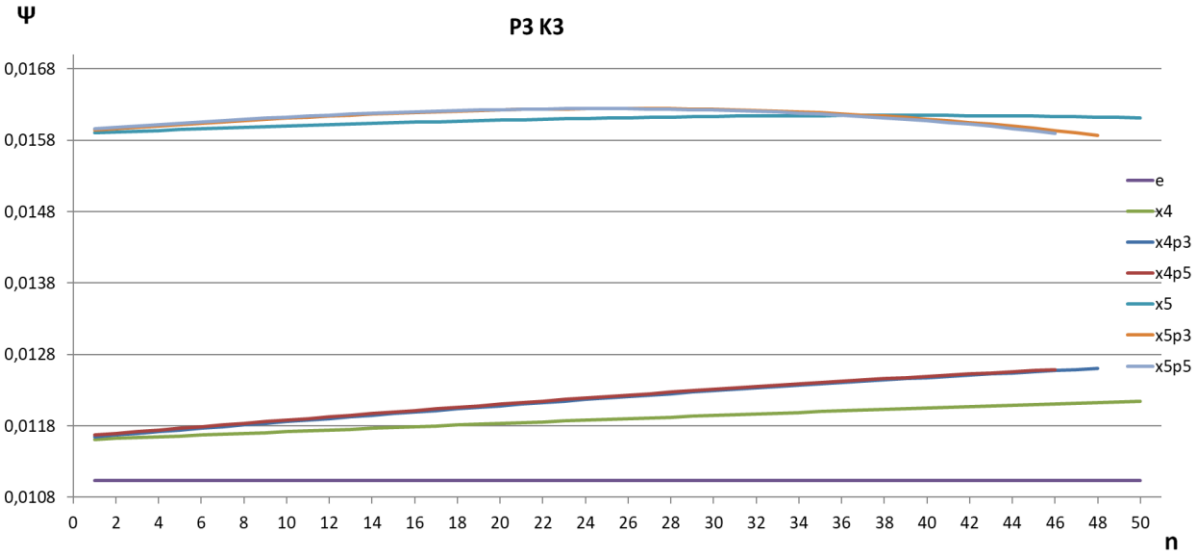
Rys. Z2.14. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty P7 – kanał 2



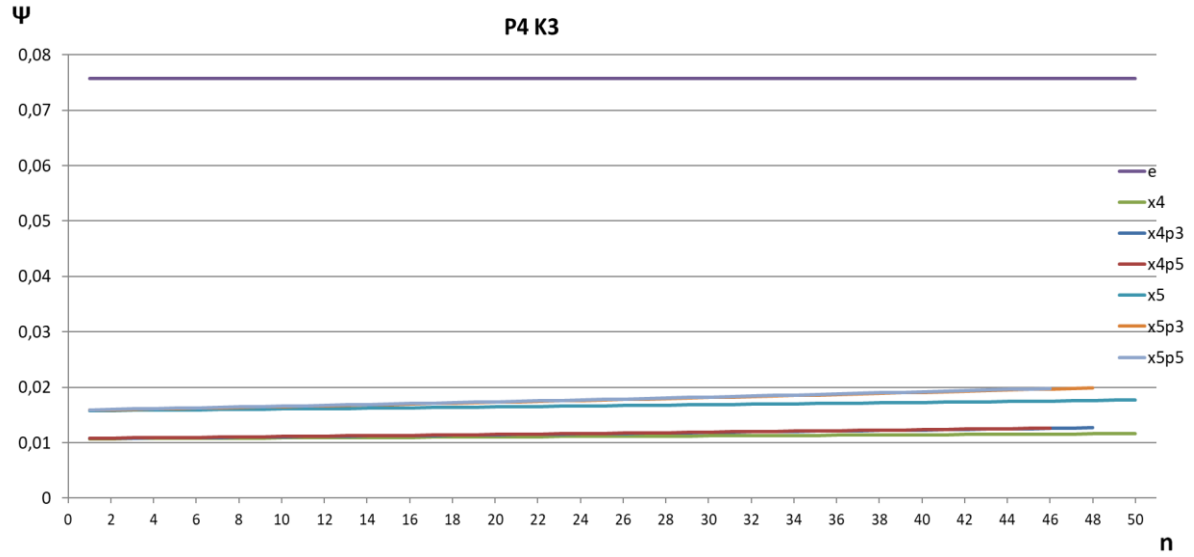
Rys. Z2.15. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty P1 – kanał 3



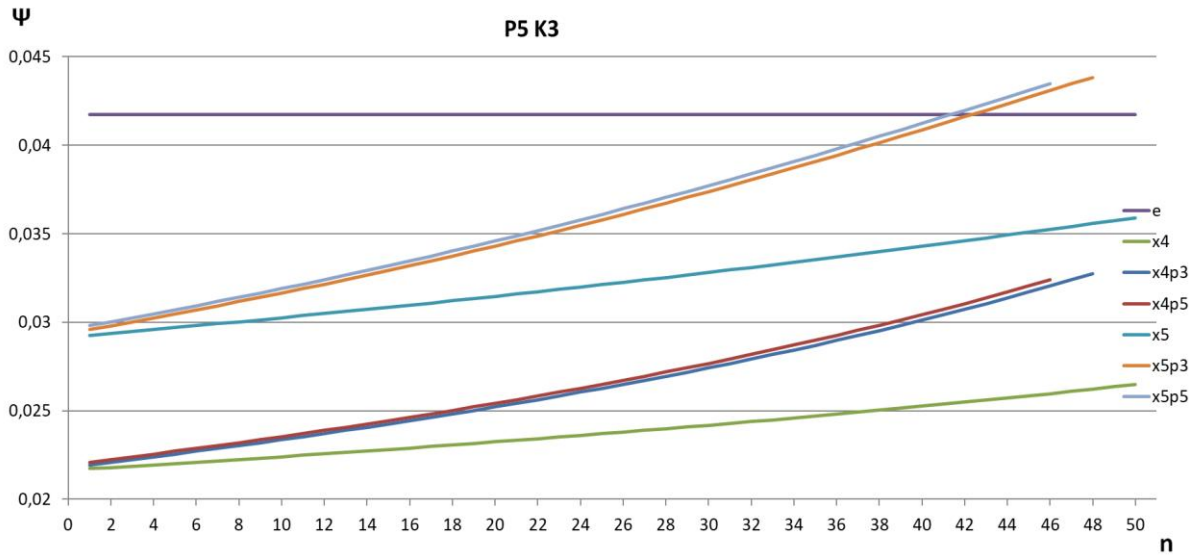
Rys. Z2.16. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty P2 – kanał 3



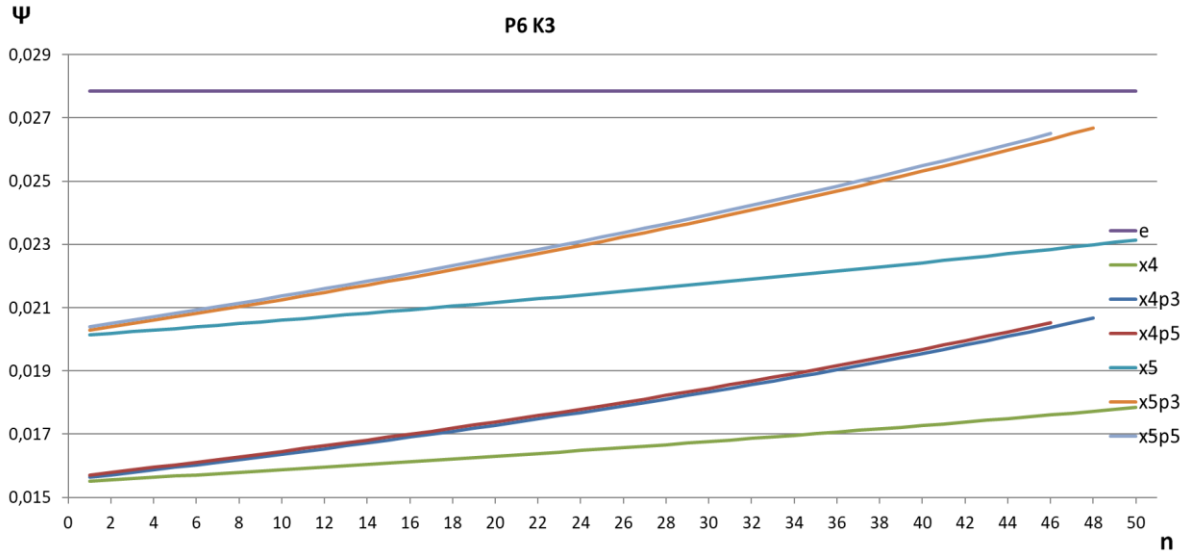
Rys. Z2.17. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty P3 – kanał 3



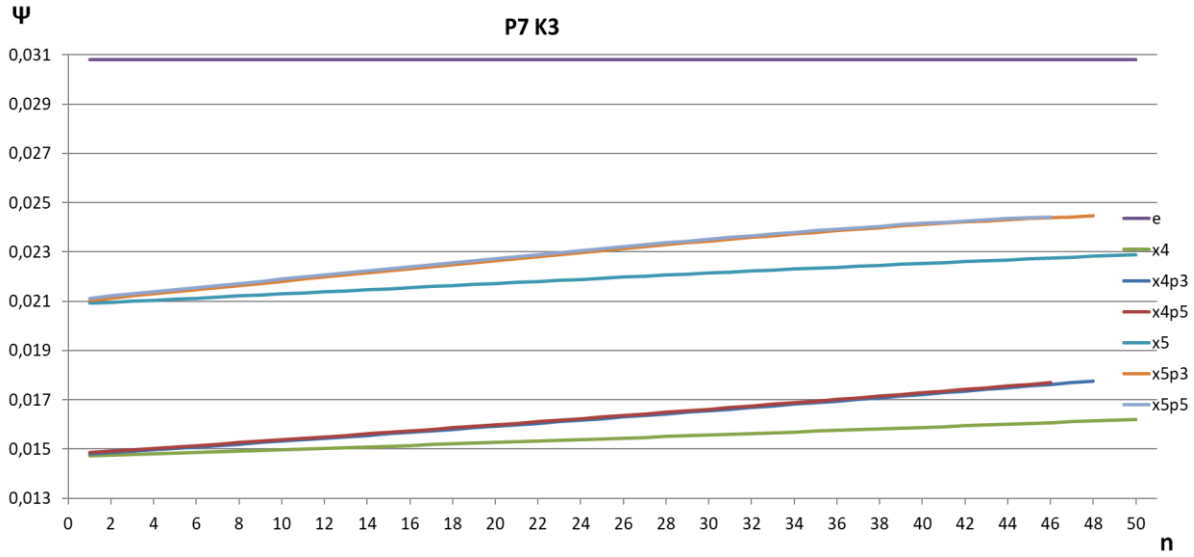
Rys. Z2.18. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty P4 – kanał 3



Rys. Z2.19. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty P5 – kanał 3



Rys. Z2.20. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty P6 – kanał 3



Rys. Z2.21. Rozkłady dekrementów tłumienia dla płyty P7 – kanał 3

Załącznik nr 3. Zestawienie wybranych skryptów MATLABA wykorzystanych do analiz przeprowadzonych w ramach prowadzonych badań

W załączniu zostały przedstawione wybrane skrypty wykorzystane do analiz przebiegów prędkości zarejestrowanych dla płyt spawanych z przemysłu, które zotały oznaczone od P1 do P7.

Skrypt do obliczania średniego syganłu na podstawie kilkudziesięciu pomiarów:

```
function S=srednie_sygnaly(varargin)

if nargin==1
    KATALOG=varargin{1};
else
    KATALOG='.';
end
clf
DIR=dir([KATALOG '/*.mat']);
n=24; %length(DIR);
C=cell(4,n);
smpl=zeros(1,n);
for i=1:n
    clear Channel_1_Data Channel_2_Data Channel_3_Data
Channel_4_Data;
    load([KATALOG '/' DIR(i).name]);
    C{1,i}=Channel_1_Data;
    C{2,i}=Channel_2_Data;
    C{3,i}=Channel_3_Data;
    C{4,i}=Channel_9_Data;
    smpl(i)=length(Channel_1_Data);
end
hold off;
nmin=min(smpl);
S=zeros(4,nmin);
for k=1:4
    for i=1:n
        S(k,:)=S(k,:)+C{k,i}(1:nmin)';
    end
    S(k,:)=S(k,:)/n;
    hold off;
end

xlabel('numer pr?bki')
ylabel('sygna?');
```

Skrypt do identyfikacji wielomianów przy wyznaczaniu rozkładu logarytmicznego dekremetu tłumienia:

```
clear variables; clc;
% close all

Katalog='p1';
S=srednie_sygnaly(Katalog);
licz_probek=5;
Amplituda_wygaszenia=0;

% ustawianie wykresow
Kolory={'r','g','b','k','c','m','k','r','b'};
Linie={'-','*','+','#','-','-',':',':',':'};
leg={};

for kanal=1:3
    figure(kanal); clf
        X=S(kanal,:);
        n=numel(X);
        f=5000;
        dt=1/f;
        st = 0.9;
        t=0:dt:(n-1)/f;

        % 2) OBCIECIE SYGNALU
        [maks,j]=max(abs(X));
        % Z tylu
        i=find(abs(X)>Amplituda_wygaszenia);
        % Z przodu
        if j+1<licz_probek
            licz_probek=j-1;
        end
        t=t(j-licz_probek:i(end));
        X=X(j-licz_probek:i(end));
        SYG=abs(X);
        t=t-t(1);
```

```
        p2=polyfit(t,SYG,2);
        p3=polyfit(t,SYG,3);
        p4=polyfit(t,SYG,4);
        p5=polyfit(t,SYG,5);
        x=0:0.0003:t(end);
        y2=polyval(p2,x);
        y3=polyval(p3,x);
        y4=polyval(p4,x);
        y5=polyval(p5,x);
        ex=fit(t',SYG','exp1');

    exx = ex.a * exp( ex.b*x);
        sred = sum(SYG)/length(SYG);

        err2=sum((y2 - sred).^2)/sum((SYG - sred).^2);
        err3=sum((y3 - sred).^2)/sum((SYG - sred).^2);
        err4=sum((y4 - sred).^2)/sum((SYG - sred).^2);
        err5=sum((y5 - sred).^2)/sum((SYG - sred).^2);
        errex=sum((exx - sred).^2)/sum((SYG - sred).^2);

        xx=0:0.002:t(end); %zakres do rysowania
        y22=polyval(p2,xx);
        y33=polyval(p3,xx);
        y44=polyval(p4,xx);
        y55=polyval(p5,xx);

        ex=fit(t',SYG','exp1');
        plot(t,SYG,'Color','g'); hold on; grid on;
        plot(xx,y22,'-sc',xx,y33,'-*r',xx,y44,'-ob',xx,y55,'-vm');
        plot(ex,'--k')

        tekst1=['v(t)=' num2str(p2(1)) 't^2+' num2str(p2(2)) '*t+' num2str(p2(3)) ' (R=' num2str(err2)
')'];
        tekst2=['v(t)=' num2str(p3(1)) '*t^3+' num2str(p3(2)) '*t^2+' num2str(p3(3)) '*t+' num2str(p3(4))
' (R=' num2str(err3)  ')'];
```

```
        tekst3=['v(t)=' num2str(p4(1)) '*t^4+' num2str(p4(2)) '*t^3+' num2str(p4(3)) '*t^2+'
num2str(p4(4)) '*t+' num2str(p4(5)) ' (R=' num2str(err4)  ')'];
     tekst4=['v(t)=' num2str(p5(1)) '*t^5+' num2str(p5(2)) '*t^4+' num2str(p5(3)) '*t^3+' num2str(p5(4))
     '*t^2+' num2str(p5(5)) '*t+' num2str(p5(6)) ' (R='      num2str(err5)  ')'];
        tekst5=['v(t)=' num2str(ex.a) '*e^{(' num2str(ex.b) '*t)} (R=' num2str(errex) ')'];
        legend('dane',tekst1,tekst2,tekst3,tekst4,tekst5);

        set(gca,'XLIM',[t(1) t(end)])
        xlabel('t [s]');
        ylabel('v(t) [m/s]');
        title(['Kanal ' num2str(kanal)]);
end
```

Skrypt do obliczania przestrzennych (2D i 3D) charakterysytyk czasowo-częstotliwościowych:

```
clear all; clc;
% close all
Katalog='p7';
S=srednie_sygnaly(Katalog);
START_OKNA=1; % od ktorego okna czasowego zaczynamy rysowac wykresy
ILE_WYKRESOW=12; % MAX 14 wykresow
licz_probek=5;
Amplituda_wygaszenia=0;

for kanal=1:3
        % PARAMETRY
        X=S(kanal,:);
        n=numel(X);
        f=5000;
        dt=1/f;
        t=0:dt:(n-1)/f;

        %2) OBCIECIE SYGNALU
        % Z przodu
        [maks j]=max(abs(X));
        % Z ty?u
        i=find(abs(X)>Amplituda_wygaszenia);
        if j+1<licz_probek
            licz_probek=j-1;
        end
        t=t(j-licz_probek:i(end));
        X=X(j-licz_probek:i(end));
        Okno_czasowe=10;% [ms]
        n=f*Okno_czasowe/1000;
        SYG_ORG=X; % FFT ze sygnalu
        L=length(SYG_ORG);
        NFFT = 2^nextpow2(L);
        FFTX = fft(SYG_ORG,NFFT)/L;
        ff = f/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
        MAX_FFT=max(2*abs(FFTX(1:NFFT/2+1)));
        MAX_AMP=max(abs(X));
        j=1;

        for i=START_OKNA*n:n:length(t)-n
            SYG=X(i:i+n); % FFT ze sygnalu
            T=t(i:i+n);
            L=length(SYG);
            NFFT = 2^nextpow2(L);
            FFTX = fft(SYG,NFFT)/L;
            ff = f/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
            SYG_FFT=2*abs(FFTX(1:NFFT/2+1))/MAX_FFT;
            time(j)=(T(1)-t(1))*1000;
            FFT(:,j)=SYG_FFT;
            j=j+1;
        end
        figure(2);
        subplot(3,1,kanal);
```

```
        plot((t-t(1))*1000,SYG_ORG); grid on;
        set(gca,'XLim',[0 (t(end)-t(1))*1000])
        xlabel('t [ms]');
        ylabel('X(t)');
        title(['Kanal ' num2str(kanal)]);
        figure(1);
        subplot(3,1,kanal);
        cla;
        [TIME,FRQ]=meshgrid(time,ff);
        surf(TIME,FRQ,FFT); shading interp
        colorbar;
        view(-26,28);
        xlabel('t [ms]');
        ylabel('f [Hz]');
        zlabel('|X(f)|');
        title(['Kanal ' num2str(kanal)]);
        figure(3);
        subplot(3,1,kanal);
        pcolor(TIME,FRQ,FFT);
        xlabel('t [ms]');
        ylabel('f [Hz]');
        title(['Kanal ' num2str(kanal)]);
        colorbar;
end
```

Skrypt do analizy przebiegów prędkości za pomocą metody okien czasowych – zestawienie okien czasowych w ramach danej próbki:

```
clear all; clc;
% close all
Katalog='p2';
S=srednie_sygnaly(Katalog);
START_OKNA=1; % OD ktorego okna czasowego zaczynamy rysowac wykresy
ILE_WYKRESOW=12;
licz_probek=5;

% ile_kat=5;
Kolory={'r','g','b','k','c','m','k','r','g','b','k','c','m','k'};
Linie={'-','-','-','-','-','-','-',':',':',':',':',':',':'};
for kanal=1:3
figure(kanal); cla; clear leg
         % Odczyt kanalow
        X=S(kanal,:);
         % PARAMETRY
        n=numel(X); % liczba  danych w kanale
        f=5000; % Hz
        dt=1/f;
        t=0:dt:(n-1)/f;
         %2) OBCIECIE SYGNALU
         % Z przodu
        [maks j]=max(abs(X));
        % Z tylu
        Amplituda_wygaszenia=0;
        i=find(abs(X)>Amplituda_wygaszenia);
        if j+1<licz_probek
            licz_probek=j-1;
        end
        t=t(j-licz_probek:i(end));
        X=X(j-licz_probek:i(end));
        Okno_czasowe=10;% [ms]
        n=f*Okno_czasowe/1000;
        SYG=X; % FFT ze sygnalu X
```

```
        L=length(SYG);
        NFFT = 2^nextpow2(L);
        FFTX = fft(SYG,NFFT)/L;
        ff = f/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
        MAX_FFT=max(2*abs(FFTX(1:NFFT/2+1)));
        MAX_AMP=max(abs(X));
        wyk=1;
        for i=START_OKNA*n:n:length(t)-n
            if wyk<=ILE_WYKRESOW  l
            SYG=X(i:i+n); % FFT ze sygnalu
            T=t(i:i+n);
            leg{wyk}=[num2str((T(1)-t(1))*1000) ' - ' num2str((T(end)-t(1))*1000) ' [ms]'];
            L=length(SYG);
            NFFT = 2^nextpow2(L);
            FFTX = fft(SYG,NFFT)/L;
            ff = f/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
            SYG_FFT=2*abs(FFTX(1:NFFT/2+1))/MAX_FFT;
            figure(kanal); grid on;hold on
            plot(ff,SYG_FFT,'Color',Kolory{wyk},'LineStyle',Linie{wyk});
            xlabel('f [Hz]');
            ylabel(['|Kanal' num2str(kanal) '|']);
            wyk=wyk+1;
            end
        end
        legend(leg,'Location','NorthWest');
end
```

Skrypt do analizy przebiegów prędkości za pomocą metody okien czasowych – obliczenie wartości średniej z danego okna czasowego:

```
clear all; clc;
close all
Katalog='p2';
S=srednie_sygnaly(Katalog);
START_OKNA=1; % OD ktorego okna czasowego zaczynamy rysowac wykresy
ILE_WYKRESOW=12; % MAX 14 wykresow
licz_probek=5; % liczba probek przed maksymalna amplitude do uwzglednienia
Amplituda_wygaszenia=0; % ogranicza probki za uderzeniem im nizsza tym mniej probek

Kolory={'r','g','b','k','c','m','k','r','g','b','k','c','m','k'};
Linie={'-','-','-','-','-','-','-',':',':',':',':',':',':',':'};
leg={'Kanal 1','Srednia 1','Kanal 2','Srednia 2','Kanal 3','Srednia 3'};
for kanal=1:3
        % SPOSOB WCZYTYWANIA plikow TXT
        X=S(kanal,:);

        % PARAMETRY
        n=numel(X);
     % X=zeros(n,1);
        X2=zeros(size(X));
        f=5000; % Hz
        dt=1/f;
        t=0:dt:(n-1)/f;

        %2) OBCIECIE SYGNALU
        % Z przodu
        [maks j]=max(abs(X));
        % Z tylu
        i=find(abs(X)>Amplituda_wygaszenia);
        if j+1<licz_probek
            licz_probek=j-1;
        end
        t=t(j-licz_probek:i(end));
        X=X(j-licz_probek:i(end));
```

```
fig=1;
Okno_czasowe=10;% [ms]
ILE_OKIEN=20;
n=f*Okno_czasowe/1000;
SYG=X; % FFT ze sygnalu
L=length(SYG);
NFFT = 2^nextpow2(L);
FFTX = fft(SYG,NFFT)/L;
ff = f/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
MAX_FFT=max(2*abs(FFTX(1:NFFT/2+1)));
MAX_AMP=max(abs(X));
MAX_FFT=1;
for i=1:n:length(t)-n
    if fig<=ILE_OKIEN
    SYG=X(i:i+n); % FFT ze sygnalu X bedzie robione
    T=t(i:i+n);
    L=length(SYG);
    NFFT = 2^nextpow2(L);
    FFTX = fft(SYG,NFFT)/L;
    ff = f/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
       figure(fig);
    SYG_FFT=2*abs(FFTX(1:NFFT/2+1))/MAX_FFT;
    hold on
    plot(ff,SYG_FFT,'Color',Kolory{kanal},'LineStyle',Linie{kanal});
    MEAN=mean(SYG_FFT);
    XLIM=get(gca,'XLim'); % srednia dla sygnalu
    YLIM=get(gca,'YLim');
    line(XLIM,[MEAN MEAN],'Color',Kolory{kanal},'LineWidth',2);
    text(mean(XLIM),MEAN+(YLIM(2)-YLIM(1))*.05,['mean=',num2str(MEAN)],'Color',Kolory{kanal});
    fig=fig+1;
    if kanal==3
        legend(leg);
        title(['Time <' num2str(T(1)*1000) 'ms,' num2str(T(end)*1000) 'ms>']);
        xlabel('f [Hz]');
        ylabel('|X(f)|');
```

```
            end
            end
        end
end
hold off;
```