



Politechnika Wroclawska

DZIEDZINA: Nauki Inżynieryjno-techniczne

DYSCYPLINA: Inżynieria Mechaniczna

ROZPRAWA DOKTORSKA

„Badanie złączy zgrzewanych przy użyciu analizy modalnej”

mgr inż. Maciej Karpiński

Promotor / Promotorzy:

dr hab. inż. Paweł Kustroń

dr hab. inż. Zygmunt Mikno

Opiekun pomocniczy:

mgr inż. Wojciech Jopek

Słowa kluczowe: analiza modalna, MES, kontrola jakości, zgrzewanie rezystancyjne garbowe

WROCŁAW 2024

Spis treści

1. Wstęp – geneza problemu badawczego	4
2. Nieniszczące metody kontroli jakości złączy zgrzewanych.....	5
2.1. Metoda monitorowania za pomocą sygnałów z procesu	6
2.2. Metoda ultradźwiękowa.....	8
2.3. Metoda pomiaru zmian rezystancji dynamicznej.....	11
2.4. Metoda termograficzna.....	15
2.5. Metoda promieniowania rentgenograficznego	18
3. Zgrzewanie rezystancyjne.....	20
4. Zgrzewanie rezystancyjne metodą garbowe	23
4.1. Charakterystyka procesu.....	23
4.2. Zalecenie ogólne procesu	25
4.3. Charakterystyka połączenia	25
5. Niezgodności złączy zgrzewanych rezystancyjnie	27
5.1. Pęknięcia.....	28
5.2. Pustki.....	31
5.3. Wtrącenia	32
5.4. Przyklejanie	34
5.5. Niezgodności kształtu i wymiarów złącza.....	35
5.6. Niezgodności struktury krystalograficznej	35
6. Analiza modalna	36
6.1. Zasada działania	36
6.2. Funkcja odpowiedzi częstotliwościowej.....	37
6.3. Metodyka pomiarowa	39
6.4. Archiwizacja danych do FFT	40
6.5. Wpływ młotka modalnego	42
6.6. Równania ruchu układu o wielu stopniach swobody	42
6.7. Transformata Laplace'a	46
6.8. Równanie funkcji odpowiedzi częstotliwościowej	48
6.9. Transformata Fouriera.....	48
7. Analiza numeryczna MES	49
7.1. Teoria.....	49
7.2. Opis procedury analizy	51
7.3. Rozwiązanie problemu ciągłości za pomocą metody elementów skończonych	53
7.4. Dyskretyzacja geometrii	54
7.5. Składowe wpływające na utworzoną siatkę geometrii	56
7.6. Funkcja interpolacji.....	57
7.7. Wielowymiarowa postać funkcji interpolacyjnych	58

7.8.	Elementy skończone	59
8.	Cel badań – teza pracy badawczej	60
9.	Stanowisko badawcze	61
9.1.	Zgrzewarka wraz z oprzyrządowaniem zgrzewalniczym	61
9.2.	Detal wytypowany do badań	63
9.3.	Aparatura do analizy modalnej	64
9.4.	Koncepcja systemu kontroli jakości z zastosowaniem analizy modalnej	66
9.5.	Algorytm do przetwarzania sygnału – LabVIEW	67
10.	Badania numeryczne MES	71
10.1.	Przygotowanie modelu dla analizy modalnej	71
10.2.	Wyniki analizy modalnej MES	75
10.3.	Przygotowanie modelu do analizy dynamicznej MES	91
10.4.	Wyniki analizy dynamicznej MES	93
10.5.	Podsumowanie badań numerycznych	94
11.	Badania eksperymentalne zastosowania analizy modalnej	96
11.1.	Konfiguracja analizy modalnej	96
11.2.	Badanie detali	101
11.3.	Badanie stanowiska	103
11.4.	Podsumowanie badań eksperymentalnych	111
12.	Porównanie analizy eksperymentalnej z analizą numeryczną	113
13.	Algorytm do oceny jakości zgrzein wykorzystujący analizę modalną	116
14.	Zestawienie metod kontroli jakości	119
14.1.	Wyniki kontroli jakości poprzez rezystancje dynamiczną	120
14.2.	Wyniki kontroli jakości metodą analizy modalnej	121
14.3.	Podsumowanie	124
15.	Kontrola jakości metodą analizy modalnej	126
15.1.	Wyniki badań z zastosowaniem analizy widmowej	128
15.2.	Weryfikacja połączenia skaningową mikroskopią akustyczną	131
15.3.	Weryfikacja badaniami wytrzymałościowymi - siły zerwania zgrzein	135
15.4.	Statystyczna weryfikacja powtarzalności pomiarowej	138
15.5.	Podsumowanie badań z zastosowaniem analizy modalnej	141
16.	Podsumowanie prac badawczych i wnioski	143
16.1.	Wnioski poznawcze	143
16.2.	Wnioski uytylitarne	143
16.3.	Przyszłe badania	144
	Bibliografia	145
	Streszczenie	150

Pragnę podziękować wszystkim osobom, bez udziału których niniejsza praca nie mogłaby powstać.

A przede wszystkim chciałbym wyrazić wielką wdzięczność dr hab. inż. Pawłowi Kustroniowi oraz dr hab. inż. Zygmuntovi Mikno za zrozumienie, cenne rady i wszelką pomoc nawet w trudnych sytuacjach w czasie trwającej współpracy badawczo-naukowej.

Składam również serdeczne podziękowania mojemu promotorowi pomocniczemu mgr inż. Wojciechowi Jopkowi za cenne wskazówki, opiekę naukową i wszelką pomoc otrzymaną przy realizacji pracy badawczej.

Wyrazy podziękowania kieruję dla wszystkich pracowników firmy ASPA Sp. z o. o za nieocenioną pomoc, liczne wskazówki oraz wsparcie w trakcie realizacji pracy badawczej w przedsiębiorstwie.

Dziękuję rodzicom za motywację i wiarę w moje możliwości.

Największe podziękowania składam mojej przyszłej żonie Agnieszce za jej cierpliwość, wyrozumiałość i wsparcie w chwilach zwątpienia.

1. Wstęp – geneza problemu badawczego

Podjęty problem badawczy został sformułowany podczas budowy stanowiska zgrzewalniczego, przeznaczonego do wytwarzania elementów listew wtryskowych typu Common Rail. Proces technologiczny ich wytwarzania przewiduje zastosowanie zgrzewania garbowego elementów mocujących np. w postaci nakrętek. Wielopunktowe zgrzewanie garbowe, mimo że jest powszechnie stosowane w przemyśle, często prowadzi do problemów z powtarzalnością i jakością zgrzein. Te problemy wynikają głównie z nierównomiernego rozkładu natężenia prądu przez punkty zgrzewalnicze, co prowadzi do nieprzewidywalnego przebiegu procesu i może skutkować wytwarzaniem zgrzein o niewystarczających własnościach mechanicznych.

Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie analizy modalnej do kontroli jakości w celu redukcji odpadu zgrzewalniczego spowodowanego słabą jakością i powtarzalnością komponentów wytwarzanych przez zgrzewanie wielopunktowe. Obecnie przedsiębiorstwa, do zredukowania prawdopodobieństwa dostarczenia niezgodnego detalu, posługują się wrywkową niszczącą próbą wrywania zgrzeiny bądź skręcania. W moich badaniach planuje wykonać analizę modalną, która umożliwi przebadanie każdej wyprodukowanej sztuki w sposób nieniszczący, przyczyniając się do redukcji odpadu zgrzewalniczego i zwiększając prawdopodobieństwo wyprodukowania komponentu o odpowiedniej jakości.

Metoda rezystancyjnego zgrzewania garbowego znalazła szerokie zastosowanie w wielu branżach z uwagi na jej efektywność, trwałość oraz jakość powstałych połączeń. Do głównych obszarów przemysłowych, w jakich pomyślnie jest stosowana od wielu lat są: przemysł motoryzacyjny, budowy maszyn i oprzyrządowania, elektrotechniczny, lotniczy oraz branża AGD. Zgrzewanie garbowe komponentów w przemyśle motoryzacyjnym oraz lotniczym jest niezwykle ważnym procesem, zwłaszcza w odniesieniu do złączy, które są niewrażliwym punktem konstrukcji w aspekcie bezpieczeństwa i wytrzymałości konstrukcji. W branżach tych proces jest głównie wykorzystywany do zgrzewania nakrętek z elementami wykonanymi z blachy o grubościach uniemożliwiającej stworzenie połączenia gwintowanego o wystarczających własnościach mechanicznych.

Postępem technologii, metody analizy modalnej stają się coraz bardziej zaawansowane i precyzyjne. Wprowadzenie nowych technik pomiarowych, takich jak skanowanie laserowe i techniki wizualizacji, umożliwiło dokładniejsze i bardziej szczegółowe badania modalne. Te nowe technologie w połączeniu z zaawansowanym oprogramowaniem do analizy danych umożliwiają lepsze zrozumienie i kontrolę procesów zgrzewania.

Rozwój technologii i metod przeprowadzania analizy modalnej poprowadzi do rozszerzenia jej zastosowania w przemyśle zgrzewalniczym. W przyszłości, analiza modalna może stać się standardem w kontroli jakości procesów zgrzewania wielopunktowego, umożliwiając produkcję wyższej jakości produktów przy jednoczesnym zmniejszeniu odpadów i kosztów produkcji. W miarę jak więcej przedsiębiorstw zacznie dostrzegać korzyści płynące z zastosowania analizy modalnej, możemy spodziewać się, że stanie się ona coraz bardziej powszechna w przemyśle zgrzewalniczym.

2. Nieniszczące metody kontroli jakości złączy zgrzewanych

Poprzez ogromny rozmiar przemysłu motoryzacyjnego korzyści z badań nieniszczących dla procesów zgrzewania to olbrzymia oszczędność kosztów. Zwiększenie jakości poprzez przebadanie każdego złącza metodami nieniszczącymi zmniejsza konieczność wykonywania dodatkowych połączeń, co wpływa na skrócenie procesu oraz ilości materiałów. Prawdopodobnie najczęściej stosowanymi metodami do nieniszczącej kontroli w przemyśle motoryzacyjnym są metody ultradźwiękowe [1].

Obecnie tendencje w spawalnictwie w odniesieniu do badań nieniszczących kontroli jakości złączy poza metodami magnetycznymi, ultradźwiękowymi czy RTG, dołączyła nowa gałąź pręźnie rozwijana - termowizja. Metody termowizyjne opierają swoją bazę fizyczną na transporcie ciepła pomiędzy detalami łączonymi przy zastosowywaniu metod spawalniczych. Zastosowanie kamer termowizyjnych, które to wykorzystywane są do pozyskiwania informacji z procesu w postaci obrazów z naniesionymi strefami ciepła. Na podstawie obrazu rozkładu stref ciepła autorzy pokazują nieniszcząca kontrolę jakości wykonanego złącza, w zależności od zdolności do transportu ciepła szacowana jest jakość połączenia. Najnowsze publikacje prezentują system monitorowania spawania online, który umożliwia zredukowanie kosztów oraz opóźnień w wykryciu niezgodności, ponadto pozwala na wczesne wykrycie niezgodności oraz poprawieniu parametrów. Kontrola jakości oparta na obrazie termicznym wypada bardzo korzystnie z uwagi na dużą liczbę klatek na sekundę oraz rozdzielczość temperaturową. Potwierdza się, że podczerwień może być praktyczną opcją monitorowania spoin/zgrzein, zdolną do zapewnienia wiarygodnej oceny online [2, 3].

Głównymi metodami kontroli jakości obecnie stosowanymi w zgrzewaniu rezystancyjnym są metoda rezystancji dynamicznej oraz metoda ultradźwiękowa [4]. W odniesieniu do metody rezystancji dynamicznej opiera się ona głównie na badaniu rezystancji po stronie wtórnej uzwojenia, jednakże nowo publikowane badania przeprowadzają kontrole jakości na podstawie zmiany rezystancji po stronie pierwotnej transformatora. Metoda posiada znaczną przewagę nad metodą mierzenia rezystancji po stronie wtórnej, że do uzyskania informacji o jakości nie potrzebuje dodatkowych urządzeń [5]. Odnoszące się do metody ultradźwiękowej aktualnie badania pokazały, że rejestrowane sygnały dźwiękowe, które powstają podczas zgrzewania mogą zostać wykorzystane w celu oceny ich przydatności do szacowania wytrzymałości zgrzeiny. Główną zaletą tej metody jest umożliwienie detekcji zużycia elektrody [6].

Rentgenografia także znalazła zastosowanie w nieniszczącej kontroli zgrzein, przy czym wykorzystuje ona energię promieniowania rentgenowskiego przechodzącego przez zgrzeinę. Energia jest różnie absorbowana z uwagi na materiał próbki oraz gęstość masy, wewnętrzne niezgodności w postaci pęknięć, nieodpowiedniego wypełnienia zgrzeiny (porowatość) czy korozji, posiadają odmienną gęstość w porównaniu z materiałem jednorodnym, co w wyniku zobrazowania różnic pomiędzy gęstościami ukaże nam obraz niezgodności. Wyróżniamy dwa typy rentgenografii – konwencjonalne promieniowanie RTG oraz tomografia RTG [7]. Wszystkie powyższe systemy kontroli dodatkowo wymagają eksperta do oceny sygnału bądź obrazu uzyskanego w wyniku przeprowadzonej detekcji.

Wymusza to rozwój oraz zastosowanie systemów eksperckich umożliwiających autonomiczną kontrolę złącza poprzez zgromadzoną oraz wyuczoną wiedzę dotyczącą procesu, bez uczestnictwa eksperta w całym procesie. Do najważniejszych modeli eksperckich stosowanych do tego typu analizy sygnału oraz obrazu zostały zastosowane sztuczne sieci neuronowe, są modele matematyczne imitujące zachowanie układu nerwowego człowieka, zatem mają równoległe, rozproszone oraz adaptacyjne zdolności przetwarzania [7].

2.1. Metoda monitorowania za pomocą sygnałów z procesu

Napięcie oraz wartość natężenia prądu elektrycznego na obwodzie wtórnym, siła docisku elektrod oraz samo przemieszczenie elektrody to parametry, które są powszechnie rejestrowane przez układy sterowania zgrzewarek rezystancyjnych, parametry te są ściśle skorelowane z procesem zgrzewania jak i samą jakością zgrzeiny. Sygnały te można sklasyfikować jako wejściowe zmienne i odpowiedzi. Napięcie oraz natężenie prądu są wejściami zadanymi do procesu zgrzewania, jednak proces zgrzewania oddziałuje na nie, przez co posiadają cechy zmienności, które można rejestrować oraz obserwować w czasie. Dla przykładu napięcie elektryczne monitorowane podczas normalnego procesu zgrzewania zmienia się w trakcie zmian rezystancji przy sterowaniu wartością prądu, by utrzymywała ona stały poziom. Stąd napięcie oraz prąd nie są czystymi wejściami, a podwójna charakterystyka wejścia jak i odpowiedzi jest czymś więcej dla procesu zgrzewalniczego. Oczywiście przy sile docisku elektrody jako zmienna wejściowa do procesu jest stała wartość zadawana przez operatora, lecz pod silnym wpływem sił spowodowanych rozszerzalnością cieplną wskutek nagrzewania się miejsca, w którym powstaje zgrzeina oraz skurczowi cieplnemu w trakcie stygnięcia połączenia, widać zmienność tej siły w czasie. Należy więc rozróżnić dane wejściowe od reakcji tych układów na zmiany zachodzące w procesie, pozwoli to na tworzenie informacji dotyczących wykonanej zgrzeiny a co za tym idzie, informujących o jakości wykonanego połączenia [8].

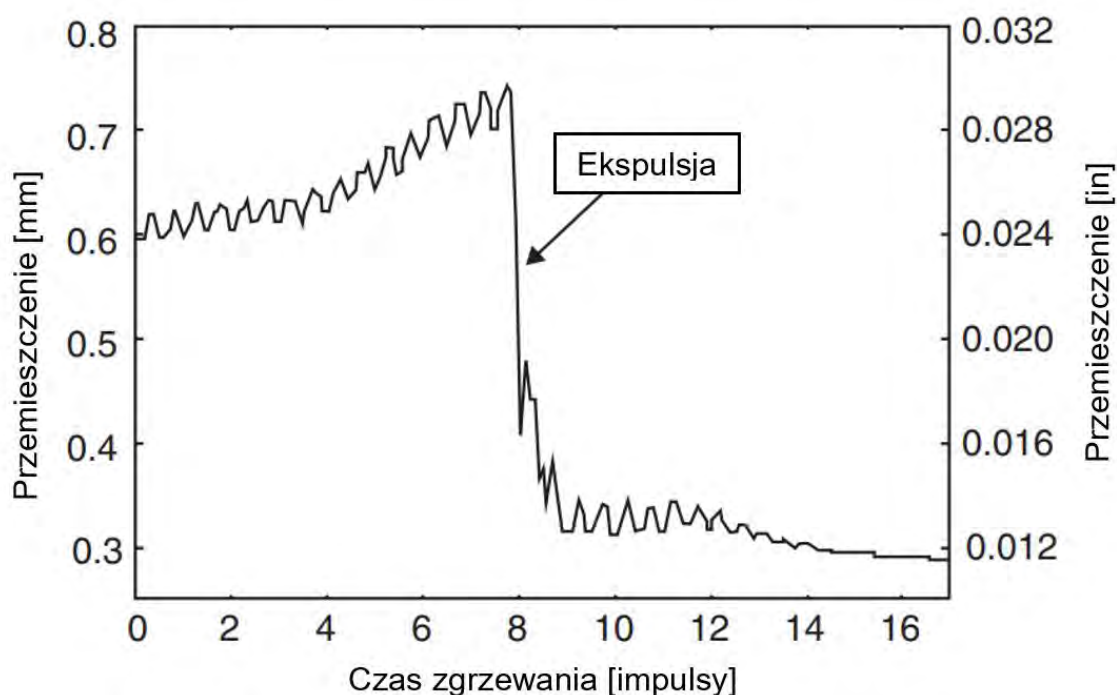
Napięcie elektryczne zależy od sterownika zgrzewania rezystancyjnego, może być stałe bądź zmienne. Jeżeli prąd elektryczny jest utrzymywany na stałym poziomie, wówczas napięcie zmienia się wraz z rezystancją dynamiczną w trakcie zgrzewania. Napięcie może zostać łatwo zmierzone z uwagi na to, że jego wartość przy zgrzewaniu jest dość niska, warto jednak zwrócić uwagę, żeby zebrany sygnał nie został uszkodzony bądź zakłócony poprzez indukowanie naprzemienne w wyniku pola magnetycznego podczas zgrzewania z prądem przemiennym. Do eliminacji zakłóceń posłużyć może zmniejszenie obszaru pętli czujnika lub korzystanie z pętli kompensacyjnej [8].

Prąd elektryczny do punktowego zgrzewania zwykle przyjmuje bardzo duże wartości mierzone w kA , co wymaga pomiaru wartości pośredniej. Podobnie jak w przypadku napięcia, wartości mierzone mogą zostać zakłócone bądź uszkodzone przez zakłócenia spowodowane procesem. Dla prądu stałego DC lub przemiennego AC o niskim natężeniu można zastosować metodę rezystancji bocznika, która to mierzy napięcie na rezystorze, co umożliwia wyprowadzenie wartości prądu na obwodzie wtórnym. Z uwagi na indukcyjność i rezystancje obwodu wtórnego prąd zgrzewania zarówno AC i DC nie osiągają wyznaczonych wartości natychmiastowo po włączeniu obwodu, zazwyczaj prąd narasta podczas kilku pierwszych cykli zgrzewania, w rezultacie których ilość ciepła może być mniejsza niż obliczona. Przy zgrzewaniu stali nie ma to większego wpływu na proces czy jakość, jednakże przy zgrzewaniu aluminium lub magnezu należy o tym pamiętać z uwagi na krótkie czasy zgrzewania tych metali [7].

Rezystancja dynamiczna mierzona podczas zgrzewania dostarcza informacji zarówno o procesie jak i jakości zgrzeiny, zwykle mierzy się go poprzez znane wartości napięcia oraz natężenia prądu, a metoda ta zostanie dokładnie rozwinięta w kolejnym rozdziale. Rezystancja dynamiczna informuje o wartości przyrostu prądu w elemencie przy określonej zmianie napięcia. Dla elementów liniowych, takich jak rezystor jest zawsze taka sama i równa rezystancji statycznej, natomiast dla elementów nieliniowych może być zmienna. W zgrzewaniu rezystancyjnym zrozumienie rezystancji dynamicznej jest istotne, ponieważ wpływa ona na jakość i efektywność procesu. Wysoka rezystancja dynamiczna może prowadzić do większych strat energii i nierównomiernego nagrzewania, co może skutkować defektami w złączu. Dlatego

kontrola i zrozumienie tej wartości są istotne dla optymalizacji parametrów zgrzewania, takich jak natężenie prądu, czas zgrzewania i siła docisku elektrod [8].

Przemieszczenie elektrody (rys. 3.1) jest wynikiem kurczenia i rozszerzania się miejsca, w którym powstaje zgrzeina wzdłuż osi elektrody. Jest to wynik ogrzewania, topienia, krzepnięcia oraz chłodzenia. Zmiana pozycji elektrody może służyć za wskaźnik w procesie zgrzewania czy jakości zgrzeiny, lecz nie można traktować jego pomiarów w sposób jednoznaczny z uwagi, że na ruch elektrody wpływa więcej niż jeden rodzaj odkształceń w materiale zgrzewanym. Przykładowo, grzanie tworzy rozszerzanie się złącza, zmiękczony materiał stały ułatwia elektrodzie wsunięcie się w zgrzeinę z przyłożoną siłą. Rozkład temperatury jest zmienny i nierównomierny, ogrzewanie i chłodzenie materiału zachodzi naprzemiennie, topienie i krzepnięcie również, wszystkie te zjawiska są wyraźnymi procesami utrudniającymi czerpanie informacji z przemieszczenia elektrody jako danych mogących w sposób jednoznaczny posłużyć do weryfikacji jakości zgrzeiny [8].

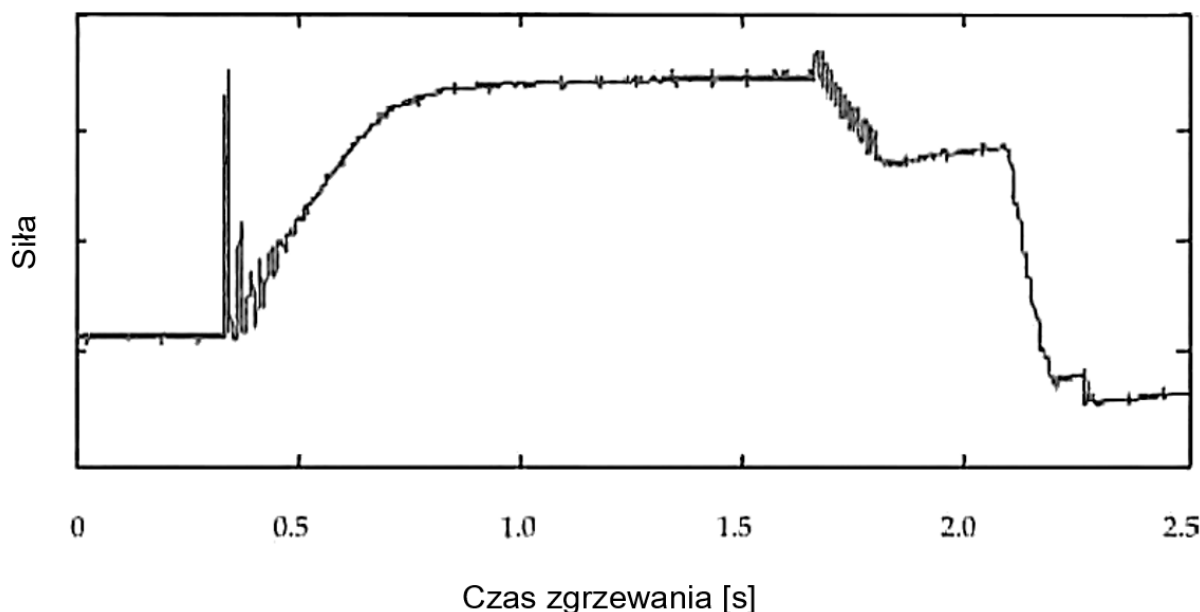


Rys. 3.1 Wykres przemieszczenia elektrody w trakcie zgrzewania rezystancyjnego [8].

Liniovne transformatory różnicowe oraz czujniki światłowodowe są powszechnie użytkowane do pomiaru przemieszczenia w zgrzewaniu. Zmierzone przemieszczenie elektrody odpowiadające zwiększeniu się grubości blach powodowane są rozszerzalnością cieplną, natomiast przemieszczenie odpowiadające za spadek grubości blach odpowiada rozrostowi jądra zgrzeiny do ciekłego materiału, co jest skorelowane z zagłębieniem elektrody w głąb blach [8].

Siła docisku (rys. 3.2) jest ważną zmienną wejściową, tworzy ona styk elektryczny pomiędzy elektrodą i materiałami, w których wykonywane jest połączenie. Zapewnia ona siłę powodującą wpuszczenie elektrody, zapewnia siłę formującą jądro zgrzeiny oraz zapobiega tworzeniu się porowatości i pękaniu złącza w trakcie stygnięcia. Siła docisku elektrody zwykle powinna być zadana w trzech cyklach: kontaktu wstępnego z detalem, wykonywania zgrzeiny oraz przytrzymania w trakcie stygnięcia złącza. Moment, w którym elektrody łapią kontakt z arkuszami blach powinien zostać utrzymany do ustabilizowania się oraz odpowiedniego narostu siły docisku (bezwładność układu pneumatycznego), której zmienność może wynikać z małej sztywności arkuszy zgrzewanych, małej sztywności elektrod bądź konstrukcji

zgrzewarki. Zmienność siły docisku w trakcie rozpoczęcia procesu w znaczący sposób obniżają jakość wykonanego połączenia, powodując między innymi niewłaściwe formowanie się zgrzeiny lub porowatość złącza. W momencie ustąpienia zmienności siły docisku można przystąpić do zgrzewania właściwego. Zgrzewarki wyposażone w serwomechanizmy zadające siłę docisku umożliwiają płynną zmianę jej wartości w trakcie procesu, co może służyć do poprawienia własności złącza [8].



Rys. 3.2 Wykres zmiany siły docisku w trakcie zgrzewania rezystancyjnego [8].

2.2. Metoda ultradźwiękowa

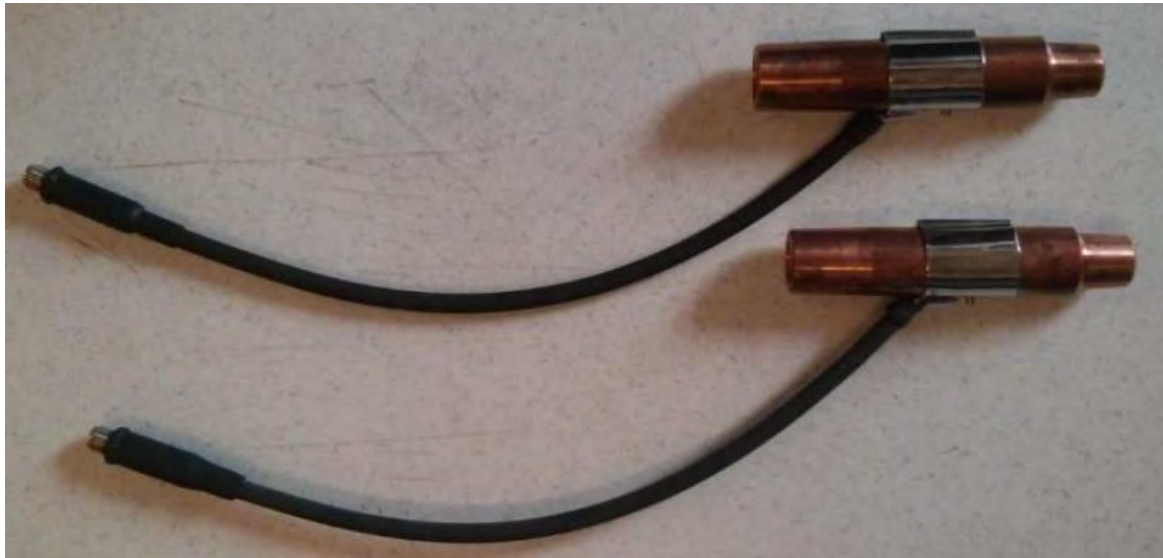
Do jednej z najczęściej stosowanych metod w przypadku kontroli złączy wykonanych techniką zarówno zgrzewania jak i spawania jest metoda kontroli z zastosowaniem fal ultradźwiękowych, które są emitowane przez głowicę do złącza, a następnie poprzez propagację w wykonanym złączu fale przedostają się do odbiornika, dają sygnał, na podstawie którego możemy rozstrzygnąć poprawność oraz jakość wykonanego złącza [3, 4, 6, 12].

Dźwięk jest to fala mechaniczna, która powoduje drganie cząstek, które można odczuć, np. jako zmiana ciśnienia. Fala dźwiękowa może rozchodzić się w powietrzu jak i w innych ośrodkach. Słuch ludzki przeważnie potrafi usłyszeć zakres częstotliwości w przedziale od 20 Hz do 20 kHz. Dźwięki o częstotliwości mniejszej od 20 Hz nazywane są infradźwiękami, natomiast częstotliwości powyżej 20 kHz – ultradźwiękami [12].

Aktualnie stosuje się kilka metod do kontroli z wykorzystaniem ultradźwięków, które zostały opracowane przez różne koncerny, jednak w zasadzie ich działania nie różnią się od siebie znacząco. Na obsadzie (rys. 3.3) lub czole elektrody mocowany jest przetwornik ultradźwiękowy, który wytwarza fale ultradźwiękową okresowo powtarzającą się i szybko gasnącą. Fala zostaje przepuszczona przez obszar zgrzeiny, a następnie odebrana poprzez kolejny przetwornik umiejscowiony po przeciwległej stronie - metoda przepuszczenia fali [12].

Przepuszczenie fali pozwala na dostarczenie informacji o amplitudzie oraz czasie przelotu sygnału przez rosnący samorodek. Doświadczenie pokazuje, że informacje te są szczególnie istotne w przypadku zgrzewania arkuszy blach, nie wymaga ona zaawansowanych systemów przetwarzania sygnałów w zestawieniu do innych metod. Do wad metody przepuszczenia należy zaliczyć mniejszą ilość informacji płynących z procesu względem metody echa,

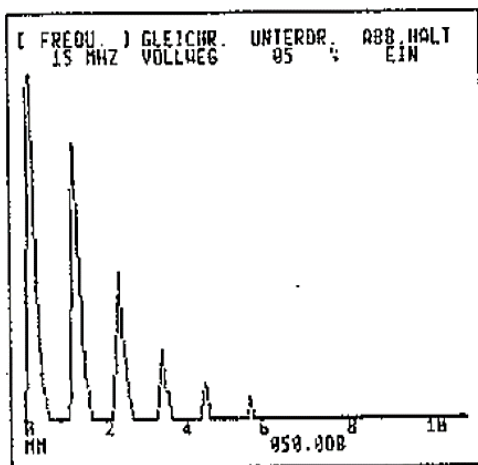
konieczność dwóch przetworników, co może wiązać się z niedogodną geometrią elektrod, prowadzi do ograniczenia stosowania jej w przemyśle [4, 7, 11, 12].



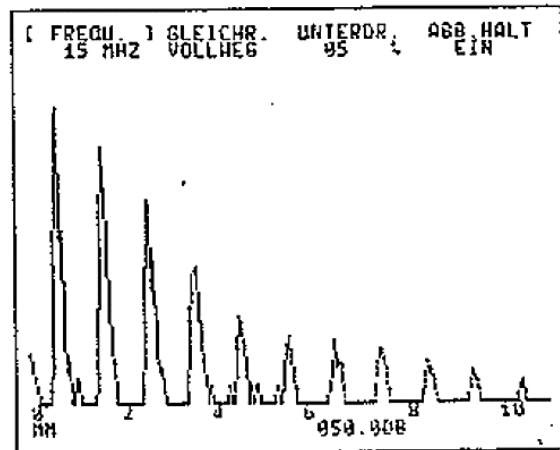
Rys. 3.3 Obsady elektrod z zamocowanymi przetwornikami drgań ultradźwiękowych [13].

Drugą metodą szeroko stosowaną jest metoda echa, w której to fala po emisji z przetwornika odbija się od punktu, w którym została wykonana zgrzeina i powraca do przetwornika – rejestrowany tutaj sygnał odbity w postaci echa. W tej metodzie najważniejsze echa sygnału pochodzą z płynnego jądra zgrzeiny oraz powierzchni połączonych arkuszy, które dostarczają informacje o penetracji jądra zgrzeiny oraz jego wielkości [4, 7, 11, 12].

Sygnał wygenerowany poprzez kontrole jakości metodą ultradźwiękową to krzywa transmisji fal ultradźwiękowych (rys.3.4; 3.5) dostarcza informacje dotyczące średnicy jądra zgrzeiny, wielkości siły zerwania zgrzeiny oraz klasie jakości, w której znajduje się wykonana zgrzeina [7, 14]. Jednocześnie krzywa może zostać wykorzystana do korekty parametrów zgrzewania w czasie rzeczywistym w celu poprawy jakości złączy. Czas potrzebny do wykonania detekcji jest niezwykle szybki i nie wydłuża procesu w znacznym stopniu.



Rys. 3.4 Sygnał z detekcji ultradźwiękowej, dla zgrzeiny prawidłowej [7].

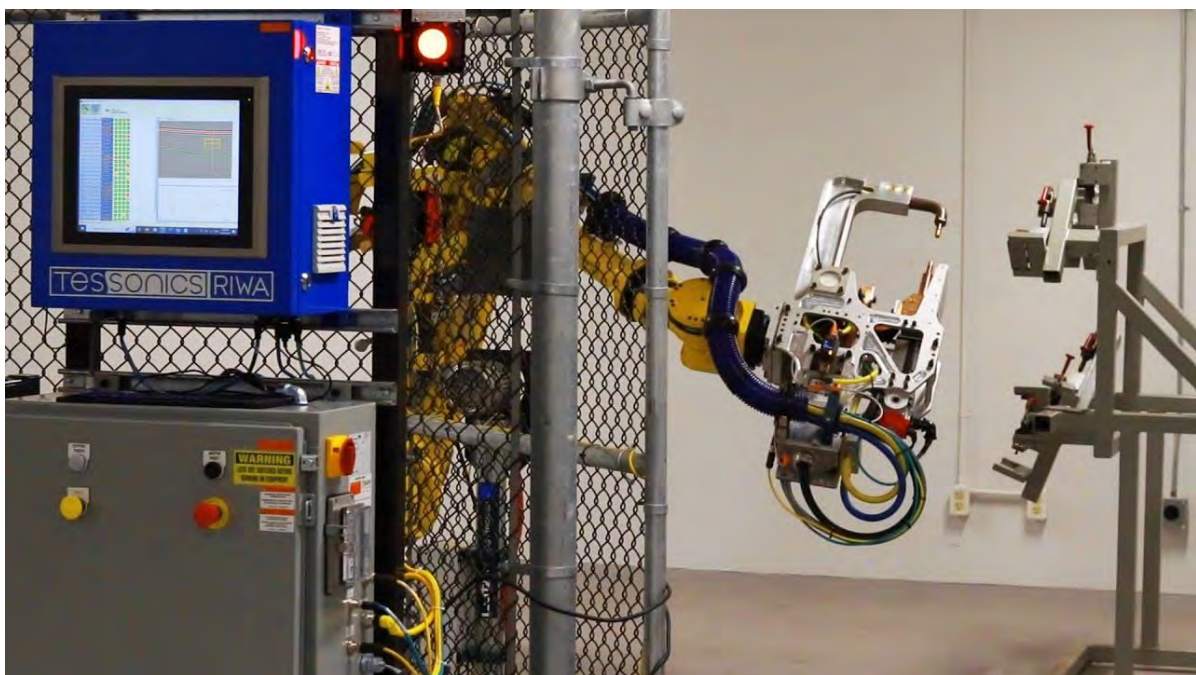


Rys. 3.5 Sygnał z detekcji ultradźwiękowej dla zgrzeiny z niezgodnościami [7].

Grubość zgrzeiny punktowej wynikająca z wygniecenia miejsca zgrzewania poprzez elektrodę jest ważnym parametrem przy szacowanej ostatecznej średnicy zgrzeiny i

identyfikacji strefy wystąpienia wypaleń. Przy kontroli jakości ważną zmienną jest temperatura, która wpływa w znaczący sposób na wyniki rejestrowane przy badaniu tą metodą. Wzrost temperatury podczas wykonywania połączenia zwiększa czas, jaki fala potrzebuje na przejście przez zgrzeinę do odbiornika, ponadto pozostała część blach, które przylegają zmniejsza go. Te przeciwstawne efekty mogą powodować fałszywą reprezentację rzeczywistej grubości zgrzeiny zmierzonej tą metodą. Określenie bardzo dokładnej grubości przy zastosowaniu tej metody jest możliwe w momencie, gdy zgrzeina całkowicie zastygnie, wówczas można dodatkowo wykazać czy elektroda nie wykonała nadmiernego wygniecenia (tak zwanego wypchnięcia) [9, 15].

Produktem przemysłowym służącym do monitoringu jakości zgrzein In-line jest produkowany przez firmę Tessonics Inc. o nazwie RIWA (rys. 3.6), który opiera swoje działanie na pojedynczym przetworniku z zastosowaniem metody echa. Przetwornik jest mocowany w uchwyt elektrody wyposażonej w kanały chłodzące. Woda z układu chłodzenia przewodzi fale ultradźwiękową do nasadki w postaci elektrody. Kolejno fala przechodzi poprzez nasadkę do blach zgrzewanych w miejscu wykonywania zgrzeiny. Przetwornik wzbudzany jest z zastosowaniem krótkich impulsów elektrycznych wysyłanych przez zintegrowany pulsometr sterowany za pośrednictwem komputera. Transduktor przekształca impulsy elektryczne w fale ultradźwiękowe, a następnie pracuje jako odbiornik sygnału odbitego. Sygnał zarejestrowany jest filtrowany a następnie analizowany poprzez algorytmy wbudowane w celu uzyskania przydatnych informacji o powstającej zgrzeinie punktowej oraz procesie.



Rys. 3.6 System RIWA do kontroli jakości zgrzein metodą ultradźwięków[16].

Zastosowanie pojedynczego przetwornika drgań zapewnia tylko ogólnie informacje o geometrii jądra zgrzeiny. Jeżeli uwzględnione zostaną te same zasady fizyczne lecz zastosuje się więcej niż jeden przetwornik, wówczas uzyska się więcej informacji o zgrzeinie. Główna przewaga systemu wieloprzetwornikowego to zapewnienie danych o średnicy rzeczywistej jądra zgrzeiny. Pozwala on uzyskać dokładne informacje o wzroście jądra, a nie szacowanie na podstawie krzywej transmisji.

2.3. Metoda pomiaru zmian rezystancji dynamicznej

Pomiar rezystancji dynamicznej to istotny wskaźnik jakości i stabilności przeprowadzanego procesu zgrzewania. W związku z tym na przestrzeni ostatnich lat zostały opracowane wiarygodne techniki szacowania wytrzymałości zgrzein w oparciu o przebieg zmiany rezystancji w czasie procesu. Do największej wady tej techniki należy zaliczyć to, że zapewnia ona nieciągły pomiar, zwykle tylko w zakresie szczytowych prądów ze względu na niemożliwy pomiar wartości na narastania prądu (rozdzielczość i histereza przyrządów pomiarowych przy mierzeniu prądów w kA) [5, 13, 17, 18, 19, 20, 21].

Systemy kontroli jakości działają na zasadzie pomiaru i analizy sygnału z przebiegu rezystancji dynamicznej mierzonej podczas procesu zgrzewania. W celu wyznaczenia rezystancji dynamicznej potrzebny jest pomiar wielkości elektrycznych, takich jak prąd zgrzewania oraz napięcie pomiędzy elektrodami zgrzewarki, mierzone w trakcie przebiegu procesu [4].

System oparty na zmiany rezystancji dynamicznej zdolny jest do [17, 22, 23, 24]:

- oceny i analizy dynamiki powstającej zgrzeiny,
- wykrywanie przypadku wypalenia zgrzeiny,
- identyfikowanie złych zgrzein wynikających z błędów ułożenia detali, niewystarczającej siły docisku bądź zanieczyszczenia powierzchni,
- przewidywanie wielkości jądra zgrzeiny oraz jej wytrzymałości mechanicznej;
- wykrywanie zużycia elektrody,
- dokonanie korekty parametrów niezbędnych do poprawy jakości zgrzein.

Monitorowanie rezystancji dynamicznej w odniesieniu do innych parametrów takich jak temperatura, przemieszczenie, siła, wibracje, sygnatura akustyczna, napięcie czy prąd, które to również można monitorować w sposób „online” podczas zgrzewania, posiada tę przewagę [17]:

- rezystancja dynamiczna odzwierciedla zmianę temperatury jak i inne zmiany,
- pomiar rezystancji jest dyskretny dla zgrzeiny,
- czujniki mogą być używa z każdym typem elektrody jak zgrzewadła oraz są wytrzymałe,
- procedura do wyznaczenia zmian rezystancji jest prosta.

Charakterystyką procesu rezystancji dynamicznej jest odpowiednia forma zapisu danych umożliwiająca ich dalszą analizę. Model oparty jest na opisie zjawiska fizycznego, aby przedstawić jednoznacznie rezystancje i zidentyfikować błędne zgrzeiny. Systemy do kontroli jakości zgrzewania rezystancyjnego wydłużają czas zgrzewania aż do osiągnięcia pożądanego wcześniej określonego spadku rezystancji. Dla wielu zastosowań ustalono, że spadek rezystancji na poziomie 15-20% w rozsądnym czasie zgrzewania oraz sile docisku będzie kwalifikować zgrzeinę do prawidłowej [25, 26].

Oczywiście zapotrzebowanie aktualnego przemysłu jest na systemy, które dostarczą bardziej szczegółowe kryteria i klasyfikacje problemów wynikających z procesu. Aktualnie występujące niezgodności powodują małe, subtelne zmiany; które to nie są w stanie być zidentyfikowane poprzez proste techniki. Dodatkowo wzrost zastosowań nowoczesnych, takich jak stopy aluminium, stale wysokowęglowe czy powlekanie, które wykazują odmienną specyfikę w stosunku do stali niskowęglowych w odniesieniu do kreowania jądra zgrzeiny i zmian rezystancji dynamicznej. Materiały tego typu są dużo trudniejsze w zgrzewaniu, a prawdopodobieństwo powstania zgrzeiny o niewystarczających własnościach mechanicznych wzrasta drastycznie [17].

Termin rezystancji dynamicznej jest użyty w odniesieniu do zmienności wartości rezystancji po stronie wtórnej transformatora – dokładniej w materiałach zgrzewanych znajdujących się pomiędzy elektrodami w trakcie zgrzewania. Zmiana rezystancji wynika głównie ze wzrostu temperatury materiału zgrzewanego w jądrze zgrzeiny wskutek przepływu prądu elektrycznego, ale również na skutek złożonych rezystancji przy kontakcie pomiędzy elektrodą a blachą. Idealnym przypadkiem jest zmierzenie tylko i wyłącznie rezystancji pomiędzy arkuszami blach łączonymi metodą zgrzewania punktowego, z uwagi na fakt, że są one najbardziej związane z jądrem zgrzeiny [17].

Studia wykonane przez innych badaczy wykazały, że najważniejszym składnikiem zmiany rezystancji dynamicznej jest upłynniony materiał rodziwy blach a nie powierzchnie stykowe z elektrodami [27].

Do zrozumienia problemów związanych z pomiarem dynamicznej rezystancji warto wziąć pod uwagę ogólną rezystancję obwodu do zgrzewania punktowego. Zasadniczo jest to transformator obniżający napięcie podłączony bezpośrednio do obciążenia o bardzo małej rezystancji. Jedną z technik szacowania zmiany rezystancji jest pomiar kąta fazowego w obwodzie pierwotnym. Producenci dostarczający układy sterowania faworyzują tę metodę, ponieważ ich punkt kontroli jest po obwodzie pierwotnym, gdzie występują dużo mniejsze wartości prądu, co umożliwia zastosowanie dokładniejszej i dużo szybszej aparatury pomiarowej. Niedoskonałością tej metody jest brak pomiaru bezwzględnego, ponieważ pomiary opierają się na wartościach, które zostają poddane transformacji, podczas której występują straty na transformatorze i wszystkich połączeniach czy obwodach [27].

Dodatkowo samo rozgrzewanie zgrzeiny występuje w obwodzie wtórnym, więc zmiany rezystancji wiążą się ze zmianą rezystancji całego obwodu – np. podniesienie temperatury elektrod czy szyn prądowych doprowadzających prąd elektryczny do miejsca wykonania zgrzeiny. Przez co właściwą drogą jest pomiar bezpośrednio rezystancji z obwodu wtórnego transformatora.

Napięcie do pomiarów dostarczone jest przy użyciu sondy, ale pomiar ten obarczony jest błędem nierezystancyjnego napięcia.

Przykładowy model napięcia:

$$u(t) = m_p(t) \frac{di(t)}{dt} + r_w(t)i(t) \quad (1)$$

gdzie:

$r_w(t)$ – oznacza rezystancje złącza,

$m_p \frac{di}{dt}$ – napięcie indukowane w obwodzie pomiarowym,

Do zmierzenia wartości prądu po stronie wtórnej służy cewka Rogowskiego, która jest w rzeczywistości toroidem.

Przykładowy model natężenia prądu mierzonego toroidem:

$$i(t) = \frac{1}{m_t} \int u_t(t) dt \quad (2)$$

gdzie:

$u_t(t)$ – oznacza napięcie na torodzie w danej chwili t .

Analiza sygnałów rezystancji wskazała, że jest to sygnał niestacjonarny, w związku z tym hipotetyczny sygnał przyjmuje się, że wygląda następująco:

$$S(n) = a(n) + b(n) + w(n) \quad (3)$$

gdzie:

$a(n)$ – czas zmiany uśredniony (część deterministyczna),

$b(n)$ – niestacjonarna składowa stochastyczna,

$w(n)$ – sygnał błędu bądź szum

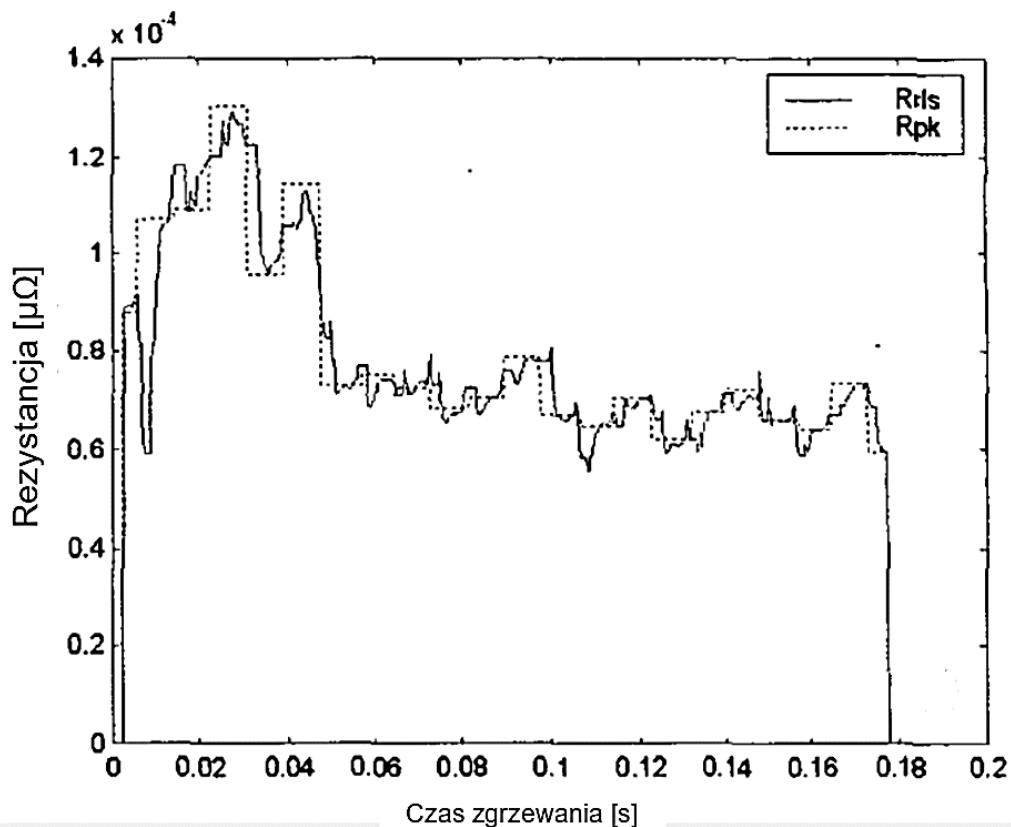
Istnieją różne techniki szacowania $r_w(t)$ dla pojedynczego punktu. Polegają one na eliminacji wpływu poprzez składową indukcyjną. Na przykład metoda szczytowa polegająca na obliczaniu $r_w(t)$ tylko w szczytowych momentach czasowych, w których występują szczyty prądu. Natomiast w metodzie całkowej osiąga to poprzez całkowanie równania (3) od początku do końca każdego półokresu. Wadą tych metod są niewygodne do znalezienia wartości maksymalne i punkty przejścia przez zero wykładnicze funkcji, jednakże największym ograniczeniem tych metod to brak kompletnej reprezentacji zmieniającej się w czasie rezystancji dynamicznej [17].

Z uwagi na te wadę zaleca się użycie systemu czasu ciągłego techniki identyfikacji do oszacowania $r_w(t)$. Zasadniczo niezbędne jest [19, 20, 28, 29, 30]:

- pomiar online próbek $u(t)$ oraz $i(t)$, w jednorodnych przedziałach czasu – T;
- symulacja ciągłego stanu, przestrzeni stanów dla równania (3);
- obliczanie $\frac{di(t)}{dt}$ z wektora stanu;
- zastosowanie rekurencyjnego algorytmu najmniejszych kwadratów (RLS ze zmiennym współczynnikiem) do aktualizowania szacowania $r_w(t)$ oraz $m_p(t)$ w tej samej chwili czasu.

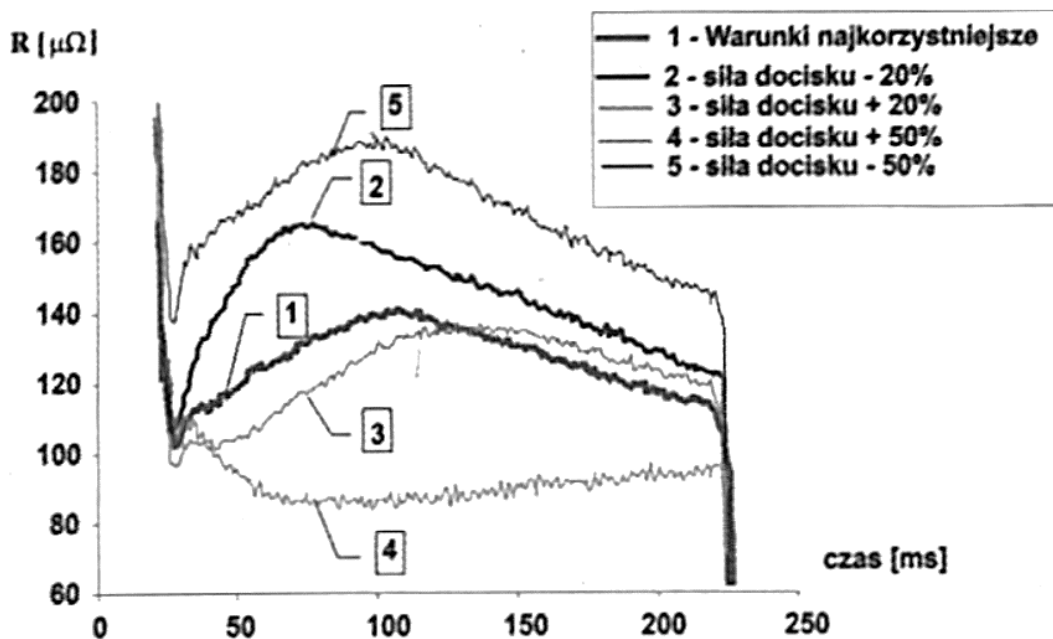
Pozwoli to na włączenie czynnika zapomnienia śledzenia zmiennych w czasie charakterystyk $r_w(t)$ oraz $q(t)$. W celu uniknięcia błędów estymacji należy przyjąć wskaźnik zapomnienia $ff = 0,8 \div 0,9$ oraz przy niskich wartościach prądu stosować macierz kowariancji błędów aktualizowaną tylko w przypadku, gdy prąd $i(t)$ przekracza minimalny poziom, który reprezentuje poziom zakłóceń, najczęściej jest to 10% prądu szczytowego. Szacowana wartość $r_w(t)$ (rys. 5) dla wypchniętej spiny szacowana zarówno metodą pików jak RLS dla $ff = 0,8$.

Szacowanie metodą RLS jest zgodne z metodą pików w szczytowych momentach prądu i pokazuje, że większa część zmian rezystancji zachodzi pod koniec każdego pół cyklu, obserwowana jest także quasi-sinusoidalna zmiana rezystancji. Porównanie średniokwadratowych błędów estymacji otrzymanych różnymi metodami ujawniły, że RLS zapewnia mniejszy błąd średniokwadratowy spośród wymienionych metod. RLS cechuje lepsze rozpoznanie wydostanie się iskier ze złącza, co obrazuje wykres (rys. 3.7). Można zaobserwować, że w chwili czasu $t \approx 8$ ms następuje wyrzucenie iskry, które nie zostało zarejestrowane przez metodę pików, kolejne wyrzucenie przy $t \approx 50$ ms, zostało odnotowane przez obie metody [17].



Rys. 3.7 Porównanie wyznaczenia rezystancji dynamicznej metodą RLS oraz pików [17].

Wykazane wcześniej powiązania pomiędzy zmianą parametrów technologicznych procesu (prąd zgrzewania, siła docisku, powierzchnia styku elektrod), a parametrami elektrycznymi wpływają na wykres przebiegu rezystancji dynamicznej (rys. 3.8). Pozwala to na wyznaczenie parametrów technologicznych, które pozwolą do uzyskania najlepszych własności mechanicznych połączenia, w przypadku zgrzewania jest to maksymalna siła zerwania zgrzeiny [4].

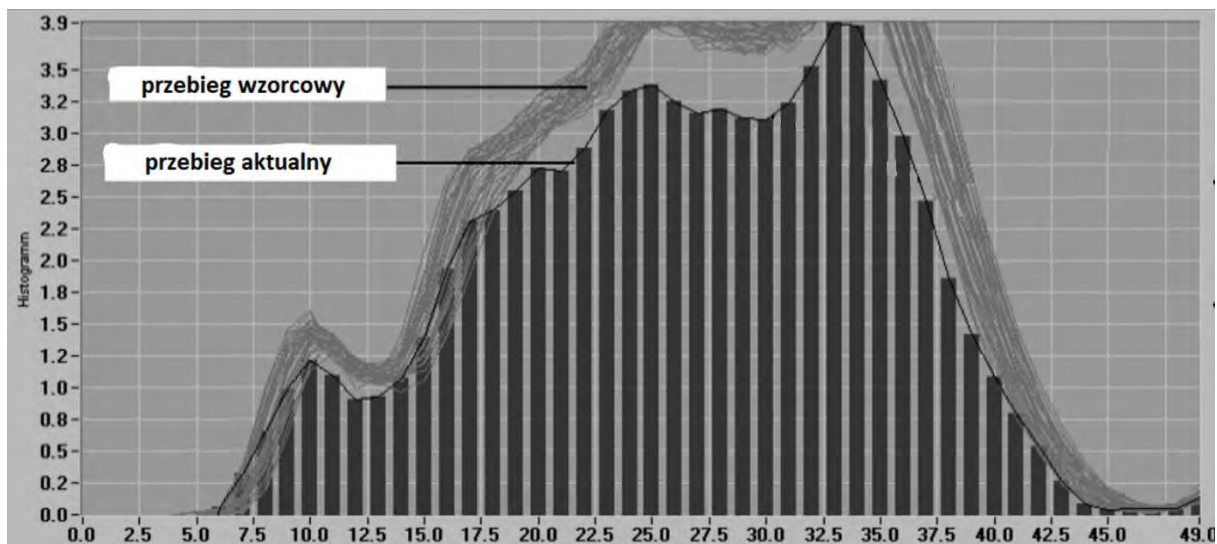


Rys. 3.8 Wpływ parametrów technologicznych na przebieg rezystancji dynamicznej [4].

W celu zapewnienia niezawodności działania systemu kontroli jakości, którego działanie oparte jest o zmianę rezystancji dynamicznej wymagane jest zastosowanie dodatkowego systemu decyzyjnego. System może być oparty na sieci neuronowej, lecz występuje konieczność uczenia sieci, czyli wprowadzenia danych zebranych na podstawie badań w postaci serii uczącej oraz serii testowej. W procesie nauczania sieci bierze udział seria ucząca, z kolei seria testowa jest wykorzystywana do określenia stopnia wytrenowania, co pozwala przerwanie procesu uczenia w najodpowiedniejszym momencie.

System kontroli przy zgrzewaniu punktowym opierający swoje działanie na sieciach neuronowych tworzy bazę danych z przebiegami rejestrowanymi podczas zgrzewania. Po wykonaniu szeregu połączeń, dla których zarejestrowano parametry elektrycznego oraz określono ich klasę, zgrzeinom z badań wytrzymałościowych przyporządkowuje się przebieg wzorcowy, do którego sieć neuronowa została wyuczona.

Przemysłowy system PQSweld firmy Harms&Wende do mierzenia rezystancji dynamicznej oparty jest na pomiarach z dużą rozdzielczością (50000 próbek na sekundę) napięcia i natężenia prądu. Pomiar prądu w tym systemie odbywa się poprzez pętle pomiarową lub przekładnik prądowy, z kolei napięcie odczytywane jest możliwie blisko punktu zgrzewania, ale poza częściami wykonującymi ruch jak np. elektrody. Pętla pomiarowa umożliwia pomiar dla prądu przemiennego o częstotliwościach 50Hz jak i stałego. Wraz z zakończonym cyklem zgrzewania następuje zbiór pomiarów w celu utworzenia histogramu (rys. 3.9), pozwala on na zobrazowanie różnic w sygnałach z wykonanych kolejnych zgrzein względem zgrzeiny wzorcowej, która jest kwalifikacja wymaganej jakości. System w pierwszej fazie musi zostać nauczony poprawnych przebiegów, które są badane w sposób niszczący, kolejno zgrzeiny spełniające nasze wymagania muszą zostać wprowadzone do bazy danych systemu. Ostatecznie następuje automatyczne ustalenie tolerancji wszystkich próbek i poprzez wykorzystanie logiki rozmytej powstaje wstępny opis jakości zgrzein [15].



Rys. 3.9 Histogram z przebiegów prądu, napięcia oraz rezystancji [15].

2.4. Metoda termograficzna

Prostą metodę kontroli można znaleźć w wizualnej inspekcji jednak badania te mogą być przeprowadzane wyłącznie przez osobę wykwalifikowaną w tej dziedzinie. Wykonanie powierzchni zgrzeiny, która wizualnie sprostą kontroli jest więc niewystarczającą próbą określającą jakość, zgrzeina pomimo przyzwoitego wyglądu może nie mieć zmian struktury wewnętrznej w stosunku do jądra oraz sekcji go otaczających. Alternatywne podejście do testów

wizualnych zewnętrznych jak i strukturalnych wewnętrznych niesie wykorzystanie aktywnej termografii do kontroli zgrzein [2, 3, 31, 32, 33, 34].

Termografia jest szeroko stosowana do szybkiego i bezkontaktowego badania połączeń metalicznych z uwagi na duży postęp w technologii kamer rejestrujących obraz w podczerwieni [35].

Przy zastosowaniu termografii można wykryć miejsce spoiny, średnicę jądra lub także wyodrębnić procent przekroju poprawnie wykonanego w złączu niewłaściwym. Systemy termografii umożliwiają kontrole więcej niż jednej zgrzeiny w tej samej chwili czasu. Systemy termowizyjne posiadają duży potencjał do automatyzacji. Złącza zgrzewane nie zawsze pozwalają na dojście obustronne do miejsca wykonanego połączenia, z uwagi na to metoda kontroli jakości musi umożliwić kontrole poprzez dojście z jednej strony połączenia [35].

Do wykonania termografii można użyć różnych źródeł ogrzewania, między innymi może to być światło bądź laser, lecz te metody generowania ciepła w świetle procesów produkcyjnych mogą być zakazane ze względu na bezpieczeństwo pracowników hali produkcyjnej. Poszukiwanie optymalnego pomiaru wprowadza różnorodne konfiguracje do kontroli jakości zgrzeiny, techniki stosowane można dzielić ze względu na zastosowany mechanizm nagrzewania zgrzeiny: ogrzewanie światłem lub indukcyjnie [32]. Dodatkowymi źródłami wzbudzenia ciepła mogą być zastosowane ultradźwięki czy lampy błyskowe. Samo zgrzewanie w sobie jest procesem generującym energię cieplną z prawa Joule'a Lenza, które także może być wykorzystane do kontroli z wykorzystaniem termowizji [36].

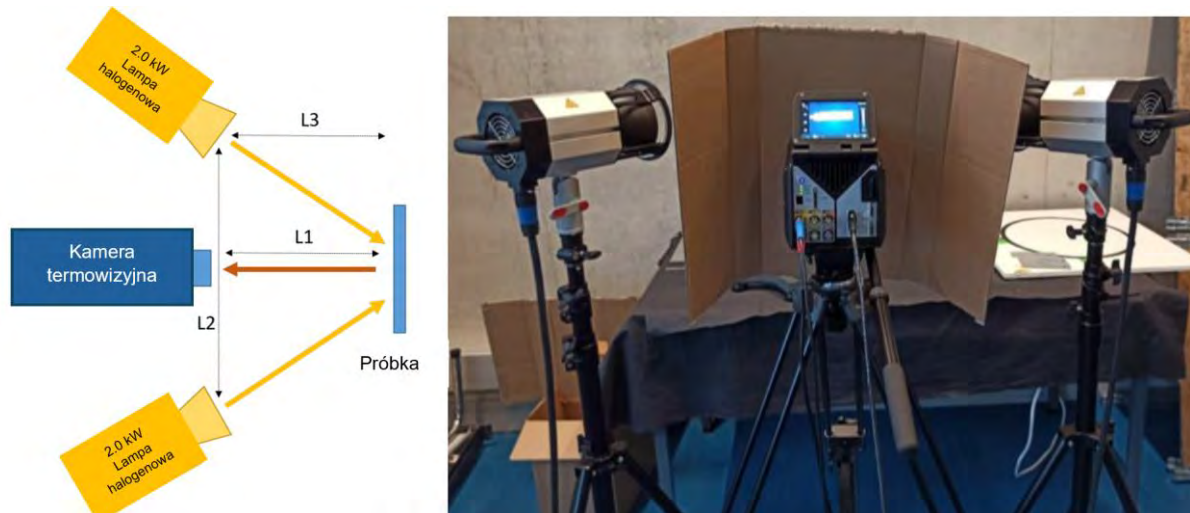
Ogrzewanie może odbywać się przy zastosowaniu lamp halogenowych w połączeniu z termografią lock-in lub pulsacyjną. Dwie lampy halogenowe o mocy 2 kW każda zostają umiejscowione na statywach, natomiast kamera termowizyjna umożliwiająca pomiar znajduje się po środku (rys. 3.10) [37].

Do pomiarów z zastosowaniem grzania indukcyjnego wykorzystywany jest grzejnik o mocy 1,5 kVA. Energia cieplna jest przekazywana na próbkę poprzez cewkę indukcyjną o dwóch uzwojeniach. Grzałka indukcyjna mocowana jest przy użyciu zacisku w odległości od badanej próbki. Podgrzewanie próbki następuje stopniowo, czas trwania impulsu wzbudzającego grzałkę jest ustalany przez operatora wykonującego pomiary [37].

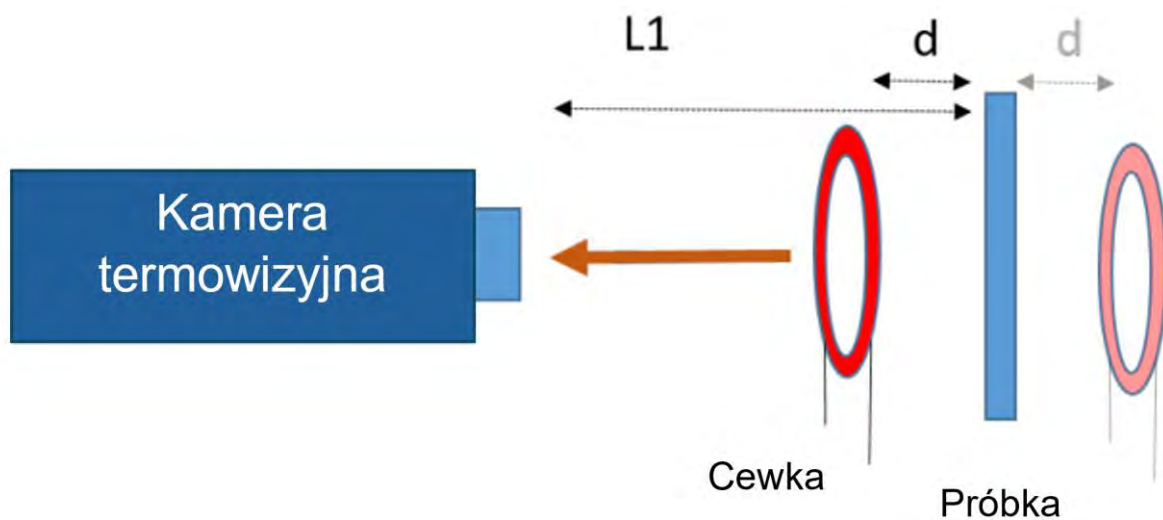
Poprzez zgrzewanie części posiadają połączenie o strukturze metalicznej, umożliwia ono transfer ciepła pomiędzy próbkami. Wykorzystując termografię w podczerwieni można zaobserwować różnicę w przenoszeniu ciepła przez obszar zgrzeiny a resztę próbki. Dodatkowo obszary spajane będą wykazywały inne schładzanie w stosunku do obszarów bez wykonanego połączenia. Różnice w wewnętrznej strukturze zgrzeiny będą powodować znaczną różnicę w stygnięciu, którą można zaobserwować dzięki kamerze termowizyjnej za pomocą przetwarzania końcowego obrazu [37].

Termografia lock-in działa na wzbudzeniu sinusoidalnym, bazuje ona na optymalnej kombinacji amplitudy względem częstotliwości. Parametry te pozwalają na dobranie takiego sposobu grzania, który spowoduje największy kontrast dla regionów poddawanych kontroli. Amplituda odpowiada za ilość energii dostarczonej do złącza, natomiast częstotliwość za czas, w którym energia jest wyzwalana. Niska częstotliwość będzie skutkować wydłużonym czasem ogrzewania. Badania pokazują, że wydłużony czas ogrzewania ($f = 0,05 \text{ Hz}$) skutkuje lepszym obrazem w odniesieniu do kontrastu zdjęć, w przypadku wysokich częstotliwości ($f = 1,4 \text{ Hz}$) obraz wykazuje wysokie zakłócenia, które przeszkadzają w analizie termogramu [37].

Wyniki pomiarów są analizowane poprzez szybką transformatę Fouriera (FFT) jak i zasadniczej analizy składowej (PCA). PCA opiera się na dekompozycji wartości osobliwych oraz celu. Technika ta zmniejsza ilość zmiennych przy jak najmniejszej utracie informacji. Transformata Fouriera znów opiera się na zaokrągłaniu danych przez sumę fal harmonicznnych, służą one do wyznaczenia fazy oraz amplitudy [38, 39].



Rys. 3.10 Stanowisko do kontroli jakości z zastosowaniem termowizji oraz ogrzewaniem świetlnym [37].



Rys. 3.11 Schemat stanowiska do kontroli jakości z zastosowaniem termowizji oraz o ogrzewaniu indukcyjnym [37].

Termografia pulsacyjna z użyciem nagrzewania za pomocą energii światła opiera swoje działanie na stałej amplitudzie przyporządkowanej do badań. Posługuje się ona na czasie i ilości cykli impulsu powodującego nagrzewanie próbki. Do analizy danych z pomiarów posługujemy się dokładnie takimi samymi narzędziami jak w przypadku termografii lock-in [37].

W termografia indukcyjnej ogrzewanie próbek może być wykonywane zarówno przednio od frontu próbki lub tylnego za nią. Termografia indukcyjna (rys. 3.11) jest najszybszą metodą nagrzewania zgrzein, daje obrazy o najwyższej jakości. Analiza danych zgromadzonych tą metodą odbywa się w sposób analogiczny do poprzednich. Jako jedyna z wyżej wymienionych metod może znaleźć swoje zastosowanie w procesach produkcyjnych. W poprawnych

zgrzeinach można wykryć wyraźny kontur, a obszar wewnątrz zgrzeiny (jądra) wykazuje odmienne zachowanie w transferze ciepła [37].

Dotychczasowe prace badawcze pokazują, że charakteryzowanie zgrzein punkowych przy zastosowaniu termografii jest możliwe i bardzo korzystne, należy jednak pamiętać, że słabe pod kątem wytrzymałościowym zgrzeiny także będą zapewniać gradient temperatury równie dobrze jak zgrzeiny o wyższych własnościach wytrzymałościowych. Techniki te muszą być w dalszym ciągu rozwijane w celu zwiększenia prędkości kontroli z uwagi na prędkości pracy linii montażowych, co umożliwi opłacalność oraz realistyczne warunki eksploatacji takich systemów [34].

2.5. Metoda promieniowania rentgenograficznego

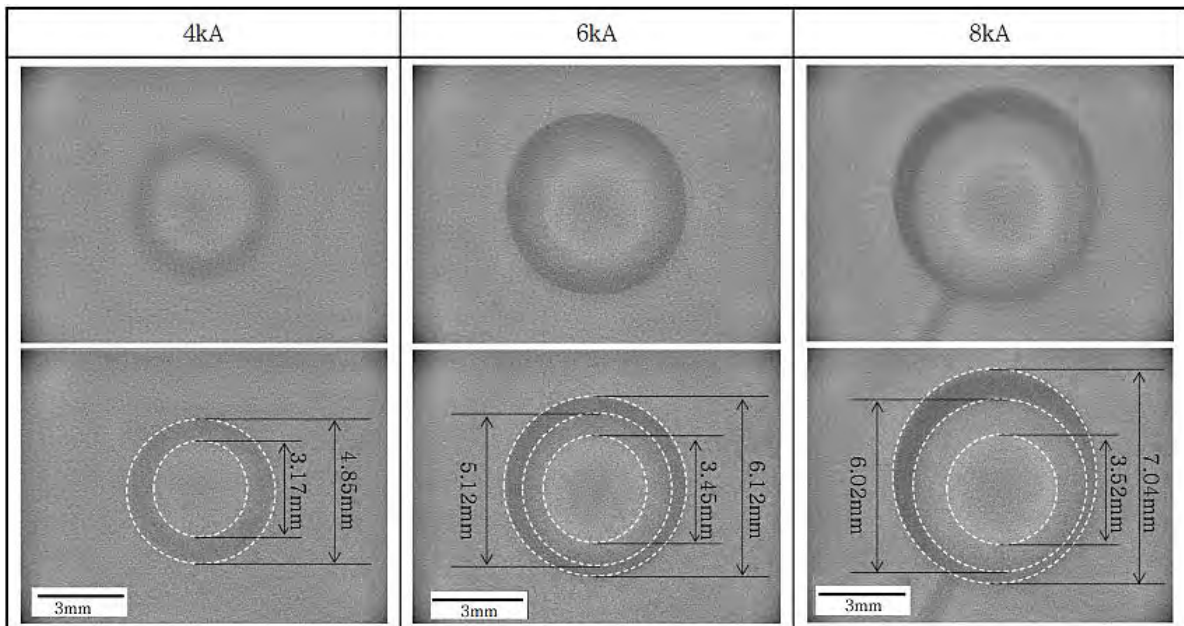
Metody transmisji promieniowania rentgenowskiego z obrazem spoiny zyskała powszechną popularność jako metoda kontroli złączy spawanych jak i zgrzewanych. W praktykach przemysłowych są niedoścignione pod względem informacji dostarczanych o wykonanym złączu jak i jej wrażliwości na defekty, natomiast jej powolna produktywność do weryfikowania połączeń wiąże się z ogromnymi kosztami pracy jak i materiałów [40].

Badania radiologiczne polegają na prześwietleniu obiektu badanego poprzez wiązkę silnie zjonizowanego promieniowania emitowanego przez aparat rentgenowski bądź źródło izotopowe. Na podstawie różnic w absorpcji promieniowania przez zgrzeinę powoduje powstanie jej obrazu na detektorze. Radiografie cechuje bardzo dobra wykrywalność mikropęknięć, jest uznawana za metodę o największej dokładności przy weryfikacji jakości połączenia. Metoda kontroli jakości polega na ocenie zmienności natężenia promieniowania docierającego do radiogramu po przepuszczeniu przez złącze, w którym nieciągłości tworzą obszary o innej grubości. Największą wadą metod rentgenowskich jest konieczność obustronnego dojścia do złącza, ponieważ film jest po przeciwległej stronie względem promieniowania [41].

Promieniowanie rentgenowskie oraz ultradźwięki mogą być zastosowane do zobrazowania kształtu i rozmiaru jądra. Dla kontroli ultradźwiękowej wykorzystywany jest mikroskop akustyczny, w jego polu umieszcza się próbkę w medium w postaci wody, poprzez którą dokonuje się transmisji ultradźwięków. W przypadku kontroli z użyciem promieni rentgenowskich stosuje się folię światłoczułą jako środek transmisyjny. Możliwość zastosowania cyfrowych rejestratorów obrazu umożliwia szybszą i sprawną kontrolę jakości [42].

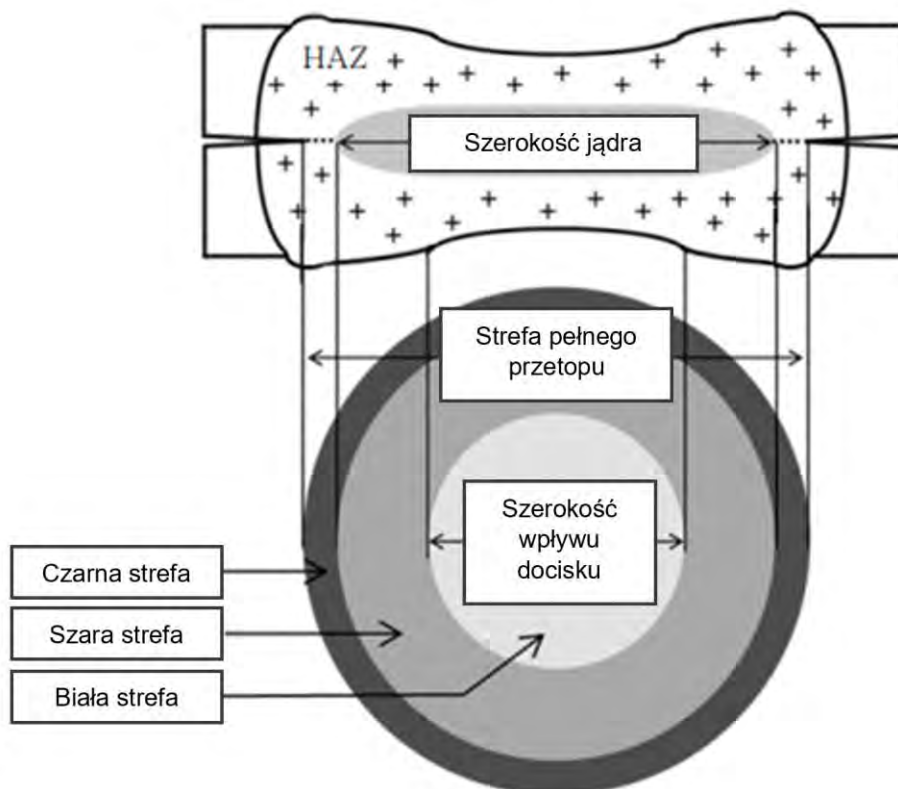
Penetracja promieni rentgenowskich przez zgrzeinę punktową za pomocą aparatu FXS-160.40 firmy Fein Focus przy parametrach napięcia przyspieszającego 100 kV oraz prądzie 0,4 mA i prostopadłym ułożeniu wiązki elektronowej daje rentgenogramy zgrzein punkowych przedstawione poniżej (rys. 3.12).

Można na nich wyróżnić trzy okręgi: biały – materiał wygnieciony poprzez elektrodę wskutek działania siły docisku, szary – wpływ strefy ciepła na mikrostrukturę zgrzeiny, gdzie wystąpił pełen przetop blach łączonych i uformowało się jądro zgrzeiny, czarny - wpływ strefy ciepła z przetopem pomiędzy blachami (rys. 3.13)[42].



Rys. 3.12 Rentgenogramy zgrzein na detektorze [42].

Rentgenografia w kontroli jakości zgrzein niesie za sobą duże ograniczenia z względu na konieczność dostępu dwustronnego do zgrzeiny, natomiast jej dokładność poprzez przepuszczenie promieniowania RTG umożliwia bardzo dokładną metodę weryfikacji złącza, może znaleźć swoje zastosowanie w przypadku konstrukcji o wysokim współczynniku bezpieczeństwa wykonanych połączeń. Natomiast aktualny stan wiedzy i kosztowność technologii nie pozwalają na szerokie zastosowanie i automatyzacje w odniesieniu do procesów produkcyjnych [42].



Rys. 3.13 Schemat stref o różnym natężeniu promieniowania RTG, a strukturą zgrzeiny [42].

3. Zgrzewanie rezystancyjne

Zgrzewanie rezystancyjne jest procesem, w którym stworzone zostaje trwałe nierozdzielne połączenie w wyniku nagrzania obszaru styku części łącznych przez przepływający prąd elektryczny, prowadzi to do uplastycznienia materiału, który zostaje odkształcony plastycznie poprzez zewnętrzną zadaną siłę docisku [8, 41, 43, 44, 45, 46, 47].

W trakcie powstawania złącza dochodzi do wielu jednoczesnych zmian natury metalurgiczno-fizycznej, między innymi: wydzielanie ciepła, gradient temperatury, przenoszenie masz, zmiana struktur fazowych, odkształcenie plastyczne na zimno jak i gorąco, mechanizmy topnienia jak i krystalizacji metali w obszarze zgrzewania, narastanie oraz relaksacja naprężeń zarówno cieplnych jak i mechanicznych [8, 41, 43, 44, 45, 46, 48].

Połączenie może być dokonane w dwóch stanach skupienia, pierwszym stałym w wyniku dyfuzji masz czy wzajemnego przekrystalizowania, drugim ciekłym poprzez wytworzenie w materiałach łączonych tzw. Jądra zgrzeiny. W zależności od metody wykonania połączenia zgrzewanie można podzielić na punktowe, garbowe, doczołowe zwarciove, doczołowe iskrowe, liniowe. Dodatkowo nagrzewanie rezystancyjne wykorzystywane jest także w luzozgrzewaniu, brykietowaniu linek czy kształtowaniu detali [43].

Ciepło niezbędne do procesu powstaje wskutek prawa Joule'a Lenza, które to określa ilość ciepła, jaka się wytwarza się w trakcie zgrzewania i opisuje ją wzór (4) [8, 41, 43, 44, 45, 46].

$$Q = \int_0^{t_z} I_{(t)}^2 R_{(t)} dt \quad (4)$$

gdzie:

Q – ciepło [J],

I – natężenie prądu zgrzewania [A],

R – całkowita rezystancja obszaru zgrzewania [Ω],

t – czas przepływu prądu zgrzewania [s],

Natężenie prądu $I(t)$ jest podstawowym parametrem zgrzewania, którego wartości mogą być zadawane jak i kontrolowane poprzez wiele rozwiązań technicznych:

- zgrzewarki: jednofazowe AC, trójfazowe AC bądź DC, kondensatorowe, inwertorowe;
- układy sterowania: z kontrolowaniem wartości natężenia prądu, ze stabilizowanym natężeniem prądu, z korektą oraz stabilizacją natężenia prądu, z regulacją natężenia prądu w czasie rzeczywistym;
- aparatury kontrolno-pomiarowej: systemy do oceny warunków zgrzewania (przede wszystkim natężenia prądu), programów komputerowych, które wykorzystują sztuczną inteligencję do określenia własności wykonanego złącza oraz kwalifikowania jakości względem klasy zgrzeiny [8].

W trakcie procesu zgrzewania o sposobie nagrzewania decyduje rezystancja całkowita R_c , którą to można rozbić na składowe rezystancji materiałów R_m oraz rezystancji styków R_s [43],

$$R_c = \sum (R_m + R_s) \quad (5)$$

W początkowej fazie procesu rezystancję można uogólnić wzorem:

$$R_m = \zeta \frac{l}{s} \quad (6)$$

gdzie:

ζ – rezystancja właściwa,

l – długość drogi prądu,

s – powierzchnia przekroju,

Rezystancja zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury z szybkością, która wynika z rodzaju materiału według zależności:

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (7)$$

gdzie:

R – rezystancja materiału w temperaturze T ,

R_0 – rezystancja materiału w temperaturze T_0 ,

α – współczynnik temperaturowy rezystancji.

Przykładowe przebiegi zmiany rezystancji właściwej przedstawia rysunek (rys. 4.1), który przedstawia przebiegi zmiany rezystancji wraz ze wzrostem temperatury dla różnych stopów metali [43].

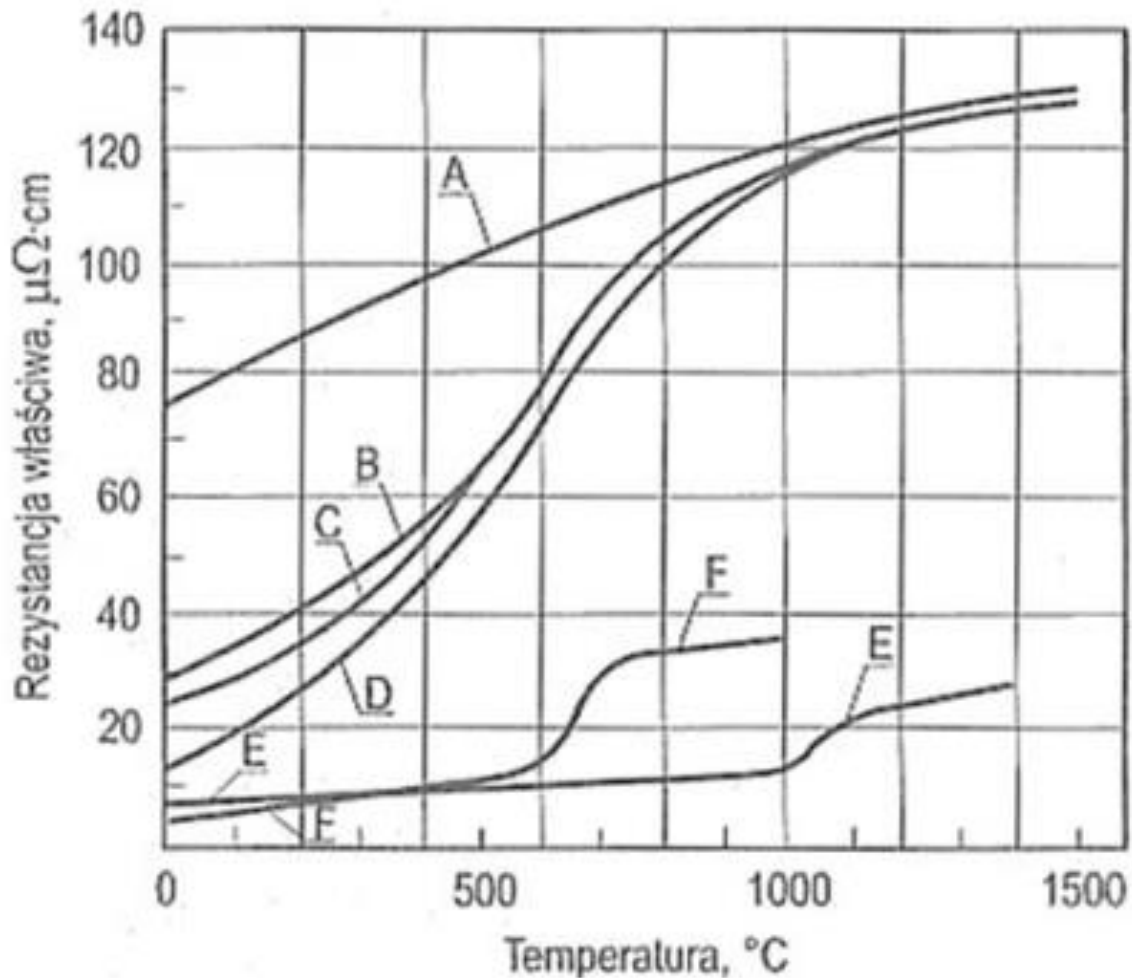
Rezystancja styków spada wraz ze wzrostem przewodności elektrycznej materiału im czystsze i dokładniejsze przygotowanie powierzchni elementów. Pozostałymi parametrami wpływającymi na rezystancje styków jest wielkość powierzchni, siła docisku oraz zwiększenie temperatury materiału w obszarze styku, w ich wypadku wraz ze wzrostem rezystancja maleje. Wartość rezystancji mieści się w szerokim przedziale od kilkudziesięciu [43].

Całkowita rezystancja obwodu wtórnego zgrzewania zmienia swoją wartość nieustannie podczas cyklu, a jej wyliczenie na podstawie wzorów matematycznych jest praktycznie niemożliwe. W procesie zgrzewania problem ten rozwiązano poprzez wyznaczenie jej z użyciem pomiaru wartości napięcia szczytowego (U_p) dzielonego przez szczytową wartość natężenia prądu (I_p), uzyskuje się wówczas rezystancję dynamiczną obszaru zgrzewania:

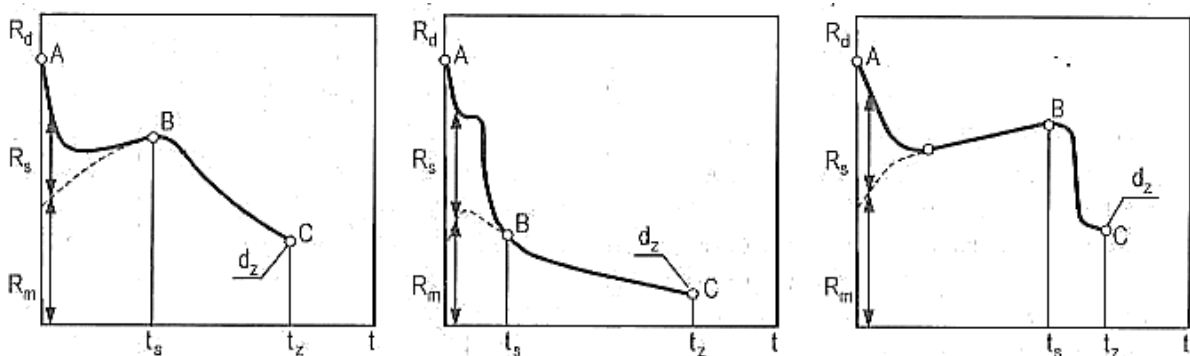
$$R_d = \frac{U_p}{I_p} \quad (8)$$

Wartość ta wyznaczona jest w oparciu o rzeczywisty spadek napięć U_p oraz wartości natężenia prądu w mierzalnych przedziałach czasu (0,001 s dla zgrzewarek o źródle inwertorowym oraz 0,01 s dla źródeł prądu przemiennego). Przebieg rezystancji dynamicznej jest charakterystyczny dla poszczególnych metod zgrzewalniczych, co obrazują wykresy zamieszczone poniżej (rys. 4.2). Krzywe rezystancji dynamicznej przy obecnym stanie zaawansowania technicznego są podstawowym parametrem charakteryzującym proces zgrzewania i na ich podstawie tworzona jest aparatura sterująca przebiegiem [8].

Przebieg zgrzewania oraz tworzenia się jądra zgrzeiny poza wykorzystaniem zjawiska Joule'a Lenza wykorzystuje inne zjawiska związane z przepływem energii elektrycznej o dużym natężeniu, np.: elektromagnetyczne, elektrodynamiczne czy termoelektryczne (zjawisko Peltiera) [43].



Rys. 4.1 Zależność wielkości rezystancji właściwej względem temperatury nagrzewania [43]:
A – stal chromowo-niklowa, B – stal manganowo-krzemowa, C - stal wysokomanganowa, D - stal niskowęglowa, E – mosiądz, F - aluminium



Rys. 4.2 Przebiegi rezystancji dynamicznej obszaru zgrzewania I – Zgrzewanie punktowe; II – Zgrzewanie garbowe blach na zakładkę; III – Zgrzewanie doczołowo zwarciove; gdzie A – początek zgrzewania; B – początek właściwego tworzenia zgrzeiny; C – koniec wzrostu zgrzeiny d_z , w czasie zgrzewania t_z [43].

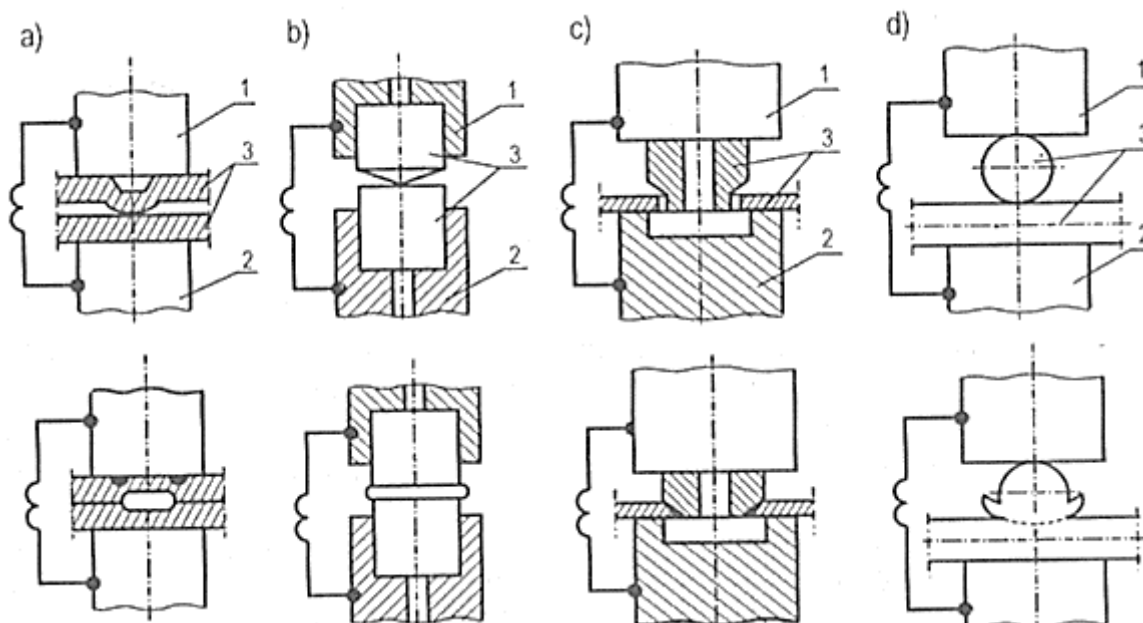
4. Zgrzewanie rezystancyjne metodą garbowe

4.1. Charakterystyka procesu

Jest to odmiana zgrzewania rezystancyjnego, w której przyływ prądu koncentruje się w punkcie miejscowego styku poprzez geometrię jednego bądź obu detali łączonych. Geometria nazywana jest garbami i może przyjmować różne postacie geometryczne. Garby służą do koncentracji generowanego ciepła, a sam proces z uwagi na to wykorzystuje mniejsze siły oraz krótsze czasy zgrzewania niż w pozostałych odmianach zgrzewania. Do zgrzewania garbowego elektrody przyjmują kształt dużej płaskiej powierzchni, a wymiar wykonywanej zgrzewiny określony jest wymiarem garbów, nie powierzchnią elektrody jak w przypadku zgrzewania punktowego [50-70].

Zgrzewanie rezystancyjne często stosowane jest przy najtrudniejszych aplikacjach, pozwala ono na łączenie materiałów o znacznych grubościach, a także o dużych różnicach grubości pomiędzy łączonymi detalami. Najczęstszym przykładem zastosowania jest wykonywanie do kilku zgrzein w jednej chwili czasu pomiędzy komponentami, co powoduje duże utrudnienia ze względu na nierównomierną rezystancję wszystkich styków, w wyniku czego występuje bocznikowanie prądu. Prowadzi to do uznania zgrzewania garbowego za najtrudniejszy proces zgrzewalniczy, który często musi być modyfikowany pod kątem geometrii jak i rozmieszczenia garbów na detalach łączonych [8].

Garby mogą być wykonane w procesie technologicznym lub stanowić integralną część łączonych części, np. kulista część łba śruby, przetłoczenie, brzeg blachy lub powierzchnia walcowa pręta. Typowe zestawy połączeń przedstawiono na ilustracji poniżej (rys. 5.1) [8].

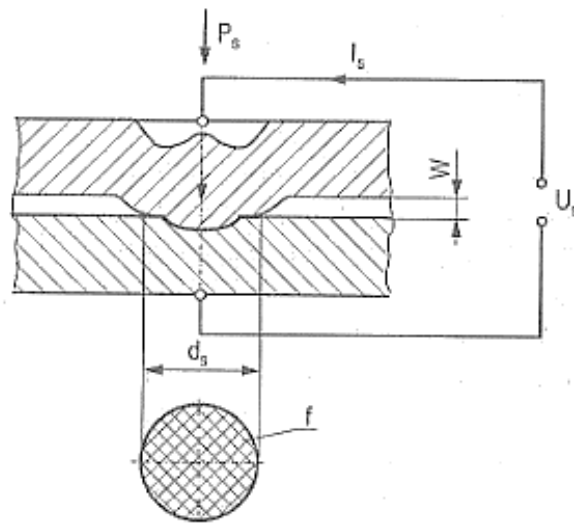


Rys. 5.1 Przykłady zgrzewania garbowego: a) elementy blaszane; b) c) kołki sworzni, czopów; d) prętów; 1, 2- elektrody; 3 – elementy zgrzewane [43].

Proces zgrzewania garbowego blach na zakładkę składa się z trzech etapów.

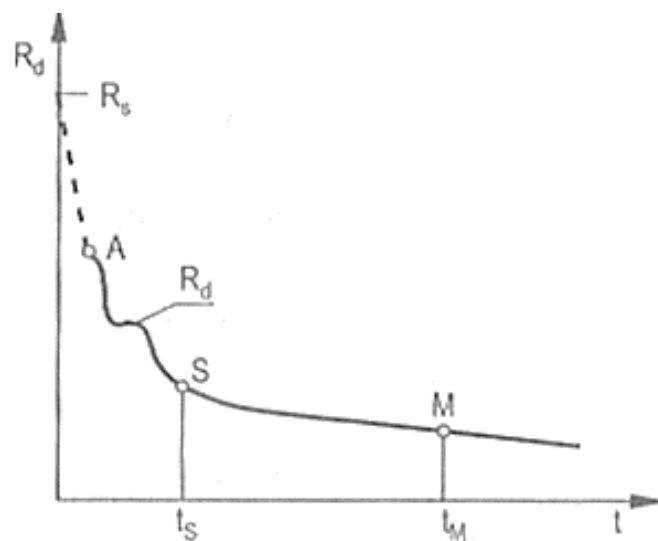
Obciążenie wstępne garbu - bez prądu wstępne dociśnięcie łącznych części powoduje zmniejszenie wysokości garbu z jednoczesnym zwiększeniem powierzchni styku f (rys. 5.2). Jeżeli siła docisku jest niewystarczająca, to garb odkształca się tylko sprężysto, co nie jest pożądaną cechą do drugiego etapu z uwagi na dużą rezystancję statyczną styku oraz małą stabilność wymiarową. Pożądaną siłą docisku jest siła wywierana na garb, która będzie skutkować początkowi umacniania plastycznego. Z punktu technologicznego obciążenie wstępne garbów

jest istotne szczególnie przy zgrzewaniu wielogarbowym, pozwala to na równomierne rozłożenie powierzchni styków f , a tym samym zrównoważoną gęstość prądów na poszczególnych garbach, unikając wypaleń czy wyprysków. Odpowiednia siła to taka, której wartość spowoduje obniżenie garbu o 25-35% [43].



Rys. 5.2 Schemat obciążenia wstępnego garbu [43].

Formowanie zgrzeiny – w wyniku przepływu prądu elektrycznego dochodzi do nagłego odkształcenia garbu i dopasowanie go do leżącej blachy. Rezystancja dynamiczna w strefie wykonywanego połączenie gwałtownie maleje przedział A-S (rys. 5.3), a sam garb najbardziej zwiększa swoją temperaturę na brzegach w sposób pierścieniowy. Przyklejenie pomiędzy blachą a grabem powstaje w środkowej powierzchni garbu. Kolejno następuje zetknięcie i kontakt pomiędzy elektrodą a wydętym dnem garbu, a strefa intensywnego nagrzewania przenosi się na całą powierzchnię styku, prowadząc do nagrzania się materiału do temperatury podlikwidu-sowej. Czas, w jakim następuje stabilizacja rezystancji dynamicznej S (rys. 5.3), zależy od parametrów wejściowych procesu, czyli prądu zgrzewania oraz w mniejszym już stopniu od siły docisku elektrod [43].



Rys. 5.3 Krzywa rezystancji dynamicznej w trakcie powstawanie złącza poprzez zgrzewanie garbowe, R_d – rezystancja dynamiczna obszaru zgrzewania; R_s – rezystancja statyczna obszaru zgrzewania [43].

W dalszym ciągu przepływający prąd elektryczny powoduje stąpienie, w wyniku którego powstaje jądro zgrzeiny, krzywa rezystancji dynamicznej nie zmienia swoich wartości. Złącze zgrzane prawidłowo jest w stanie mieszanym (brzegi są plastyczne, a jądro w stanie płynnym), następuje to zazwyczaj po upływie czasu t_M – jądro zgrzeiny wówczas osiąga pełne wymiary (jego średnica wyjmując wymiar $d_j = 5\sqrt{g}$, gdzie g jest grubością blach zgrzewanych metodą grabową). Penetracja jądra do blach przyjmuje około 60% ich grubości [43].

4.2. Zalecenie ogólne procesu

Zalecenia przygotowania powierzchni oraz materiałów użytych do poprawnego wykonania zgrzewania garbowego:

1. Do zgrzewania wymagane jest oczyszczenie powierzchni części w taki sposób aby były one metalicznie czyste i odtłuszczone, dodatkowo części nie mogą posiadać na sobie rdzy, smaru, farby czy innych zanieczyszczeń. Części wykonywane metodą tłoczenia na gorąco należy pozbawiać zgorzeliny [60].
2. Części w trakcie procesu powinny stykać się jedynie poprzez garby, wszystkie elementy prowadzące, pozycjonujące powinny być wykonane z materiałów izolacyjnych. Należy w detalach unikać zadziorów i skaleczeń, ponieważ w trakcie procesu mogą powodować dodatkowe miejsca styku [60].
3. Zgrzewarka powinna być zaadaptowana do kształtu oraz wymiaru części zgrzewanych – musi ona wykazywać stałość i powtarzalność warunków [43].
4. Materiał na elektrody do zgrzewania powinien cechować się: odpowiednią przewodnością elektryczną jak i cieplną (powyżej 40% IACS), posiadać twardość powyżej 160 HV, temperaturę mięknięcia co najmniej 450 °C oraz małą skłonność do wiązania się z materiałem zgrzewanym [43].
5. Powierzchnia styku pomiędzy elektrodą a elementem zgrzewanym powinna być większa od przekroju zgrzewania [43].
6. Wartość siły docisku zależy od kształtu, powierzchni garbu oraz materiału zgrzewanego, przybliżone wartości siły docisku dla stali miękkich to $7 \div 12 \frac{daN}{mm^2}$ [43].
7. Prąd zgrzewania decyduje o stopniu nagrzania elementów zgrzewanych, a jej wartość zależy od siły docisku czy wymiarów garbu. Przyjmuje się, że prąd dla stali niskowęglowych powinien być w przybliżeniu to $300 \div 500 \frac{A}{mm^2}$ przekroju garbu [43].
8. Czas nagrzewania dobiera się w zależności od przekroju zgrzein oraz gatunku materiału łączonego. Przy stalach miękkich należy zadać krótkie czasy nagrzewania, dla stali twardej (węglowych, stopowych) dłuższe [43].
9. W zależności od materiału należy zwrócić uwagę na program sterowania cyklem, szczególnie na czasy narastania wartości prądu [43].

4.3. Charakterystyka połączenia

Wysoka jakość połączenia wykonanego zgrzewaniem garbowym jest powodem jej powszechnego stosowania. Zmienne warunki pracy części zgrzewanych z zastosowaniem tej metody wymuszają ciągłe doskonalenie procesu z uwagi na właściwości takie jak: wygląd zewnętrzny, tolerancje wymiarowe, właściwości mechaniczne pod działaniem sił statycznych jak i dynamicznych, lepsza struktura krystalograficzna zgrzeiny jak i redukcja wpływu strefy ciepła [43, 44, 45].

Złącza garbowe posiadają estetyczny wygląd zewnętrzny, z uwagi na te cechy wykorzystywana jest jako końcowa faza wykonania części po wykonaniu innych operacji technologicznych. Pomimo uszkodzenia warstw zabezpieczających przed korozją komponentów w skutek wykonanego połączenia, te często wykazują cechy odporności na korozję. Z uwagi

na precyzyjny sposób pozycjonowania detali umożliwia to wysoką precyzję położenia detali. Połączenie garbowe wykazuje równe własności wytrzymałości na działanie sił co materiał rodzimy [43, 44, 45].

Połączenie metaliczne może być utworzone poprzez wzajemne przetopienie lub przekształcenie obszaru zgrzewania. Charakter połączenia zależy od kształtowania zgrzewanych części oraz stosowanych parametrów zgrzewania, dobiera się go w fazie projektowania konstrukcji. W środku złącza garbowego występuje typowe jądro zgrzeiny jak w wypadku zgrzewania punktowego, wokół jądra występuje strefa zgrzania, która zostaje w stanie stałym (plastycznym) podczas przebiegu procesu. W przypadku niewłaściwych parametrów lub warunków, mogą powstać niezgodności spawalnicze zmniejszające jakość, z uwagi na to przestrzeganie podstawowych zasad jest warunkiem koniecznym i niezbędnym szczególnie w produkcjach seryjnych [43, 44, 45].

5. Niezgodności złączy zgrzewanych rezystancyjnie

Poznanie niezgodności, które występują w złączach zgrzewanych rezystancyjnie prowadzi do zwiększenia jakości komponentów produkowanych tym procesem technologicznym. Rozpoznanie przyczyn oraz możliwość ich eliminacji powinny przyczynić się do poprawy jakości na wszystkich etapach produkcji, czyli fazach: projektowania, opracowania procesu technologicznego, realizacji procesu wytwarzania oraz kontroli jakości złączy jak i wyrobów. Szczegóły klasyfikacji oraz pojęcia przedstawia norma PN-ISO8402 [14, 50, 70, 71, 72, 73, 74].

Podziału niezgodności w złączach zgrzewanych można dokonać z uwagi na kryterium łatwości do wykrycia:

Niezgodności makroskopowe – nadtopienia, wżery, nadmierne wgnioty, brak przetopu, niewłaściwe uformowanie jądra zgrzeiny. Niezgodności te są wykrywalne nieuzbrojonym ludzkim okiem bądź z powiększeniem trzydziestokrotnym. Są one najczęściej wykrywalne przemysłowymi metodami badań nieniszczących bądź niszczących.

Niezgodności mikroskopowe – wtrącenia niemetaliczne, mikropęknięcia, kruche struktury metalograficzne, wykrywane są poprzez badania metalograficzne struktury zgrzeiny [70].

Publikacje wyróżniają jeszcze dodatkową grupę w postaci niezgodności submikroskopowych, występują one na poziomie budowy metalograficznej, są wykrywane z zastosowaniem specjalistycznych metod i technik zarówno niszczących jak i nieniszczących [70].

Kolejnym podziałem wyróżnianym jest podział z punktu widzenia użytkownika:

Niezgodności na zewnątrz, które występują na powierzchni zgrzeiny: nadmierne wgnięcie zgrzeiny poprzez elektrody, nadmierne rozwarście blach, przetopienie w obszarze zgrzeiny, przegrzanie zgrzeiny, przypalenie w obszarze kontaktu z elektrodą, za duża odległość pomiędzy łączonymi detalami, dyfuzja materiału elektrody na złącze, niesymetryczny rąbek zgrzeiny, pęknięcia, pory oraz wżery [70].

Niezgodności wewnątrz zgrzeiny występują w trakcie bądź po zgrzewaniu wewnątrz zgrzeiny: przyklejenie (nieuformowanie jądra), pęknięcia, zbyt małe bądź duże jądro zgrzeiny, asymetryczny kształt jądra, przesunięcie punktu zgrzewania poza obszar docisku elektrody, pęcherze oraz pory, jamy skurczowe, wtrącenia żużlu, tlenków, nadmierny rozrost ziarna w obszarze złącza, niewłaściwy rozkład twardości, krucha struktura hartownicza, nadmierne odwęglenie, nadmierne odkształcenie [70].

Podziału można dokonać z punktu widzenia na kształt, decyduje on w znacznej mierze o czynnym przekroju zgrzeiny oraz koncentracji naprężeń [70, 75]:

Niezgodności przestrzenne: pęcherze, żużle, jamy skurczowe, wtrącenia

Niezgodności płaskie: ostro tworzące się karby będące zalążkiem pęknięcia zgrzeiny,

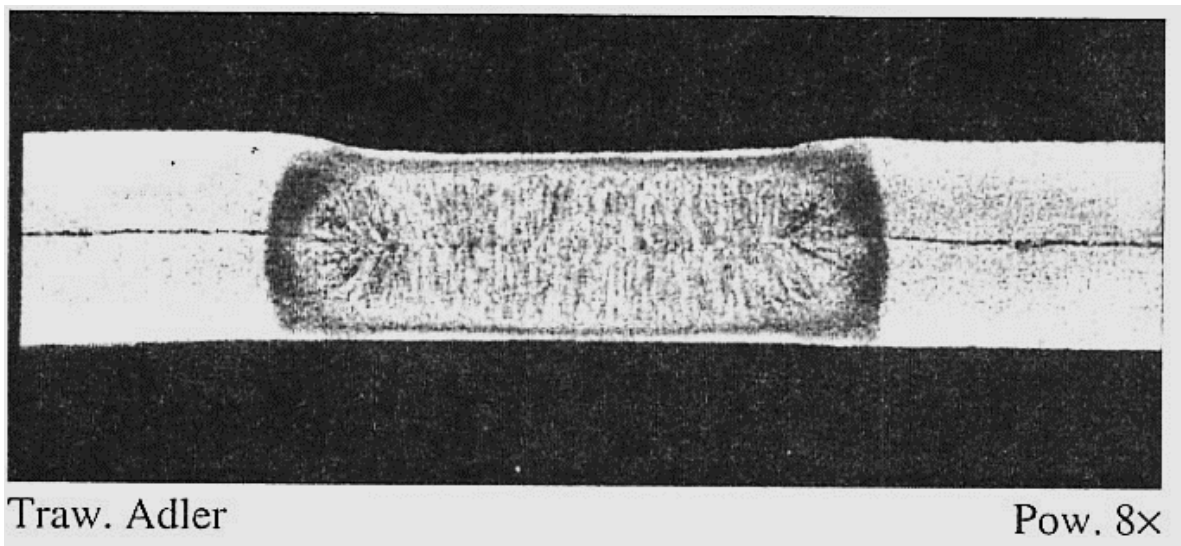
Niezależnie od materiału niezgodności sklasyfikowano w siedmiu grupach: 1 – pęknięcia; 2 – pustki; 3 – wtrącenia stałe; 4 – przyklejanie; 5 – niezgodności kształtu i wymiaru; 6 – niezgodności struktury; 7 – różne.

5.1. Pęknięcia

Do pęknięcia dochodzi w wyniku stanu naprężeń, które przekraczają granicę wytrzymałości materiału na rozciąganie, co skutkuje przerwaniem ciągłości złącza. W zgrzeinach do pęknięcia można podzielić je na: hartownicze, od wpływu strefy ciepła, mechaniczne. Poza pęknięciami wynikającymi z procesu, może dochodzić do pęknięć kruchych wskutek, np. przeciążenia układu zgrzewania bądź nadmiernego obciążania detali [70].

Pęknięcia hartownicze najczęściej występują w stalach węglowych i stopowych w trakcie lub zaraz po ukończeniu procesu (w trakcie chłodzenia), zaliczane są one do pęknięć zimnych. Utworzenie nieciągłości powstaje wskutek działania sił wynikających ze zjawiska hartowania się stali pod wpływem działania temperatur, dokładniej obecności martenzytu w stalowych połączeniach zgrzewanych. W wyniku tych mechanizmów do pęknięcia może dochodzić wyraźnie później po zakończonym uprzednio procesie. Hartownicze pęknięcia mogą występować w różnych miejscach połączenia tworząc karby lokalne zgrzeiny. Duże prędkości chłodzenia zgrzein powodują powstawanie naprężeń hartowniczych, które wraz z naprężeniami skurczowymi wynikającymi z gwałtownych zmian termodynamicznych jądra zgrzeiny sprzyjają do powstawania pęknięć w miejscu styku dendrytów i strefie transkrystalizacji. Pęknięcia są niedopuszczalne przy zgrzewaniu odpowiedzialnych komponentów i obniżają w znacznym stopniu jakość.

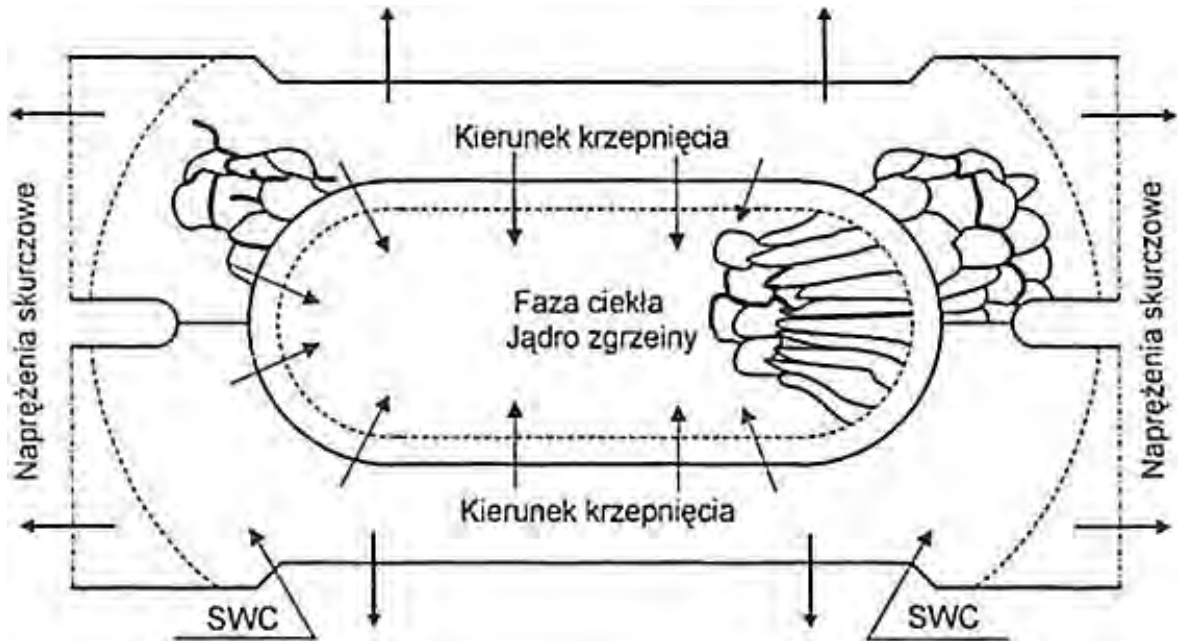
Mechanizmami przeciwdziałającymi pęknięciom hartowniczym jest zastosowanie programów zgrzewania charakteryzujących się zmiennością przebiegu w czasie trwania procesu. Najczęściej występuje to jako zgrzewanie z użyciem impulsowego nagrzewania, końcowe podgrzewanie złącza lub wyżarzanie po zgrzewaniu. Przykład niezgodności ukazuje poniższy zgląd metalograficzny (rys. 6.1), w środku jądra zgrzeiny występują niewielkie porowatości oraz nieznaczne pęknięcia. W linii styku blach występuje duże pęknięcie równoległe [70].



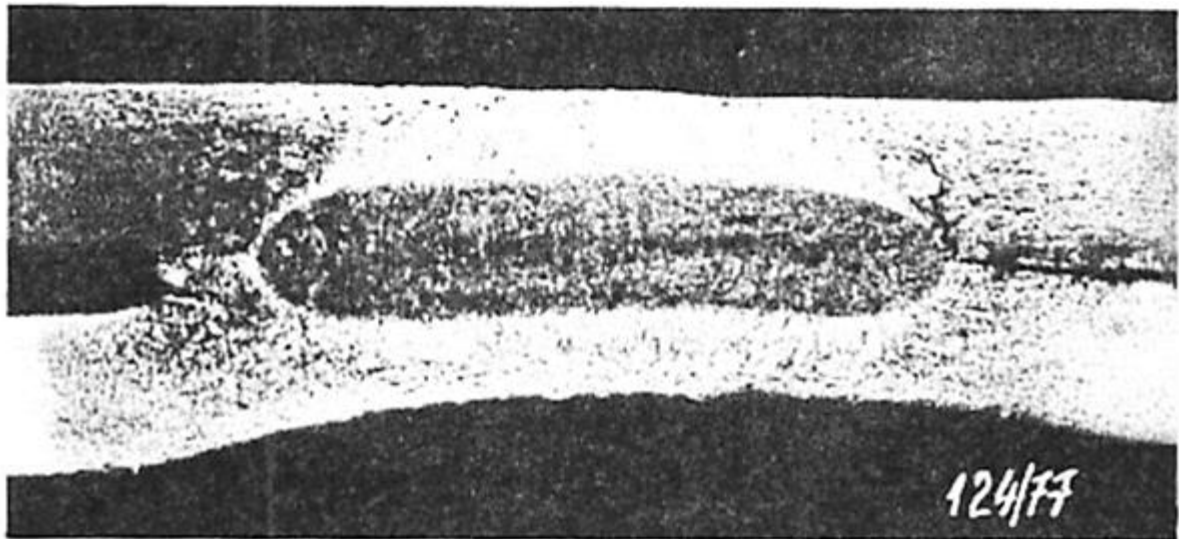
Rys. 6.1 Makrostruktura zgrzeiny punktowej z pęknięciem hartowniczym blach [70].

Pęknięcia gorące występują w materiale zgrzeiny oraz wpływie strefy ciepła podczas procesów krystalizacji w obszarze temperatur likwidus-solidus. Efekt tego mechanizmu to wydzielanie się pomiędzy zakrzepniętymi ziarnami metalu warstewki cieczy przy równoczesnym oddziaływaniu na ten obszar naprężeń pochodzących od skurczu temperaturowego, które przewyższają wytrzymałość materiału. Schemat powstawania pęknięcia gorącego przedstawiono na ilustracji (rys. 6.2). Podczas wzrostu ziarna maleje powierzchnia graniczna na jednostkę objętości metalu, prowadzi to do nagromadzenia składników nietopliwych faz, skutkując podatnością na pęknięcia gorąca. Wzrost zawartości węgla oraz siarki potęguje tę skłonność, poprzez

tworzenie się nietopliwych warstw. Do zredukowania ryzyka powstania gorącego pęknięcia należy używać stali o odpowiednich stosunkach Mn/S do zawartości węgla, stosować dłuższe czasy docisku końcowego w trakcie stygnięcia zgrzeiny redukuje to odkształcenia skurczowe przy zgrzewaniu punktowym stosowanie kulistych elektrod w celu redukowania odkształcenia blach w strefie wpływu ciepła. Złącze zgrzewane z obecnością pęknięcia gorącego (rys. 6.3), w strefie wpływu ciepła widoczne gorące pęknięcia [70].



Rys. 6.2 Schemat tworzenia gorącego pęknięcia w zgrzeinie punktovej [70].

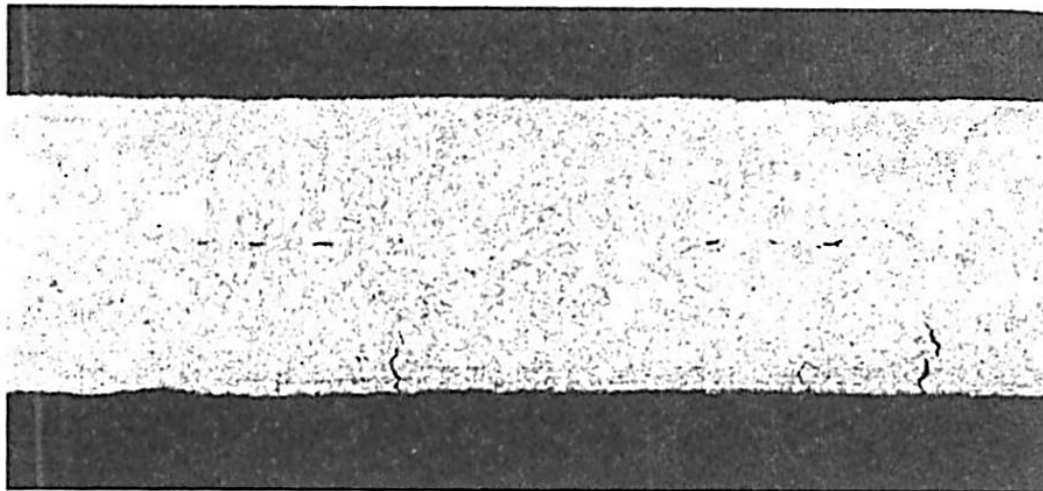


Traw. Adler

Pow. 5x

Rys. 6.3 Makrostruktura zgrzeiny punktovej z pęknięciem gorącym [70].

Pęknięcia mechaniczne powstają wskutek naprężeń przewyższających granice plastyczności, przedstawione zostały poprzez złącze liniowe zgrzewane na elektrodach krążkowych (rys. 6.4) [70].

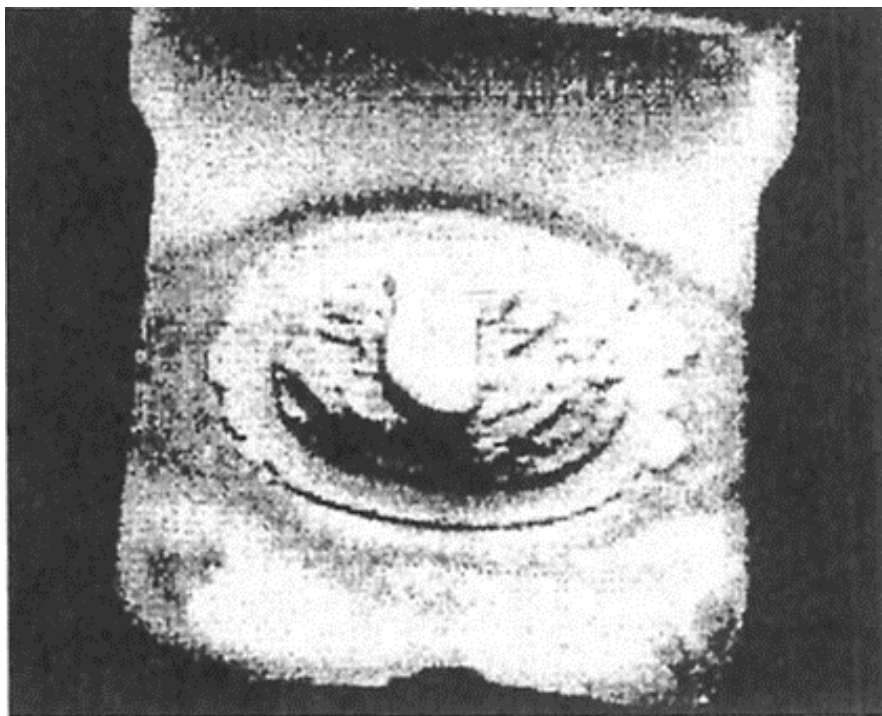


Traw. Nital

Pow. 20×

Rys. 6.4 Makrostruktura zgrzeiny liniowej z pęknięciami mechanicznymi [70].

Pęknięcia kruche pojawiają się najczęściej w blachach zgrzewanych metodą punktową i grabową (rys. 6.5), powstają w wyniku strefy wpływu ciepła na obszarze styku centralnego; obszarze wtórnej krystalizacji (obszar zgrzania w stanie stałym). Kruchość złączy wynika z: karbów geometrycznych dających początek pęknięciu oraz powodującym spadek wytrzymałości; wtrąceń niemetalicznych oraz grubości ziarna struktury – przy ziarnach dużej grubości pękanie następuje przy granicy plastyczności, przy ziarnie drobnym pękanie następuje po przekroczeniu odkształcenia plastycznego; kruchych struktur w złączy takich jak bainit górny lub dolny, jednolita struktura martenzytyczna, struktury mieszane o pewnych ilościach perlitu, ferrytu lub bainitu; warstwowości struktury i wtrąceń niemetalicznych w szczególności dla ułożenia pasmowego w łańcuszek z wtrąceniami tlenków; niewłaściwego składu chemicznego stali, zawartości pierwiastków Cr, Co, V, Mo, P, S [70].

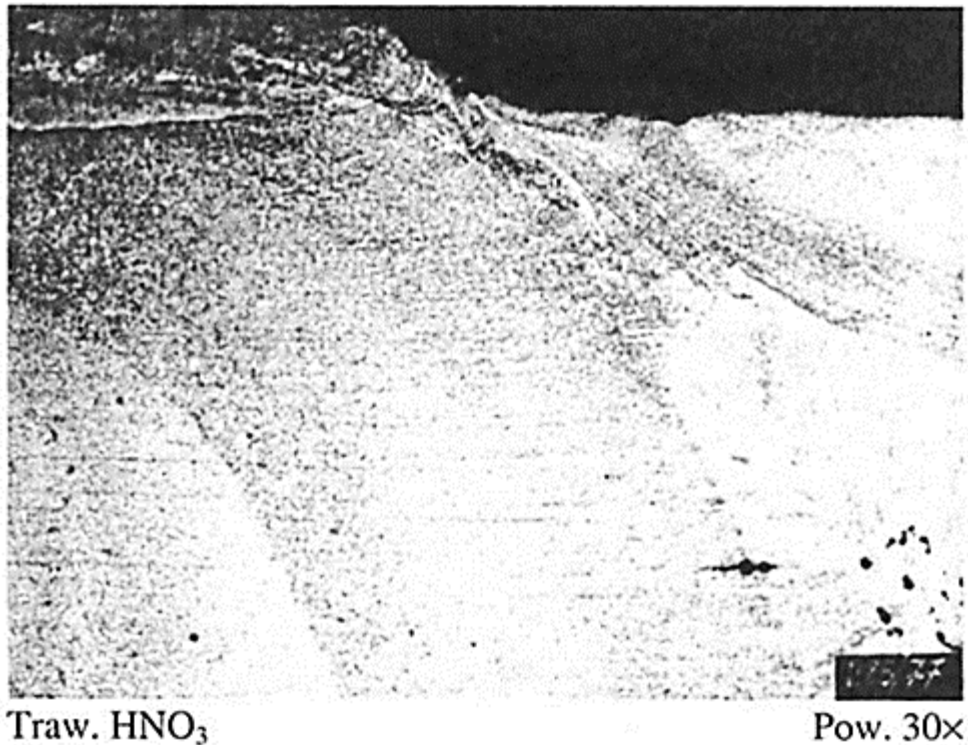


Rys. 6.5 Makrostruktura zgrzeiny grabowej z pęknięciem kruchym [70].

5.2. Pustki

Pustki w zgrzeinach występują najczęściej w postaci: pustki gazowej, jamy skurczowej czy pustki wypryskowej.

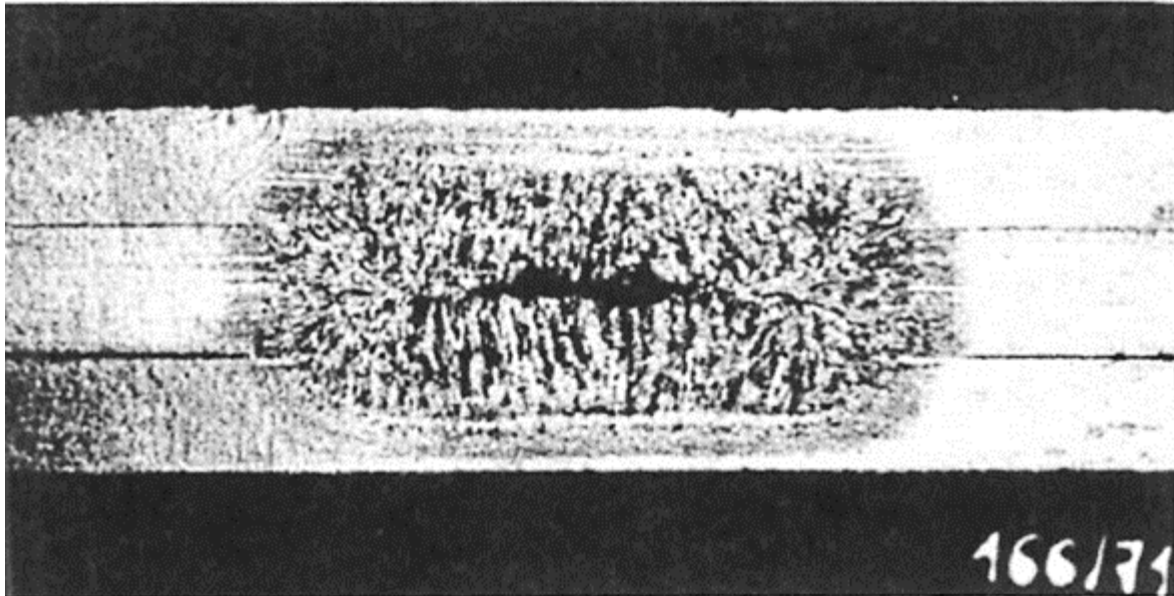
Pustki gazowe pojawiają się w złączach zawierających jądro zgrzeiny, które zostały wykonane w stanie płynnym, nazywane są także pęcherzami i pochodzą od zanieczyszczeń zewnętrznych takich jak: farby czy mastyk używane do ochrony antykorozyjnej; powłok ochronnych kompozytowych bądź metalicznych; smarów, olejów i innych zanieczyszczeń organicznych. Przykład pustki z porami usytuowanymi w środkowej strefie jądra zgrzeiny (rys. 6.6) [70].



Rys. 6.6 Makrostruktura zgrzeiny grabowej z pustkami gazowymi [70].

Jamy skurczowe (rys. 6.7) to najczęstsza niezgodność występująca w złączach zgrzewanych z przetopieniem, koncentruje się w środkowej części jądra zgrzeiny. Wielkości uzależnione są od stosowanych parametrów zgrzewania, głównie siły docisku oraz sprawność układu dociskowego. Wraz ze wzrostem siły docisku, skłonność do powstawania jam skurczowych maleje. Drugą cechą wpływającą na możliwość wystąpienia defektu w postaci jamy skurczowej jest nadążanie docisku elektrody za materiałem odkształcanym. Materiały o dużym współczynniku liniowym rozszerzalności temperaturowej (aluminium, stal kwasoodporna) wykazują tendencje do powstawania jam [70].

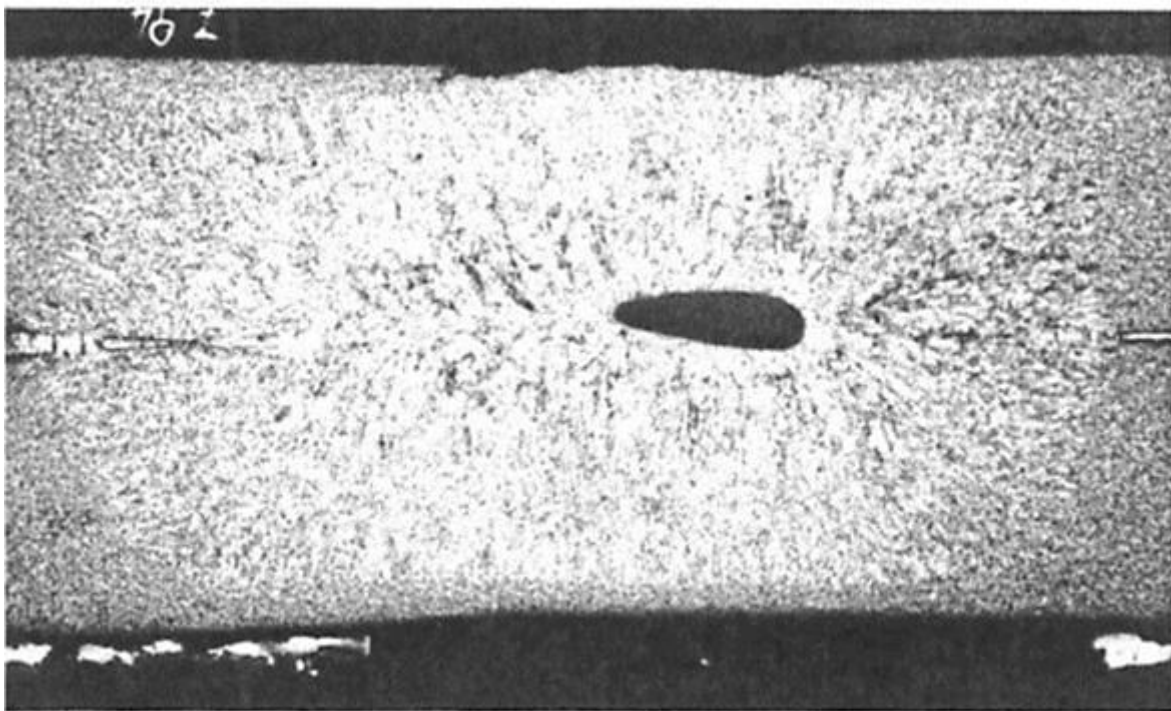
Pustki wypryskowe (rys. 6.8) występują w miejscu wyprysnięcia z jądra zgrzeiny materiału stopionego podczas powstawania złącza. Głównym powodem powstawania wyprysku jest nadmierna energia użyta podczas wykonywania zgrzeiny. Parametry do korekty w przypadku wyprysku materiału to zmniejszenie natężenia prądu, skrócenie czasu zgrzewania bądź zwiększenie siły docisku elektrod. Pustkę wypryskową dzieli się na otwartą oraz zamkniętą, do pierwszego dochodzi na powierzchni materiału podczas kontaktu pomiędzy elektrodą a materiałem zgrzewanym. Wyprysk zamknięty z kolei powstaje w trakcie wyrzucenia materiału z wnętrza zgrzeiny [70].



Traw. Adler

Pow. 5×

Rys. 6.7 Makrostruktura zgrzeiny grabowej z jamą skurczową [70].



Traw. Nital

Rys. 6.8 Makrostruktura zgrzeiny z pustką wypryskową zamkniętą [70].

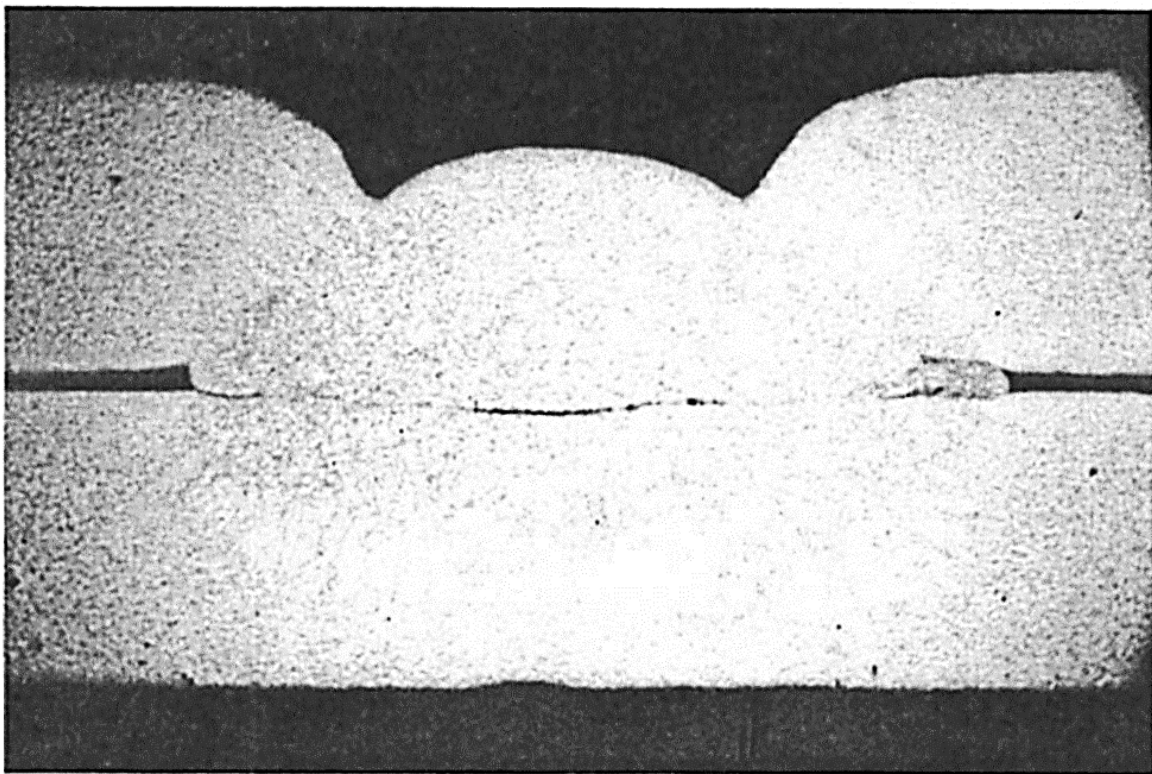
5.3. Wtrącenia

Wtrącenia w zgrzeinach występują najczęściej w postaci wtrącenia niemetalicznego bądź metalicznego.

Wtrącenie niemetaliczne w złączy zgrzewanym mają swoje pochodzenie z materiału zgrzewanego bądź zanieczyszczonej powierzchni materiałów łączonych. Najczęstszym wynikiem jest zanieczyszczenie styku centralnego, które tworzy na jego powierzchni skupiska tlenków metali zgrzewanych. Utlenienia złącza jest główną przyczyną niskich własności

wytrzymałościowych oraz plastycznych złącza niezależnie od zastosowanego wyżarzania. Utworzenie tlenków powoduje powstanie warstwy zewnętrznej trudno topliwej, niemożliwej do roztopienia w procesie zgrzewania (SiO_2 temperatura topienia $1710\text{ }^\circ\text{C}$; Al_2O_3 – temperatura topienia $2050\text{ }^\circ\text{C}$; Cr_2O_3 – temperatura topienia $1890\text{ }^\circ\text{C}$). Tlenki rozmieszczone są w różny sposób w obszarze zgrzeiny i strefie wpływu ciepła, a ich zredukowanie może być poprzez zastosowanie atmosfery ochronnej poprzez gazy osłonowe jak np. argon. Wtrącenia ułożone pasmowo zgodnie z kierunkiem walcowania ulegają odkształceniu i zmieniają swoje ukierunkowanie, lokując się poprzecznie i ukośnie do osi zgrzeiny. Przykład wtrącenia niemetalicznego (rys.6.9) przedstawiono poniżej, są to widoczne na brzegach wtrącenia tlenków pochodzące z powierzchni blachy [70].

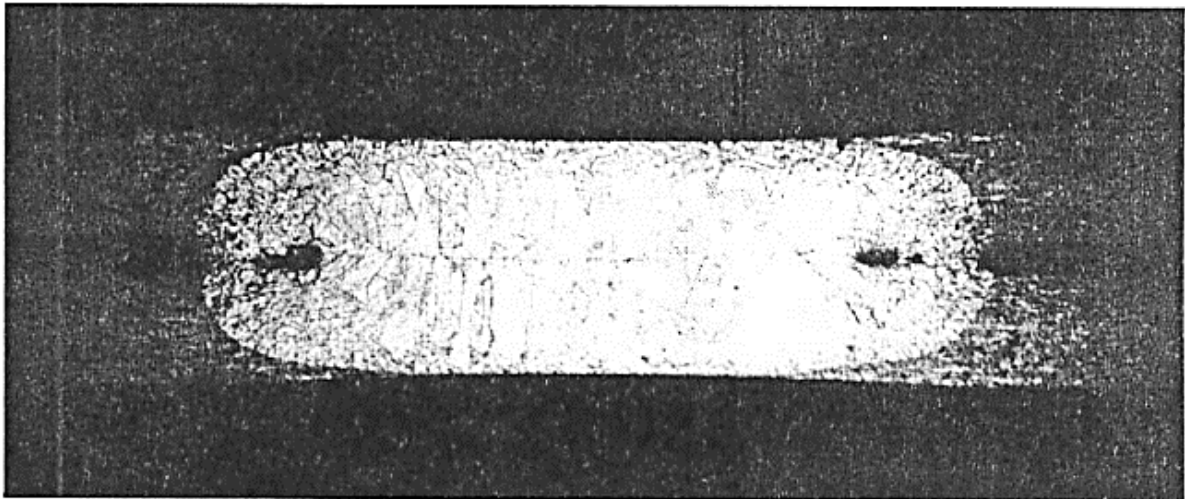
Wtrącenie metaliczne powstają przy kontakcie elektrod z metalicznymi powłokami ochronnymi (Zn, Al., AlSi, Pb). Udział materiału powłokowego powoduje tworzenie nowych struktur żelaza lub tworzenie nieciągłości przez pozostawioną część powłoki w miejscu styku. Dochodzić może także do wtrąceń miedzi z elektrod, która szczególnie wytraca się przy zgrzewaniu blach aluminiowych lub stalowych ocynkowanych, jej obecność prowadzi do pęknięć oraz korozji międzykrystalicznej. Wtrącenie metaliczne przedstawiono (rys. 6.10) na makrostrukturze zgrzeiny grabowej blach stalowych ocynkowanych, w których pozostałości warstwy cynku pozostały wewnątrz zgrzeiny [70].



Traw. Nital

Pow. 10×

Rys. 6.9 Makrostruktura zgrzeiny z wtrąceniem metalicznymi [70].



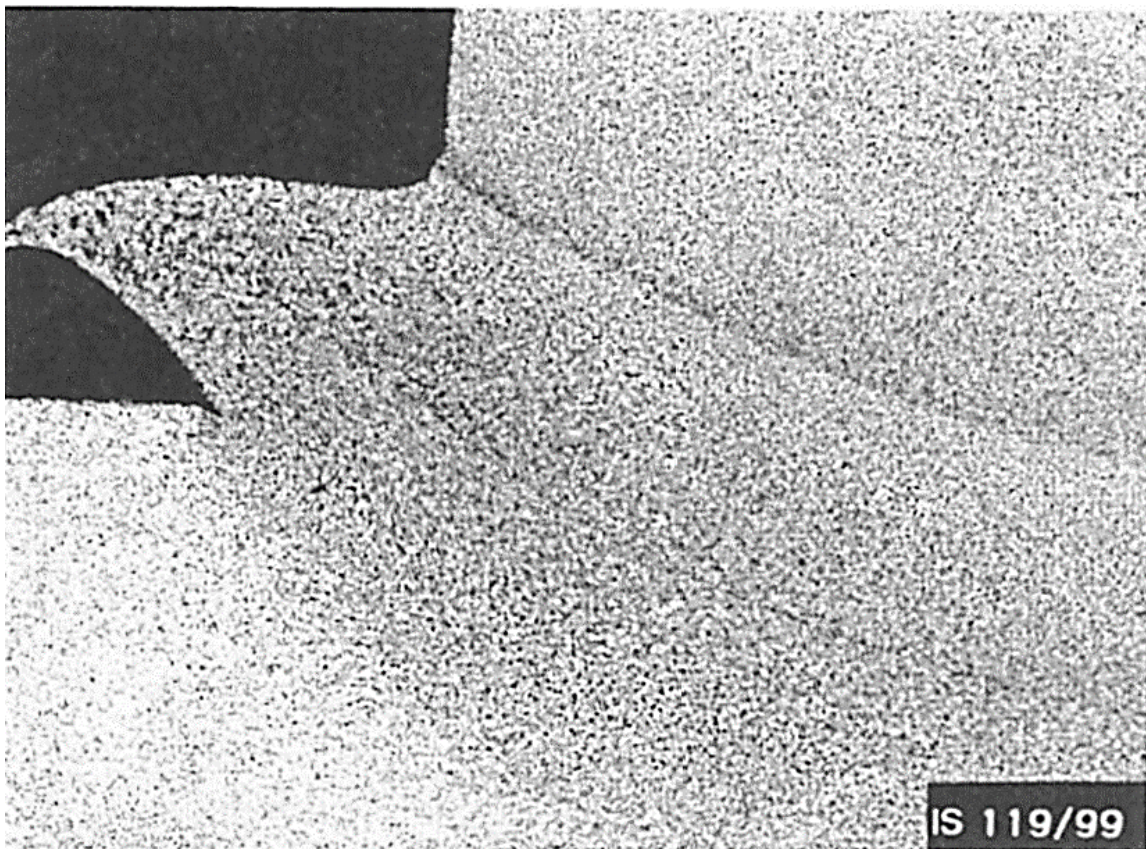
Traw. odcz. Buehlera

Pow. 6x

Rys. 6.10 Makrostruktura zgrzeiny z wtrąceniami niemetalicznymi [70].

5.4. Przyklejanie

W zgrzewaniu zjawisko przyklejania występuje z powodu zbyt niskiej energii zgrzewania lub zanieczyszczonego styku poprzez materiały organiczne lub syntetyczne. Przykładem są pręty zgrzane grabowo (rys. 6.11), gdzie zgrzeina nie wytworzyła jądra tylko i wyłącznie nastąpiło sklejenie prętów [70].



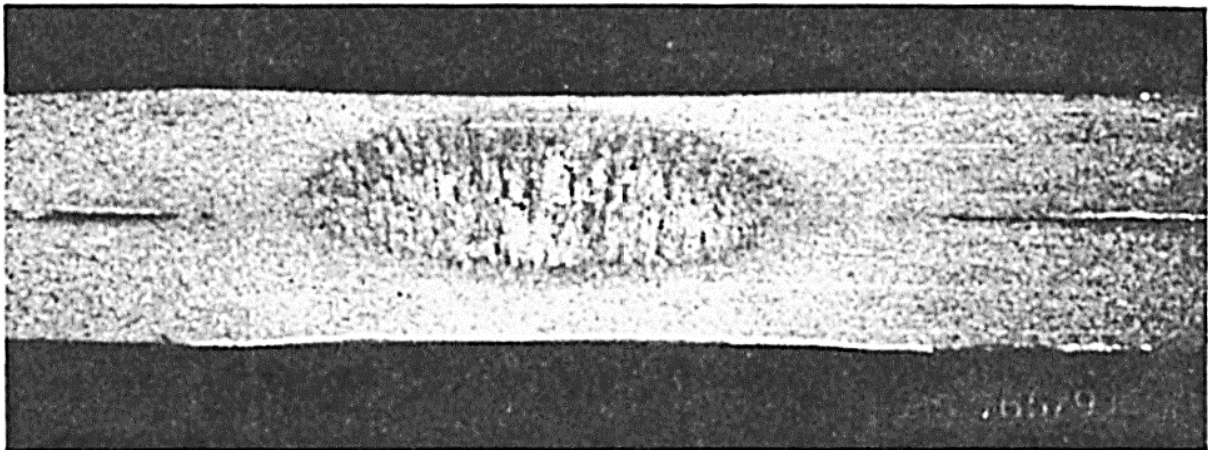
Traw. Nital

Pow. 16x

Rys. 6.11 Makrostruktura przyklejenia prętów zgrzewanych grabowo [70].

5.5. Niezgodności kształtu i wymiarów złącza

Niezgodności związane z geometrią oraz wymiarami złącza zgrzanego można podzielić na zewnętrzne oraz wewnętrzne, do niezgodności przyczyniają się najczęściej niewłaściwe parametry, kształt elektrod bądź technologia zgrzewania. Niezgodności kształtu jakie mogą występować, to: zbyt mała lub duża średnica jądra (parametry prądu i czasu zgrzewania); asymetria osiowa zgrzeiny; odchylenie jądra w kierunku płaszczyzny styku blachy z elektrodą (rys. 6.12); zmiana położenia jądra od płaszczyzny centralnego styku, niewłaściwa średnica elektrod; nadmierny wgniot poprzez za dużą siłę docisku. W literaturze przedstawiono wymogi jakości w przypadku zgrzein wykonanych metodą punktową jak i garbową wykonywanych w stalach węglowych [47, 70, 76, 77].



Traw. FeCl_3

Pow. 8x

Rys. 6.12 Makrostruktura odchylenie jądra w kierunku płaszczyzny styku blachy z elektrodą [70].

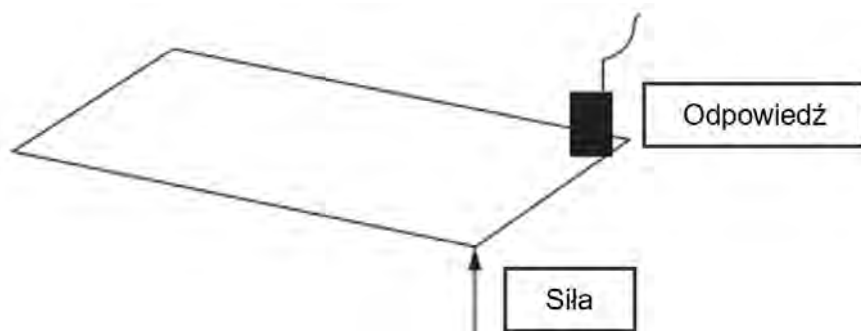
5.6. Niezgodności struktury krystalograficznej

Niezgodności strukturalne powstają w wyniku niewłaściwie dobranego materiału, parametrów zgrzewania lub elektrod. Niezgodności struktury prowadzą do kruchości strefy transkryształizacji w stali niskowęglowej poprzez wystąpienie w składzie pierwiastków niemetalicznych takich jak węgiel, fosfor i siarka. Niekorzystny wpływ siarki można redukować wprowadzając do stali mangan. Krzepnące dendryty zawierają czysty materiał w stosunku do końca krzepnącej cieczy, końcowe krzepnięcie w przestrzeniach dendrycznych cieczy szczególnie w miejscu zmiany orientacji dendrytów może zawierać zanieczyszczenia powodujące niezgodności strukturalne. Strefa transkryształizacji jest słabym ogniwem zgrzeiny, a jej postać obrazuje jakość zgrzeiny. Nagromadzenie zanieczyszczeń w tej strefie znacznie osłabia nośność jądra w płaszczyźnie równikowej. Przez osłabienie strefy transkryształizacji zgrzeina nie jest odporna na rozciąganie, stosunek siły rozciągania do ścinania jest mniejszy o połowę, co znacznie ogranicza możliwości stali o nieodpowiednim stosunku pierwiastków w składzie [70].

6. Analiza modalna

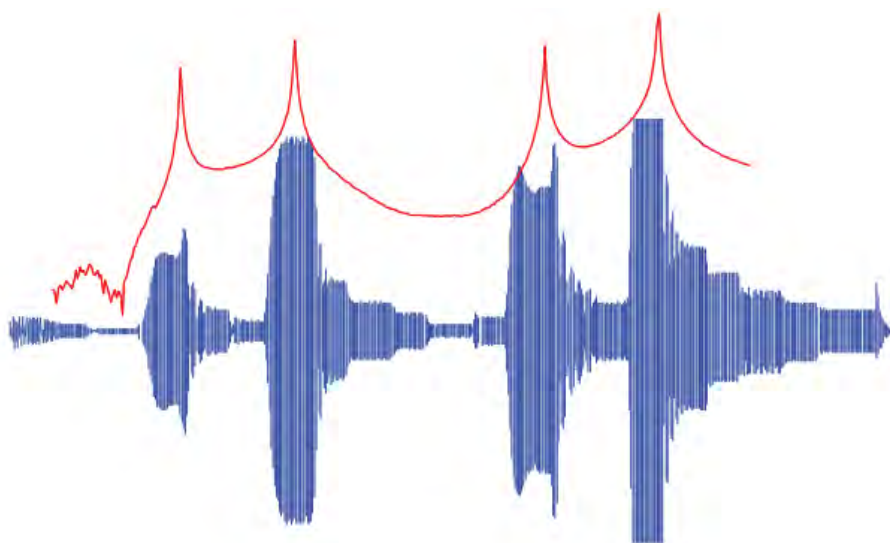
6.1. Zasada działania

Analiza modalna jest metodą, w której dokonuje się identyfikacji właściwości dynamicznych obiektu (np. częstotliwość drgań własnych, tłumienia czy postaci drgań). W celu przedstawienia mechanizmów i praw rządzących tym narzędziem rozważono swobodną płaską płytę do rogu, której przyłożono siłę zmienną w czasie (rys. 7.1), której wartość zmienia się w sposób sinusoidalny. Przyjmując zmienną częstotliwość oscylacji siły, przy zachowaniu stałej granicy dolnej oraz górnej wartości. Do zbadania odpowiedzi układu wymuszonego taką siłą niezbędny jest akcelerometr przymocowany od jednego z rogów próbki [78, 79, 80, 81, 82, 83].



Rys. 7.1 Schemat wymuszenie-odpowiedź [78].

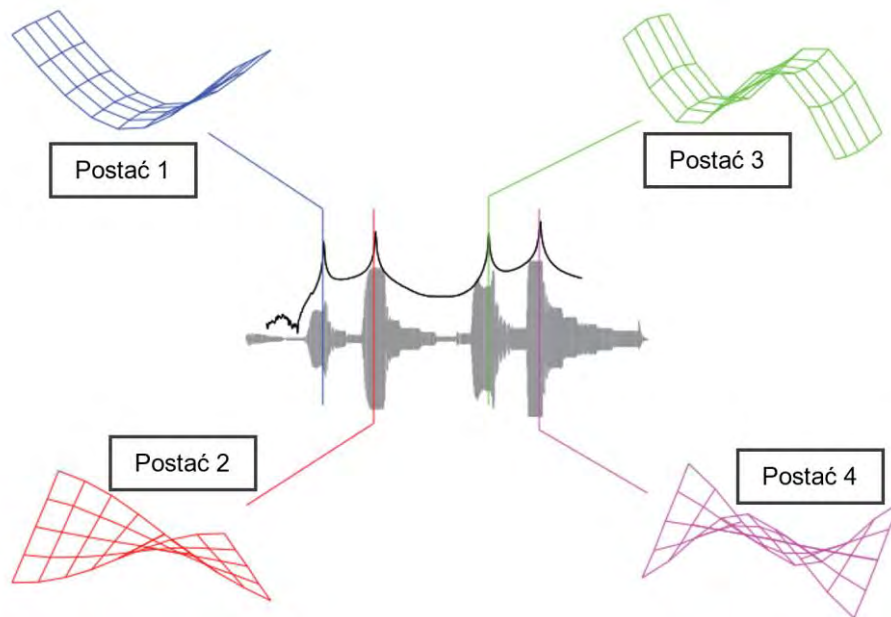
Mierzając odpowiedź próbki w postaci sygnału z akcelerometru można zaobserwować zmiany amplitudy i częstotliwości drgań w wybranych punktach. W różnych punktach, w momencie przechodzenia od niskiej częstotliwości do wysokiej, dochodzi do zmiany wartości amplitudy, która wzrasta lub maleje (Rys. 7.2). Przykładając taką siłę do układu zmienia się amplituda drgań w zależności od szybkości oscylacji tej siły. Dzieje się to z uwagi na zbliżanie się częstotliwości wymuszenia z częstotliwością własną (częstotliwość rezonansowa) układu wymuszanego. Amplituda drgań układu będzie dążyć do nieskończoności w momencie zrównania się częstotliwości drgań układu z częstotliwością wymuszenia, co prowadzi do zniszczenia układu. Jest to zaskakujące zjawisko z uwagi, że siła wymuszenia nie musi być dużą siłą [78, 84].



Rys. 7.2 Odpowiedź układu na wymuszenie siłą o zmiennej częstotliwości i stałej amplitudzie:
linia niebieska - sygnał przyspieszenia w dziedzinie czasu,
linia czerwona - obwiednia sygnału [78].

W trakcie wzrostu częstotliwości wymuszenia układ osiągał czterokrotny wzrost amplitudy, spowodowane jest to wystąpieniem czterech postaci drgań układu. Postać drgań przyjmuje specyficzny kształt przedstawiony na rysunku (rys.7.3). Pokazuje to wzorec deformacji, jaki przyjmuje płyta w zależności od wymuszania jej jedną z częstotliwości drgań własnych. W przypadku pierwszego modu jest to deformacja zginająca płytę, w przypadku drugiej występuje skręcenie, a trzecia oraz czwarta są drugimi odmianami zginania oraz skręcania [78, 85].

Wzorce te nazywane są modami drgań. Częstotliwości drgań oraz mody występują we wszystkich konstrukcjach, a masa oraz sztywność określa miejsca wystąpienia częstotliwości własnej oraz postaci drgań. Zasadniczo jest to bardzo uproszczone rozumienie analizy modalnej, zrozumienie jej zasad jest niezbędne przy projektowaniu konstrukcji. Zrozumienie zarówno częstotliwości drgań własnych jak i ich postaci pomaga w lepszym projektowaniu konstrukcji mogących generować hałas lub niepożądane wibracje [78].



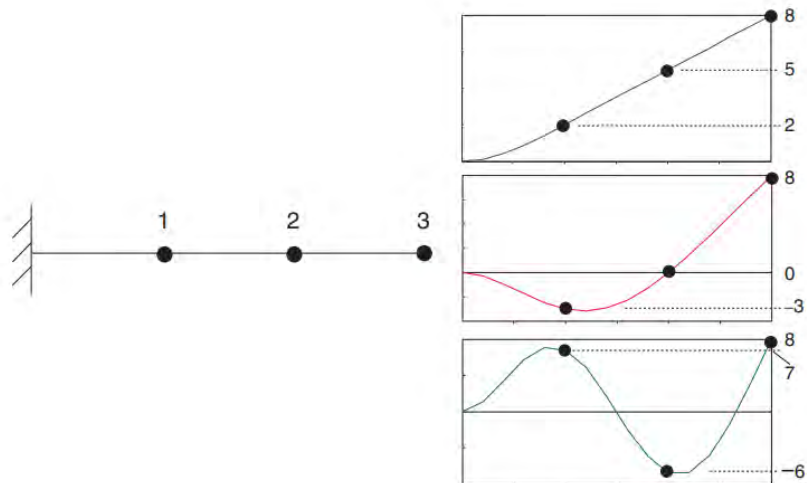
Rys. 7.3 Postacie drgań w odniesieniu do wykresu zmiany amplitudy [78].

6.2. Funkcja odpowiedzi częstotliwościowej

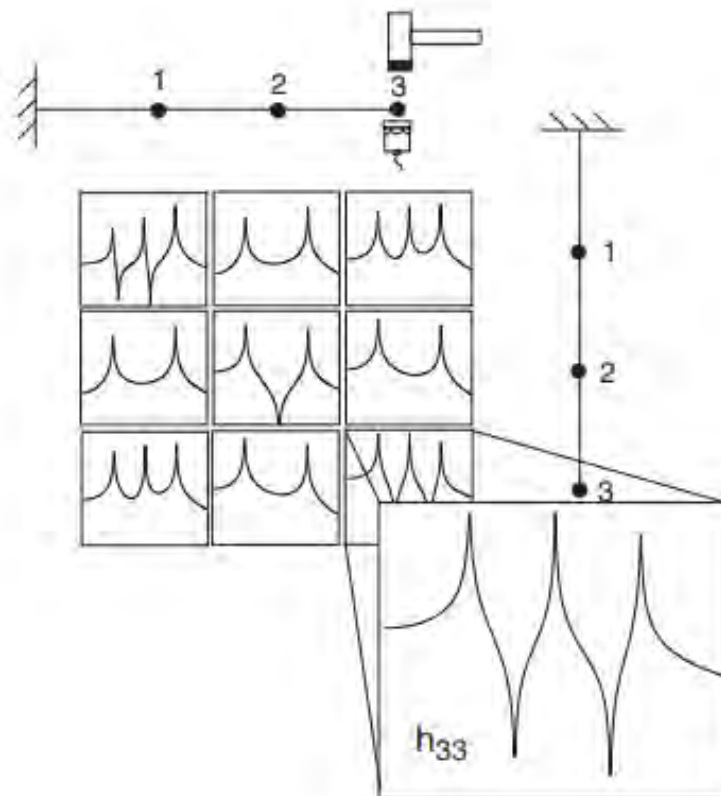
Funkcja odpowiedzi częstotliwościowej (FRF) to sygnał odpowiedzi konstrukcji w wyniku przyłożonej siły. Do jej pozyskania niezbędny jest jednoczesny pomiar przyłożonej siły, jak i odpowiedzi badanego układu (przemieszczenia, prędkości lub przyspieszenia). Zmierzone tak dane są przekształcane z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości za pomocą algorytmu FFT. Dzięki tej transformacji funkcje przyjmują postać skończoną jako liczby o wartościach zespolonych (zawierają składowe rzeczywiste i urojone) lub wielkości amplitudy i fazy komponentu, aby opisać funkcję. Poniżej przedstawiono, w jaki sposób wyodrębnić dane modalne dla tych funkcji [78, 86, 87].

Do oceny posłuży prosta belka z trzema modami drgań (rys.7.4). Istnieją trzy miejsca wymuszenia oraz trzy miejsca, w których można zmierzyć odpowiedź układu, dla tego przykładu ilość postaci drgań jest równa ilości stopni swobody układu. W przypadku typowej analizy mamy o wiele więcej konfiguracji możliwych do zmierzenia w odniesieniu do punktu pomiaru odpowiedzi oraz punktu zadanego wymuszenia, dla tego przykładu jest to dziewięć możliwych odpowiedzi częstotliwościowych. Pierwszy pomiar wykonano, uderzając w koniec belki w punkcie 3, po czym zmierzono odpowiedź układu w tym samym punkcie. Pomiar ten określany jest jako pomiar referencyjny punktu wzbudzonego. Charakterystyki pomiaru dla punktu

wzbudzonego obejmują kilka cech. Wszystkie wartości szczytowe rezonansu są oddzielone przez lokalne minima. Faza spada o 180 stopni podczas przejścia przez częstotliwość rezonansową i wzrasta podczas przejścia przez minimalną wartość amplitudy. Wartości szczytowe w części urojonej funkcji odpowiedzi częstotliwościowej muszą mieć takie same kierunki. Następnie, przenosząc siłę wymuszenia do punktu drugiego, a następnie pierwszego, jednocześnie kontynuując pomiar odpowiedzi w punkcie trzecim dla obu tych wymuszeń, otrzymamy sygnały, które tworzą pierwszy wiersz macierzy wejść - wyjść. Powtarzając kolejno wymuszenie dla wszystkich trzech punktów i zbierając odpowiedzi akcelerometrem w punktach 1 oraz 2, uzyskuje się pełną macierz sygnałów wejść - wyjść, przedstawioną na rysunku (rys. 7.5) [80, 82].



Rys. 7.4 Schemat belki wraz z postaciami drgań [78].



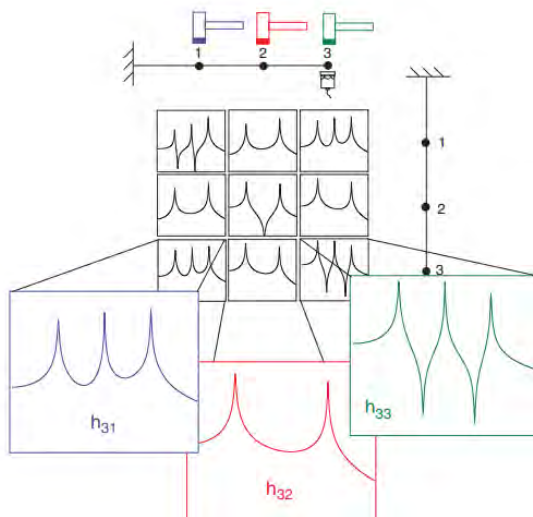
Rys. 7.5 Macierz sygnałów wejść-wyjść [78].

Jak zauważyć można macierz jest kwadratowo symetryczna, co oznacza, że wiersze 1, 2, 3 równają się kolumną 3, 2, 1. Cechę tę nazywamy wzajemnością macierzy, a spowodowana jest z uwagi na macierze masy, tłumienia oraz sztywności, które to także są symetryczne. Uwagę należy zwrócić na drugi wiersz macierzy oraz symetryczną mu drugą kolumnę, która obrazuje bardzo ważny aspekt analizy modalnej i pomiarów eksperymentalnych podczas testu modalnego. Punkt odniesienia nie może znajdować się w węźle modu – w przeciwnym razie jedna postać drgań nie będzie widoczna na pomiarach funkcji odpowiedzi częstotliwościowej [78].

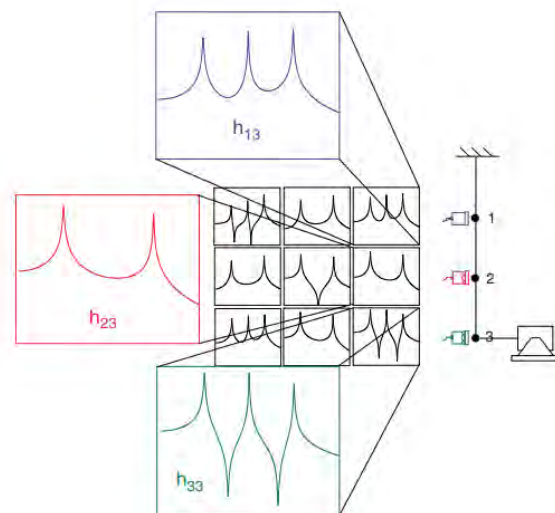
6.3. Metodyka pomiarowa

Z punktu widzenia teoretycznego nie ma znaczenia czy zmierzona odpowiedź w stałym punkcie pochodzi z kilku punktów przyłożenia siły wymuszenia, czy też siła zadawana jest w stałym punkcie, a jego rejestrowanie następuje w kilku punktach. Metoda „roving hammer” kończy wypełnieniem jednego wiersza odpowiedzi częstotliwościowej macierzy funkcji (rys. 7.6), podczas gdy metoda „shaker test” wypełnia jedną kolumnę macierzy (rys. 7.7). Z uwagi na to, że macierze te są kwadratowo symetryczne, to ich wzajemność jest prawdziwa. Warto pamiętać, że odniesienie pozycji akcelerometru jest owiązane z wierszem macierzy odpowiedzi częstotliwościowej, podczas gdy punkt odniesienia siły będzie powiązany z kolumną macierzy [78, 89].

Teoretycznie metody te powinny dawać analogiczne wyniki, samo zamontowanie akcelerometru na detalu badanym ma wpływ na strukturę podczas analizy modalnej. Struktura jako masa, mocowanie konstrukcji, mocowanie przetwornika, szczególnie w przypadku badania struktur o niskiej masie w odniesieniu do masy akcelerometru będą niosły za sobą duże różnice podczas testu modalnego. W celu zredukowania efektu zmiany masy poprzez przemieszczenie pojedynczego akcelerometru, należy posłużyć się wystąpieniem dodatkowych akcelerometrów bądź akcelerometrów zastępczych z właściwą dla nich masą, w miejscach dokonywanych pomiarów dla obu metod w celu zredukowania wpływu zmian pozycji akcelerometru [78].



Rys. 7.6 Metoda pomiaru „roving hammer” [78].



Rys. 7.7 Metoda pomiaru „shaker test” [78].

6.4. Archiwizacja danych do FFT

Poniżej przedstawiono kroki, jakie występują podczas archiwizacji danych pozyskiwanych z młotka modalnego oraz akcelerometru w celu uzyskania odpowiedzi RFR (ang. Response Function Ratio).

W pierwszej kolejności sygnały analogowe mierzone z akcelerometrów są poddawane filtrowaniu, aby upewnić się, że nie występuje zjawisko aliasingu. Zazwyczaj odbywa się to za pomocą filtrów analogowych. Filtry są odpowiedzialne za usuwanie wszystkich składowych sygnałów, które mogą przekraczać dwukrotność częstotliwości próbkowania. Wysokiej jakości filtry dopasowania fazowego przyczyniają się do wyższych kosztów aparatury przy analizatorach FFT w porównaniu do tańszych przetworników analogowo-cyfrowych [78].

Drugim krokiem jest digitalizacja sygnału analogowego w cyfrową reprezentację rzeczywistego sygnału. Odbywa się to przy użyciu przetwornika analogowo-cyfrowego, który nazywa się ADC. Zazwyczaj używane są konwertery 12, 16 lub 24 bitowe, przy czym im więcej bitów tym wyższa rozdzielczość w digitalizowanym sygnale. Główne problemy tego procesu to błąd próbkowania oraz kwantyzacji. Częstotliwość próbkowania determinuje rozdzielczość zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości w kontekście analizy sygnałów. Proces kwantyzacji odpowiada za precyzję wartości reprezentowanego sygnału. Zarówno próbkowanie, jak i kwantyzacja mogą prowadzić do powstawania błędów w pomiarach, jednakże ich wpływ jest zazwyczaj marginalny. Za najpoważniejsze zjawisko generujące błędy w procesie cyfryzacji uznaje się aliasing [78].

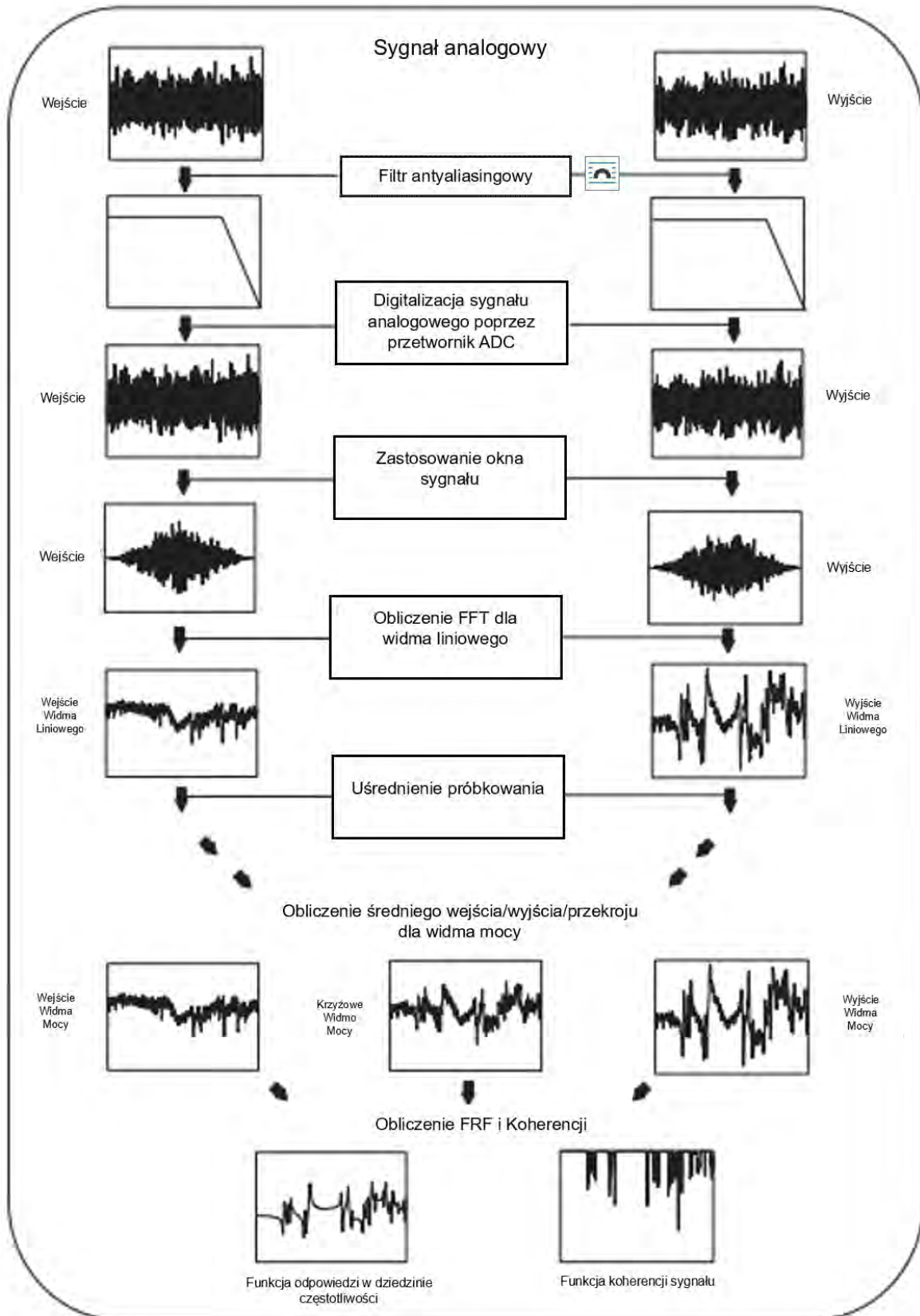
Przeciek widma występuje w transformowaniu danych czasu do dziedziny częstotliwości za pomocą FFT. Przeciek widma (ang. spectral leakage) to problematyczne zjawisko, które występuje podczas analizy sygnałów za pomocą Szybkiej Transformacji Fouriera (FFT), szczególnie gdy sygnał nie obejmuje całkowitej liczby pełnych okresów w analizowanym oknie czasowym. FFT jest dyskretną wersją transformacji Fouriera, używaną do przekształcania sygnałów czasowych na ich reprezentację w dziedzinie częstotliwości. Aby zredukować przeciek widma w FFT, stosuje się różne techniki, takie jak:

- Dobranie długości sygnału tak, aby obejmował całkowitą liczbę pełnych okresów.
- Okienkowanie – przed zastosowaniem FFT sygnał jest mnożony przez funkcję okna (np. okno Hanninga, Hamminga), która wygładza przejścia na końcach sygnału, zmniejszając nieciągłości i w efekcie przeciek widma.

Odpowiednie dobranie długości sygnału oraz zastosowanie okienkowania może znacznie zredukować ten efekt, poprawiając dokładność analizy widmowej, lecz nie może wyeliminować go zupełnie [78].

Po procesie próbkowania następuje obliczenie danych FFT w celu utworzenia liniowego widma wejściowego wzbudzenia oraz wyjściowego odpowiedzi. Zazwyczaj uśrednienie przeprowadzane jest na podstawie widma mocy uzyskanego z widma liniowego. Główne obliczenie uśrednionego widma przeprowadzone jest z wejściowego widma mocy, wyjściowego widma mocy oraz widma krzyżowego pomiędzy sygnałami wejściowymi oraz wyjściowymi. Funkcje te są uśredniane, a następnie wykorzystane do obliczenia dwóch ważnych funkcji użytych do modalnej akwizycji danych – odpowiedzi częstotliwościowej oraz jej koherencji. Do oceny jakości danych wykorzystywana jest funkcja koherencji, która określa jaka część sygnału wyjściowego jest powiązana do mierzonego sygnału wejściowego. Natomiast funkcja odpowiedzi w dziedzinie częstotliwości zawiera informacje dotyczące częstotliwości oraz tłumienia systemu, zawiera ona informacje dotyczące postaci modalnych układu w mierzonych miejscach [78].

Jest to najważniejszy sygnał uzyskiwany w trakcie eksperymentalnej analizy modalnej, a jego uzyskiwanie zobrazowane zostało na rysunku (rys. 7.8) [78].



Rys. 7.8 Anatomia analizatora FFT do typowych eksperymentalnych pomiarów testowych modalnych [78].

6.5. Wpływ młotka modalnego

Jednym z kluczowych elementów konstrukcji młotka modalnego jest jego końcówka, która odgrywa istotną rolę w określaniu zakresu pomiarowego uzyskiwanego podczas analizy modalnej. Zakres częstotliwości wzbudzenia sygnału wejściowego jest kontrolowany głównie poprzez twardość końcówki wybranej przez osobę przeprowadzającą test. Im twardsza końcówka tym szerszy zakres częstotliwości uzyskiwany przez wymuszenie. Z kolei znów ze spadkiem twardości końcówki zawęża się zakres częstotliwości wzbudzenia. Istnieją wyjątki od tej reguły, ale w istocie końcówka musi zostać dobrana w sposób, który umożliwi zarejestrowanie wszystkich interesujących postaci drgań w przedziale częstotliwości. Przy zbyt miękkiej końcówce nie wszystkie postacie mogą zostać w prawidłowy sposób wzbudzone [78].

Jeżeli widmo mocy sygnału wejściowego nie obejmuje pełnego zakresu częstotliwości, co objawia się przekroczeniem granic widma mocy, to spójność sygnału ulega znacznemu pogorszeniu. Podobne zjawisko obserwuje się w przypadku częstotliwości funkcji odpowiedzi w drugiej połowie analizowanego zakresu częstotliwości. Do wyznaczenia odpowiedniego wzbudzenia, wymagane jest zazwyczaj kilka prób wstępnych. Drugą najważniejszą rzeczą testu impulsowego jest wykorzystanie okna do transdukcji odpowiedzi. Uogólniając, w przypadku lekko tłumionych konstrukcji odpowiedzi na wymuszenie będzie stała, spadając do zera przed końcem próbkowania. Jeżeli takie przekształcenie następuje, to dane znacznie degradują się z powodu efektu przetwarzania cyfrowego przez błąd zwany wyciekami, który powinno się poprawić oknem do pomiaru w postaci okna zanikającego wykładniczo [78].

Do pomiaru impulsowego należy rozważyć dwie alternatywne możliwości w celach pewności dokonania prawidłowego pomiaru, jest to odpowiedni wybór szerokości pasma do pomiaru oraz zwiększenie rozdzielczości dla linii spektrum. Parametry te zwiększają czas wykonywania pomiaru, lecz będą wpływać na zmniejszenie konieczności stosowania okna wykładniczego i zawsze będą skutkować zmniejszeniu prawdopodobieństwa wycieku [78].

6.6. Równania ruchu układu o wielu stopniach swobody

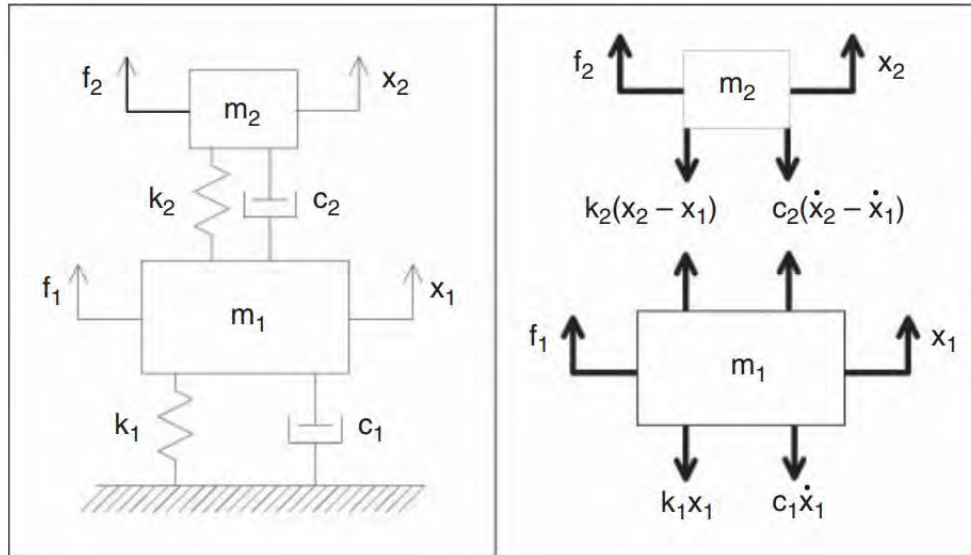
Równania ruchu dla układu o wielu stopniach swobody wymagają kilku założeń upraszczających model układu: masa modelowana jest jako bryła, sztywność sprężyn jest liniowo proporcjonalna do przemieszczenia; tłumienie jest liniowo proporcjonalne do prędkości; układ jest liniowy i niezmienny w czasie [78, 90, 91, 92, 93, 94].

Układ można opisać równaniami różniczkowymi drugiego rzędu ze stałymi współczynnikami. Przykładowy układ o dwóch stopniach swobody przedstawiono na rysunku 35. Bilans sił można przeprowadzić dla każdej z dwóch mas układu co daje dwa równania i dwie niewiadome (9, 10) [78, 90, 91, 92, 93].

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = f_1(t) - c_1 \dot{x}_1 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_1 x_1 + k_2(x_2 - x_1) \\ m_2 \ddot{x}_2 = f_2(t) - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2(x_2 - x_1) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} f_1(t) = m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 \\ f_2(t) = m_2 \ddot{x}_2 - c_2 \dot{x}_1 - k_2 x_1 + k_2 x_2 \end{cases} \quad (10)$$

Dla uproszczenia równania te można również przedstawić w postaci macierzy mas przemnożonej przez wektor przyspieszeń powiększony o macierz współczynnika tłumienia przemnożonego przez wektor prędkości sumowanego z macierzą sztywności przemnożonej przez wektor przemieszczenia, całość równa się funkcji przyłożonej siły (11) [78].



Rys.35 Lewa strona schemat układu; prawa rozkład sił i przemieszczeń [78].

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (c_1 + c_2) & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} (k_1 + kc_2) & -k_2 \\ -k_2 & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \end{Bmatrix} \quad (11)$$

Dla równania (11) macierze sztywności oraz tłumienia mają wartości poza przekątną, które są sprzężeniem pomiędzy obiektami. Rozmiar macierzy jest bezpośrednio związany z liczbą stopni swobody.

Równanie dla ruchu ogólnego przy n -stopniach swobody w postaci macierzowej przyjmuje zapis:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (12)$$

gdzie:

$[M]$ – Macierz mas o wymiarach (n, n) ,

$[C]$ – Macierz tłumienia o wymiarach (n, n) ,

$[K]$ – Macierz sztywności o wymiarach (n, n) ,

$\{F\}$ – Wektor sił o wymiarach $(n, 1)$,

$\{x\}$ – Wektor przemieszczenia, prędkości oraz przyspieszenia $(n, 1)$,

Rozwiązaniem, które upraszcza równanie (12) jest użycie wyłącznie macierzy masy i sztywności wraz z założeniem, że macierz tłumienia jest zerowa lub proporcjonalna do macierzy masy i/lub sztywności. Konceptualne wyjaśnienie takiego rozwiązania własnego (13) jest bardzo pomocne w zrozumieniu, w jaki sposób uzyskiwane są częstotliwości i jaka postać drgań powstaje przy każdej z tych częstotliwości. Równanie te nazywamy równaniem charakterystycznym [78].

$$[[K] - \lambda[M]]\{x\} = 0 \quad (13)$$

Wyznaczenie pierwszej częstości własnej $\lambda_1 = \omega_1^2$ poprzez podstawienie do równania (13) oraz znalezienie rozwiązania dla wektora $\{x_1\}$ ponieważ macierze $[M]$, $[K]$ oraz częstość ω_1^2 są znane. Rozwiązanie wektora jest proste poprzez zastosowanie dekompozycji. Przykładami takich dekompozycji są Crout-Doolittle, Cholesky lub rozkładu LDL [78].

Wektor $\{x_1\}$ jest w rzeczywistości postacią drgań dla określonej częstotliwości, dla której układ został rozwiązany. Zauważyć można, że układ posiada węzły, wokół których oscyluje. Posiadając zarówno ujemne jak i dodatnie pozycje w celu zachowania równowagi energetycznej. Analogicznie można postąpić w przypadku drugiej częstości własnej $\lambda_2 = \omega_2^2$, wyliczenie wartości jest wyznaczaniem drugiej postaci drgań układu. Proces ten można powtarzać wielokrotnie dla wszystko postaci drgań [78].

Należy pamiętać, że rozwiązania własne służą do uzyskania pary w postaci częstości oraz wektora związanego z postacią drgań. Postacie drgań są liniowo niezależne oraz prostopadłe do macierzy masy oraz sztywności. Fakt prostopadłości jest bardzo ważny podczas sprawdzania modeli elementów skończonych ze zmierzonymi danymi. Do sprawdzenia poprawności służy kontrola ortogonalności przeprowadzana do porównania wartości eksperymentalnej wektora z wartościami otrzymanego rozwiązania [78].

Aby pokazać prostopadłość oraz liniową niezależność macierzy masy oraz sztywności, należy zapisać równanie szczególne jako postać ogólna (14) [78].

$$[K][U] = [M][U][\Omega^2] \quad (14)$$

Równanie (15) zapisane przez i-wektor.

$$[K]\{u_i\} = \lambda_i[M]\{u_i\} \quad (15)$$

Po odpowiednich przekształceniach opisanych w literaturze [78] otrzymamy dowód ortogonalności macierzy (16).

$$\begin{aligned} \{u_i\}^T [M] \{u_j\} &= \begin{cases} \bar{m}_{ii} & \text{dla } i = j \\ 0 & \text{dla } i \neq j \end{cases} \\ \{u_i\}^T [K] \{u_j\} &= \begin{cases} \bar{k}_{ii} & \text{dla } i = j \\ 0 & \text{dla } i \neq j \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

W celach upraszczających równanie ruchu należy zastosować transformację modalną równania. Macierz modalna $[U]$ zostanie użyta do przejścia z fizycznej przestrzeni równania do przestrzeni modalnej (17) [78].

$$\{x\} = [U]\{p\} = [\{u_1\}\{u_2\} \cdots \{u_n\}] \begin{bmatrix} \{p_1\} \\ \{p_2\} \\ \vdots \\ \{p_n\} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Gdzie $\{p\}$ stanowi nowy wektor w przestrzeni modalnej. Po podstawieniu przekształcenia modalnego, które zostało początkowo pomnożone przez transpozycję operatorową do równania ruchu, otrzymuje się wyrażenie przedstawione w [78].

$$[U]^T[M][U]\{\ddot{p}\} + [U]^T[M][U]\{\dot{p}\} + [U]^T[M][U]\{p\} = [U]^T\{F\} \quad (18)$$

$$[U]^T[M][U] = \begin{bmatrix} \{u_1\}^T[M]\{u_1\} & \{u_1\}^T[M]\{u_2\} & \{u_1\}^T[M]\{u_3\} & \cdots \\ \{u_2\}^T[M]\{u_1\} & \{u_2\}^T[M]\{u_2\} & \{u_2\}^T[M]\{u_3\} & \cdots \\ \{u_3\}^T[M]\{u_1\} & \{u_3\}^T[M]\{u_2\} & \{u_3\}^T[M]\{u_3\} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (19)$$

Jeżeli zastosowane zostaną warunki ortogonalności:

$$\{u_i\}^T[M]\{u_j\} = 0, \quad \text{dla } i \neq j$$

Wówczas macierz przedstawia się:

$$[U]^T[M][U] = \begin{bmatrix} \{u_1\}^T[M]\{u_1\} & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & \{u_2\}^T[M]\{u_2\} & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & \{u_3\}^T[M]\{u_3\} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (20)$$

Powtarzając przekształcenie modalne dla macierzy masy (21), sztywności (22) oraz tłumienia (23) można otrzymać [78]:

$$[U]^T[M][U] = \begin{bmatrix} \bar{m}_{11} & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & \bar{m}_{22} & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & \bar{m}_{33} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$[U]^T[C][U] = \begin{bmatrix} \bar{c}_{11} & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & \bar{c}_{22} & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & \bar{c}_{33} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$[U]^T[K][U] = \begin{bmatrix} \bar{k}_{11} & 0 & 0 & \cdots \\ 0 & \bar{k}_{22} & 0 & \cdots \\ 0 & 0 & \bar{k}_{33} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (23)$$

Z uwagi na ortogonalność transformacja ta rozpręga wysoce sprzężony zbiór równań w przestrzeni fizycznej w zbiór niepowiązanych pojedynczych układów pod względem stopni swobody w przestrzeń modalną (24).

$$\begin{bmatrix} \bar{m}_1 & & \\ & \bar{m}_2 & \\ & & \ddots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \\ \vdots \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{c}_1 & & \\ & \bar{c}_2 & \\ & & \ddots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{k}_1 & & \\ & \bar{k}_2 & \\ & & \ddots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{u_1\}^T\{F\} \\ \{u_2\}^T\{F\} \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad (24)$$

Dowolne równanie takiego zestawu macierzy można zapisać wynikowo w postaci pojedynczego równania o jednym stopniu swobody dla pojedynczej postaci drgań (25) [78]:

$$\bar{m}_i\ddot{p}_i + \bar{c}_i\dot{p}_i + \bar{k}_i p_i = \bar{f}_i \quad (25)$$

6.7. Transformata Laplace'a

Transformata ta jest podobna do oceny Laplace'a przeprowadzanej dla pojedynczego stopnia swobody. Równanie przestrzeni fizycznej ruchu przekształcane jest w przestrzeń operatorową poprzez przekształcenie Laplace'a [78]:

$$[[M]s^2 + [C]s + [K]]\{X(s)\} = \{F(s)\} + [[M]s + [C]]\{x_0\} + [M]\{\dot{x}_0\} \quad (26)$$

Główną zaletą tego równania jest posiadanie równań charakterystycznych, przyłożenia siły oraz warunki początkowe w jednym równaniu. Jeżeli warunki początkowe wynoszą zero wówczas [78]:

$$[[M]s^2 + [C]s + [K]]\{X(s)\} = \{F(s)\} \quad (27)$$

Równanie jednorodne zapisać można w postaci:

$$[[M]s^2 + [C]s + [K]]\{x(s)\} = 0 \rightarrow [B(s)]\{x(s)\} = 0 \quad (27)$$

Gdzie $[B(s)]$ jest określana jako macierz systemowa. Zauważyć należy, że z uwagi na masę, tłumienie oraz macierze sztywności, które są kwadratowo-symetryczne, macierz systemu również taka jest [78].

Rozwiązanie równania jednorodnego daje $2n$ rozwiązań, gdzie n jest liczbą równań. Jeżeli tłumienie jest mniejsze od krytycznego wówczas rozwiązanie to ma pierwiastki równania, które określane są jako bieguny układu i występują w parach sprzężonych [78]:

$$\det[[M]s^2 + [C]s + [K]] = 0 \rightarrow p_k = -\sigma_k \pm j\omega_{dk} \quad (27)$$

Funkcja ta posiada wartości zespolone oraz posiada część bieguną (rzeczywista część), która jest procentem tłumienia krytycznego ζ , nietłumiona częstotliwość drgań własnych ω_n oraz urojona część bieguną, która jest wynikiem naturalnego tłumienia układu o częstotliwości ω_d , bieguny występują w złożonych parach sprzężonych [78].

Funkcja przejścia jest złożoną powierzchnią zespoloną. Liczniki takiego równania to $[A(s)]$, która to nazywana jest macierzą reszty. Mianownikiem równania jest wyznacznik macierzy $\det[B(s)]$, która jest skalarem i nazywa się równaniem charakterystycznym. Bieguny układu są wyznaczone z mianownika i warto zauważyć, że są one stałe i nie zależą od macierzy reszt, stąd noszą nazwę globalnych właściwości systemu [78].

$$[B(s)]\{x(s)\} = \{F(s)\} \rightarrow [B(s)]^{-1} = \frac{\{x(s)\}}{\{F(s)\}} \quad (28)$$

$$[B(s)]^{-1} = [H(s)] = \frac{Adj[B(s)]}{\det[B(s)]} = \frac{[A(s)]}{\det[B(s)]} \quad (29)$$

$$[B(s)][B(s)]^{-1} = [I] \quad (30)$$

$$[B(s)][A(s)] = \det[B(s)][I] \quad (31)$$

Równanie to posiada dwa bardzo ważne składniki, które są podstawowymi elementami leżącymi u podstaw eksperymentalnej analizy modalnej:

$[A(s)]$ – macierz reszty \rightarrow postacie drgań

$\det[B(s)]$ – równanie charakterystyczne \rightarrow bieguny

Wyznacznik równania charakterystycznego daje wielomian wysokiego rzędu, który można rozwiązać, aby znaleźć pierwiastki lub bieguny układu. Macierz reszty wymaga dalszych przekształceń, aby uzyskać postacie drgań. W momencie obliczenia funkcji przejścia w biegunach równanie przyjmuje postać [78]:

$$[B(p_k)][A(p_k)] = 0 \quad (32)$$

$$\begin{aligned} [B(p_k)]\{a_1(p_k)\} &= \{0\} \\ [B(p_k)]\{a_2(p_k)\} &= \{0\} \\ [B(p_k)]\{a_3(p_k)\} &= \{0\} \\ &\vdots \end{aligned} \quad (33)$$

Każda kolumna (33) jest rozwiązaniem równania (32), poprzez symetrie wszystkich wierszy macierzy istnieje rozwiązanie dla tego równania. Każdy wiersz i kolumna są rozwiązaniami tego równania w momencie gdy funkcja przejścia jest liczona w biegunie układu [78].

Podobnie jak w przypadku układu o jednym stopniu swobody, funkcja przejścia może być zapisana w postaci [78]:

$$[H(s)] = \sum_{k=1}^m \frac{[A_k]}{(s - p_k)} + \frac{[A_k^*]}{(s - p_k^*)} \quad (34)$$

Alternatywnie biorąc odwrotną transformatę Laplace'a, funkcja odpowiedzi na impuls w czasie może być zapisana [78]:

$$[h(t)] = \left[\sum_{k=1}^m \frac{1}{m_k \omega_{dk}} e^{-\sigma_k t} \sin \omega_{dk} t \right] \quad (35)$$

Patrząc na pojedynczy stopień swobody, funkcje przejścia zapisać można jako [78]:

$$h_{ij}(s) = \sum_{k=1}^m \frac{a_{ijk}(s)}{(s - p_k)} + \frac{a_{ijk}^*(s)}{(s - p_k^*)} \quad (36)$$

Na odpowiedź impulsu:

$$h_{ij}(s) = \sum_{k=1}^m \frac{1}{m_k \omega_{dk}} e^{-\sigma_k t} \sin \omega_{dk} t \quad (37)$$

6.8. Równanie funkcji odpowiedzi częstotliwościowej

Funkcja odpowiedzi częstotliwościowej to wyliczenie funkcji przejścia dla $s = j\omega$,

$$[H(s)]_{s=j\omega} = [H(j\omega)] = \sum_{k=1}^m \frac{[A_k]}{(j\omega - p_k)} + \frac{[A_k^*]}{(j\omega - p_k^*)} \quad (38)$$

A dla pojedynczego stopnia swobody:

$$h_{ij}(s)_{s=j\omega} = h_{ij}(j\omega) = \sum_{k=1}^m \frac{a_{ijk}(s)}{(j\omega - p_k)} + \frac{a_{ijk}^*(s)}{(j\omega - p_k^*)} \quad (39)$$

6.9. Transformata Fouriera

Dowolny sygnał okresowy spełniający warunki Dirichleta może zostać odwzorowany za pomocą sumy tzw. składowych harmonicznyc. Sygnał może zostać podzielony na serię fal sinusoidalnych o różnych amplitudach oraz częstotliwościach. Narzędziem stosowanym do tego typu podziału jest transformata Fouriera, której to podstawą są szeregi Fouriera. Rozbicie złożonego sygnału na jego komponenty składowe umożliwia precyzyjne uwidocznienie różnic, takich jak częstotliwość sygnału, dominujące częstotliwości oraz amplitudy w odniesieniu do tych częstotliwości. Metoda FFT stanowi technikę analizy szeregu czasowego zapisanego w formie dyskretnej, przy czym uwzględnia dodatkowe ograniczenia wynikające z tej dyskretyzacji. Dyskretny algorytm jest podstawową do formowania sygnału częstotliwościowego, który jest dostępny w większości analizatorów FFT. Transformacja, pierwotnie zdefiniowana jako całka w dziedzinie ciągłej, w kontekście dyskretnej transformaty Fouriera (DFT) wymaga uwzględnienia faktu, że dane czasowe są rejestrowane w ograniczonych przedziałach czasowych. W ramach DFT zapewnia się, że sygnał czasowy jest reprezentowany przez skończoną liczbę sinusoid w dziedzinie częstotliwości, co oznacza, że sygnał musi być w pełni uchwycony w obrębie jednej próbki. Taki zabieg eliminuje zniekształcenia podczas procesu transformacji. W przeciwnym razie istnieje ryzyko zniekształcenia sygnału, które może wynikać z aliasingu lub niewystarczającego próbkowania [78, 94].

Transformata Fouriera w przypadku przejścia z dziedziny czasu do częstotliwości przyjmuje wzór [78]:

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\pi f t} dt \quad (40)$$

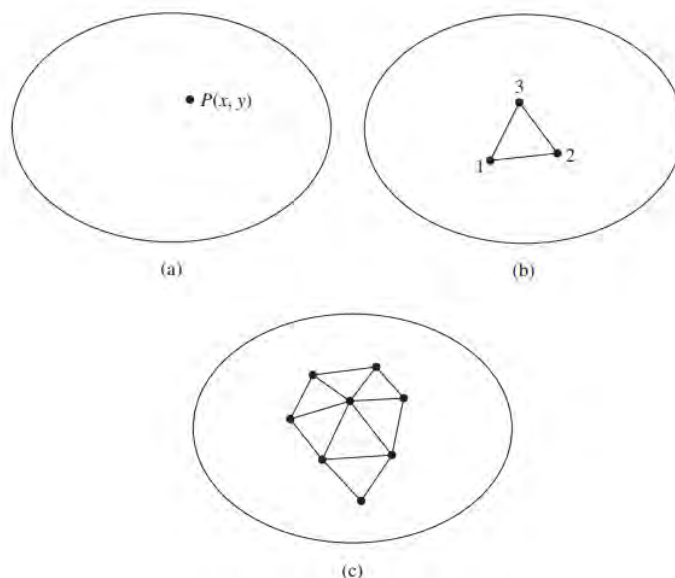
Transformata odwrotna przyjmuje postać

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_x(f) e^{-j\pi f t} dt \quad (41)$$

7. Analiza numeryczna MES

7.1. Teoria

Metoda elementów skończonych jest metodą obliczeniową stosowaną do pozyskania przybliżonego rozwiązania problemu z wartościami granicznymi w projektowaniu inżynierskim. Graniczna wartość problemu to problem matematyczny, w którym jedna lub więcej zmiennych musi spełniać równanie różniczkowe w całym przedziale dziedziny niezależnie od zmiennych i specyficznych granic dziedziny. Problemy związane ze zmiennymi granicznymi nazywane są problemami polowymi. Pole jest dziedziną zainteresowań i najczęściej reprezentuje strukturę fizyczną, która jest imitowana poprzez elementy skończone. Zmienne pola są zmiennymi zależnymi będącymi szukanymi rozwiązaniami z użyciem równań różniczkowych. Warunki brzegowe są wartościami pola zmiennych, na granicy pola. W zależności od analizowanego problemu fizycznego zmienne pola mogą obejmować: przemieszczenie fizyczne, temperaturę, strumień ciepła, prędkość cieczy i inne [97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104].



Rys. 8.1 Podstawowy koncept elementów skończonych – a) ogólna dwuwymiarowa domena zmiana pola (x, y) , b) trójwęzłowy element skończony, c) dodatkowe elementy przedstawiające częściową siatkę elementów skończonych [101].

Ogólna technika i terminologia metody elementów skończonych zostaną przedstawione na rysunku (rys. 8.1). Przedstawia on objętość materiału lub materiałów o znanych właściwościach fizycznych. Objętość reprezentuje dziedzinę w granicach problemu do rozwiązania. Do uproszczenia rozważań założono dwuwymiarowy przypadek z pojedynczą zmienną (x, y) określaną w każdym punkcie $P(x, y)$ (rys. 8.1a), także znane równanie zarządzające (bądź równania) jest spełnione w każdym punkcie. Oznacza to uzyskanie dokładnego rozwiązania matematycznego, czyli wyrażenia algebraicznego zależnego od zmiennych niezależnych. W praktycznych zastosowaniach dziedzina problemu może mieć skomplikowaną strukturę geometryczną, podobnie jak samo równanie nadrzędne. W takich przypadkach prawdopodobieństwo uzyskania dokładnego rozwiązania jest bardzo niskie, co wynika z trudności w precyzyjnym odwzorowaniu skomplikowanych warunków i zależności. Dlatego przybliżone rozwiązania oparte na numerycznych technikach i obliczeniach cyfrowych są najbardziej rozpowszechnione w zastosowaniach do analiz inżynierskich. Analiza elementów skończonych to potężne narzędzie dla uzyskiwania przybliżonych rozwiązań z odpowiednią dokładnością [101].

Na rysunku (rys. 8.1b) przedstawiono element trójkątny, który obejmuje poddziedzinę obszaru o skończonej wielkości. Element ten, będący elementem skończonym, nie jest różniczkowalny w wymiarach $dx \times dy$. Problem ten rozważany jest w dwóch wymiarach, przy czym założono, że grubość w kierunku osi z pozostaje stała. W rezultacie, zależność od zmiennej z nie jest uwzględniona w równaniu różniczkowym. Wierzchołki trójkątnego elementu są ponumerowane, aby wskazać, że te są węzłami. Węzeł jest określonym punktem w elemencie skończonym, w którym to wartość zmiennej pola musi być obliczona. Węzeł zewnętrzny znajduje się na granicach elementu skończonego i może zostać wykorzystany do połączenia elementu z sąsiednim elementem skończonym. Węzeł, który nie leży na granicy elementów, jest węzłem wewnętrznym i można połączyć go z żadnym innym elementem [101].

Wartość zmienna pola jest obliczona tylko w węzłach, pozostałe wartości zmiennych polowych zostają wyznaczone tylko w przybliżonych wartościach, przez interpolacje wartości węzłowych. W odniesieniu do przykładu trójkąta, wszystkie węzły znajdują się na jego krawędziach, a każdy inny punkt wewnątrz elementu opisany jest za pomocą przybliżonego równania pola. Zmienna pola w takich przypadkach jest aproksymowana na podstawie wartości węzłowych, co umożliwi opis wewnętrznych właściwości elementu w sposób przybliżony, ale wystarczająco dokładny dla analizy numerycznej [104]:

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3 \quad (42)$$

gdzie:

ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 – wartości węzłów pola,

N_1, N_2, N_3 – interpolacje funkcji (funkcje kształtu),

W metodzie elementów skończonych wartości węzłowe zmiennej polowej traktowane są jak nieznanne stałe, które należy wyznaczyć. Funkcje interpolacyjne są najczęściej w postaci wielomianu zmiennych niezależnych, wyprowadzone są w celu spełnienia określonych wymagań węzłowych. Funkcje interpolacyjne stanowią z góry określone, znane funkcje zmiennych, które opisują zmienność wartości polowej w obrębie elementu skończonego. Funkcje te pozwalają na aproksymację wartości zmiennej polowej w dowolnym punkcie elementu, bazując na wartościach węzłowych i są kluczowe dla precyzyjnej analizy oraz modelowania złożonych struktur w metodach numerycznych, takich jak metoda elementów skończonych [104].

Element trójkątny ma 3 stopnie swobody, z uwagi na to, że do jego opisania wymagane są trzy wartości węzłowe zmiennej w każdym miejscu elementu. Jeżeli dziedzina reprezentowana jest poprzez ciało płaskie poddane płaskiemu stanowi naprężeń, zmienna pola staje się wektorem przemieszczenia i wartości dla niej muszą być wyliczone w każdym węzle [104].

Jak obrazuje (rys.8.1c), każdy element jest połączony na zewnątrz węzła do innych elementów. Równania elementów skończonych są sformułowane w taki sposób, że wartości zmiennej polowej w każdym połączeniu węzłowym są równe dla wszystkich elementów przylegających do danego węzła. Zapewnia to ciągłość zmiennej polowej w węzłach, co jest kluczowe dla dokładności modelowania i analizy. Dzięki temu podejściu zmienna polowa jest płynnie przekazywana między elementami, co pozwala na spójne i realistyczne odwzorowanie zachowania całej analizowanej struktury. W rzeczywistości formuły elementów skończonych zapewniają ciągłość zmiennej polowej poza granicami między elementowymi. Cecha ta umożliwia uniknięcie fizycznie niedopuszczalnych sytuacji, takich jak obecność luk czy pustek w dziedzinie analizy. W kontekście problemów strukturalnych, obecność luk mogłaby prowadzić do fizycznego rozdzielania elementów, co jest nieakceptowalne. W zagadnieniach

wymiany ciepła luka mogłaby objawiać się jako różne wartości temperatury w tym samym punkcie fizycznym, co również jest nieprawidłowe i wpływa negatywnie na dokładność wyników. Zachowanie ciągłości zmiennej polowej w węzłach zapobiega takim problemom, zapewniając spójność i poprawność modelu [104].

Przykładem w problemach strukturalnych jest zmienna polowa przemieszczenia, której rzeczywistą dziedziną analizy są odkształcenia i naprężenia. Zgodnie z definicją, odkształcenie jest pierwszą pochodną składową przemieszczenia, co oznacza, że jest bezpośrednio związane z gradientem przemieszczenia w obrębie analizowanej struktury. Dokładne uwzględnienie tej relacji jest kluczowe dla precyzyjnego modelowania i analizy deformacji oraz naprężeń w materiałach. Odkształcenie nie jest ciągłe na granicach elementu. Wielkość nieciągłości pochodnych może być wykorzystana w tym przypadku do oceny dokładności rozwiązania i zbieżności elementów [104].

7.2. Opis procedury analizy

Formułowanie analizy za pomocą metody elementów skończonych jest wspólne dla wszystkich typów takich analiz, niezależnie od tego, czy dotyczą one struktury, przepływu ciepła, przepływu płynów czy innego problemu fizycznego. W analizach numerycznych metodą elementów skończonych można wyróżnić trzy główne procedury analizy, którymi są: przetwarzanie wstępne, rozwiązywanie, przetwarzanie końcowe [104].

Przetwarzanie wstępne polega na zdefiniowaniu modelu i obejmuje określenie:

- geometrycznej dziedziny problemu,
- typu elementów do użycia,
- właściwości materiałowych elementów,
- właściwości geometrycznych elementów,
- połączeń elementów (siatka modelu),
- ograniczeń fizycznych (warunki brzegowe),
- obciążeń.

Krok przetwarzania wstępnego (definiowania modelu) jest kluczowy. Jeżeli definicja wstępna będzie nieprawidłowa, wówczas rozwiązanie będzie bezwartościowe [104, 108].

W trakcie etapu rozwiązywania, oprogramowanie do analizy metodą elementów skończonych generuje równania algebraiczne w formie macierzowej i wylicza nieznanne wartości głównej zmiennej pola. Następnie, obliczone wartości są wykorzystywane do wyznaczenia dodatkowych, pochodnych zmiennych, takich jak siły reakcji, naprężenia w elementach i przepływ ciepła. Model metody elementów skończonych często składa się z dziesiątek tysięcy równań, dlatego stosuje się specjalistyczne techniki rozwiązania, aby zminimalizować wymagania dotyczące przechowywania danych i czasu obliczeń. Dla problemów statycznych i liniowych, powszechnie stosuje się rozwiązanie frontu falowego, które opiera się na eliminacji Gaussa [104, 107, 108].

Przetwarzanie końcowe, czyli analiza i ocena wyników rozwiązania jest ostatnim etapem w analizie metodą elementów skończonych. Oprogramowanie postprocesora wykorzystuje zaawansowane procedury do sortowania, drukowania i prezentowania wybranych wyników z rozwiązania. Możliwe operacje obejmują: klasyfikację naprężeń elementów według wielkości, weryfikację równowagi, obliczanie współczynników bezpieczeństwa, ilustrację zdeformowanego kształtu struktury, animację zachowania modelu dynamicznego oraz generowanie kolorowych wykresów temperatury. Mimo że danymi rozwiązaniami można manipulować na wiele sposobów podczas przetwarzania końcowego, najistotniejszym celem jest

przeprowadzenie oceny wyników opartej na wiedzy i doświadczeniu, czy wyniki rozwiązania są zgodne z prawami fizyki [104, 107].

W metodzie elementów skończonych, rzeczywiste ciało lub ciągłość materii są przedstawione jako zbiór podobszarów zwanych elementami skończonymi. Elementy te są połączone w określonych miejscach nazywanych węzłami. Węzły zazwyczaj znajdują się na granicach elementów, gdzie sąsiadujące elementy są połączone. Ponieważ rzeczywista wartość zmiennej polowej (takiej jak przemieszczenie, naprężenie, temperatura, ciśnienie czy prędkość) wewnątrz elementu nie jest znana, przyjmuje się, że można ją przybliżyć za pomocą prostych funkcji aproksymacyjnych. Funkcje te są zdefiniowane na podstawie wartości zmiennej polowej w węzłach elementu skończonego. Kiedy zapisuje się równania pola dla całej dziedziny, nowe niewiadome to wartości zmiennych polowych w węzłach. Takie podejście umożliwia rozwiązanie problemu poprzez określenie wartości węzłowych, co pozwala na efektywne modelowanie i analizę zmienności w obrębie analizowanej struktury. Rozwiązując te równania, zazwyczaj w formie równań macierzowych, uzyskuje się wartości zmiennych polowych w węzłach. Po ich obliczeniu funkcje aproksymacyjne pozwalają na określenie zmienności zmiennej polowej w całym obszarze analizy, obejmującym wszystkie elementy. Dzięki temu możliwe jest pełne odwzorowanie zmienności w obrębie analizowanej dziedziny, co jest kluczowe dla precyzyjnego modelowania i analizy zachowania struktury lub systemu [103, 104].

7.3. Rozwiązanie problemu ciągłości za pomocą metody elementów skończonych

Rozwiązanie uniwersalnego problemu ciągłości przy użyciu metody elementów skończonych zawsze odbywa się zgodnie z uporządkowanym procesem, który składa się z kolejnych etapów. W kontekście statycznych problemów strukturalnych, procedura ta zostanie przedstawiona w następujących krokach [103]:

- I. Dyskretyzacja struktury jest pierwszym etapem w metodzie elementów skończonych, jest podział struktury lub obszaru, w którym poszukujemy rozwiązania na mniejsze podobszary, zwane elementami. W rezultacie struktura ma być reprezentowana za pomocą odpowiednich elementów skończonych. Należy podjąć decyzję o liczbie, rodzaju, wielkości i rozmieszczeniu tych elementów [103].
- II. Wybór odpowiedniego modelu interpolacji lub przemieszczenia - w obliczeniach strukturalnych, w przypadku braku dokładnych rozwiązań przemieszczenia dla złożonych struktur poddanych określonym warunkom obciążenia, stosuje się odpowiednie modele interpolacyjne lub przemieszczeniowe w ramach danego elementu, aby zasymulować nieznane rozwiązania. Wybór modelu powinien zapewniać obliczeniową prostotę oraz spełniać określone kryteria zbieżności. Model interpolacyjny lub przemieszczeniowy musi być na tyle prosty, aby umożliwić efektywne obliczenia, ale jednocześnie na tyle precyzyjny, aby zapewnić wiarygodność i dokładność symulacji wyników analitycznych [103].
- III. Wyprowadzenie macierzy sztywności elementów i wektorów obciążenia - na podstawie przyjętego modelu przemieszczenia, macierz sztywności $[K^{(e)}]$ oraz wektor obciążenia $[\vec{P}^{(e)}]$ dla elementu e są wyprowadzane za pomocą równania z warunków równowagi lub odpowiednio dobranej zasady wariacyjnej [103].
- IV. Złożenie równań elementów w celu uzyskania ogólnych równań równowagi - z uwagi na to, że struktura jest zbudowana z wielu elementów skończonych, indywidualne macierze sztywności elementów i wektory obciążenia muszą być skompilowane w odpowiedni sposób, a globalne równania równowagi muszą być sformułowane jako [103]:

$$[K]\vec{\Phi} = \vec{P} \quad (43)$$

gdzie:

$[K]$ – macierz sztywności,

$\vec{\Phi}$ – wektor przemieszczeń węzłów,

\vec{P} – wektor sił węzłowych dla całej struktury.

- V. Odnalezienie wartości dla nieznanymi przemieszczeń w węzłach - należy dostosować ogólne równania równowagi, aby uwzględnić warunki brzegowe danego problemu. Po zastosowaniu warunków brzegowych, równania równowagi można przedstawić w następujący sposób:

$$[K]\vec{\Phi} = \vec{P} \quad (44)$$

W przypadku problemów liniowych, rozwiązanie dla wektora $\vec{\Phi}$ jest stosunkowo proste. Natomiast w przypadku problemów nieliniowych, rozwiązanie wymaga wykonania

serii kroków, z których każdy polega na modyfikacji macierzy sztywności $[K]$ i/lub wektora obciążenia \vec{P} [103].

- VI. Kalkulacja odkształceń i naprężeń elementów na podstawie znanych przemieszczeń węzłowych $\vec{\phi}$, jeśli to wymagane. Odkształcenia i naprężenia w elementach można obliczyć, wykorzystując odpowiednie równania mechaniki ciał stałych lub teorii strukturalnej. Równania te uwzględniają relacje między przemieszczeniami, odkształceniami i naprężeniami, co pozwala na dokładną analizę i ocenę zachowania materiałów i struktur poddanych różnym warunkom obciążenia. Terminologia używana w poprzednich sześciu etapach musi zostać dostosowana, jeśli chcemy zastosować tę koncepcję w innych dziedzinach. Na przykład należy używać terminów ciągłość lub dziedzina zamiast struktura, zmienna pola zamiast przemieszczenie, macierz charakterystyczna zamiast macierz sztywności, a wyniki elementów zamiast odkształcenia elementów [103].

7.4. Dyskretyzacja geometrii

Geometria (obszar lub region rozwiązania) problemu jest często nieregularna. Pierwszym etapem w analizie metodą elementów skończonych jest podział nieregularnego obszaru na mniejsze i regularne podobszary, zwane elementami skończonymi. Jest to jak zastąpienie obszaru o nieskończonej liczbie stopni swobody systemem o skończonej liczbie stopni swobody. Różne sposoby podziału obszaru na elementy skończone wiążą się z różnymi ilościami czasu obliczeniowego i często prowadzą do różnych przybliżeń rozwiązania problemu fizycznego. Proces dyskretyzacji to w zasadzie kwestia inżynierskiego osądu. Skuteczne metody idealizacji elementów skończonych wymagają pewnego doświadczenia i znajomości prostych wytycznych. Dla dużych problemów związanych ze złożonymi geometriami, idealizacja elementów skończonych oparta na manualnych procedurach wymaga dużego wysiłku i czasu ze strony analityka. Opracowano specjalistyczne programy do automatycznego generowania siatek, które umożliwiają efektywne idealizowanie złożonych obszarów przy minimalnym zaangażowaniu analityka. Programy te automatyzują proces siatkowania, co pozwala na szybsze i bardziej precyzyjne modelowanie skomplikowanych struktur, redukując potrzebę manualnej interwencji zwiększając efektywność analizy [103, 105].

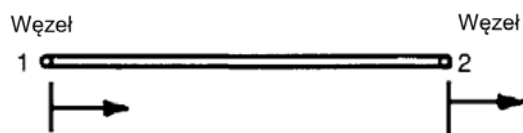
Kształt, rozmiar, liczba i konfiguracja elementów musi być starannie dobrana, aby jak najwierniej odwzorować oryginalne ciało lub obszar, nie zwiększając przy tym wymaganego nakładu obliczeniowego. Wybór rodzaju elementu zazwyczaj zależy od geometrii ciała i liczby niezależnych współrzędnych potrzebnych do opisu systemu [101, 103].

Jeżeli geometria, właściwości materiału i zmienna pola problemu mogą być opisane za pomocą tylko jednej współrzędnej przestrzennej, możemy użyć jednowymiarowych lub liniowych elementów (rys. 8.2). W przypadku prostej analizy zakłada się, że jednowymiarowe elementy mają dwa węzły (node), po jednym na każdym końcu, z odpowiednią wartością zmiennej pola wybraną jako nieznaną (stopień swobody). Jednak w przypadku analizy belek wartości zmiennej pola (przemieszczenie poprzeczne) i jej pochodna (nachylenie) są wybierane jako niewiadome (stopień swobody) w każdym węźle (rys. 8.3) [101, 103].

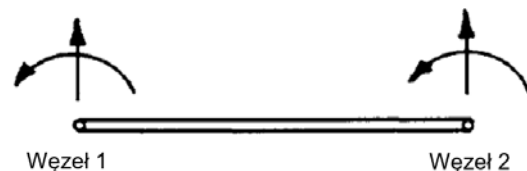
Gdy szczegóły i konfiguracja problemu można zostać opisana za pomocą dwóch niezależnych współrzędnych przestrzennych, należy zastosować elementy dwuwymiarowe (rys. 8.4). Podstawowym elementem używanym do analizy dwuwymiarowej jest element trójkątny. Mimo że element czworokątny (lub jego specjalne formy, czworobok i równoległobok) można uzyskać w wyniku złożenia dwóch lub czterech elementów trójkątnych, w niektórych przypadkach użycie elementów czworokątnych daje korzystniejsze rezultaty jakości siatki [101, 103].

Wówczas gdy geometrię, właściwości materiałowe i inne parametry ciała można opisać za pomocą trzech niezależnych współrzędnych przestrzennych, możemy zamodelować ciało za pomocą elementów trójwymiarowych (rys. 8.5). Podstawowym elementem trójwymiarowym, analogicznym do elementu trójkątnego w przypadku problemów dwuwymiarowych jest element czworościanu. W niektórych przypadkach element sześciianu można uzyskać poprzez złożenie pięciu czworościanów. Niektóre problemy, które są faktycznie trójwymiarowe, można opisać za pomocą tylko jednej lub dwóch niezależnych współrzędnych. Takie problemy można zamodelować za pomocą elementów osiowosymetrycznych lub pierścieniowych pokazanych (rys. 8.6). Problemy posiadające symetrię osiową, takie jak tłoki, zbiorniki magazynowe, zawory, dysze raketowe i osłony termiczne pojazdów powrotnych należą do tej kategorii [101, 103, 104].

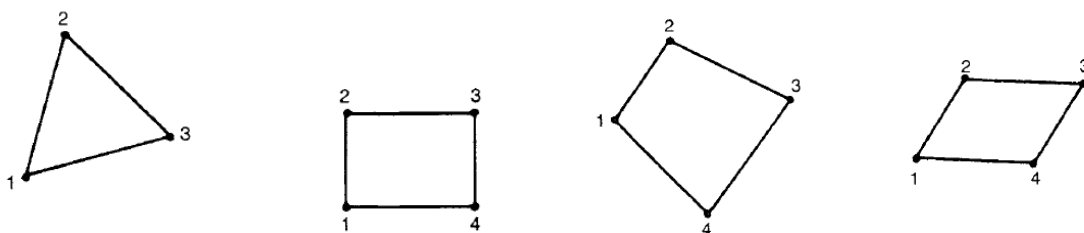
Do dyskretyzacji problemów obejmujących zakrzywione geometrie przydatne są elementy skończone z zakrzywionymi bokami (rys. 8.7). Możliwość modelowania zakrzywionych granic jest możliwa dzięki dodaniu węzłów środkowych. Elementy skończone z prostymi bokami są znane jako elementy liniowe, podczas gdy te z zakrzywionymi bokami są nazywane elementami wyższego rzędu [102, 103].



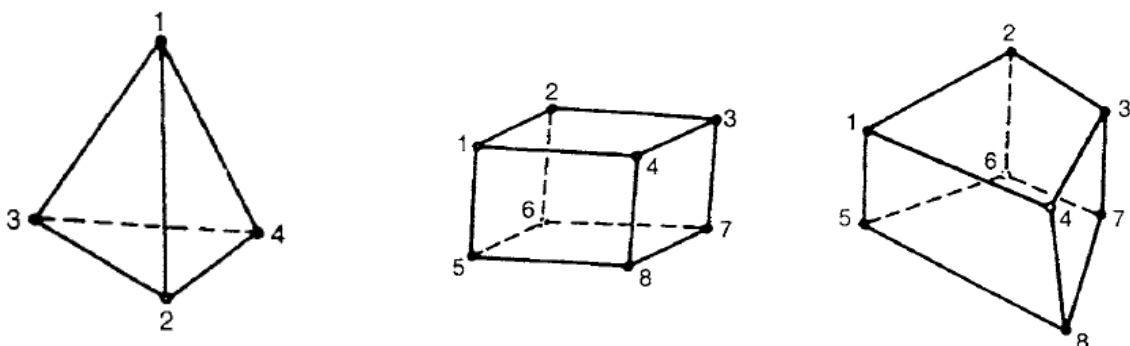
Rys. 8.2 Element skończony 1D [103].



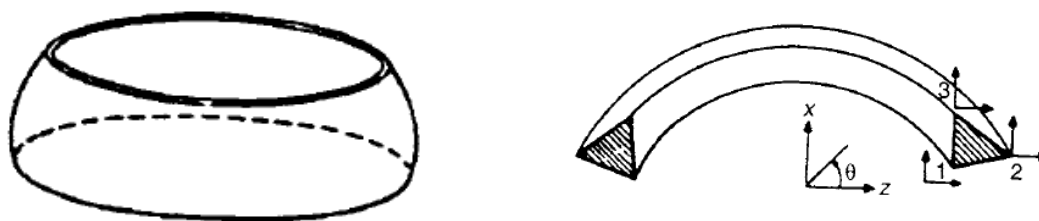
Rys. 8.3 Element skończony 1D [103].



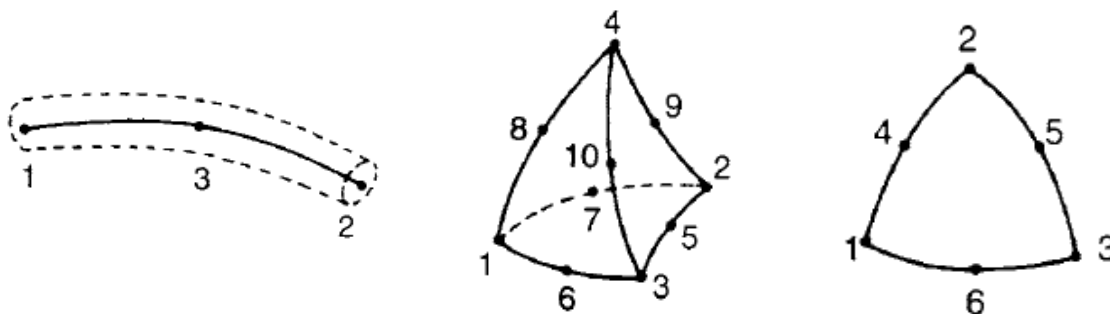
Rys. 8.4 Elementy skończone 2D [103].



Rys. 8.5 Elementy skończone 3D [103].



Rys. 8.6 Elementy skończone osiowoosymetryczne [103].



Rys. 8.7 Elementy skończone wyższego rzędu [103].

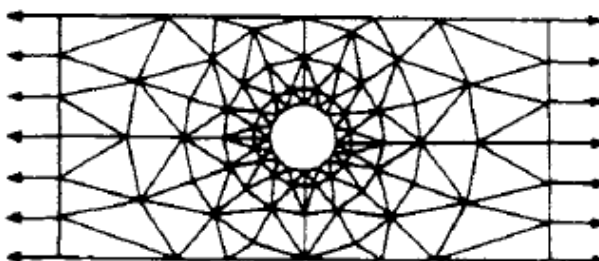
7.5. Składowe wpływające na utworzoną siatkę geometrii

Często rodzaj użytych elementów wynika bezpośrednio z fizycznego problemu. W przypadku problemu, który dotyczy analizy struktury kratownicowej pod określonymi warunkami obciążenia, to oczywistym wyborem do idealizacji są “elementy prętowe lub liniowe”. Jednakże rodzaj elementów użytych do dyskretyzacji może pozostać niejednoznaczny, a w takich przypadkach należy umiejętnie wybrać i zwracać uwagę na rodzaj użytych elementów [102, 103].

Rozmiar elementów ma bezpośredni wpływ na zbieżność rozwiązania, dlatego musi być on starannie dobrany. Jeśli elementy są małe, wówczas końcowe rozwiązanie będzie posiadało precyzyjniejsze rezultaty. Należy pamiętać, że użycie mniejszych elementów wiąże się z większym czasem obliczeń. Wówczas możliwym jest użycie elementów o różnych rozmiarach w obrębie tego samego ciała. Dla analizy naprężeń płyty z otworem można zauważyć użycie elementów o różnych rozmiarach (rys. 8.8). Rozmiar elementów powinien zmniejszać się w pobliżu otworu (skupienie naprężeń) w porównaniu do miejsc dalszych. Generalnie, jeżeli oczekujemy gwałtownych zmian zmiennej pola, należy używać drobniejszej siatki w tych obszarach. Innym aspektem związanym z rozmiarem elementów, który wpływa na rozwiązanie metodą elementów skończonych, jest stosunek proporcji elementów. Stosunek proporcji opisuje kształt elementu w zespole elementów. Dla elementów dwuwymiarowych, stosunek proporcji jest określany jako stosunek największego wymiaru elementu do najmniejszego wymiaru. Elementy o stosunku proporcji zbliżonym do jedności zazwyczaj dają najlepsze wyniki [103].

Lokalizacja węzła dla badanego obiektu nie ma znaczenia, jeżeli nie ma gwałtownych zmian w geometrii, właściwościach materiału oraz warunkach zewnętrznych (np. temperatura lub obciążenie), wówczas obiekt można podzielić na równe części. Z drugiej strony jeżeli występują jakiegokolwiek nieciągłości w badanym obiekcie, wówczas węzły muszą leżeć na tych nieciągłościach [101, 103].

Liczba elementów użytych do odwzorowania jest związana z pożądaną dokładnością wyników. Rozmiar elementów wraz z liczbą stopni swobody elementu każdorazowo oznacza dokładniejsze wyniki badanego problemu. Istnieje pewna liczba elementów, po której nie będzie istniała wyraźna poprawa wyników badania. Użycie zbyt dużej liczby elementów wiąże się z dużą liczbą swobody, co może prowadzić do problemów z przechowaniem wyników macierzy w pamięci komputera [101, 103].



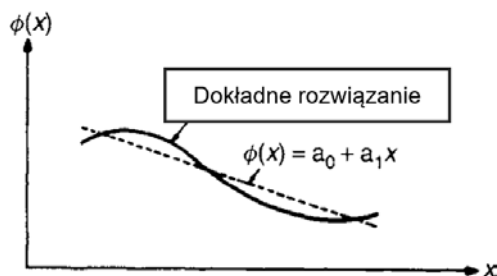
Rys. 8.8 Dyskretyzacja poprzez elementy różnych rozmiarów [103].

7.6. Funkcja interpolacji

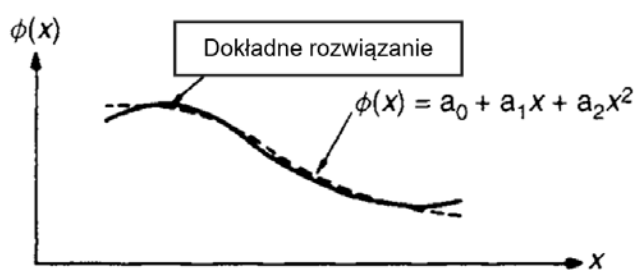
Podstawową ideą metody elementów skończonych jest aproksymacja kawałkowa – oznacza to, że rozwiązanie skomplikowanego problemu uzyskuje się poprzez podział obszaru zainteresowania na małe bryły geometryczne (elementy skończone), a następnie przybliżanie rozwiązania zostaje obliczone w każdym elemencie za pomocą prostej funkcji. Zatem koniecznym i ważnym krokiem jest wybór funkcji prowadzącej do rozwiązania w każdym elemencie. Funkcje używane do reprezentowania zachowania rozwiązania w elemencie nazywane są funkcjami interpolacyjnymi lub przybliżającymi, czy też modelami interpolacyjnymi. Funkcje interpolacyjne typu wielomianowego są najczęściej używane w literaturze z następujących powodów [102, 103]:

- I. Sformułowanie i skomputeryzowanie równania elementów skończonych z funkcjami interpolacyjnymi typu wielomianowego (rys. 8.9) jest prostą metodą dającą dobre efekty. Konkretnie, łatwiej jest wykonywać różniczkowanie lub całkowanie z wielomianami [103].
- II. Możliwe jest poprawienie dokładności wyników poprzez zwiększenie stopnia wielomianu, jak pokazano na rysunku (rys. 8.10). Teoretycznie, wielomian nieskończonego rzędu odpowiada dokładnemu rozwiązaniu. W praktyce używane są wielomiany skończonego rzędu jako przybliżenia [103].

Chociaż funkcje trygonometryczne również posiadają niektóre z tych właściwości, rzadko są używane w analizie elementów skończonych.



Rys. 8.9 Funkcja interpolacji wielomian pierwszego stopnia [103].



Rys. 8.10 Funkcja interpolacji wielomian drugiego stopnia [103].

Gdy wielomian interpolacyjny jest rzędu pierwszego, element nazywany jest elementem liniowym. Element liniowy nazywany jest elementem prostym, jeśli liczba węzłów w elemencie wynosi 2, 3 i 4 w odpowiednio 1D, 2D i 3D. Jeśli wielomian interpolacyjny jest rzędu drugiego lub n-tego, element nazywany jest elementem wyższego rzędu. W elementach wyższego rzędu wprowadza się dodatkowe węzły wtórne (środkowe i/lub wewnętrzne) oprócz węzłów pierwotnych (narożnych), aby dopasować liczbę stopni swobody węzłowej do liczby stałych (współrzędnych uogólnionych) w wielomianie interpolacyjnym. Elementy wyższego rzędu są szczególnie przydatne w przypadkach, w których oczekuje się gwałtownej zmiany gradientu zmiennej pola, wówczas elementy proste, które szacują gradient za pomocą stałych wartości nie przynoszą satysfakcjonujących wyników. Połączenie zwiększonej precyzji i zmniejszenia nakładu pracy na przygotowanie danych sprawiło, że elementy wyższego rzędu stały się powszechnie stosowane w wielu praktycznych zastosowaniach [102, 103].

Jeżeli stopień wielomianu interpolacyjnego jest ustalony, dyskretyzację obszaru (lub dziedziny) można ulepszyć na dwa sposoby.

- Pierwsza metoda R polega na zmianie lokalizacji węzłów bez zmiany całkowitej liczby elementów.
- Druga metoda H polega na zwiększeniu liczby elementów.

Natomiast jeśli chcemy poprawić dokładność poprzez zwiększenie stopnia wielomianu interpolacyjnego, stosujemy metodę P [103].

Zakrzywione granice nie mogą być odpowiednio modelowane za pomocą elementów o prostych krawędziach. Dlatego opracowano grupę elementów nazywanych “izoparametrycznymi”. Kluczową ideą elementów izoparametrycznych jest stosowanie tych samych funkcji interpolacyjnych do określania kształtu elementu lub jego geometrii, jak i do opisu zmienności zmiennej pola wewnątrz elementu. Aby uzyskać równania elementów izoparametrycznych, należy wprowadzić lokalny lub naturalny układ współrzędnych dla każdego kształtu elementu. Następnie funkcje interpolacyjne lub kształtu są wyrażane za pomocą współrzędnych naturalnych. Reprezentowanie geometrii za pomocą (nieliniowych) funkcji kształtu można traktować jako procedurę mapowania, która przekształca regularny kształt, taki jak trójkąt o prostych bokach lub prostokąt w lokalnym układzie współrzędnych, w zniekształcony kształt, trójkąt o zakrzywionych bokach lub prostokąt w globalnym układzie współrzędnych kartezjańskich [103].

Ten koncept pozwala na reprezentowanie problemów z zakrzywionymi granicami za pomocą elementów izoparametrycznych o zakrzywionych bokach. Obecnie elementy izoparametryczne są powszechnie stosowane w problemach analizy trójwymiarowej i powłokowej [103].

7.7. Wielowymiarowa postać funkcji interpolacyjnych

Jeśli dla zmiennej pola $\phi(x)$ w jednowymiarowym elemencie (45) zakłada się wielomianowy typ zmienności, to $\phi(x)$ może być wyrażone jako [93]:

$$\phi(x) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 x^2 + \dots + \alpha_m x^n \quad (45)$$

Podobnie, w dwuwymiarowych (46) i trójwymiarowych (47) elementach skończonych formę wielomianową funkcji interpolacyjnych można wyrazić jako [103]:

$$\phi(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 x^2 + \alpha_5 y^2 + \alpha_6 xy + \dots + \alpha_m y^n \quad (46)$$

$$\phi(x, y) = a_1 + a_2 x + a_3 y + a_4 z + a_5 x^2 + a_6 y^2 + a_7 z^2 + a_8 xy + a_9 yz + a_{10} zx + \dots + a_m z^n \quad (47)$$

gdzie $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ są współczynnikami wielomianu, znane również jako „współrzędne uogólnione”, n jest stopniem wielomianu, a liczba współczynników wielomianu m jest dana przez [103]:

$$m = n + 1 \text{ dla elementu 1D} \quad (48)$$

$$m = \sum_{j=1}^{n+1} j \text{ dla elementu 2D} \quad (49)$$

$$m = \sum_{j=1}^{n+1} j(n + 2 - j) \text{ dla elementu 3D} \quad (50)$$

W większości praktycznych zastosowań rzędem wielomianu w funkcjach interpolacyjnych jest jeden, dwa lub trzy [103].

7.8. Elementy skończone

Elementy skończone można podzielić na trzy typy: proste, złożone i wielokrotne, w zależności od geometrii elementu i stopnia wielomianu używanego w funkcji interpolacyjnej.

Elementy proste to te, które używają wielomianów składających się z wyrazów stałych i liniowych do przybliżania. Wielomiany podane przez równania reprezentują funkcje prostych dla elementów jedno-, dwu- i trójwymiarowych. Biorąc pod uwagę, że prosty jest zdefiniowany jako figura geometryczna utworzona przez połączenie $n + 1$ węzłów w przestrzeni n -wymiarowej, możemy traktować narożniki elementów jako węzły w elementach prostych. Na przykład, prosty element w dwóch wymiarach to trójkąt z trzema węzłami (narożnikami) [102, 103].

Elementy złożone to te, które do przybliżania używają wielomianów składających się z wyrazów kwadratowych, sześciennych i wyższych, zgodnie z potrzebą, oprócz wyrazów stałych i liniowych. Elementy złożone mogą mieć te same kształty co elementy proste, ale będą miały dodatkowe węzły graniczne i czasami wewnętrzne. Na przykład, element trójkątny z trzema węzłami narożnymi i trzema węzłami środkowymi spełnia to wymaganie [102, 103].

Elementy wielokrotne to te, których granice są równoległe do osi współrzędnych, aby osiągnąć ciągłość między elementową, a ich przybliżające wielomiany zawierają wyrazy wyższego rzędu. Element prostokątny jest przykładem elementu wielokrotnego w dwóch wymiarach. Granice elementów prostych i złożonych nie muszą być równoległe do osi współrzędnych [102, 103].

8. Cel badań – teza pracy badawczej

Celem badań jest opracowanie systemu kontroli jakości dla procesu wieloelementowego zgrzewania garbowego, wykorzystującego analizę modalną. W obecnej sytuacji technicznej, wiele systemów kontroli jakości zgrzein w czasie rzeczywistym skupia się na zgrzewaniu punktowym. Najczęściej stosowane metody to pomiar rezystancji podczas procesu zgrzewania oraz metoda ultradźwiękowa. Jednakże te metody nie zostały jeszcze w pełni wykorzystane do kontroli jakości w procesie wieloelementowego zgrzewania garbowego.

Wieloelementowe zgrzewanie garbowe, ze względu na swoją złożoność, niesie ze sobą ryzyko powstania odkształceń i odchyłeń od zadanych parametrów, co prowadzi do dużej ilości odpadu. W związku z tym, badania mają na celu zastosowanie analizy modalnej do kontroli jakości wszystkich złączy w elemencie rozpatrywanym całościowo. Analiza modalna, która już znalazła zastosowanie w wyznaczaniu sztywności dynamicznej układu mechanicznego zgrzewarki i ocenie wpływu sztywności na jakość zgrzeiny, może przyczynić się do rozwiązania tego problemu.

Ostatecznym celem badań jest stworzenie nowatorskiego systemu kontroli jakości, który będzie wykorzystywany do monitorowania i oceny jakości złączy tworzonych podczas procesu wieloelementowego zgrzewania garbowego. Taki system nie tylko poprawi jakość zgrzein, ale także przyczyni się do redukcji odpadów produkcyjnych, co jest korzystne zarówno z punktu widzenia ekonomicznego, jak i środowiskowego.

Teza:

Zastosowanie analizy modalnej, pozwala na ocenę procesu zgrzewania garbowego wielopunktowego, pod kątem detekcji niezgodności zgrzewalniczych w elementach listew wtryskowych łączonych tą metodą. Analiza spektralna sygnałów przyspieszenia rejestrowanych w określonych punktach oprzyrządowania zgrzewalniczego pozwala na detekcję występowania niezgodności zgrzewalniczych w postaci braków zgrzania.

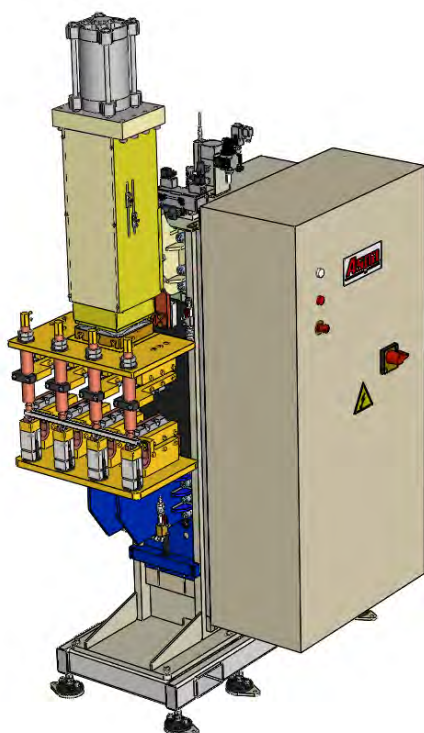
9. Stanowisko badawcze

9.1. Zgrzewarka wraz z oprzyrządowaniem zgrzewalniczym

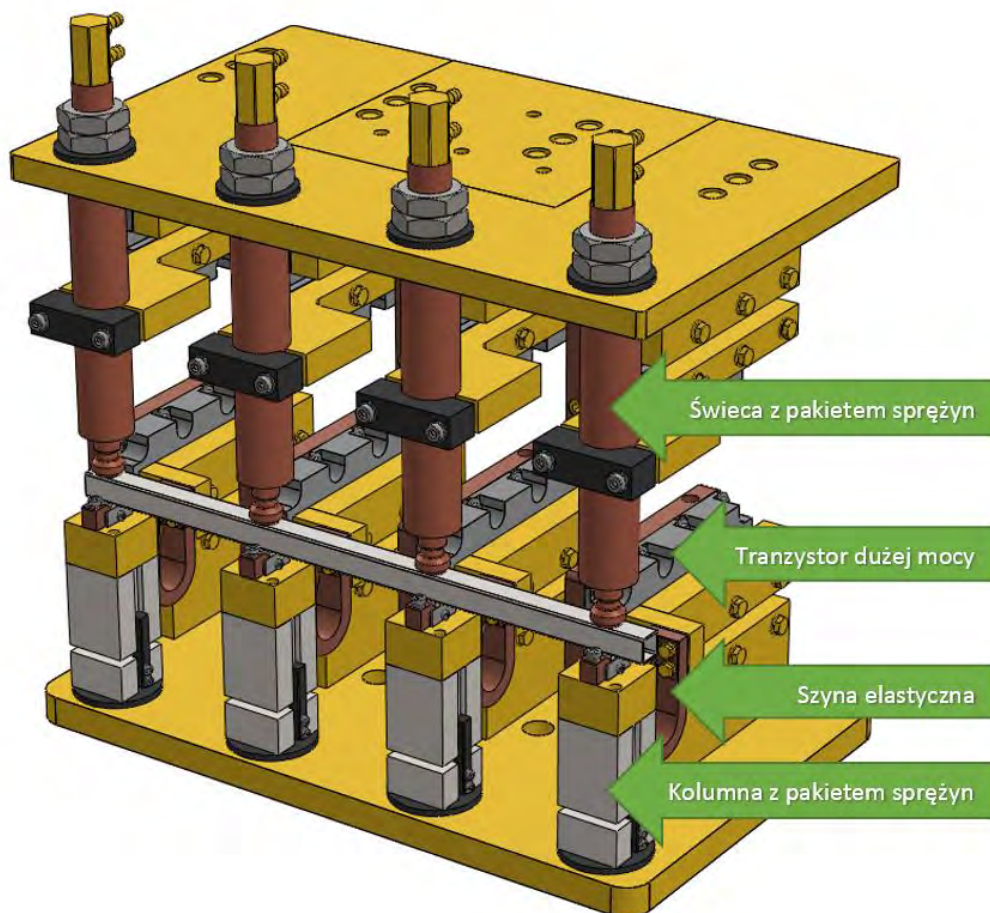
W skład stanowiska badawczego wchodzi zgrzewarka garbowa inwertorowa ZGm-300i produkcji ASPA (rys. 9.1). Wyposażona jest w następujące komponenty charakteryzujące funkcjonalność tej maszyny:

- Układ sterowania GeniusHWI PRO firmy Harms & Wende z dodatkowym oprogramowaniem zewnętrznym XPegasus GOLD umożliwiającym sterowanie i kontrolę procesu za pośrednictwem komputera PC. Sterownik pozwala na zadawanie parametrów zgrzewania oraz umożliwia ich pomiar oraz analizę w trakcie procesu zgrzewania. Sterownik wyposażony jest w wyjście sygnałowe umożliwiające sterowanie zaworem proporcjonalnym w celu cyfrowego zadania wartości siły docisku, zadanie wartości prądu zgrzewania oraz czasu jego przebiegu, czasu narastania i opadania prądu. Posiada sensory pomiarowe dla prądu oraz napięcia.
- Źródło prądowe to transformator produkcji Harms & Wende - typu 2MF8-13,2-13,0 o mocy nominalnej $S_{50\%} = 300 \text{ kVA}$, o napięciu zasilającym $U_1 = 500 \text{ V}$ o częstotliwości $1000 - 1200 \text{ Hz}$, transformator ten po stronie wtórnej charakteryzuje się prądem stałym ciągłym $I_{2-100\%} = 13 \text{ kA}$ oraz napięciem jałowym $U_2 = 13,2 \text{ V}$. Zasilanie transformatora zapewnione jest przez inwerter produkcji Hans & Wende – typu HWI416W o mocy znamionowej $S_{20\%} = 269 \text{ kVA}$ o pierwotnym prądzie wyjściowym $I_{100\%} = 240 \text{ A}$.
- Układ dociskowy zgrzewarki wyposażony jest w siłownik produkcji FESTO DSBG-160-125-P-N3 o średnicy tłoka 160 mm i skoku 125 mm , który generuje siłę $12,3 \text{ kN}$. Układ ten dodatkowo wyposażony jest w prowadzenie tłoczyska wraz z pakietem sprężyn talerzowych w postaci sprzęgła, zamocowanych pomiędzy tłoczyskiem a prowadnicą układu dociskowego. Umożliwia to lepszą normalizację przy osiadaniu garbu, a tym samym powtarzalność i kontrolę samego procesu zgrzewania garbowego.
- Równoległy układ chłodzenia z obiegami dla elektrod, szyn prądowych z płytami, transformatora oraz inwertera. Układ chłodzenia utrzymuje stałą temperaturę 25°C na wylocie każdego z obiegów wody zgrzewarki.

Do zgrzewarki zostało zaprojektowane i wykonane oprzyrządowanie zgrzewalnicze w postaci przyrządu pokazanego na rysunku (rys. 9.2). Pozwala on na zgrzewanie profilu kwadratowego z czterema nakrętkami M8 DIN 928 w pojedynczym mocowaniu. Konstrukcja przyrządu złożona jest z ułożonych w szereg czterech obsad w płycie górnej oraz kolumn stalowych w płycie dolnej. Oprzyrządowanie posiada zamocowane na płycie górnej i dolnej tranzystory dużej mocy umożliwiające odcięcie danej „odnogi obwodu prądowego”, dodatkowo zarówno obsady elektrod jak i kolumny wyposażone są w pakiety sprężyn umożliwiające równomierny docisk oraz pewność kontaktu pomiędzy punktami zgrzewanymi. Kolumna dolna posiada doprowadzenie prądowe w postaci szyny elastycznej. Obsady elektrod wyposażone są w obiegi chłodzenia umożliwiające wpięcie ich do układu chłodzenia zgrzewarki. Elektrody zamocowane na obsadzie oraz kolumnie są elementami dostarczającymi energię elektryczną zamienianą w energię cieplną zgodnie z prawem Joule’a-Lenza, służącą do stopienia garbów i utworzenia nierozłącznego połączenia pomiędzy komponentami.



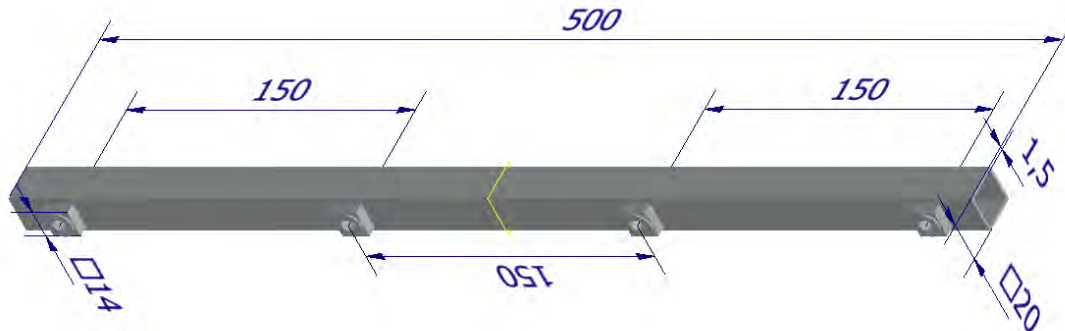
Rys. 9.1 Zgrzewarka garbowa ZGm-300i produkcji ASPA.



Rys. 9.2 Przyrząd zgrzewalniczy do zgrzewania nakrętek DIN 928 z profilem kwadratowym.

9.2. Detal wytypowany do badań

Detal wykorzystany w badaniach wykonany jest z rury o przekroju kwadratowym $20 \times 20 \times 1,5$ o długości 500 mm oraz czterech nakrętek M8, posiadających garby zgodnie z DIN 928. Nakrętki są rozmieszczone symetrycznie względem osi profilu, co 150 mm (rys. 9.3). Materiał z jakiego wykonano profil oraz nakrętki to stal konstrukcyjna S235JR. Detal został wykonany techniką zgrzewania garbowego w jednym mocowaniu wszystkich komponentów w przyrządzie. Parametry procesu zgrzewania przedstawiono w tabeli 9.1. W badaniach przyjęto założenie, że prawidłowo zgrzana nakrętka M8 DIN928, w której zgrzeina garbowa poddana statycznej próbie oderwania, posiada wytrzymałość minimalną o wartość siły 8 kN .

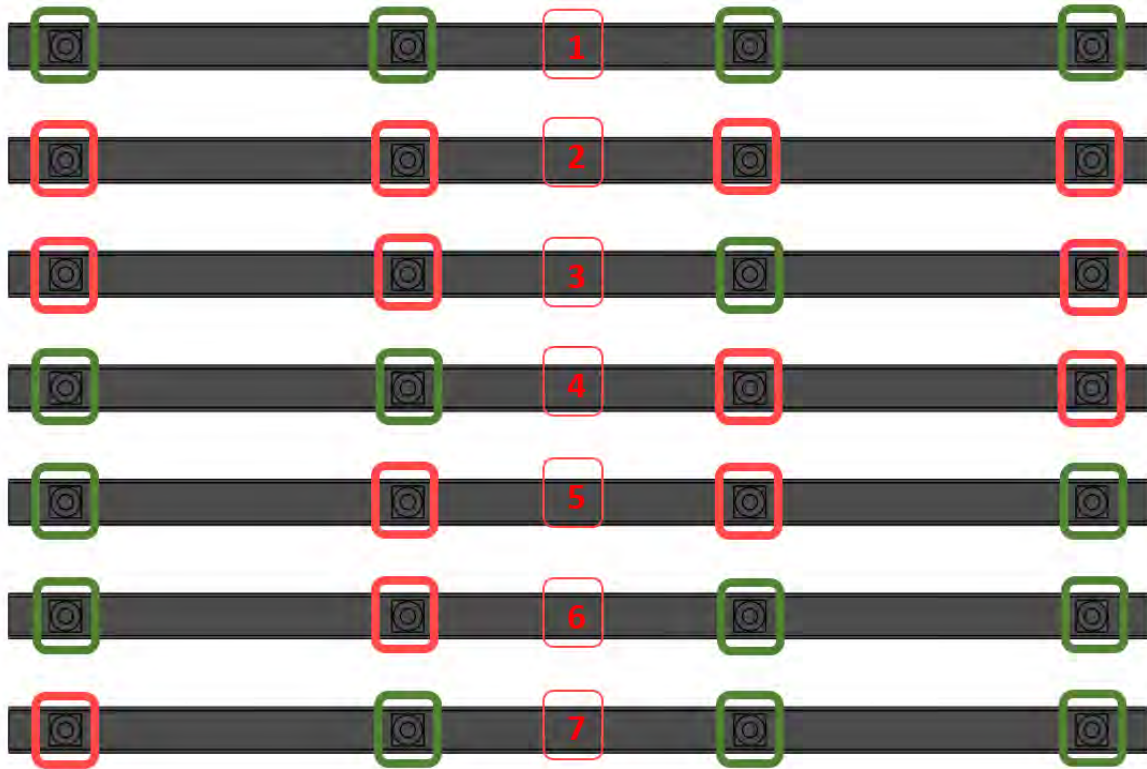


Rys. 9.3 Wzorcowy detal - profil kwadratowy ze zgrzanymi techniką garbową czterema nakrętkami M8 DIN 928.

Tabela 9.1 Parametry procesu zgrzewania detalu wzorcowego.

Parametr zgrzewania	Wartość	Jednostka
Czas narastania prądu, t_{rt}	1	ms
Prąd, I_2	42	kA
Czas przepływu prądu, t	240	ms
Siła docisku elektrod, F	12	kN
Ilość impulsów prądu zgrzewania,	1	-

Do badań z użyciem numerycznej i eksperymentalnej analizy modalnej wytypowano 7 próbek detali z różną konfiguracją zgrzanych nakrętek (rys. 9.4). Próbki powinny wykazać różnicę częstotliwości rezonansowych podczas badań numerycznych jak i eksperymentu z uwagi na fakt występowania w nich barków zgrzania (nakrętki oznaczone na czerwono).



Rys. 9.4 *Próbki detali do badań: 1 – detal wzorcowy; 2 – profil bez zgrzanej nakrętki; 3- profil bez nakrętki 1, 2 oraz 4; 4 – profil bez nakrętki 3 oraz 4; 5 – profil bez nakrętki 2 oraz 3; 6 – profil bez nakrętki numer 2; 7 – profil bez nakrętki numer 1.*

9.3. Aparatura do analizy modalnej

Stosowanie analizy modalnej do badania konstrukcji w diagnostyce maszyn pod kątem uszkodzeń strukturalnych jest szeroko znaną i stosowaną metodą. Główny nacisk badań wstępnych z wykorzystaniem analizy modalnej położony został na konstrukcji odpowiedniego oprzyrządowania oraz jego konfiguracji prowadzącej do uzyskania odpowiedzi w postaci widma pozbawionego zakłóceń (drgań maszyny oraz jej otoczenia), które mogą wpływać negatywnie na dalszą analizę sygnału.

Podstawą do skutecznej weryfikacji jakości detali są odpowiednio dobrane elementy aparatury, takie jak młotek modalny oraz akcelerometr. Te podzespoły definiują pasmo pomiarowe całego systemu. Jeżeli elementy te posiadają zbyt małe zakresy pomiarowe bądź czułość, prowadzi to będzie do braku detekcji częstotliwości rezonansowej, która jest niezbędna do dalszego przetwarzania sygnałów w celu oceny jakości próbki. W przypadku braku właściwej konfiguracji sprzętowej będzie ona skutkować błędami podczas procesu kontroli jakości, które wpływają na ogólną wydajność i efektywność procesu.

Do wykonania wstępnej analizy modalnej detali wykorzystano aparaturę firmy PCB Piezotronics, w której skład wchodzi:

- Młotek modalny (rys. 9.5) – dobór odpowiedniego młotka odbywa się na podstawie cech mechanicznych w postaci rozmiaru obiektu badanego oraz masy wymuszanej. Wytypowano młotek model 086C01 o maksymalnym wymuszeniu rejestrowanym 440 N;
- Sensor przyspieszenia (rys. 9.6) - głównymi cechami określającymi wybór odpowiedniego akcelerometru jest masa własna czujnika oraz zakres częstotliwości mierzonych.

Zbyt duża masa akcelometru może obciążać element badany, wpływać na zmianę jego form drgań i częstotliwości rezonansowych. Dodatkowo wystąpić mogą zakłócenia sygnału, które uniemożliwią dalszą analizę sygnału. Zakres pomiarowy informuje o dziedzinie, w której będzie możliwa analiza częstotliwości rezonansowych. Po konsultacji z producentem aparatury pomiarowej wytypowano akcelometr 621C40;

- Karta pomiarowo-archiwizacyjna National Instruments, której przeznaczeniem jest kondycjonowanie, aktywizacja oraz przetwarzanie sygnałów analogowych na dyskretne. Pomiary zrealizowano poprzez cztero-slotową obudowę Compact DAQ cDAQ-9174 i dwudziestocztero-bitową kartę pomiarową NI-9232 (rys. 9.7) o 3 wejściach analogowych. Karta obsługuje akcelerometry piezoelektryczne w standardzie IEPE, dla których niezbędne jest dodatkowe zasilanie prądem o natężeniu od 2 – 20 mA;
- Komputer PC wraz z oprogramowaniem LabView, wraz oprogramowaniem umożliwiającą przetworzenie sygnałów zarejestrowanych z młotka modalnego jak i akcelometru w celu uzyskania widma amplitudowego.



Czułość	Zakres Częstotliwości	Zakres pomiarowy	Częstotliwość rezonansowa
11,2 mV/N	0 - 9,5 kHz	440 N	> 15 kHz

Rys. 9.5 Młotek modalny PCB Piezotronics 086C01.



Czułość	Zakres częstotliwości	Zakres pomiarowy	Częstotliwość rezonansowa
10 mV/g	0 - 18 kHz	+/- 500 g	85 kHz

Rys. 9.6 Akcelometr PCB Piezotronics 621C40.

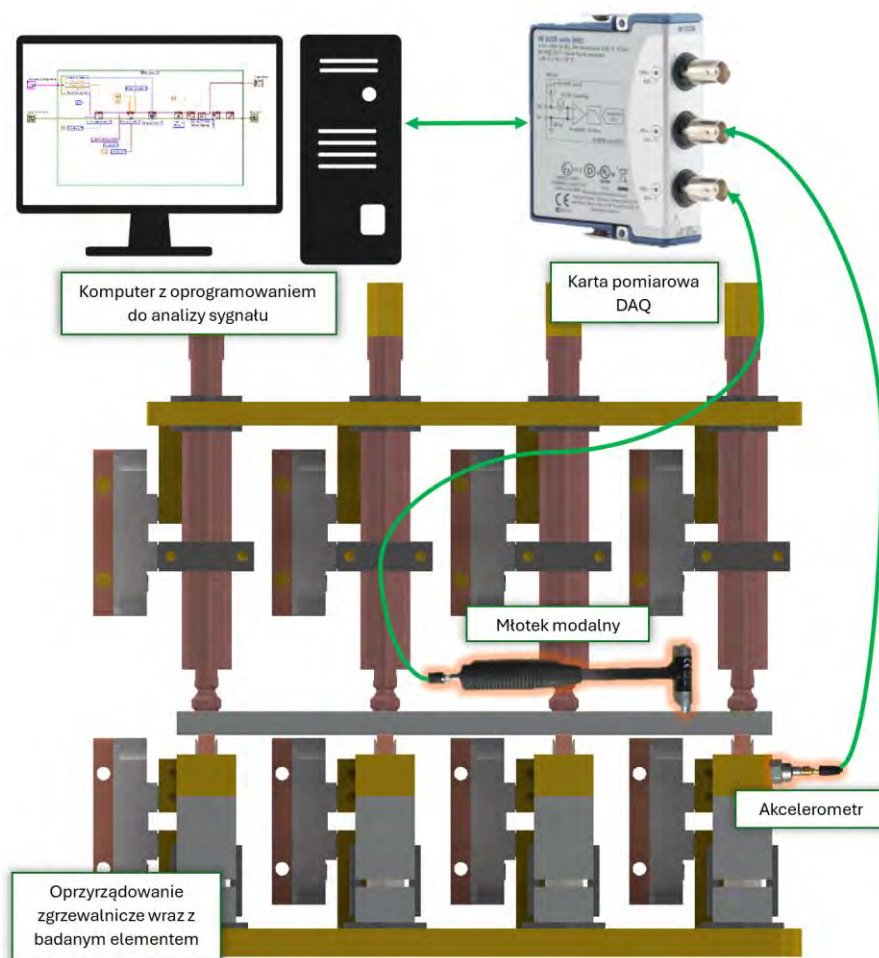


Wejścia	Częstotliwość próbkowania	Prąd zasilania
3	102,4 kS/s	2 - 20 mA

Rys. 9.7 Obudowa cDAQ-9174 oraz karta pomiarowa NI-9232.

9.4. Koncepcja systemu kontroli jakości z zastosowaniem analizy modalnej

Stanowisko zgrzewalnicze wraz z układem pomiarowym umożliwiające przeprowadzenie badań przy użyciu analizy modalnej na zgrzewarce wyposażonej w oprzyrządowanie zgrzewalnicze, przedstawiono na rysunku (rys. 9.8). W oprzyrządowaniu w sposób jednoznaczny pozycjonowany został detal wytypowany do detekcji niezgodności po procesie zgrzewania wielopunktowego garbowego. Koncepcja systemu opiera się na analizie sygnału odpowiedzi przyspieszenia całego układu w dziedzinie częstotliwości. Przyrząd zgrzewalniczy wyposażony został w czujnik przyspieszenia, który umożliwia rejestrowanie sygnału odpowiedzi. Kolejnym czynnikiem niezbędnym do działania systemu jest wymuszenie obiektu ze stanu równowagi za pomocą impulsu siły. Impuls jest generowany poprzez uderzenie młotka modalnego w przyrząd zgrzewalniczy, co umożliwia zarejestrowanie przez system pomiarowy wartości siły wymuszającej w postaci sygnału napięciowego. Przyrząd wraz ze zgrzewarką wykorzystywany jest jako ośrodek, w którym rozchodzą się drgania mechaniczne, których analiza pozwala wygenerować widmo amplitudowe drgań. Podstawą działania systemu pomiarowego są dwa sygnały archiwizowane w karcie pomiarowej. Rola karty polega na kondycjonowaniu oraz akwizycji sygnałów. Karta pomiarowa jest połączona z komputerem stacjonarnym za pomocą interfejsu USB. Komputer wyposażony jest w oprogramowanie umożliwiające odczyt sygnałów z karty pomiarowej, a następnie wykonanie transformaty Fouriera i ich analizy. Porównanie wartości częstotliwości drgań własnych zakończonego procesu zgrzewania z sygnałem wzorca umożliwi ocenę jakości wykonanych połączeń zgrzewanych.



Rys. 9.8 Parametry zgrzewania detalu wzorcowego.

9.5. Algorytm do przetwarzania sygnału – LabVIEW

Program do przetwarzania sygnałów został napisany w maszynie stanów – jest to podstawowa architektura programowania w środowisku LabVIEW. Uniwersalna struktura maszyny stanów stanowi szkielet wielu programów. Maszyna stanów składa się z zestawu „stanów”, które reprezentują poszczególne etapy działania programu. Każdy stan wykonuje określoną operację, a następnie decyduje, który stan powinien zostać wykonany następnie. Decyzje te są zazwyczaj podejmowane na podstawie danych wejściowych lub wyników operacji wykonanych w poprzednich stanach. W kontekście LabVIEW, maszyna stanów jest często implementowana za pomocą struktury pętli „while”, struktury „case” i zmiennych przechowujących aktualny stan. Struktura case jest używana do wyboru operacji do wykonania na podstawie aktualnego stanu, a zmienna stanu jest aktualizowana na końcu każdego cyklu pętli. W przypadku algorytmu do analizy modalnej w programie można wyszczególnić stany:

1. Inicjalizacja oprogramowania.
2. Konfiguracja analizy.
3. Oczekiwanie na zdarzenie.
4. Pomiar danych.
5. Odczyt danych.
6. Analiza FFT danych.
7. Zapis sygnału wzorca.
8. Kontrola jakości.
9. Czyszczenie danych.

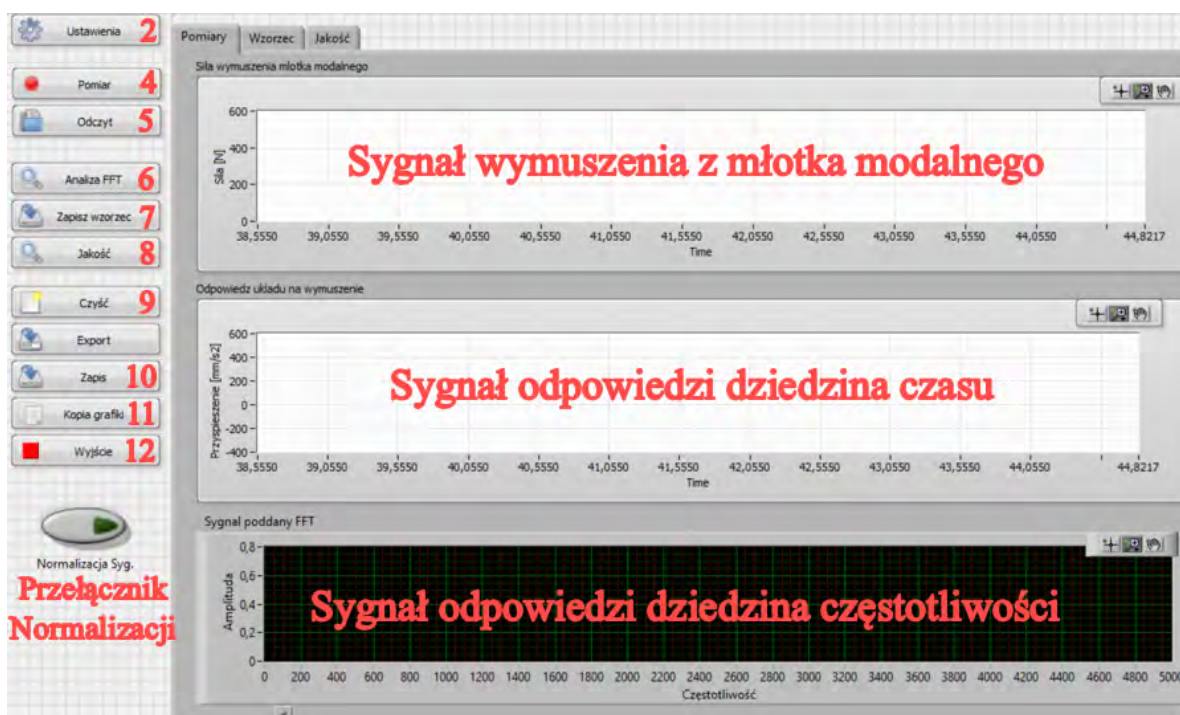
10. Zapisanie danych.
11. Skopiowanie wykresu.
12. Odświeżenie interfejsu użytkownika.
13. Wyjście z programu.

Panel użytkownika (rys. 9.9) prezentuje wszystkie możliwe czynności, które może wykonać użytkownik w oprogramowaniu. Wyżej wymienione stany wraz z odpowiadającymi im przełącznikami zaznaczone są na zrzucie ekranu z panelu, natomiast stany, które nie znajdują się na zrzucie są stanami ukrytymi dla użytkownika pełniącymi szczególną rolę w funkcjonowaniu programu.

Na panelu użytkownika znajdują się trzy wykresy:

- Pierwszy wykres przedstawia odczyt sygnału analogowego z młotka modalnego w postaci siły wymuszenia, ukazując zmienność tej siły w dziedzinie czasu.
- Drugi wykres ilustruje odpowiedź układu w postaci przyspieszenia również prezentowaną w dziedzinie czasu.
- Trzeci wykres pokazuje sygnał odpowiedzi z akcelerometru po zastosowaniu transformacji Fouriera (FFT), przedstawiając dane w dziedzinie częstotliwości.

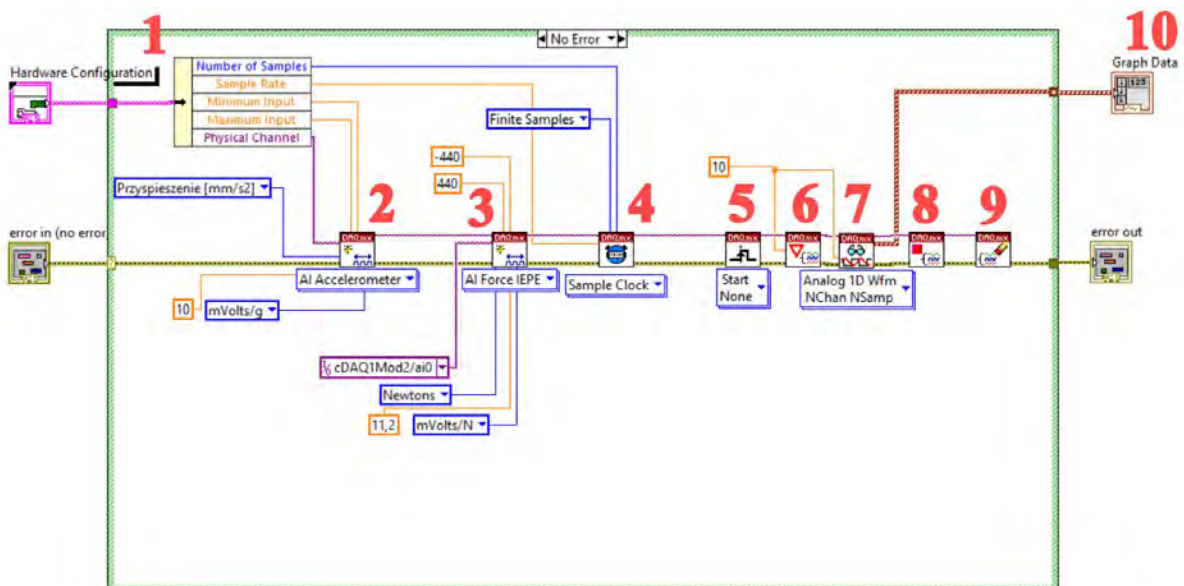
W niniejszym rozdziale pracy przedstawione zostaną dwa kluczowe stany: „Pomiar danych” oraz „Analiza danych”, które stanowią podstawę algorytmu do analizy modalnej badanego obiektu. Pozostałe stany wraz z zawartymi w nich algorytmami zostaną szczegółowo omówione w kolejnych częściach pracy. W dalszych rozdziałach zostaną także rozwinięte zagadnienia dotyczące wzorca odpowiedzi detalu wzorcowego oraz kontroli jakości, z uwagi na otrzymane widma amplitudowe.



Rys. 9.9 Interfejs użytkownika w oprogramowaniu LabVIEW.

Stan „Pomiaru danych” posiada VI blok (rys. 9.10), w którym zawierają się wszystkie procesy logiczne związane z archiwizacją sygnału z młotka modalnego oraz akcelerometru. Opis drogi sygnałów na schemacie przedstawiono w punktach:

1. Blok swoje działanie rozpoczyna od danych wejściowych w postaci konfiguracji sprzętowej (Hardware Configuration), posiada kanał sygnału wejściowego akcelerometru, z którego blok odczytuje wartość napięcia oraz rozdzielczość jego pomiarów, dodatkowo w bloku tym obsługiwany jest zegar, dla którego można ustawić ilość prób, które ma odczytać oraz odstęp czasowym pomiędzy nimi.
2. DAQmx Virtual Channel otrzymuje dane wejściowe z akcelerometru. Blok ten zawiera niezbędne dane konfiguracyjne, w tym czułość akcelerometru, która jest określona przez producenta. W omawianym przypadku czułość wynosi 10 mV/g .
3. DAQmx Virtual Channel archiwizujący sygnał z młotka modalnego, blok ten odczytuje wartość napięcia z kanału drugiego i analogicznie jak w przypadku akcelerometru wymaga konfiguracji czułości dla wartości siły wymuszenia, dla użytego młotka modalnego wartość przelicznika wartości napięcia na wartość siły wynosi $11,2 \text{ mV/N}$. Blok ten dodatkowo charakteryzuje się sztywną maksymalną wartością pomiarową, która wynosi 440 N .
4. DAQmx Timing to zegar próbkowania, który przypisuje wartościom z akcelerometru oraz młotka modalnego dziedzinę czasu.
5. DAQmx Start Trigger pozwala na rozpoczęcie zadania na skutek wymuszenia impulsowego. Rejestrowanie sygnału odpowiedzi przeprowadzone jest w 10 sekundowym oknie czasowym.
6. DAQmx Wait Until - konfiguracja czasu wyrażona w sekundach określa interwał, w którym impuls oraz odpowiedź z akcelerometru są rejestrowane.
7. DAQmx Read pozwala na zapisanie sygnałów w postaci macierzowej, w tym przypadku rozdziela sygnał na dwa wiersze jednowymiarowe.
8. DAQmx Stop Task moduł zatrzymuje zadania aktywizacji danych.
9. DAQmx Clear Task służy do usuwania danych tymczasowych po aktywizacji.
10. Graph Data dane w postaci wykresów w dwóch wierszach macierzy (1 – sygnał odpowiedzi, 2 – sygnał wymuszenia) przekazane zostają do dalszej analizy.

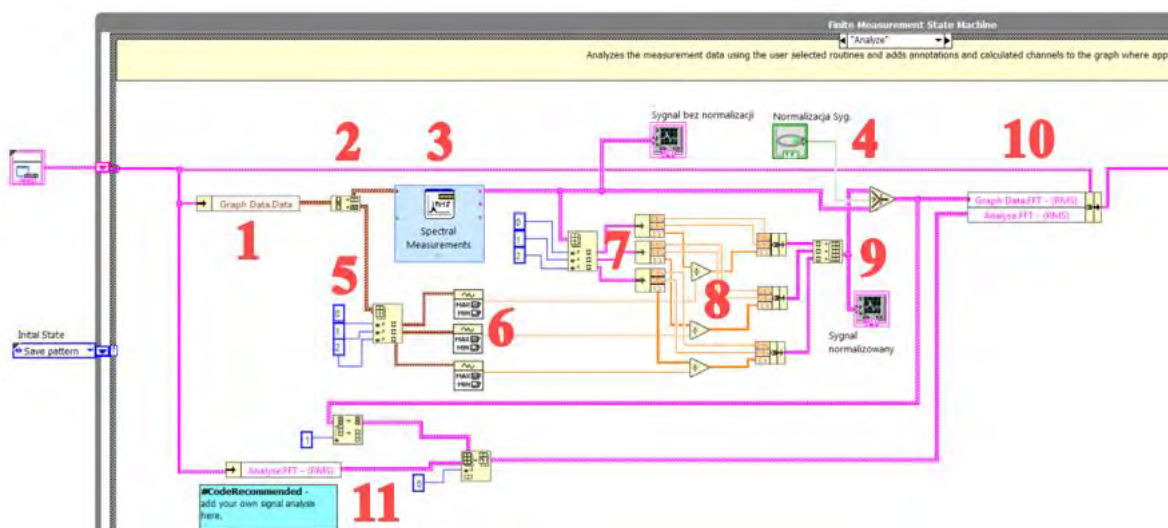


Rys. 9.10 Schemat blokowy programu do aktywizacji danych do analizy modalnej.

Schemat blokowy algorytmu do zamiany sygnału z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości przedstawiono na widoku ekranu monitora (rys. 9.11), drogę sygnału przedstawiono w punktach:

1. Odczytanie danych wykresu ze ścieżki głównej danych poprzez blok „Unbundle”.

2. Podzielenie sygnału na dwa osobne wiersze (wiersz 1 sygnał odpowiedzi, wiersz 2 sygnał wymuszenia).
3. Wykonanie FFT na sygnale z wiersza 1 - odpowiedzi układu i przekazanie sygnału do bloku rysującego wykres odpowiedzi amplitudowej układu. Jednocześnie sygnał przekazywany jest do kroku 7 w celu normalizacji sygnału.
4. Blok decyzyjny umożliwia wskazanie, który sygnał zostanie poddany dalszej analizie. Umożliwia także normalizację sygnału o wartość siły impulsu odczytanej z młotka modalnego, jeżeli zostanie przesterowany w pozycje „True” poprzez przełącznik normalizacji na interfejsie użytkownika, wówczas program przyjmuje sekwencje kroków 5 – 6 – 7 – 8 – 9, jeżeli jest stan „False”, to program wykona krok 10-11.
5. Wykonanie indeksowania szeregów sygnału (jeżeli operujemy na więcej niż jednym sygnale), jest to podział sygnałów wymuszenia archiwizowanych z młotka modalnego.
6. Blok funkcyjny poszukujący wartości maksymalnej siły na każdym indeksie sygnału.
7. Wykonanie indeksowania szeregów sygnału (jeżeli operuje się na więcej niż jednym sygnale), jest to podział sygnałów odpowiedzi w dziedzinie częstotliwości, następnie sygnał ten musi zostać rozgrupowany przez blok „Unbundle”.
8. Rozgrupowany sygnał odpowiedzi w dziedzinie częstotliwości z kroku 7 zostaje podzielony przez wartość maksymalną wymuszenia dla danego indeksu, po operacji normalizacji sygnały zostają zgrupowane blokiem „Bundle”.
9. Sygnałom zostają przypisane indeksy i następuje zebranie ich w szereg, który zostaje wyświetlony na wykresie sygnału normalizowanego i przekazany do modułu decyzyjnego z punktu 4.
10. Wartości odpowiedzi bez normalizacji bądź z nią zostają przekazane do zmiennej Graph Data.FFT.
11. Rozgałęzienie sygnału wykorzystywane do narysowania dwóch różnych wykresów ułatwiających porównanie analiz modalnych dla poszczególnych próbek.



Rys. 9.11 Schemat blokowy programu do przeprowadzenia analizy modalnej.

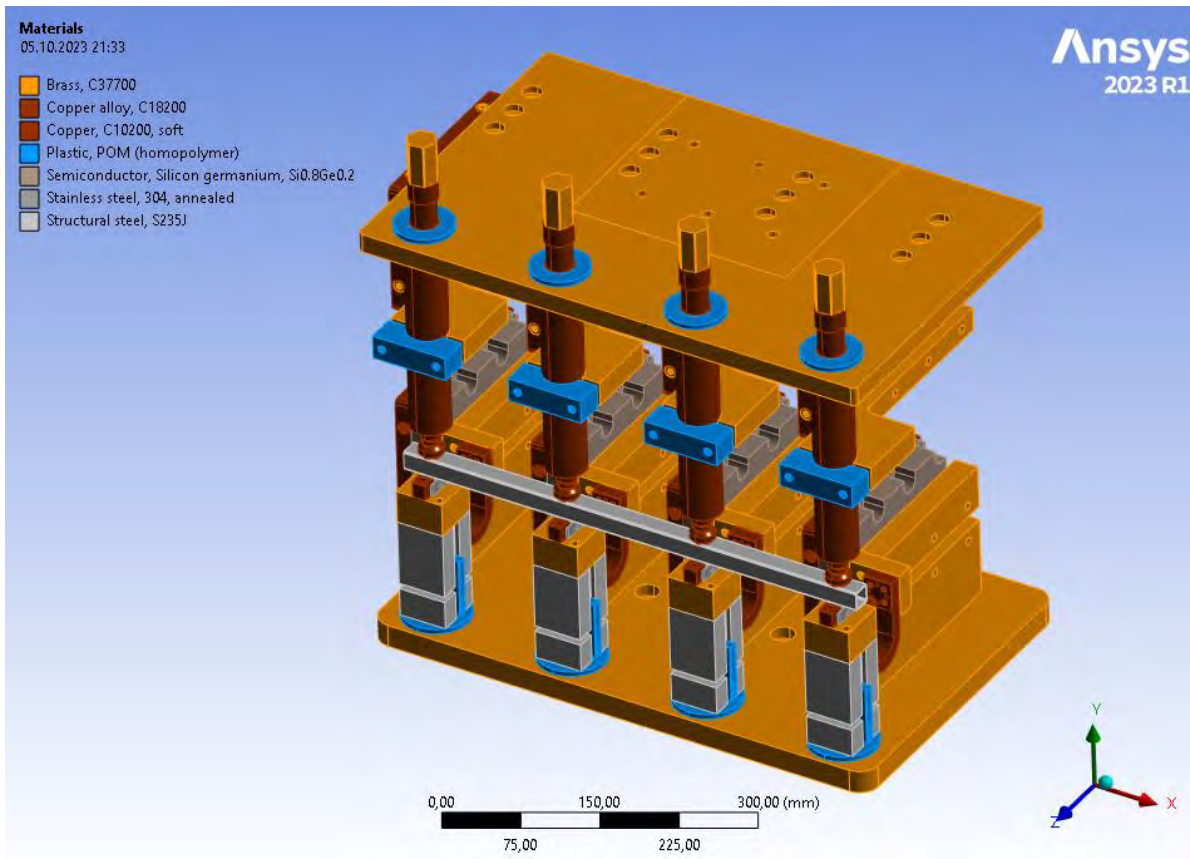
10. Badania numeryczne MES

Pierwszym etapem badań było przeprowadzenie analizy numerycznej mającej na celu sprawdzenie przedziałów, w których pojawią się częstotliwości rezonansowe badanego obiektu. Badania numeryczne MES przeprowadzone zostały przy użyciu oprogramowania ANSYS Mechanical 2023. Celem przeprowadzonego badania było zgłębienie zjawisk mechanicznych zachodzących w analizowanej konstrukcji. W skład obiektu badanego wchodzi oprzyrządowanie zgrzewalnicze wraz z detalem zamocowanym pomiędzy elektrodami przyrządu. Zespół ten poddany jest analizie numerycznej, która ma wskazać wyraźne różnice w zmianie częstotliwości drgań własnych dla różnych próbek. Uzyskane wyniki zostały poddane weryfikacji eksperymentalnej.

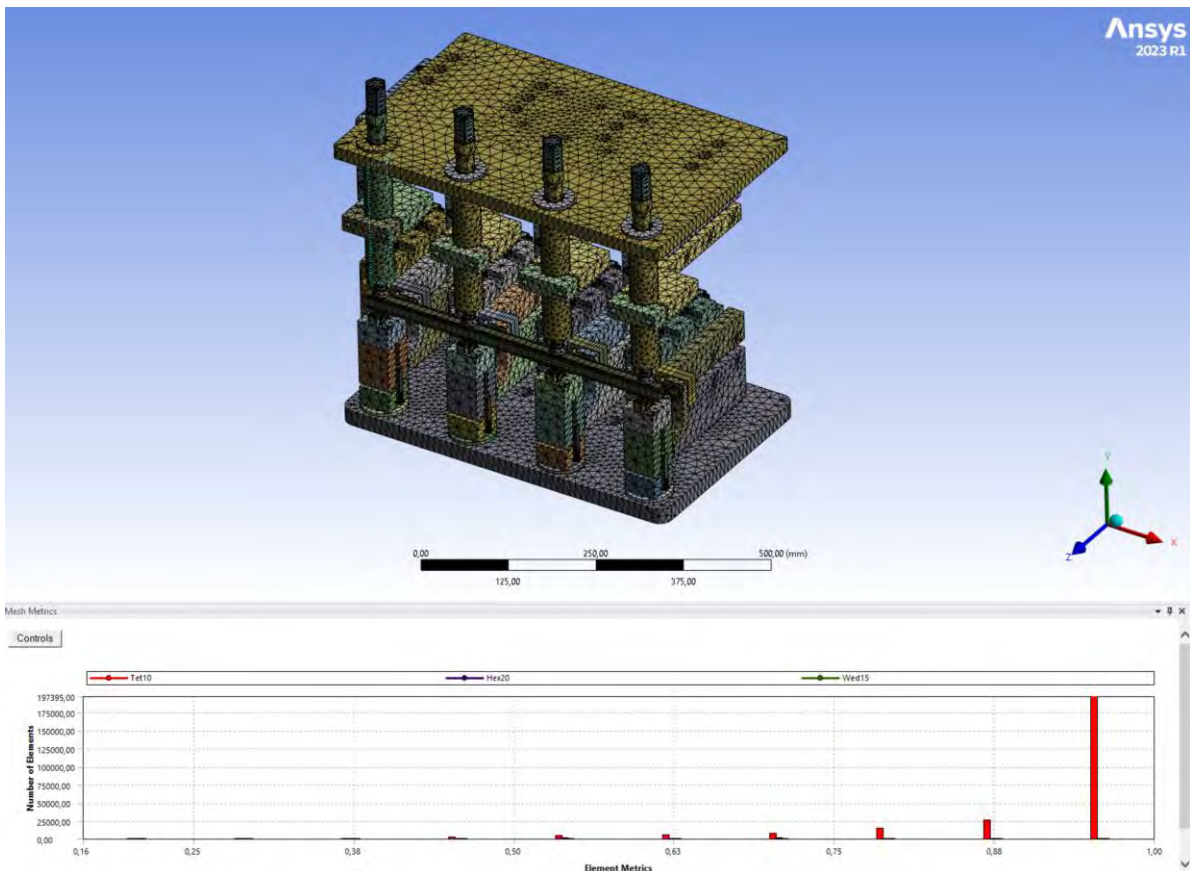
10.1. Przygotowanie modelu dla analizy modalnej

Założenia przyjęte dla badanego modelu:

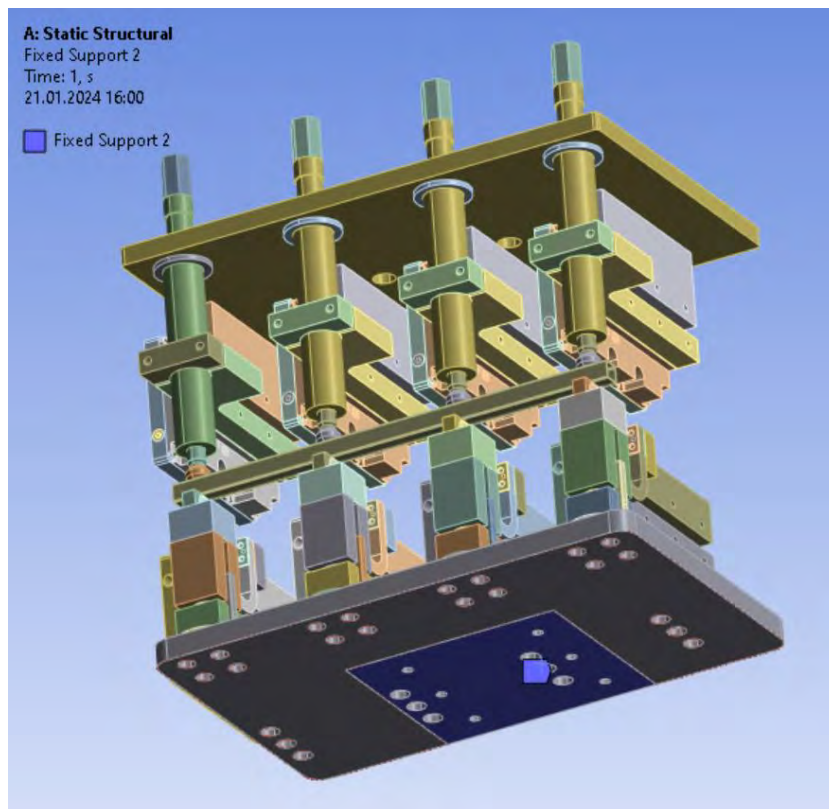
- nadano własności materiałowe zgodne z rzeczywistym oprzyrządowaniem (rys. 10.1);
- przyjęto siatkę modelu (rys. 10.2) składającą się z 258501 elementów (jakobian jakości wynosi $min = 0,16$; $max = 1$; $średnia = 0,94$);
- pominięto model zgrzewarki, wynika to z uproszczenia konstrukcji wykorzystanej do symulacji, zakłada się wysięg dolny wraz z górnym, tworząc mikroukład utwierdzonego sztywnie przyrządu (rys. 10.3);
- nałożono warunek brzegowy w postaci siły ciężenia (rys. 10.4);
- przyjęto wymuszenie odpowiadające sile docisku zgrzewarki 12 kN (rys. 10.5), naprężenie powstające w wyniku działania siły docisku na obiekt przedstawiono na ilustracji (rys. 10.6);
- sprężyny w kolumnach elektrod rozpatrywane są jako ciało sztywne (rzeczywista charakterystyka dynamiczna sprężyn została pominięta z uwagi na ich całkowite ściśnięcie w wyniku działania układu dociskowego maszyny);
- pominięto modele części złącznych; spowodowane jest to długimi czasami obliczeniowymi zagadnienia (badanie ma na celu zweryfikowanie zmiany częstotliwości rezonansowych w przypadku braku połączenia mechanicznego pomiędzy profilem a nakrętką, zastosowanie tego uproszczenia we wszystkich rozważanych przypadkach nie wpłynie na wynik porównania poszczególnych próbek badanych);
- próbka wytypowana do badań to profil kwadratowy $20 \times 20 \times 1,5$ o długości 500 mm ze zgrzanymi czterema nakrętkami DIN 928, które są wykonane ze stali S235JR (detale te są zgodne z detalami, które poddano eksperymentalnej analizie modalnej w następnych rozdziałach pracy (rys. 9.3);
- niewłaściwie wykonana zgrzeina pomiędzy profilem, a nakrętką symulowana jest poprzez zmianę typu kontaktu pomiędzy nakrętką a profilem na „No Separation”, natomiast prawidłowe wykonane zgrzeiny posiadają kontakt typu „Bonded”;
- kontakt pomiędzy elektrodą górną i profilem oraz pomiędzy elektrodą dolną i nakrętką zdefiniowano jako „Bonded” (z powodów nieliniowości analizy przy profilu bez zgrzanej nakrętki analiza numeryczna nie mogła zostać przeprowadzona);
- analiza modalna przeprowadzona jest dla pasma częstotliwości $0\text{--}5000\text{ Hz}$;



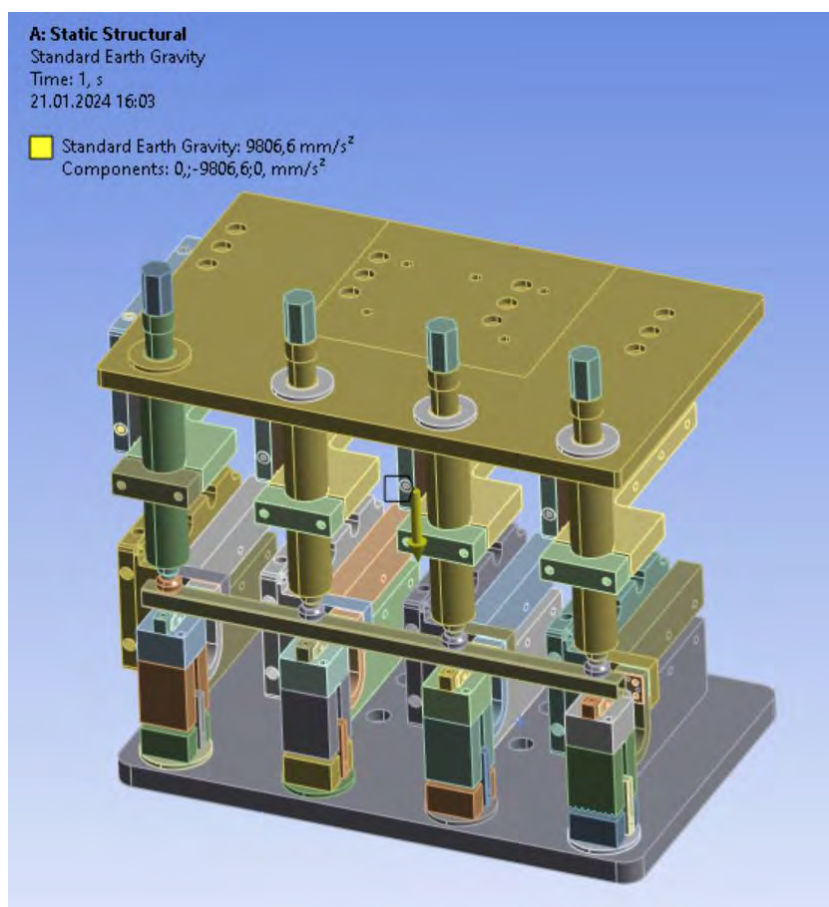
Rys. 10.1 Własności materiałowe modelu do numerycznej analizy modalnej.



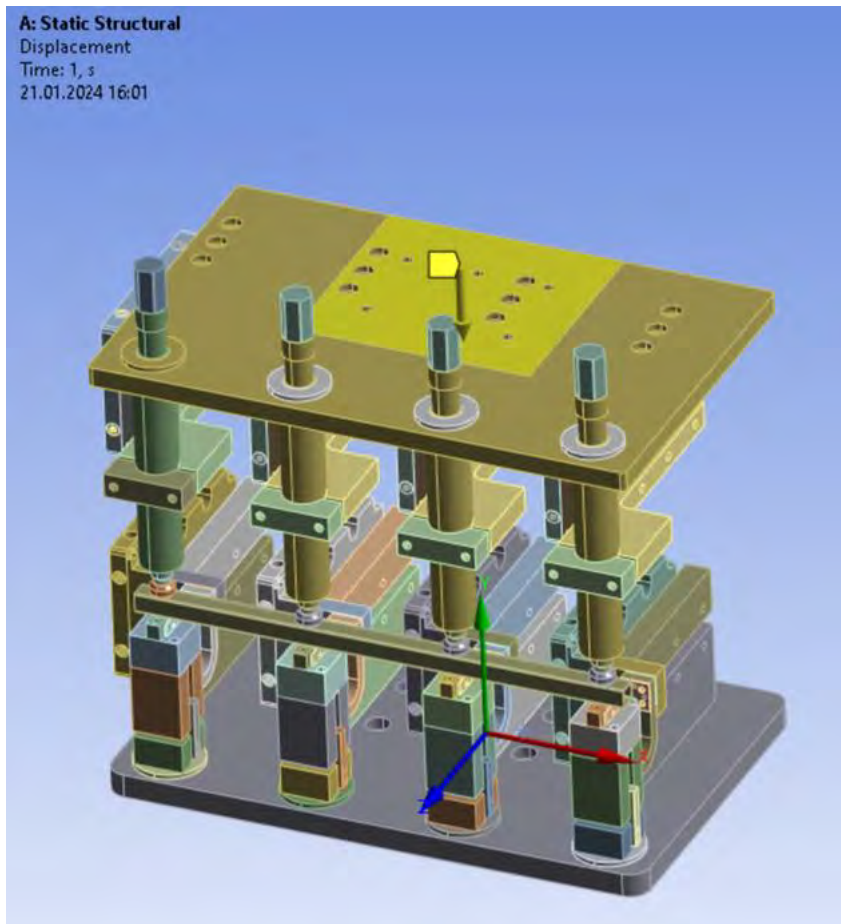
Rys. 10.2 Siatka modelu wraz z jacobianem jakości.



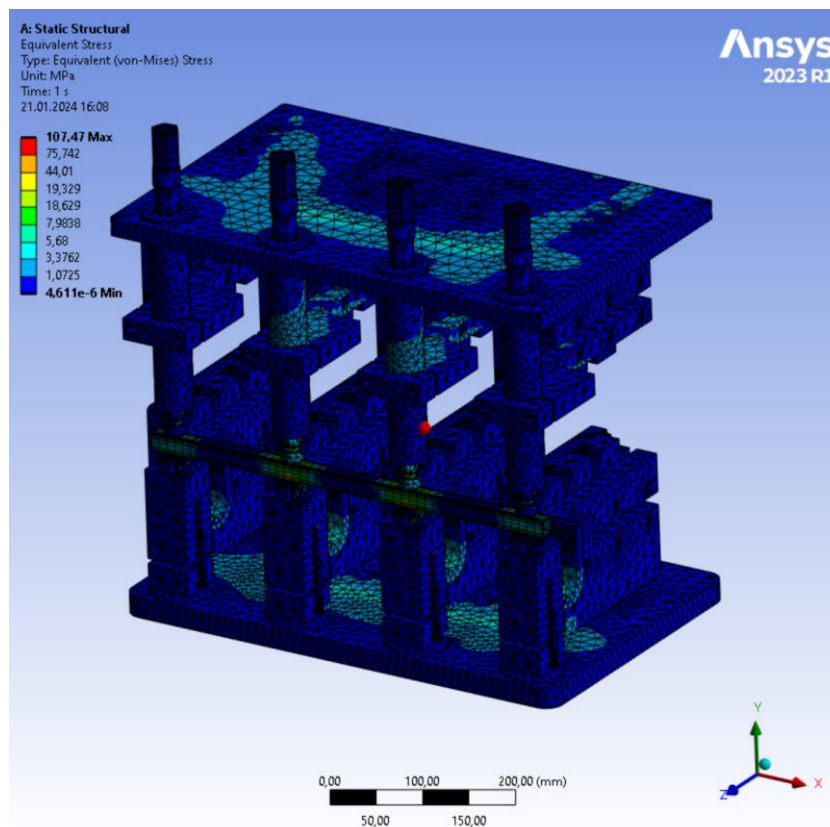
Rys. 10.3 Warunek brzegowy utwierdzenia stałego.



Rys. 10.4 Warunek brzegowy działania siły grawitacji na obiekt.



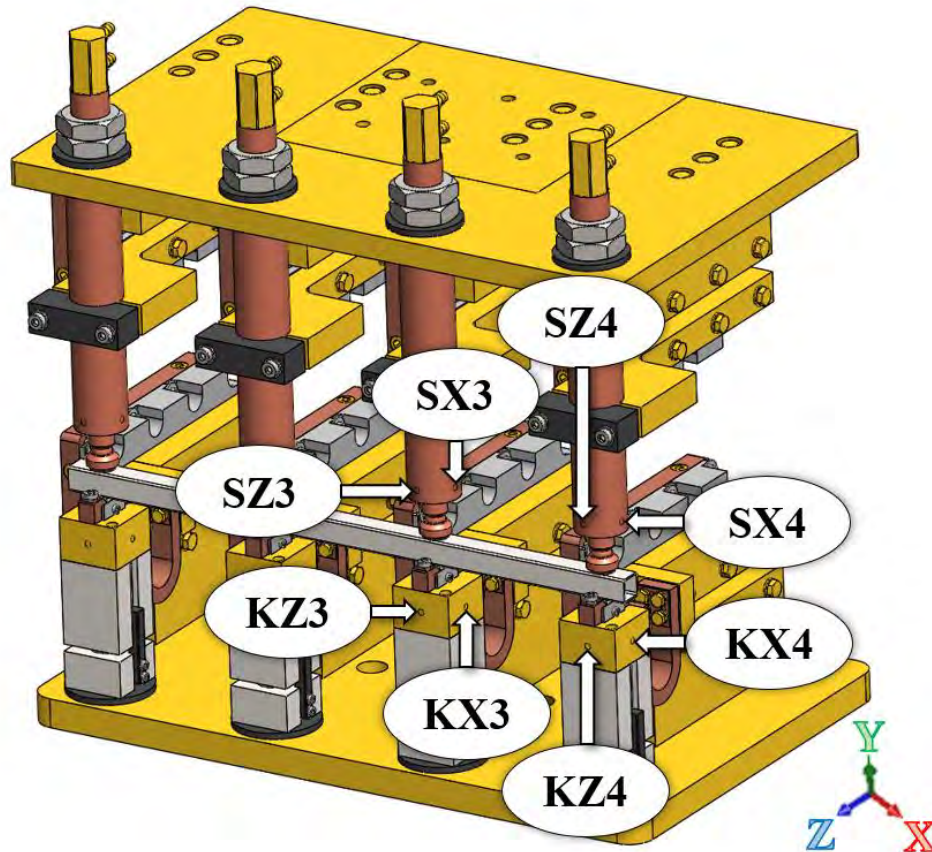
Rys. 10.5 Warunek brzegowy działania siły docisku 12kN na badany obiekt.



Rys. 10.6 Naprężenia statyczne modelu.

10.2. Wyniki analizy modalnej MES

Wykonana numeryczna analiza modalna wyznaczyła 221 postaci drgań dla dziedziny poszukiwań $f \in 0 - 5000 \text{ Hz}$. Dla wszystkich postaci została zarejestrowana deformacja całkowita oraz deformacje w osiach Z i X dla punktów przedstawionych na ilustracji (rys. 10.7). Punkty te wytypowano jako miejsca mocowania akcelerometru bądź wymuszenia, w prototypie oprzyrządowania do modalnej kontroli jakości.



Rys. 10.7 Model z zaznaczonymi punktami wykorzystywanymi do pomiarów; pierwsza litera rozróżnia obsadę względem kolumny: S – punktu znajdujące się na obsadzie, K – w punktu znajdujące się na kolumnie; druga litera oznacza kierunek współrzędnych, na której dokonywany jest pomiar; ostatnia cyfra symbolizuje numer kolumny/obsady, odliczając od lewej strony.

Zestawienie wykresów wraz z wynikami dla deformacji całkowitej znajdują się w tabeli (tab. 10.1). Pierwszy wykres (rys. 10.8) przedstawia zestawienie wszystkich próbek badanych. Prezentuje wszystkie widma częstotliwości rezonansowych w badanym punkcie i kierunku dziedziny $f \in 0 - 5000 \text{ Hz}$ oraz maksymalną deformację jaka zachodzi przypadkowo we wszystkich osiach badanego obiektu. Na wykresie (rys. 10.8) wyszczególnić można trzy przedziały częstotliwości, dla których amplitudy przewyższają pozostałe wartości osi argumentów. Są to przedziały: f_{D1} (4300 – 4600 Hz), f_{D2} (3500 – 3800 Hz), f_{D3} (2800 – 3300 Hz).

Pierwszym etapem było wyznaczanie częstotliwości, przy których amplituda przyjmuje najwyższe wartości w trzech przedziałach (f_{D1} , f_{D2} oraz f_{D3}) dla poszczególnych próbek. Wyniki zebrano na wykresach w dla poszczególnych detali. Częstotliwości rezonansowe zostały

zebrane i przedstawione na wykresach porównujących poszczególne próbki z próbką wzorcową (rys. 10.9 - 10.14) oraz wykresie zbiorczym częstotliwości rezonansowych (rys. 10.15).

Drugim etapem był wybór formy drgań, która pozwala na najprecyzyjniejsze rozróżnienie rozważanych przypadków niezgodności i wzorca. Wyniki dla poszczególnych form drgań zebrano w tabeli 10.2. Przedstawiają postacie drgań dla: $f_{D11} = 4496 \text{ Hz}$, $f_{D21} = 3775 \text{ Hz}$ oraz $f_{D31} = 2984 \text{ Hz}$. Postać drgań została przedstawiona jako deformacja całkowita oraz w osiach X oraz Z.

Trzeci etap to pomiar punktów wytypowanych na modelu (rys. 10.7) oraz odpowiadającego im przemieszczenia w osiach Z oraz X. W celu zapewnienia przejrzystości wyników sporządzono tabele przedstawiającą znaczące wyniki w postaci wykresów przemieszczenia dla punktu KZ4 (tab. 10.3) oraz KX4 (tab. 10.5). W analogiczny sposób dla obydwu punktów na podstawie wykresów deformacji wszystkich detali (rys. 10.25, 10.42) wyznaczone zostały trzy przedziały z wartościami przewyższającymi pozostałe wyniki {KZ4 f_{Z1} (400 – 600 Hz), f_{Z2} (1500 – 1800 Hz), f_{Z3} (2600 – 3000 Hz); KX4 f_{X1} (300 – 600 Hz), f_{X2} (1100 – 1400 Hz), f_{X3} (2400 – 2800 Hz)}. Dla wyznaczonych przedziałów zostały wyznaczone częstotliwości rezonansowe, przy których poszczególne próbki uzyskują największą amplitudę. Częstotliwości wyznaczone dla detalu wzorcowego dla punktu KZ4 ($f_{Z11} = 513 \text{ Hz}$, $f_{Z21} = 1599 \text{ Hz}$, $f_{Z31} = 2710 \text{ Hz}$) oraz punktu KX4 ($f_{X11} = 513 \text{ Hz}$, $f_{X21} = 1240 \text{ Hz}$, $f_{X31} = 2471 \text{ Hz}$) służą do weryfikacji postaci drgań układu, jaką powoduje wymuszenie z wyznaczoną częstotliwością. Wyniki postaci rezonansu zebrano w tabelach dla punktu KZ4 (tab. 10.4) oraz KX (tab. 10.6) prezentują one deformację całkowitą, w osi Z oraz osi X.

Badanie dotyczy weryfikacji powstania złącza w postaci zgrzeiny bądź jej braku pomiędzy profilem a nakrętką. Postacie drgań istotne dla badania złącza muszą cechować się częstotliwościami rezonansowymi, które wywołają największą amplitudę na badanym detalu.

W poniższych rezultatach dla pierwszej postaci drgań z tabeli (tab. 10.2) dla częstotliwości $f_{D11} = 4496 \text{ Hz}$ (rys. 10.16), zaobserwowano deformacje wpływającą w największym stopniu na pierwszą obsadę oraz nakrętkę. Szczególnie widoczne jest to dla kierunku zgodnego z osią Z (rys. 10.18). Wywołuje ona największe deformacje w odniesieniu do całego modelu. Dla kierunku zgodnego z osią X (rys. 10.17) nie zaobserwowano znaczących przemieszczeń. Zauważono brak symetrycznego przemieszczenia (postać umożliwia prawidłowe zbadanie połączenia tylko dla nakrętki nr 1). Zmiana wartości częstotliwości drgań własnych widoczna jest w zestawieniu z detalami posiadającymi niezgodność, lecz niesie ze sobą duże trudności pomiarowe z uwagi na fakt występowania deformacji tylko w obrębie kolumny 1. Tabela deformacji dla punktu KZ4 (tab. 10.3) nie obrazuje znacznych przemieszczeń punktu w osi Z dla częstotliwości w przedziale f_{D1} (4300 – 4600 Hz). Spowodowane jest to brakiem znaczącego wpływu tej postaci drgań na kolumnę 4, na której umiejscowiony jest punkt KZ4.

Druga postać drgań poddana analizie charakteryzuje się częstotliwością $f_{D21} = 3778 \text{ Hz}$, przemieszczenie całkowite pokazano na rysunku (rys. 10.19). Maksymalna deformacja pojawia dla mocowania drugiej obsady. Miejsce to jest mało istotne z powodu niewielkich przemieszczeń detalu poddawanego ocenie jakości. Natomiast jeżeli występuje brak stałego połączenia pomiędzy nakrętką, a profilem w próbkach, wówczas powstaje druga częstotliwość rezonansowa dla $f_D \in 3600 - 3700 \text{ Hz}$, która we wszystkich próbkach badanych znajduje się poza zakresem wartości wzorcowej.

Trzecia postać drgań (rys. 10.22) dla $f_{D31} = 2984 \text{ Hz}$ pokazuje deformację pojawiającą się w obrębie profilu. Postać dostarcza informacji o jakości powstałego połączenia, ze względu na przemieszczenie występują na badanej próbce. Na modelu deformacji w osi Z (rys. 10.24),

zauważyć należy wyraźną tendencję do pojawienia się węzłów w miejscu usytuowania nakrętek oraz kształtu deformacji w postaci łuku z maksymalną amplitudą umiejscowioną symetrycznie pomiędzy nakrętkami. W przypadku niewłaściwego połączenia zmienia się sztywność węzła, na podstawie której prowadzi do zmiany częstotliwości rezonansowej. Analiza numeryczna dla tego przypadku wykazuje bardzo wyraźne zmiany wartości częstotliwości rezonansowej f_{D3} w przypadku wszystkich próbek poddanych badaniom. Zauważono dla kierunku zgodnego z osią X (rys. 10.23), że postać drgań zachowuje się w sposób odmienny, w miejscu podpór środkowych występują dwa maksymalne przemieszczenia, natomiast symetrycznie pomiędzy nakrętkami powstają węzły. Analizując wykresy (rys. 10.25, 10.42) z tabel (tab. 10.4, 10.6) dla deformacji punktów KZ4 oraz KX4, również występują wyraźne zmiany wartości amplitudy wraz z jej wystąpieniem dla przedziałów $f_X \in 2400 - 2800 \text{ Hz}$ oraz $f_Z \in 2600 - 3000 \text{ Hz}$.

Na podstawie wyników deformacji całkowitej określono przedział f_{D3} (2800 – 3300 Hz) do poszukiwania częstotliwości własnej układu. Detal w tym przedziale osiąga największe amplitudy odkształcenia. Przedział ten należy rozszerzyć o wartości zmierzone dla punktów KZ4 oraz KX4, co prowadzi do przedziału f_{D3} (2400 – 3300 Hz). Przedział ten prezentuje wyraźne zmiany częstotliwości maksymalnej amplitudy dla wszystkich badanych detali, umożliwiając zastosowanie algorytmu do oceny jakości na podstawie sprawdzenia wystąpienia wartości szczytowej.

Czwarta postać drgań dla $f_{Z11} = f_{X11} = 513 \text{ Hz}$ (rys. 10.33, 10.49) pokrywa się dla punktu KZ4 oraz KX4. Deformacja ta zachodzi głównie dla osi Z (rys. 10.35, 10.52), na której można zobaczyć odkształcenie detalu i kolumn w postaci łuku. Przemieszczenia w osi Z dostarczyły informacji, że jest to istotna postać drgań w badaniach eksperymentalnych. Dla osi X (rys. 10.34, 10.51) odkształcenie zachodzi głównie na mocowaniach tranzystorów, przez co oś nie jest rozpatrywana jako przyszły punkt pomiarowy w badaniach eksperymentalnych. Częstotliwości rezonansowe dla poszczególnych próbek zmieniają swoją wartość w dziedzinie w zależności od symulowanej niezgodności, pozwalając rozróżnić próbki. Postać czwarta generuje wyniki pozwalające prawidłowo ocenić jakość komponentu, szczególnie w osi Z. Problemem czwartej postaci jest brak dużych przemieszczeń, które są wyraźnie widoczne na wykresie dla deformacji całkowitej (rys.10.8).

Dla piątej postaci drgań $f_{Z21} = 1599 \text{ Hz}$ (rys. 10.36) na modelu deformacji całkowitej otrzymano przemieszczenia pierwszej osady oraz czwartej kolumny. Deformacje te występują głównie w osi X (rys. 10.37), natomiast deformacja w osi Z (rys. 10.38) skupiona jest wokół kolumny czwartej. Obserwowana postać drgań nie wpływa w znaczący sposób na kolumny środkowe oraz badaną próbkę. Zauważyć to można w tabeli (tab. 10.3), w której wszystkie częstotliwości własne (f_{Z2}) dla braku zgrzanej nakrętki są zbliżone w wartości (rys. 10.32).

Dla szóstej postaci drgań $f_{Z31} = 2710 \text{ Hz}$ (rys. 10.39), deformacje całkowite obrazują wyraźne przemieszczenie w środkowej części profilu badanego. Nie zachodzi ono dla osi X (rys. 10.40), natomiast jest wyraźnie widoczne i osiąga duże wartości dla osi Z (rys. 10.41). Odkształcenie powodowane przez tę postać drgań jest ważne w aspekcie badań eksperymentalnych, z uwagi na fakt przemieszczenia maksymalnego, które pojawia się na kontrolowanym detalu. Taki przebieg odkształcenia umożliwia weryfikację wszystkich punktów zgrzewanych. Wykres zestawieniowy (rys.10.32) prezentuje częstotliwości maksymalne f_{Z3} dla tego przedziału we wszystkich próbkach. Pomimo zbliżonych wyników w przypadku detali 3, 5 oraz 7. Poszukiwana częstotliwość rezonansowa ma na celu ustalenie jakości połączenia, analizowana zostanie w przedziale częstotliwości (f_{Z3} 2600 – 3000 Hz). Możliwe jest to poprzez występowanie dodatkowych wartości maksymalnych i minimalnych w tym przedziale dziedziny. Pozwala to na rozróżnienie próbek z niezgodnościami od

próbki wzorcowej. Zestawienie przebiegów poszczególnych próbek w odniesieniu do przebiegu wzorcowego dla punktu KZ4 zostało przedstawione na wykresach (rys. 10.26 - 10.31).

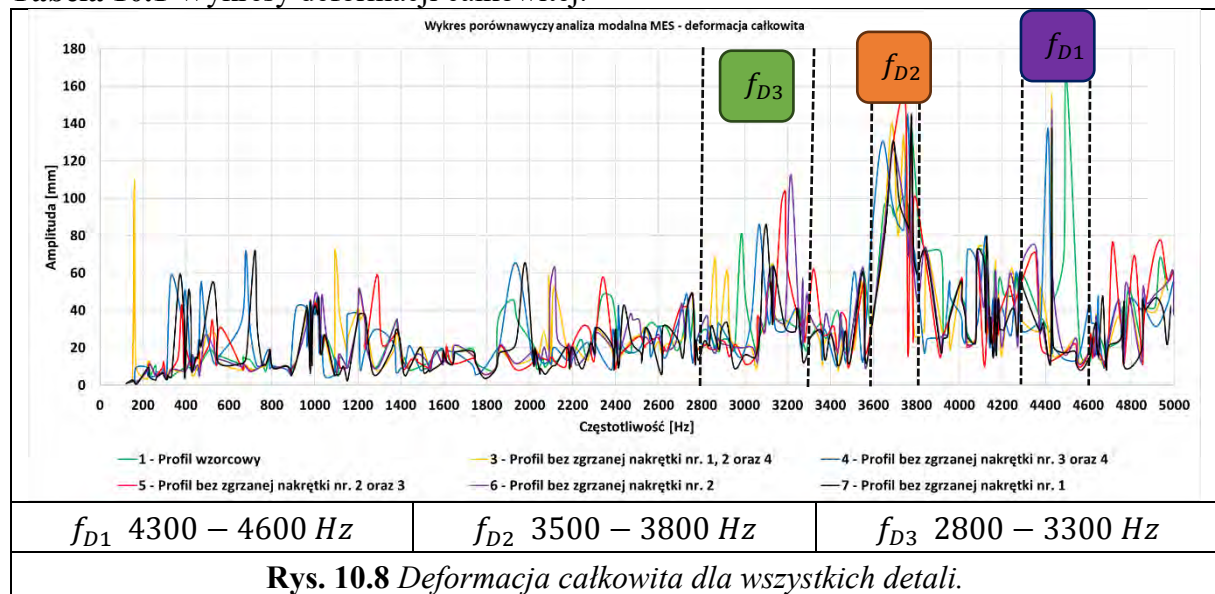
Siódma postać drgań (rys. 10.53) $f_{X21} = 1240 \text{ Hz}$ przedstawia odkształcenia mające postać łuku w płaszczyźnie X-Y. Kształt postaci widać na wykresie deformacji w osi X (rys. 10.54). Natomiast dla deformacji w osi Z zachodzi wychylenie tylko czwartej obsady (rys. 10.55). Pasma częstotliwości (f_{X2} 1100 – 1500 Hz) umożliwia kontrolę jakości złącza jeżeli akcelerometr znajdzie się na kolumnie pierwszej lub czwartej w kierunku X. W związku z tym pasmo to pozwala na identyfikację jakości złącza.

Ósma postać drgań (rys. 10.56) $f_{X31} = 2471 \text{ Hz}$ przedstawia maksymalne przemieszczenia na próbce badanej. Deformację w osi X (rys. 10.57) nie prowadzi do przemieszczeń zorientowanych na badanej próbce, lecz pojawia się na kolumnie pierwszej oraz czwartej. Analogicznie zbadane odkształcenia dla osi Z (rys. 10.58) przedstawia nieznaczne asymetryczne przemieszczenia z osi. Największa amplituda wypada w miejscu mocowania szyny elastycznej do tranzystora. Postać ósma nie prowadzi do jednoznacznej kontroli jakości dla osi X lub Z, jej główne deformacje zorientowane są dla kierunku Y. Dla pasma przedstawionego montaż akcelerometru musiałyby znajdować się w osi Y, co jest problematyczne na przyrządzie tego typu. Zestawienie przebiegów poszczególnych próbek zestawiający je z przebiegiem wzorcowym dla punktu KX4 przedstawiono na wykresach (rys. 10.43 - 10.48).

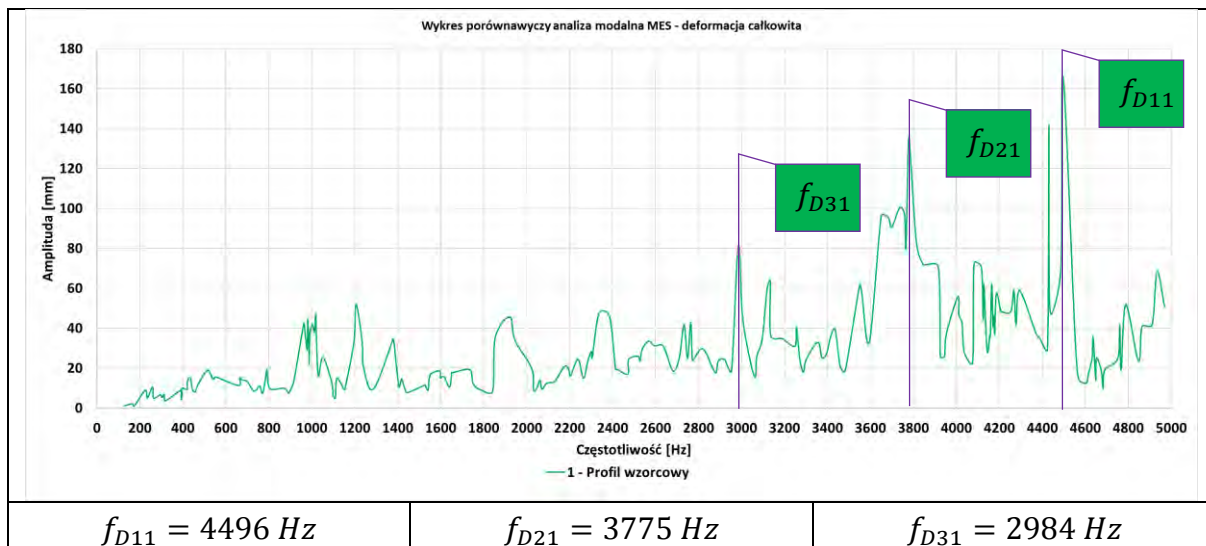
Wyniki wszystkich częstotliwości rezonansowych i porównanie ich pomiędzy próbkami zebrano na wykresach (rys. 10.15, Rys. 10.32, Rys. 10.49). Wykresy te obrazują zmiany częstotliwości rezonansowej w wyniku występowania niezgodności pomiędzy próbkami.

Przy analizie ośmiu postaci drgań dla wartości przemieszczenia maksymalnego w odniesieniu do deformacji całkowitej jak i punktowej kolumny czwartej w osi X i Y, stwierdzono, iż pasmo częstotliwości $f \in (2400 - 3300 \text{ Hz})$ jest pasmem, dla którego postaci drgań powodują odkształcenie detalu, które pozwala na ocenę złącza powstałego pomiędzy nakrętką a profilem. Natomiast w przedziale $f \in (400 - 800 \text{ Hz})$ można dokonać obserwacji zmian częstotliwości rezonansowych, jeżeli akcelerometr umiejscowiony jest na czwartej kolumnie.

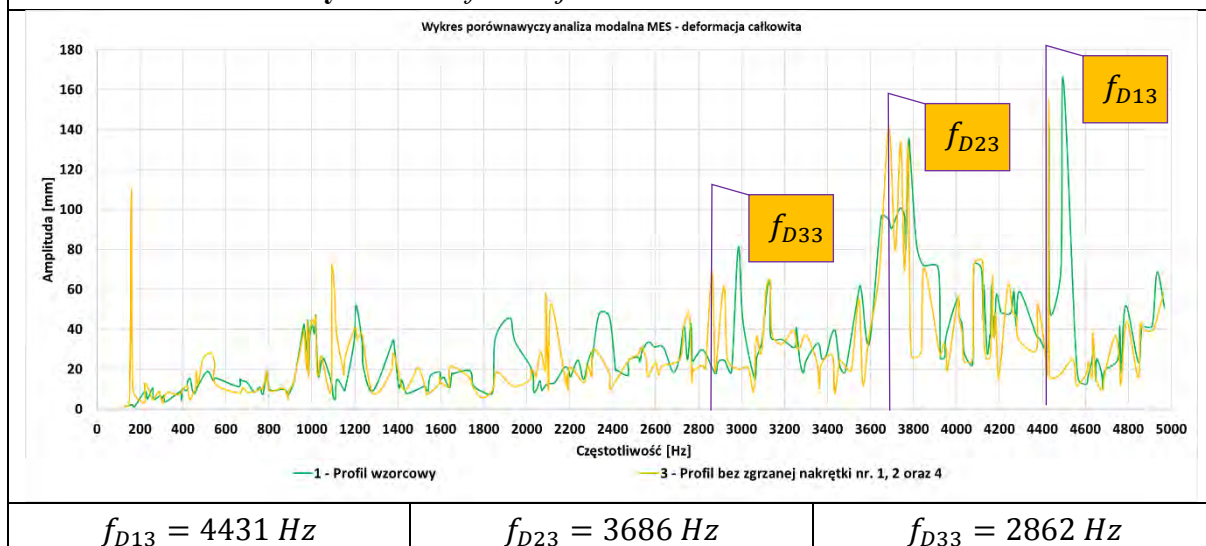
Tabela 10.1 Wykresy deformacji całkowitej.



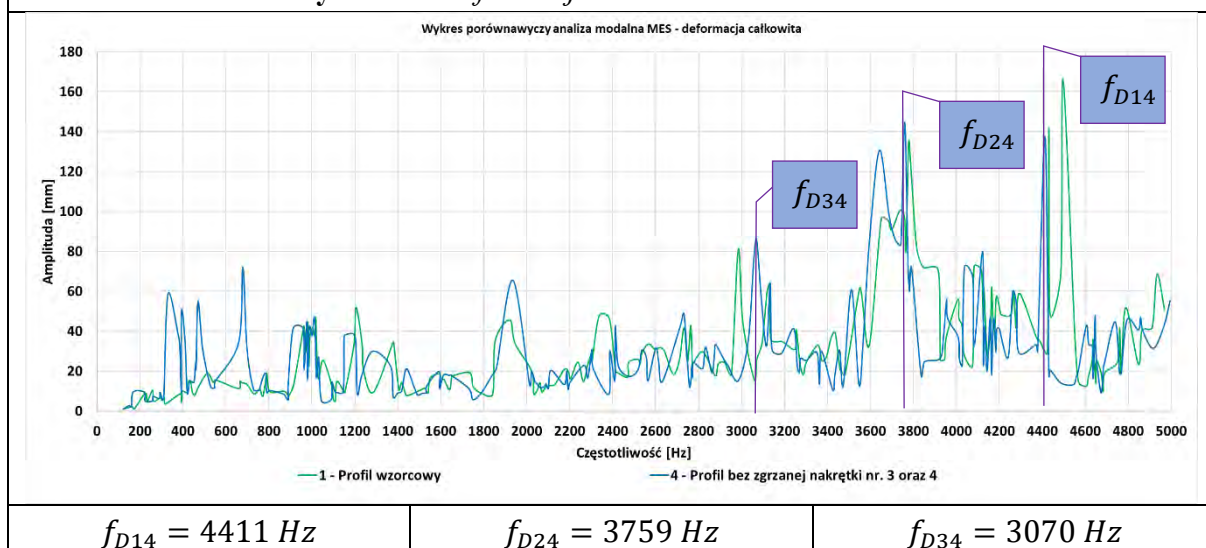
Rys. 10.8 Deformacja całkowita dla wszystkich detali.



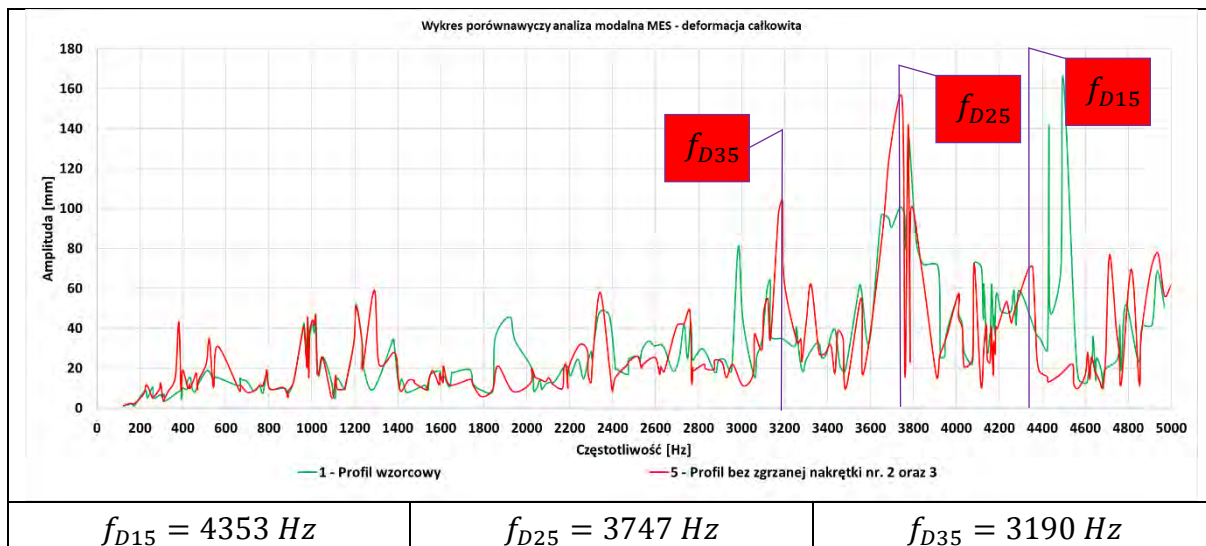
Rys. 10.9 Deformacja całkowita dla detalu nr 1.



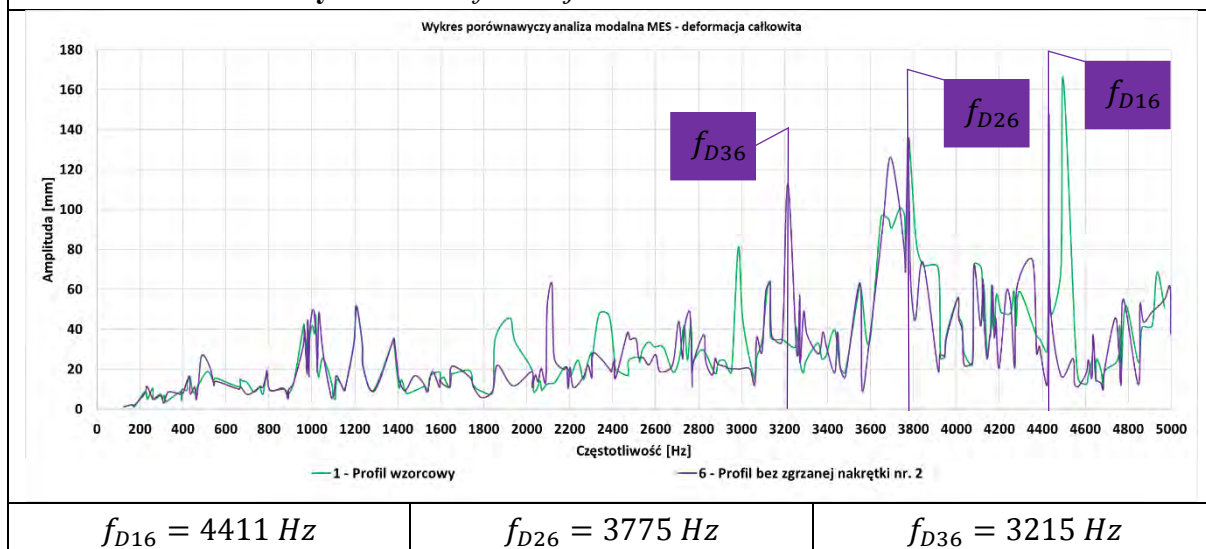
Rys. 10.10 Deformacja całkowita dla detalu nr 3.



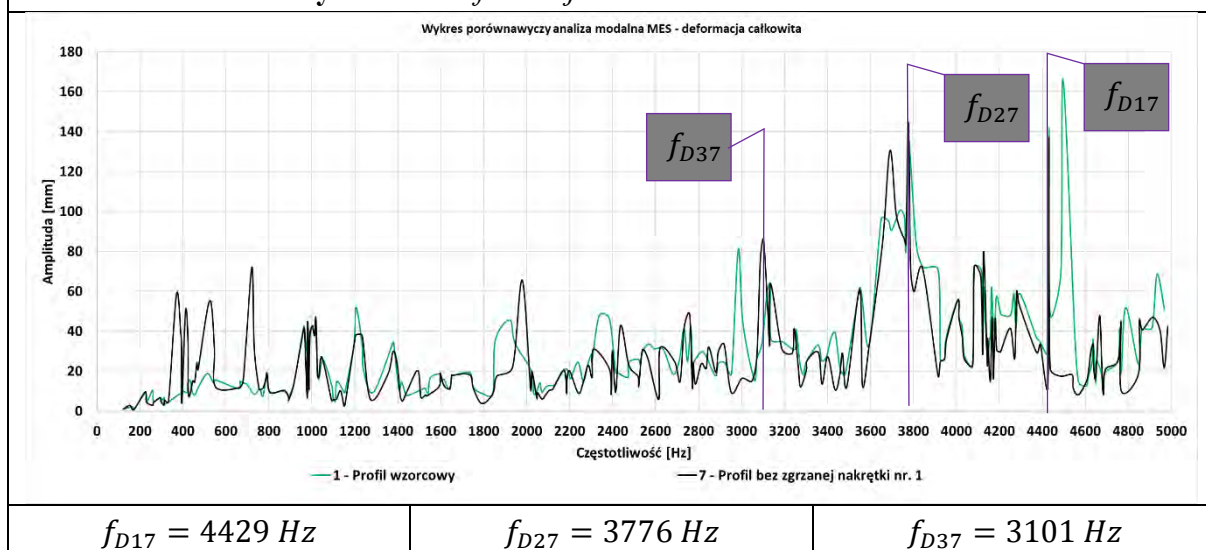
Rys. 10.11 Deformacja całkowita dla detalu nr 4.



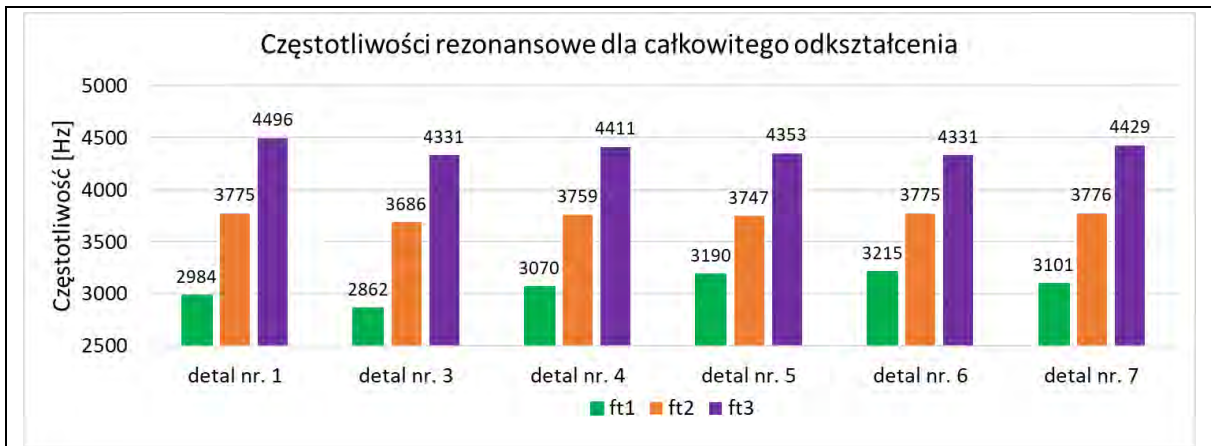
Rys. 10.12 Deformacja całkowita dla detalu nr 5.



Rys. 10.13 Deformacja całkowita dla detalu nr 6.

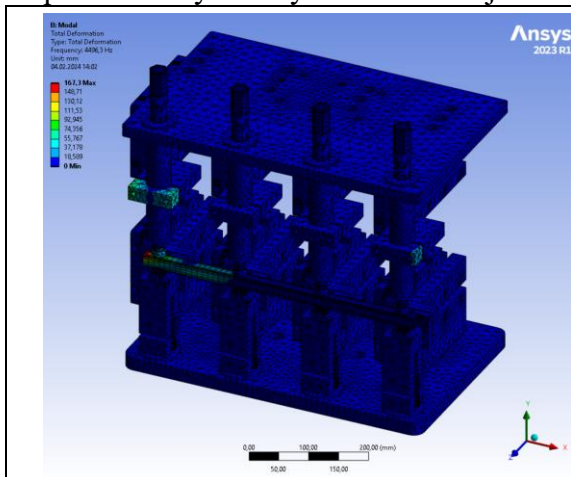


Rys. 10.14 Deformacja całkowita dla detalu nr 7.

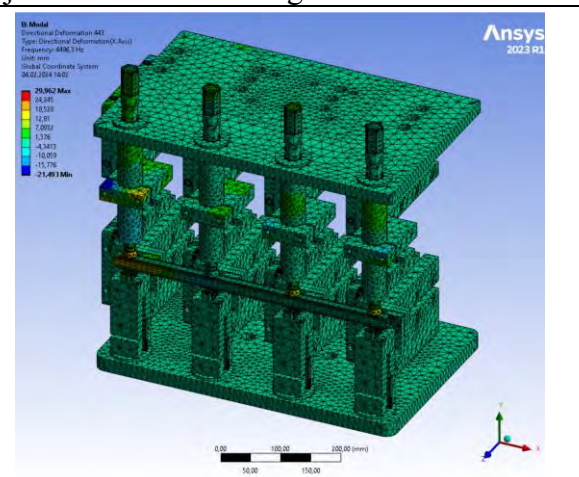


Rys. 10.15 Wykres zestawiający częstotliwości rezonansowe całkowitego odkształcenia.

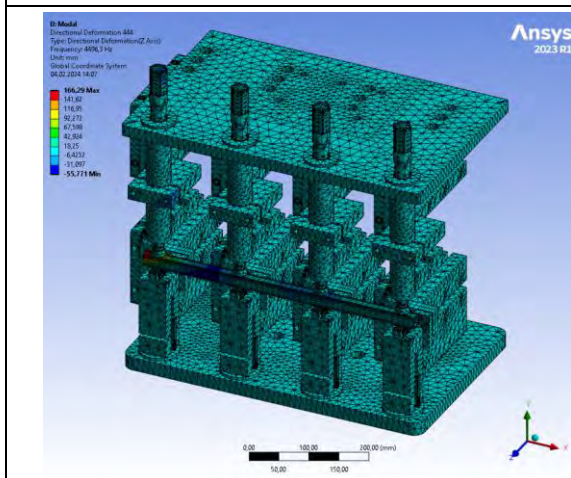
Tabela 10.2 Deformacja: całkowita, w osi X oraz osi Z dla trzech postaci o maksymalnych amplitudach wynikowych z deformacji całkowitej dla detalu wzorcowego.



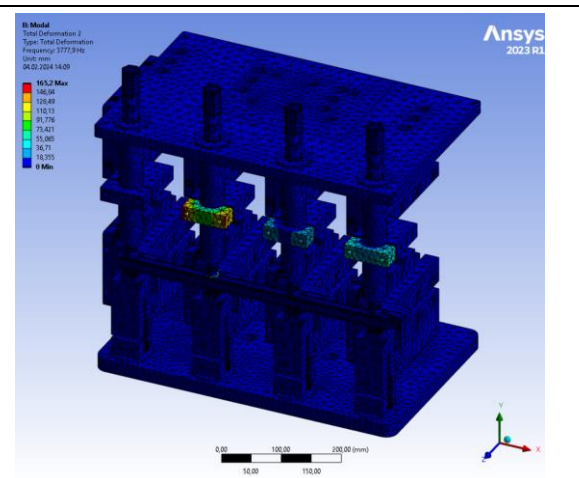
Rys. 10.16 Deformacja całkowita dla częstotliwości $f_{D11} = 4496$ Hz.



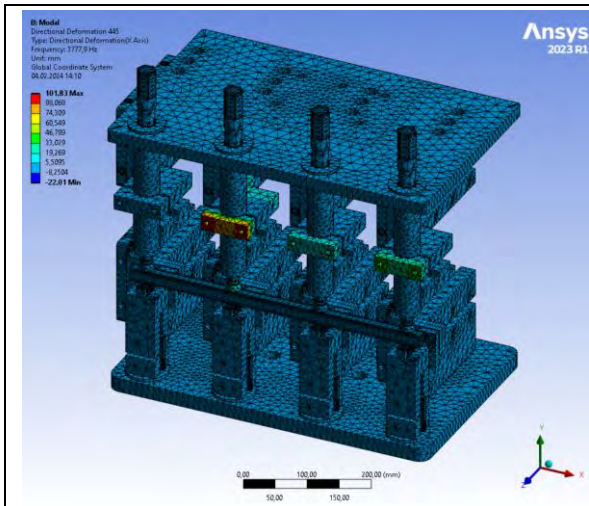
Rys. 10.17 Deformacja w osi X dla częstotliwości $f_{D11} = 4496$ Hz.



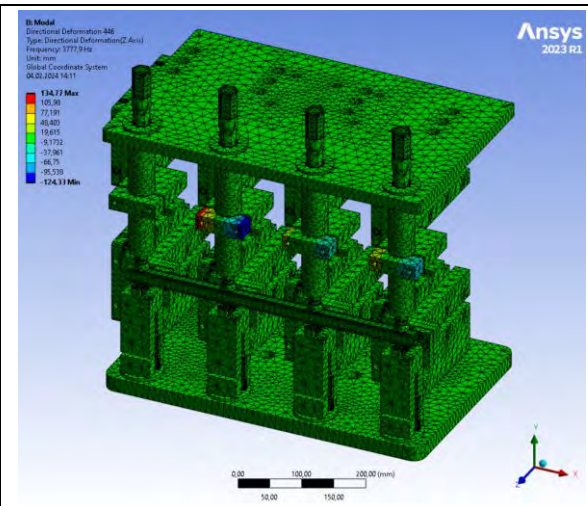
Rys. 10.18 Deformacja w osi Z dla częstotliwości $f_{D11} = 4496$ Hz.



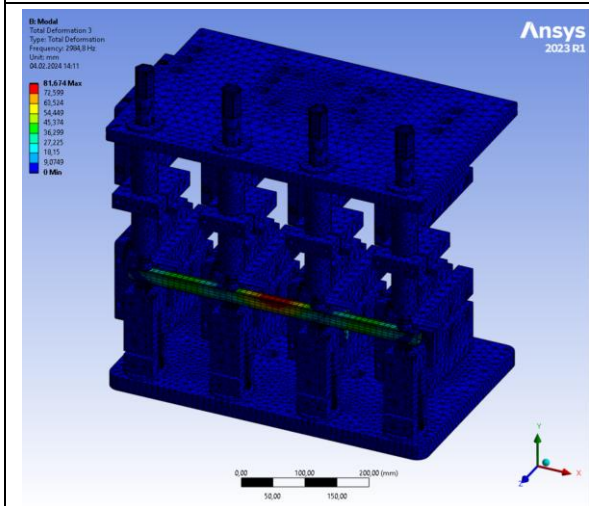
Rys. 10.19 Deformacja całkowita dla częstotliwości $f_{D21} = 3775$ Hz.



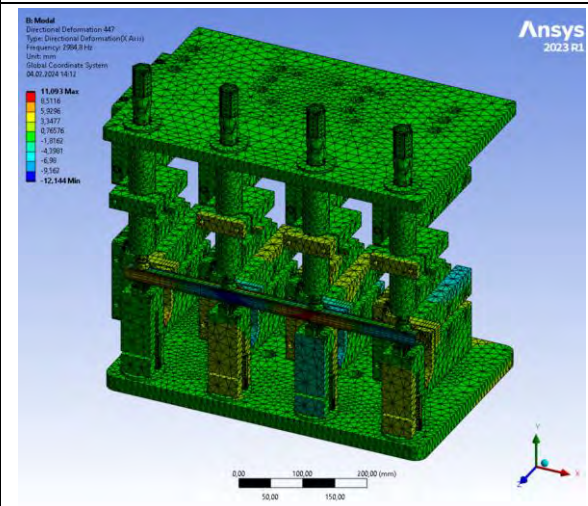
Rys. 10.20 Deformacja w osi X dla częstotliwości $f_{D21} = 3775$ Hz.



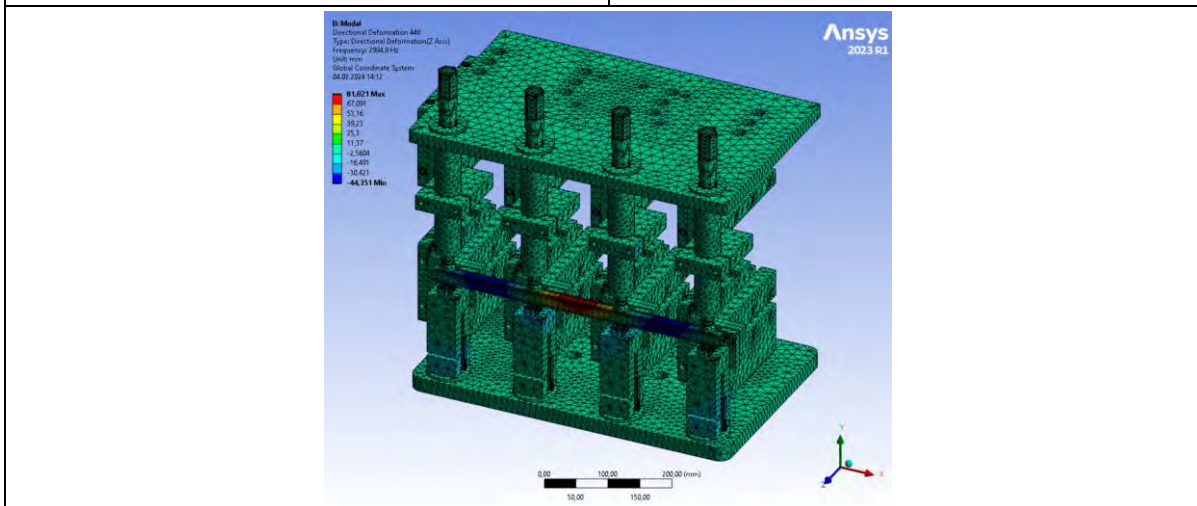
Rys. 10.21 Deformacja w osi Z dla częstotliwości $f_{D21} = 3775$ Hz.



Rys. 10.22 Deformacja całkowita dla częstotliwości $f_{D31} = 2984$ Hz.

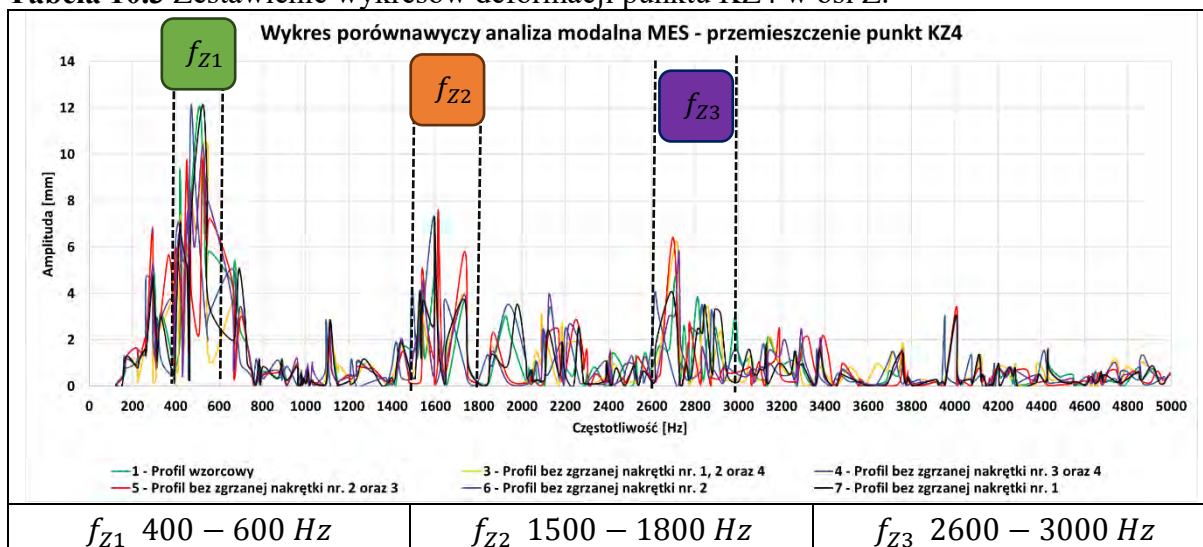


Rys. 10.23 Deformacja w osi X dla częstotliwości $f_{D31} = 2984$ Hz.

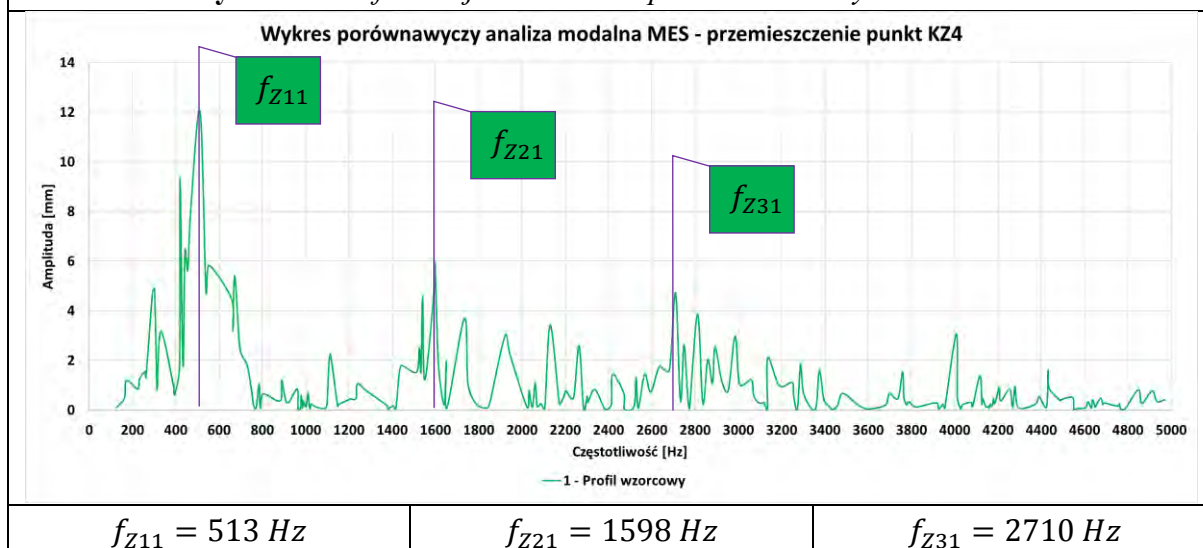


Rys. 10.24 Deformacja w osi Z dla częstotliwości $f_{D31} = 2984$ Hz.

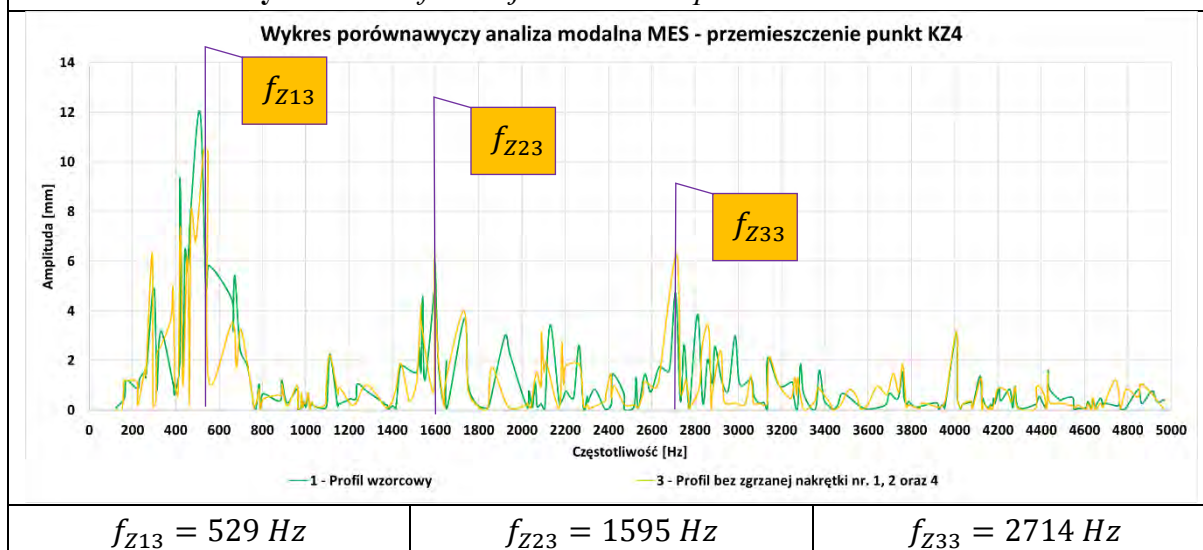
Tabela 10.3 Zestawienie wykresów deformacji punktu KZ4 w osi Z.



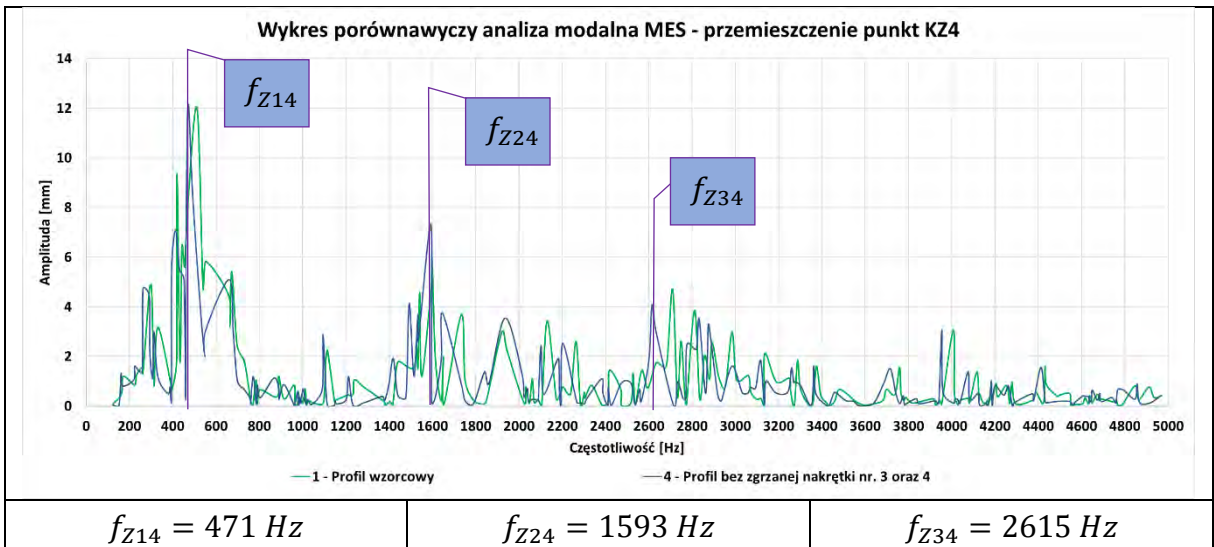
Rys. 10.25 Deformacja w osi Z dla punktu KZ4 wszystkich detali.



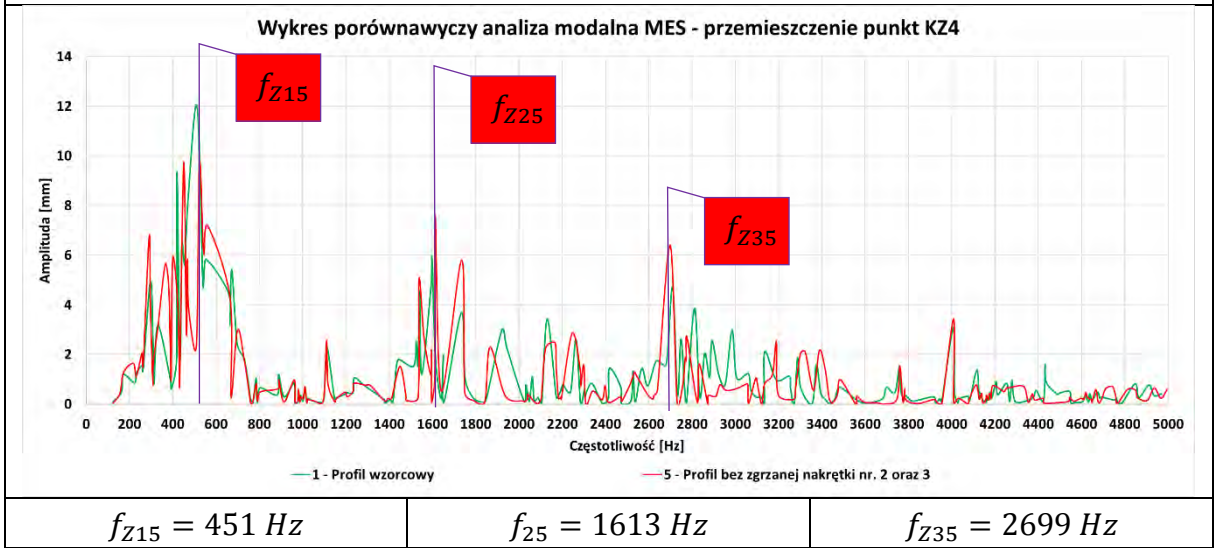
Rys. 10.26 Deformacja w osi Z dla punktu KZ4 detal nr 1.



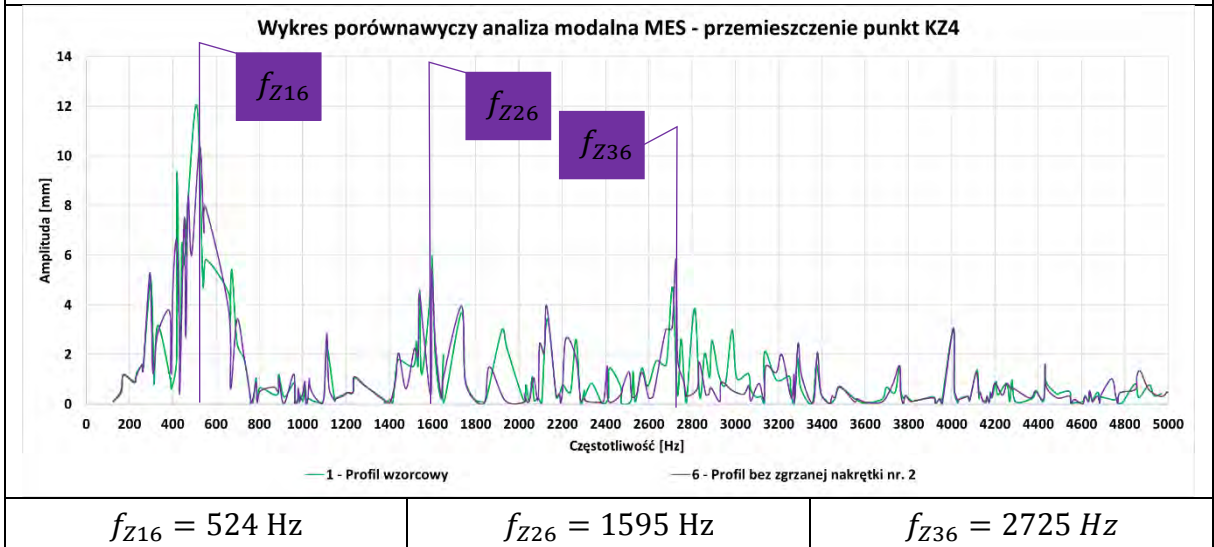
Rys. 10.27 Deformacja w osi Z dla punktu KZ4 detal nr 3.



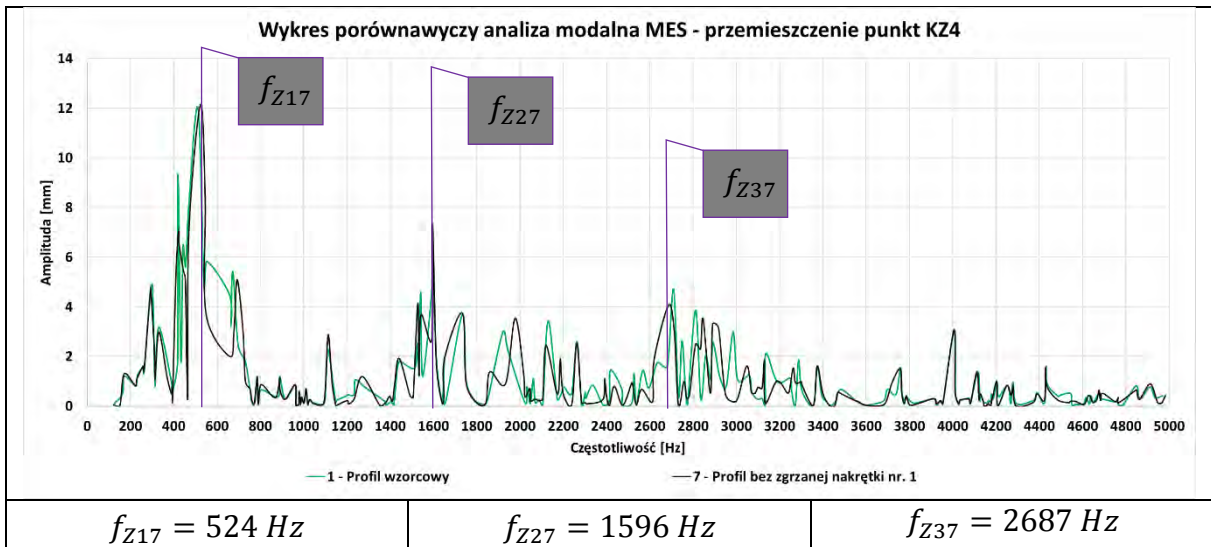
Rys. 10.28 Deformacja w osi Z dla punktu KZ4 detal nr 4.



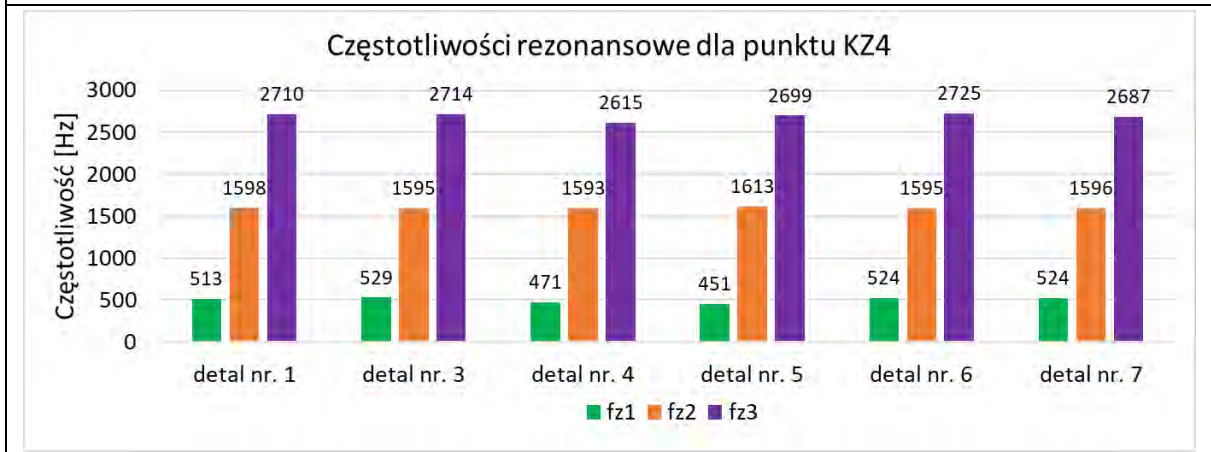
Rys.10.29 Deformacja w osi Z dla punktu KZ4 detal nr 5.



Rys. 10.30 Deformacja w osi Z dla punktu KZ4 detal nr 6.

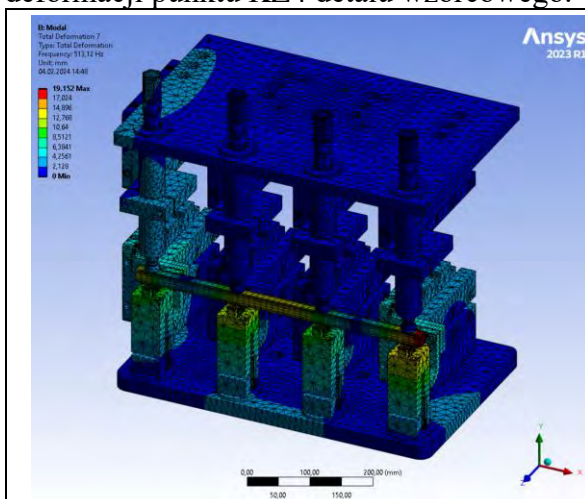


Rys. 10.31 Deformacja w osi Z dla punktu KZ4 detal nr. 7.

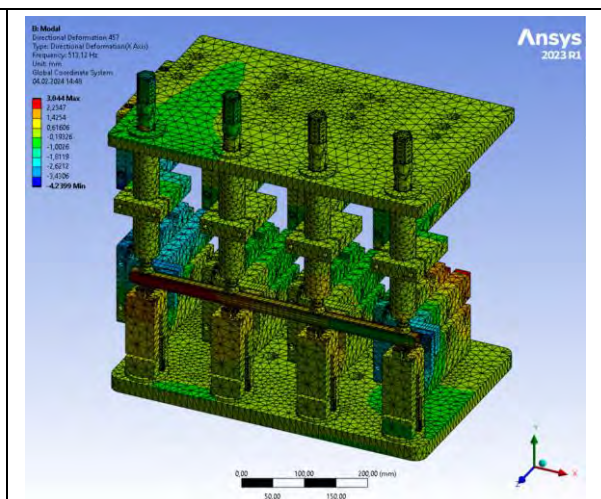


Rys. 10.32 Wykres zestawiający częstotliwości rezonansowe dla punktu KZ4.

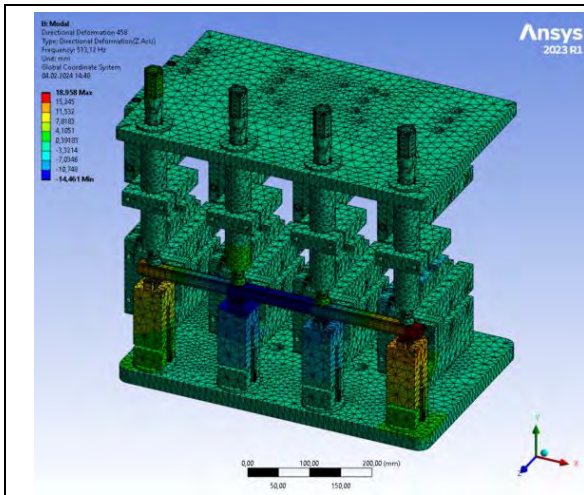
Tabela 10.4 Deformacja: całkowita, w osi X oraz osi Z dla trzech postaci drgań deformacji punktu KZ4 detalu wzorcowego.



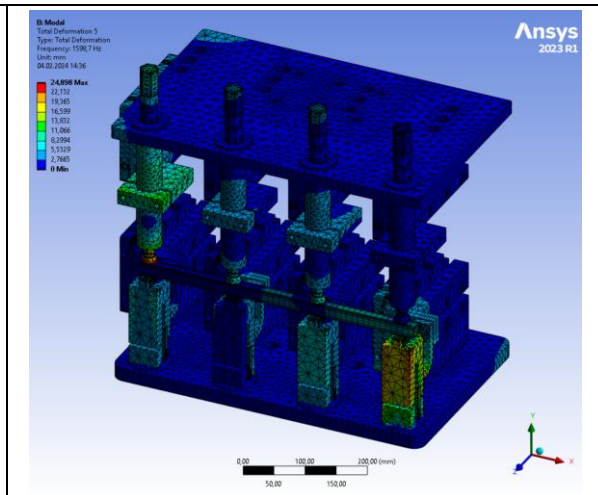
Rys. 10.33 Deformacja całkowita dla częstotliwości $f_{Z11} = 513 \text{ Hz}$.



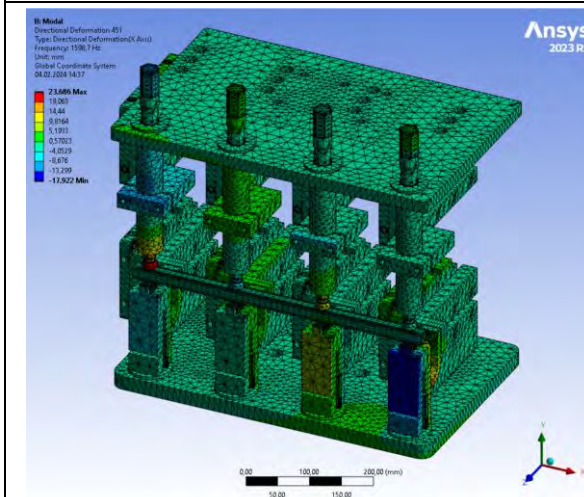
Rys. 10.34 Deformacja w osi X dla częstotliwości $f_{Z11} = 513 \text{ Hz}$.



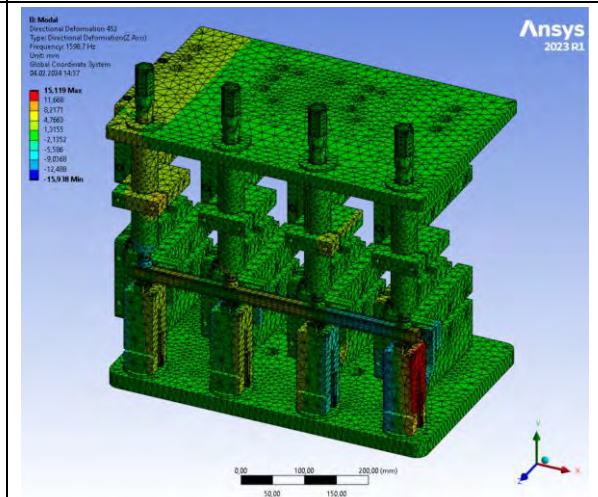
Rys. 10.35 Deformacja w osi Z dla częstotliwości $f_{z11} = 513$ Hz.



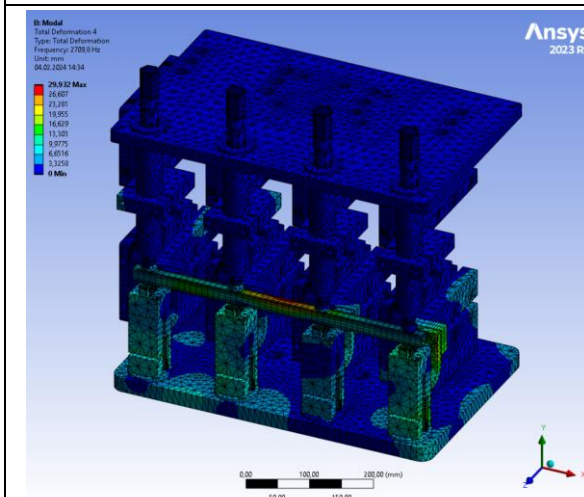
Rys. 10.36 Deformacja całkowita dla częstotliwości $f_{z21} = 1599$ Hz.



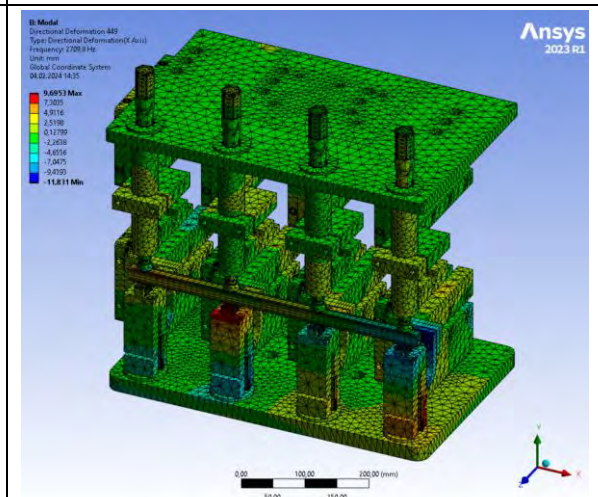
Rys. 10.37 Deformacja w osi X dla częstotliwości $f_{z21} = 1599$ Hz.



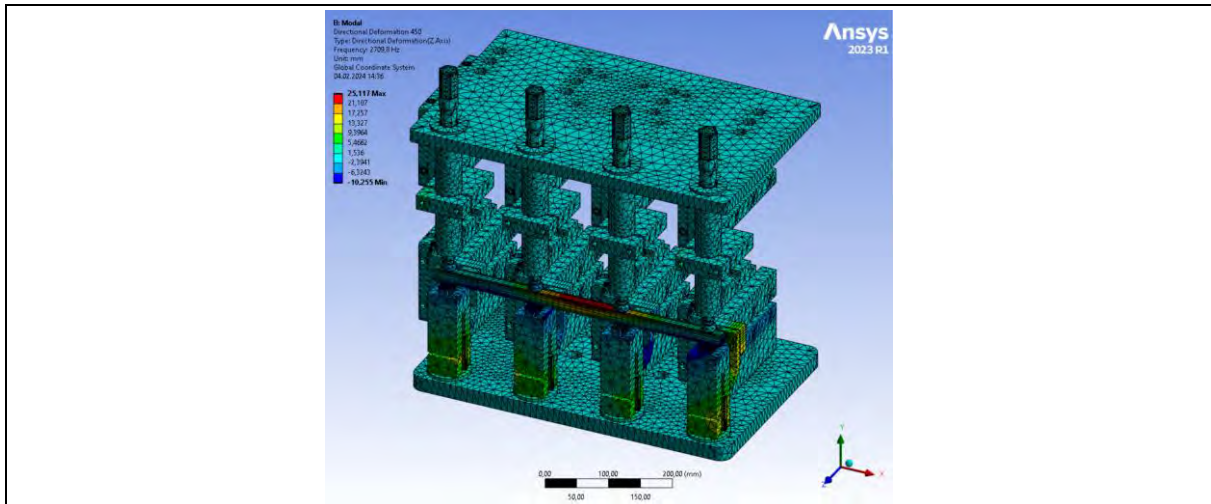
Rys. 10.38 Deformacja w osi Z dla częstotliwości $f_{z21} = 1599$ Hz.



Rys. 10.39 Deformacja całkowita dla częstotliwości $f_{z31} = 2710$ Hz.

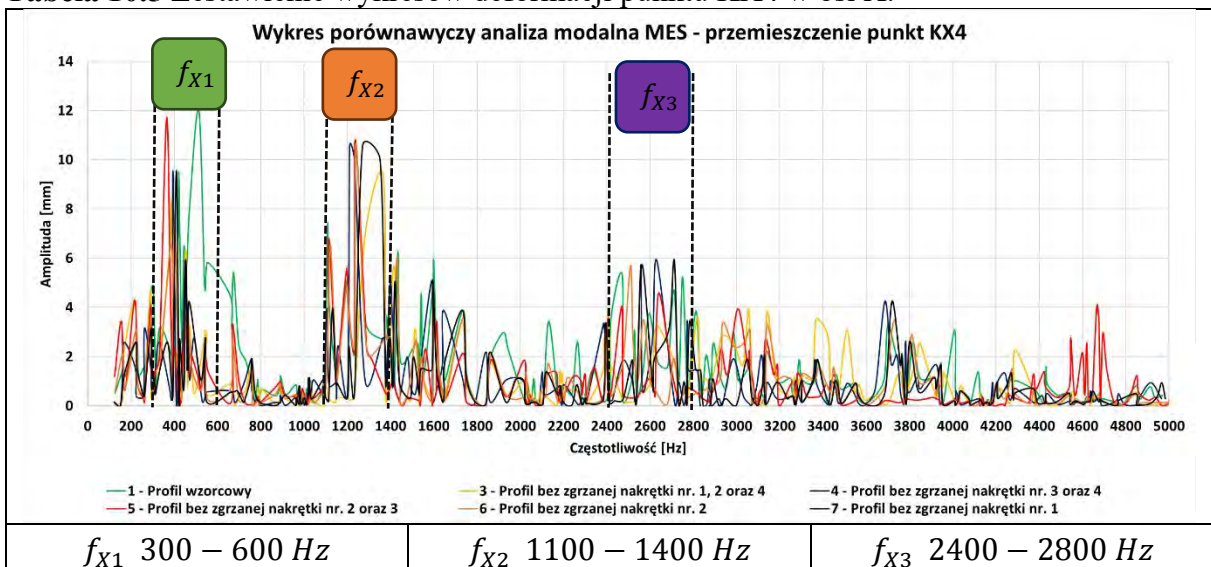


Rys. 10.40 Deformacja w osi X dla częstotliwości $f_{z31} = 2710$ Hz.

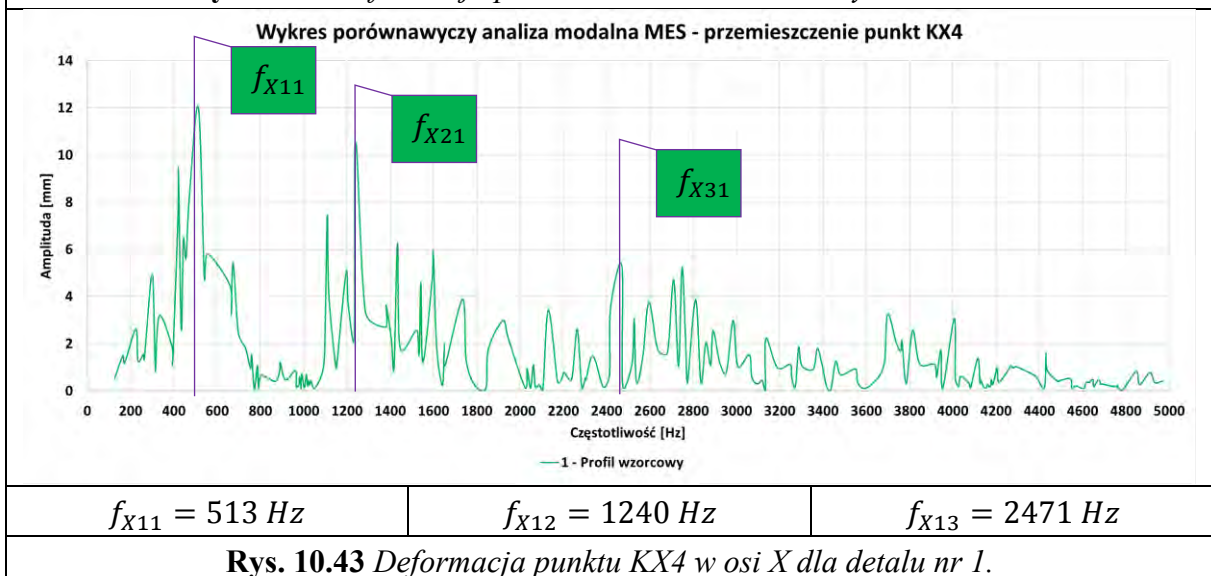


Rys. 11.41 Deformacja w osi Z dla częstotliwości $f_{Z31} = 2710$ Hz.

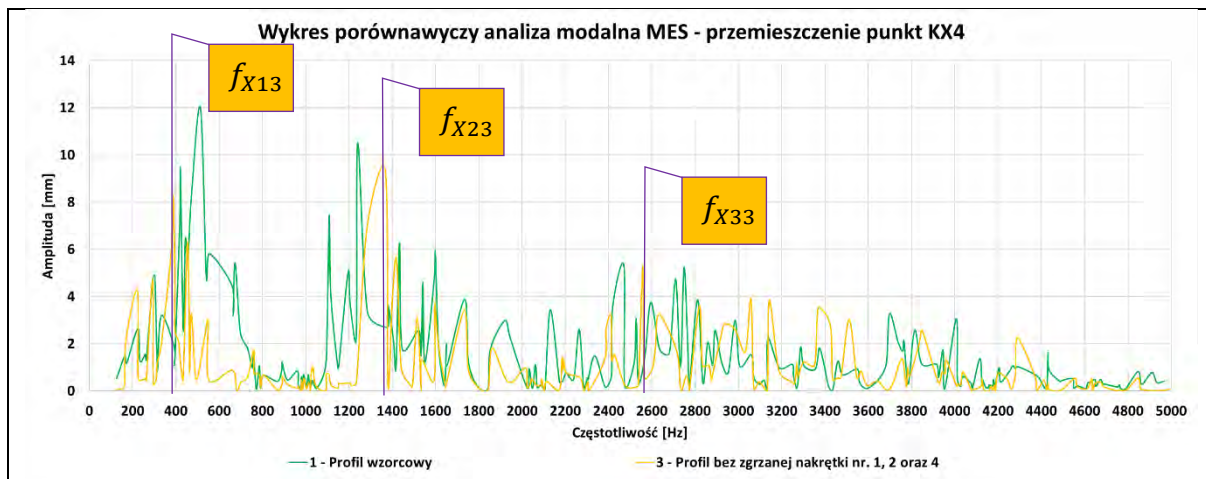
Tabela 10.5 Zestawienie wykresów deformacji punktu KX4 w osi X.



Rys. 10.42 Deformacja punktu KX4 w osi X dla wszystkich detali.



Rys. 10.43 Deformacja punktu KX4 w osi X dla detalu nr 1.

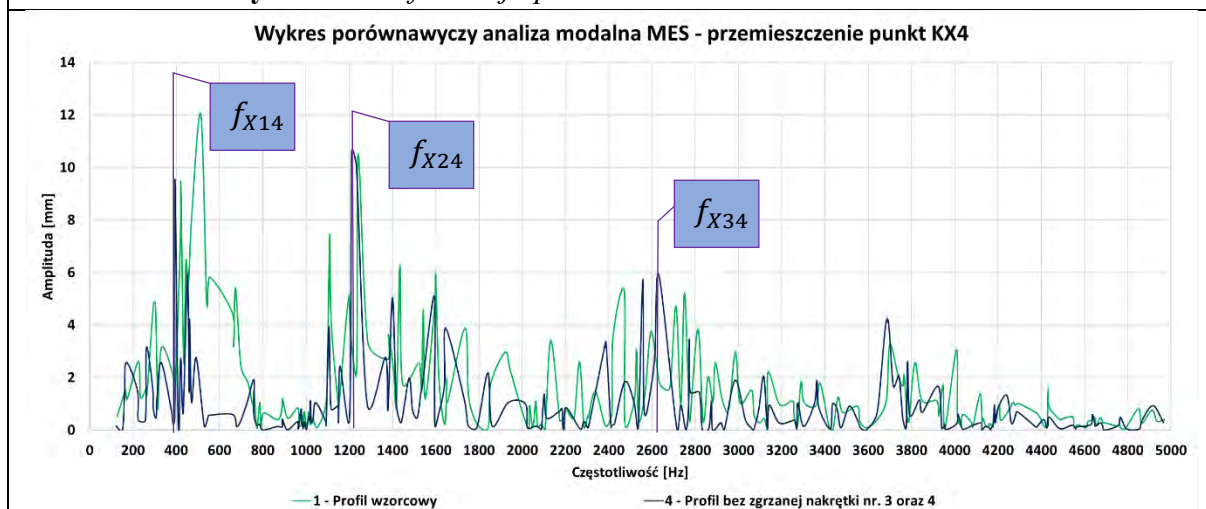


$$f_{X13} = 387 \text{ Hz}$$

$$f_{X23} = 1367 \text{ Hz}$$

$$f_{X33} = 2558 \text{ Hz}$$

Rys. 10.44 Deformacja punktu KX4 w osi X dla detalu nr 3.

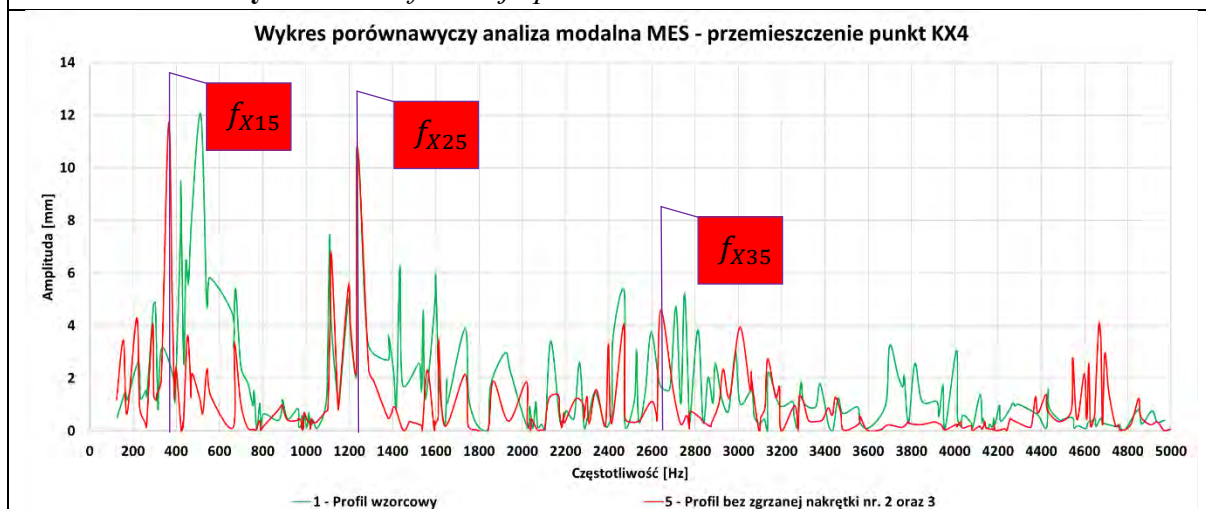


$$f_{X14} = 394 \text{ Hz}$$

$$f_{X24} = 1212 \text{ Hz}$$

$$f_{X34} = 2632 \text{ Hz}$$

Rys. 10.45 Deformacja punktu KX4 w osi X dla detalu nr 4.



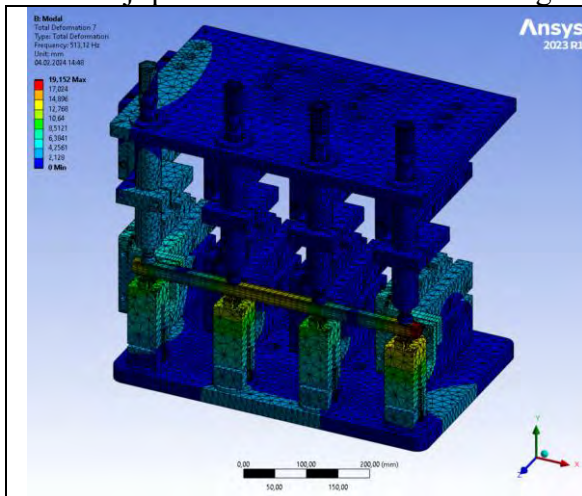
$$f_{X15} = 365 \text{ Hz}$$

$$f_{X25} = 1237 \text{ Hz}$$

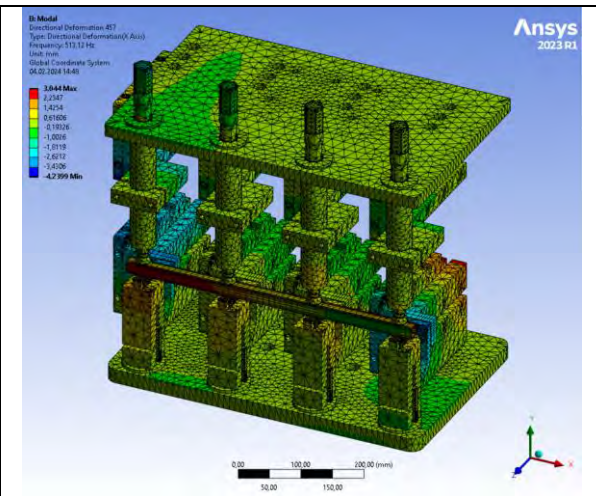
$$f_{X35} = 2640 \text{ Hz}$$

Rys. 10.46 Deformacja punktu KX4 w osi X dla detalu nr 5.

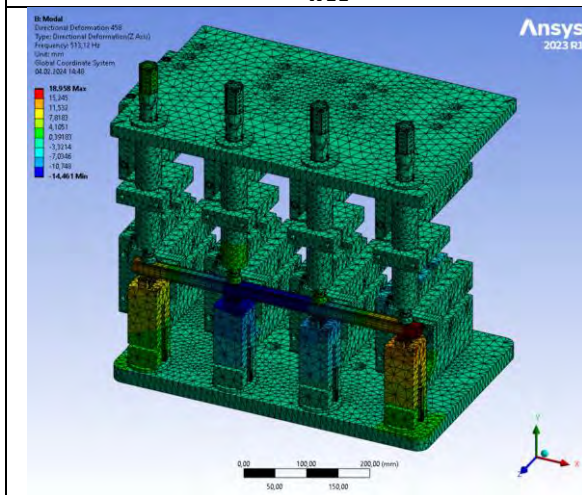
Tabela 10.6 Deformacja: całkowita, w osi X oraz osi Z dla trzech postaci drgań deformacji punktu KX4 detalu wzorcowego.



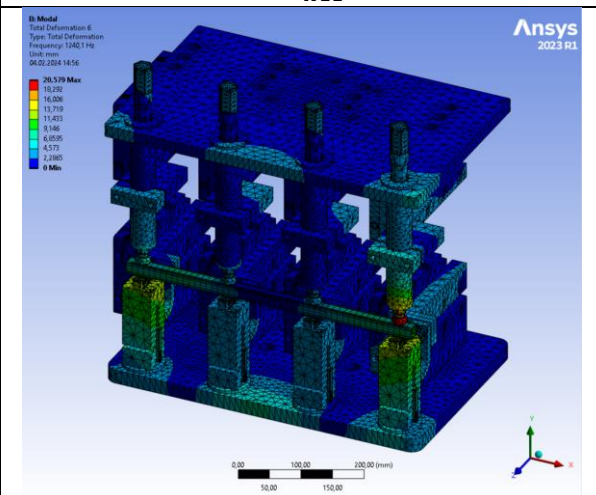
Rys. 10.50 Deformacja całkowita dla częstotliwości $f_{X11} = 513$ Hz.



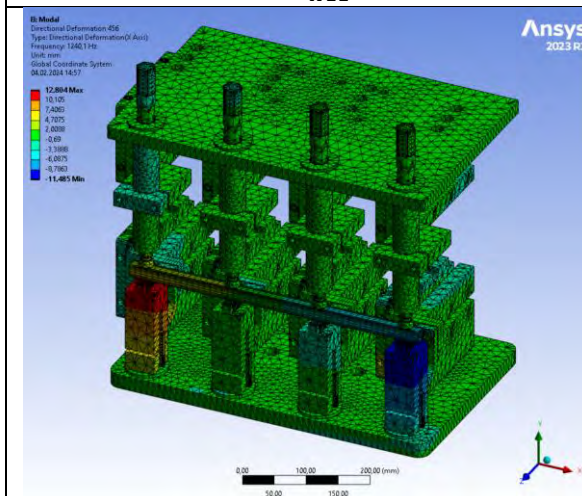
Rys. 10.51 Deformacja w osi X dla częstotliwości $f_{X11} = 513$ Hz.



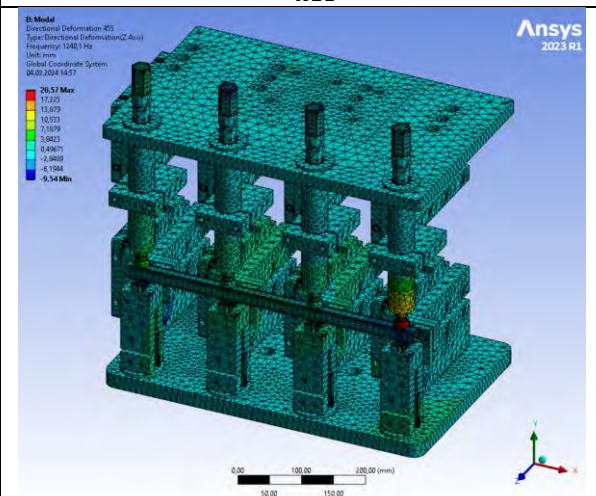
Rys. 10.52 Deformacja w osi Z dla częstotliwości $f_{X11} = 513$ Hz.



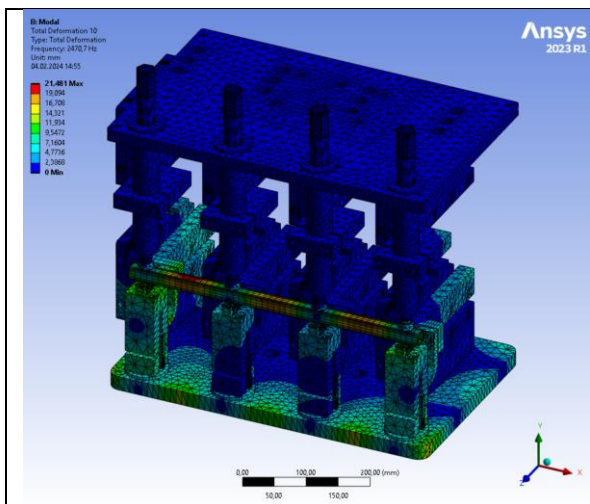
Rys. 10.53 Deformacja całkowita dla częstotliwości $f_{X21} = 1240$ Hz.



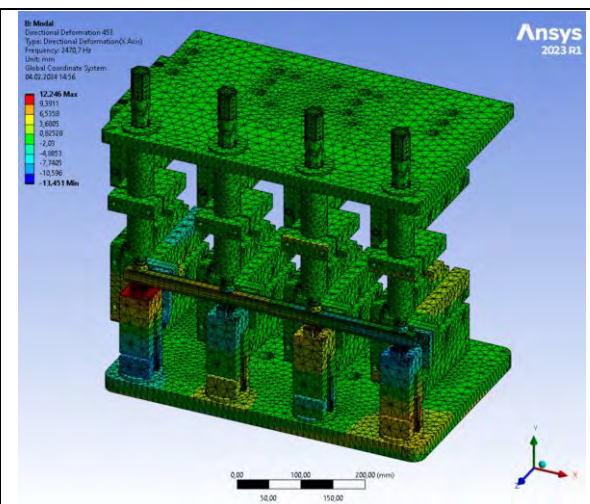
Rys. 10.54 Deformacja w osi X dla częstotliwości $f_{X21} = 1240$ Hz.



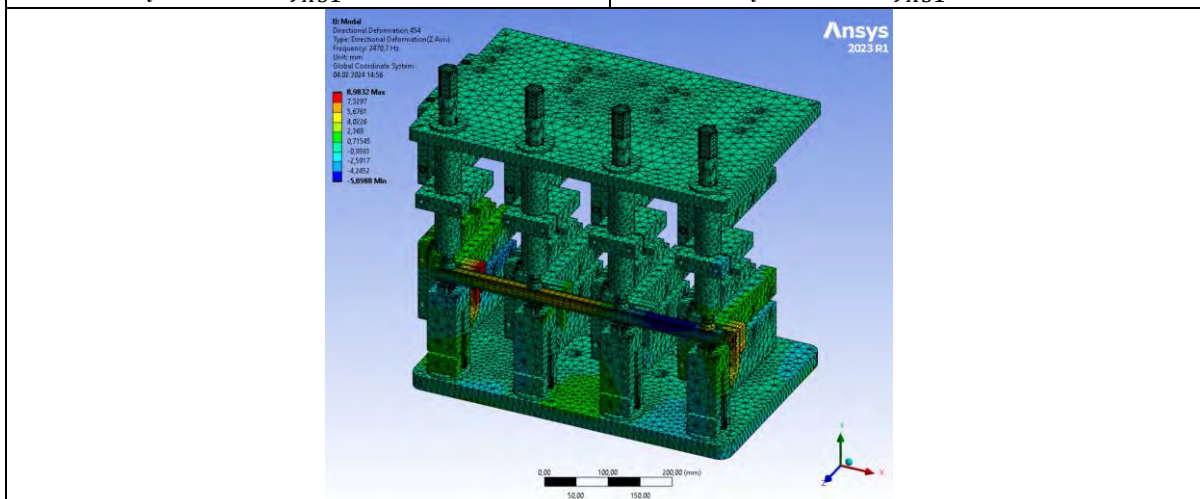
Rys. 10.55 Deformacja w osi Z dla częstotliwości $f_{X21} = 1240$ Hz.



Rys. 10.56 Deformacja całkowita dla częstotliwości $f_{X31} = 2471$ Hz.



Rys. 10.57 Deformacja w osi X dla częstotliwości $f_{X31} = 2471$ Hz.



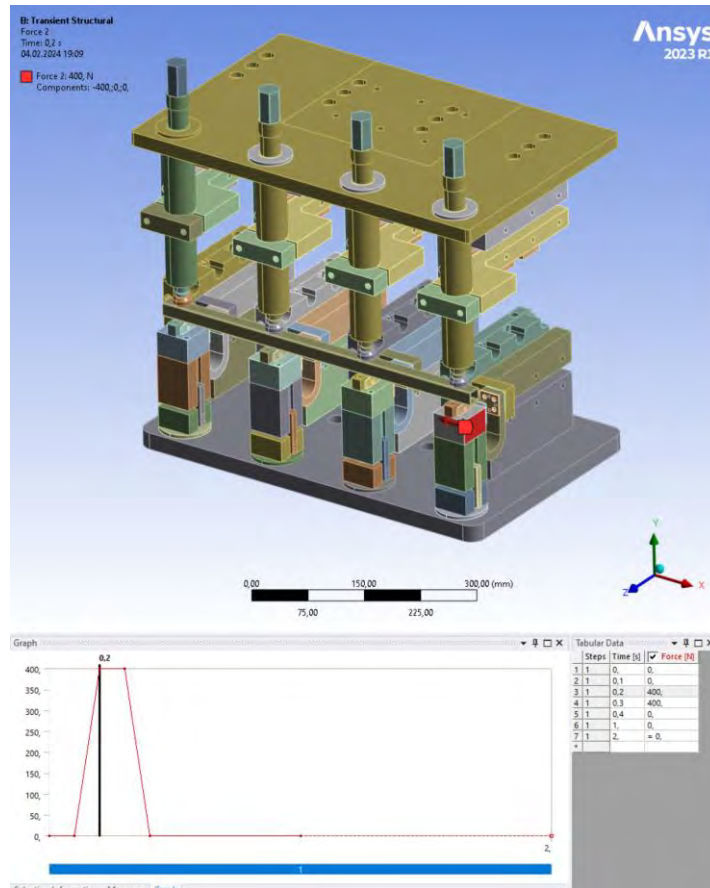
Rys. 10.58 Deformacja w osi Z dla częstotliwości $f_{X31} = 2471$ Hz.

10.3. Przygotowanie modelu do analizy dynamicznej MES

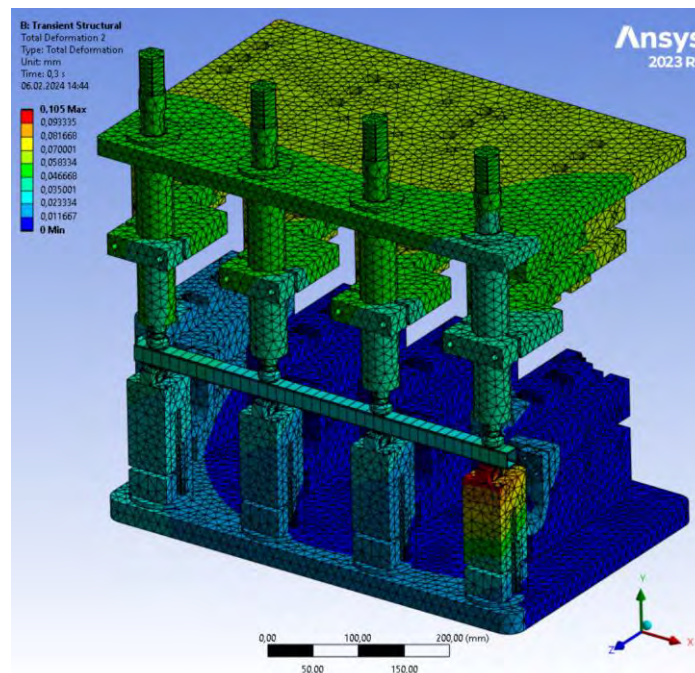
Analiza dynamiczna w kontekście badanego układu jest kluczowym narzędziem w inżynierii, umożliwiającym badanie reakcji struktury na obciążenia zmienne w czasie. Metoda ta pozwala na modelowanie i symulowanie zachowania układu w odpowiedzi na dynamiczne siły, takie jak wymuszenie impulsowe. Przeprowadzona analiza dynamiczna ma na celu weryfikację wpływu siły docisku na odpowiedź przemieszczenia układu. W celu przeprowadzenia analizy dynamicznej zostały sformułowane następujące dodatkowe warunki brzegowe eksperymentu numerycznego:

- przyjęto siatkę modelu o nieliniowych własnościach składającą się z 210280 elementów (jacobian jakości wynosi min = 0,19; max = 1; średnia = 0,95);
- analiza została przeprowadzona w krokach stanowiących interwały czasowe symulacji typu ang. transient (o długości trwania pojedynczego kroku 0,1 s), całość analizy trwa 2s, przemieszczenie maksymalne w wyniku impulsu siły pojawia się w trzecim kroku symulacji (rys. 10.60);
- model wzbudzony jest poprzez wymuszenie impulsowe zadane w punk KZ4 o wartości impulsu siły $F = 400$ N (rys. 10.59);

- w modelu dynamicznym użyto kontaktów uwzględniających tarcie, którego współczynnik dla kontaktu pomiędzy elektrodą a detalem wynosił $\mu = 0,2$; natomiast w przypadku braku zgrzania nakrętki pomiędzy nakrętką a profilem przyjęto współczynnik tarcia na poziomie $\mu = 0,15$;



Rys. 10.59 Warunek brzegowy punktu przyłożenia siły wraz z wykresem przebiegu impulsu siły wzbudzającej $F = 400\text{N}$.

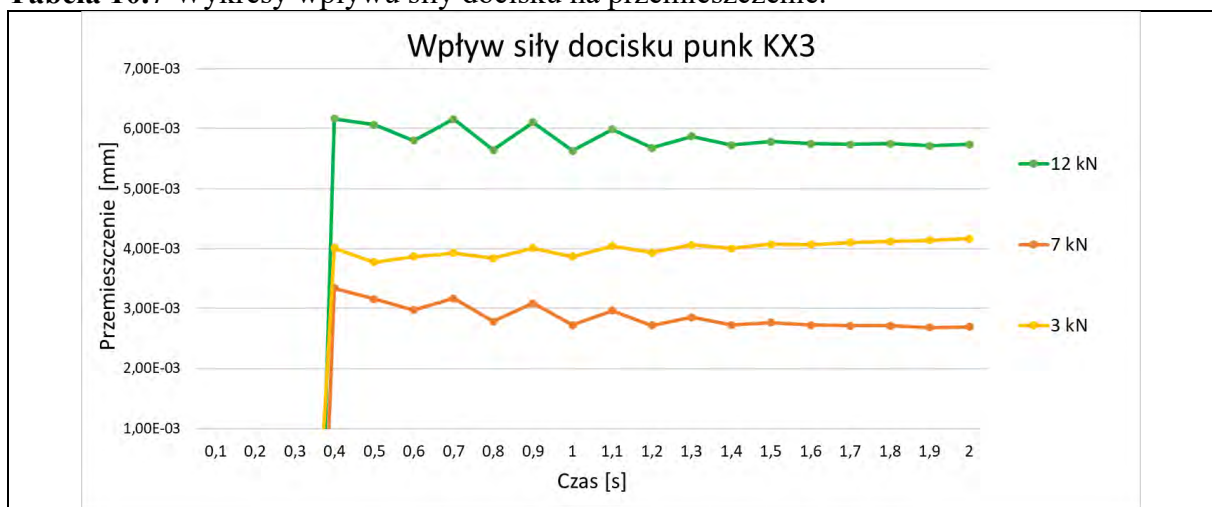


Rys. 10.60 Deformacje całkowite po czasie 0,3s.

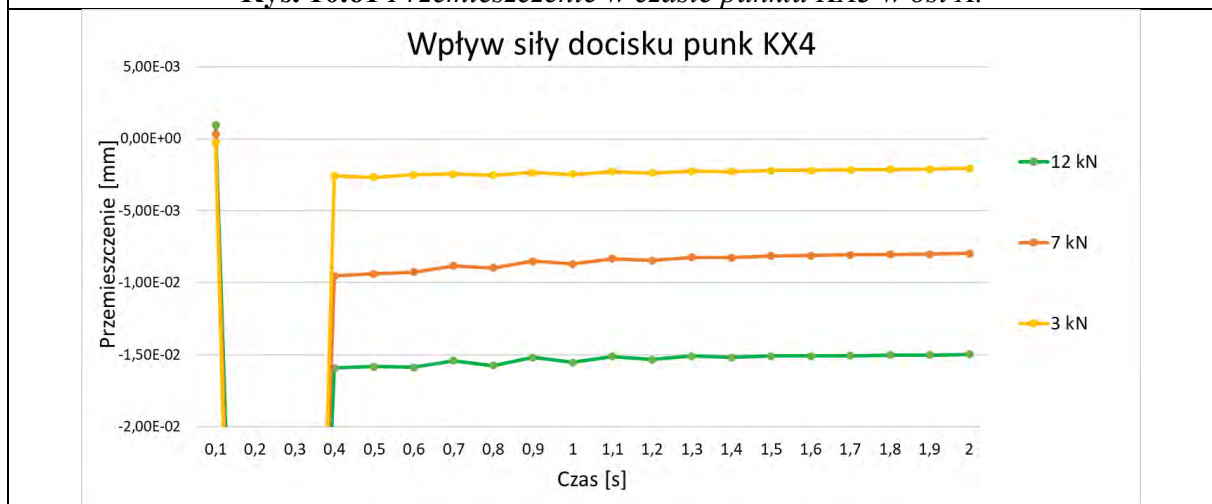
10.4. Wyniki analizy dynamicznej MES

Wyniki numerycznej analizy dynamicznej przedstawiają zmianę położenia punktów na skutek wzbudzenia w postaci impulsu siły o wartości $F = 400 \text{ N}$. Na wykresach zauważono pojawienie się drgań w punktach pomiarowych po czasie 0,4 s. Wyniki dotyczące wpływu siły docisku zebrano w tabeli (tab. 10.7). Zawiera ona wykresy przemieszczenia dla punktów KX3, KX4, KZ3 oraz KZ4 w dla próbki nr 1 wzorcowej. Poddając analizie wykres dla punktu KX3 (rys. 10.61), stwierdzono, że zwiększenie siły docisku korzystnie wpływa na przebiegi drgań w układzie. Dowodem tego jest większa amplituda w czasie niż w przypadku sił docisku wynoszących 7 i 3 kN. Wykres porównania sił dla punktu KX4 (rys. 10.62) potwierdza te wyniki. Z kolei zmiana siły docisku w kierunku Z została przedstawiona na dwóch kolejnych wykresach (rys. 10.63, 10.64). Wykresy pokazują, że siła docisku o wartości 3 kN prowadzi do zmniejszenia odkształcenia w czasie, co wywołuje niekorzystny wpływ prowadząc do zakłócenia pomiarów.

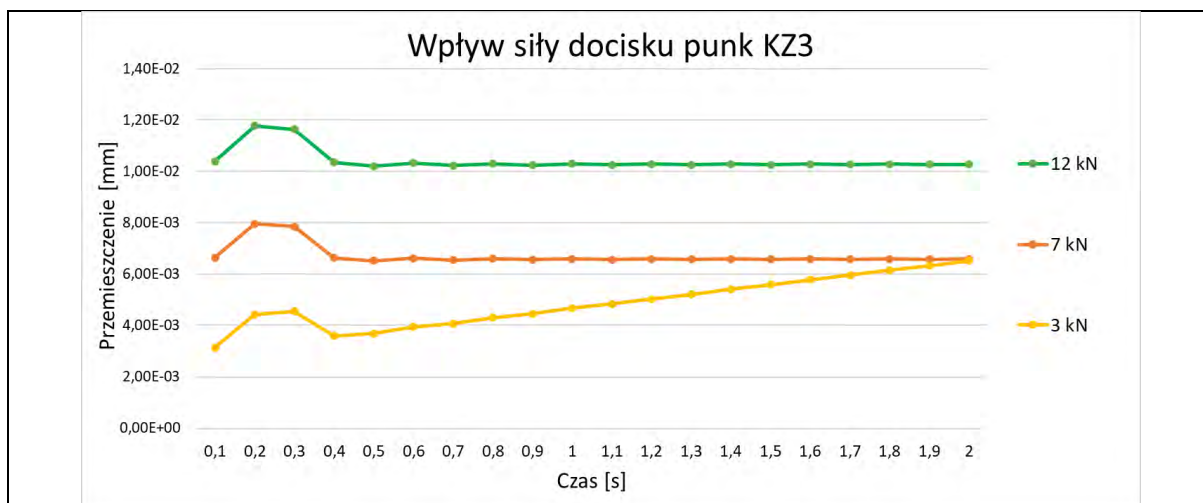
Tabela 10.7 Wykresy wpływu siły docisku na przemieszczenie.



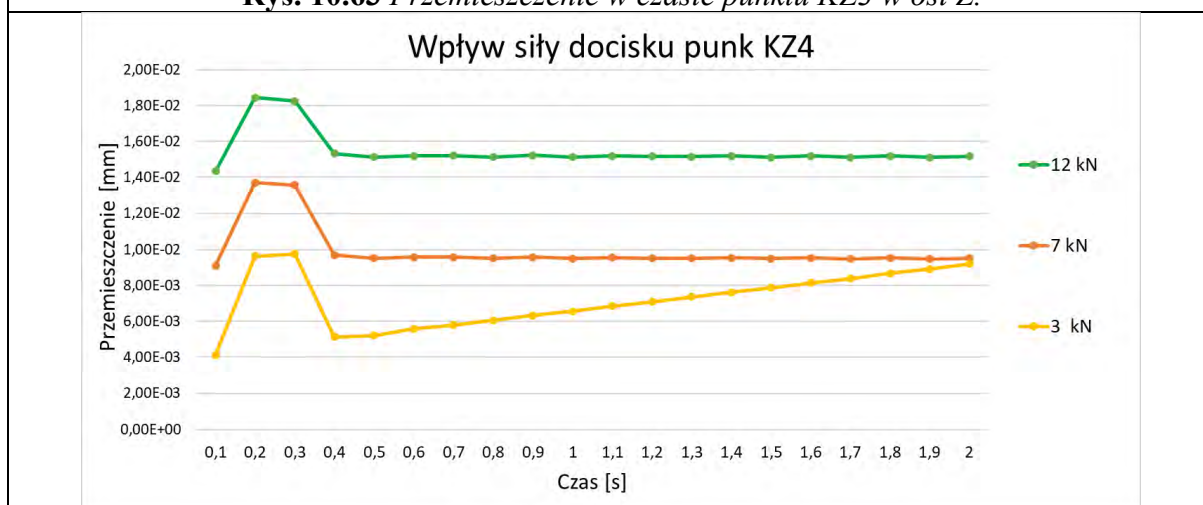
Rys. 10.61 Przesunięcie w czasie punktu KX3 w osi X.



Rys. 10.62 Przesunięcie w czasie punktu KX4 w osi X.



Rys. 10.63 Przemieszczenie w czasie punktu KZ3 w osi Z.



Rys. 10.64 Przemieszczenie w czasie punktu KZ4 w osi Z.

10.5. Podsumowanie badań numerycznych

Numeryczna analiza modalna dowiodła możliwość wykorzystania do kontroli jakości połączeń zgrzewanych garbowo wielopunktowo.

Badania modalne dostarczyły wiele postaci drgań dla układu, należy jednak analizować tylko te, których częstotliwości rezonansowe przedstawiają odkształcenia w badanym detalu. Ważnym aspektem dla postaci drgań poddanej analizie jest jej równomierna deformacja, która prowadzi do dużo czytelniejszego rezultatu końcowego.

Częstotliwości, które wzbudzają rezonans w detalu zawierają się w przedziale $f \in (400 - 800 \text{ Hz})$ oraz $f \in (2400 - 3300 \text{ Hz})$. Są to pasma, dla których postacie drgań przedstawiają największe przemieszczenia na detalu. Pozwala to na ocenę połączenia pomiędzy nakrętkom a profilem.

Analizy wykazały, iż najlepszym elementem do pomiaru przemieszczeń i identyfikacji braku zgrzania są kolumny, ponieważ:

- ich geometria jest identyczna oraz są symetrycznie rozstawione,
- są odseparowane od płyt mocujących elementami z tworzywa sztucznego, a ich połączenie jest sprężyste, redukując wpływ masy maszyny,

- są powiązane ze sobą, poprzez most składający się z nakrętek i profilu (brak zgrzania przy odpowiednio niskiej sile docisku zaburza możliwość przekazywania energii mechanicznej).

Dynamiczna analiza dowodzi, że zwiększenie siły docisku ma pozytywny wpływ na jakość otrzymanych wyników. Wraz ze wzrostem siły docisku, przemieszczenia detalu w wyniku wymuszenia impulsowego stają się większe, co ułatwia ich rejestrację. Siła docisku o wartości 3 kN prowadzi do zmniejszenia się odkształceń, a tym samym zaniku ruchu harmonicznego kolumn, zakłóca to obserwację układu.

Najlepszym punktem pomiarowym są kolumny z uwagi na brak konieczności mocowania akcelerometru na detalu. Dodatkowo kolumny ulegają ugięciu wstępnemu wynikającemu z dużej siły docisku. W zależności od jakości połączenia wykonanego pomiędzy nakrętką a profilem wartości tego przemieszczenia umożliwiają rozróżnienie komponentów z niezgodnościami od wzorcowych.

Pomiar w dwóch osiach dostarcza więcej informacji o powstałych połączeniach. Zauważono, że zmiany pomiędzy detalami w osi Z mogą być niewidoczne i wymagać większej rozdzielczości pomiarowej. Z kolei po zmianie kierunku odpowiedzi na oś X można otrzymać wyraźne zmiany w odpowiedzi pomiędzy detalami. Zebranie odpowiedzi w dwóch osiach pozwala na dużo lepszą analizę jakości oraz zwiększa wiarygodność pomiarową ew. prototypu urządzenia dokonującego detekcji.

Analizy numeryczne wskazały najlepsze pod względem wykrywalności miejsca mocowania oraz przedziały poszukiwania częstotliwości rezonansowych, niezbędne w eksperymentalnej analizie modalnej.

11. Badania eksperymentalne zastosowania analizy modalnej

Badania z zastosowaniem analizy modalnej dla lepszego zrozumienia problemu badawczego zostały podzielone na trzy etapy.

W pierwszym etapie dobrano właściwą konfigurację do przeprowadzenia analizy modalnej, która pozwoliła otrzymać widmo pozbawione sygnałów niepożądanych (np. drgań z otoczenia lub samej maszyny), nazywanych dalej zakłóceniami. Ponadto zbadano metody dokonywania analizy, sposób mocowania akcelerometru, końcówki młotka modalnego oraz kierunki wymuszenia względem kierunku rejestrowanej odpowiedzi.

W drugim etapie zbadano siedem próbek profili, które zostały przygotowane do badań (rys. 9.4). Porównano wzorzec prawidłowo zgrzany z profilami, w których występują niezgodności zgrzewalnicze w postaci braku zgrzanych nakrętek. Badania prowadzone były bez ośrodka, którym jest przyrząd zgrzewalniczy zamocowany na zgrzewarce. Przeprowadzenie tych badań miało na celu weryfikację założenia dotyczącego zastosowania analizy modalnej do wykrywania możliwych niezgodności podczas procesu zgrzewania wielopunktowego. Wyniki tych badań ukazały różnice w częstotliwości rezonansowych dla rozważanych przypadków.

Trzecim etapem było wykonanie pomiarów dla detali umieszczonych w ośrodku badanym (przyrząd wraz ze zgrzewarką) po wykonanym procesie zgrzewania wielopunktowego garbowego. Etap ten odzwierciedlał różne warianty braków zgrzania nakrętek (wszystkie zgrzane, część zgrzana bądź żadna), co pozwoliło w kolejnym kroku na dobór odpowiedniego algorytmu pozwalającego na analizę porównawczą odpowiednich widm amplitudowych drgań w celu oszacowania jakości połączeń zgrzanego detalu.

11.1. Konfiguracja analizy modalnej

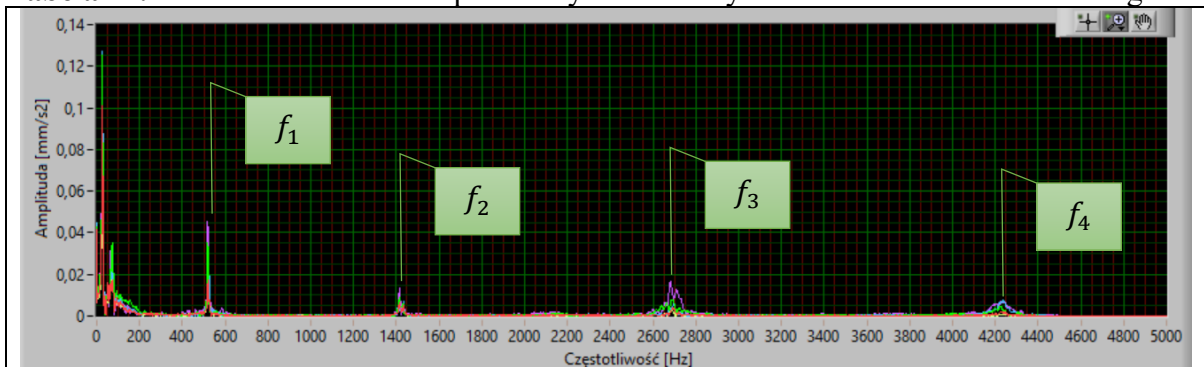
Konfigurację analizy rozpoczęto od zbadania wpływu końcówki, którą dokonane jest wymuszenie młotkiem modalnym na sygnał odpowiedzi układu. W tabeli (tab. 11.1) zostały zebrane sygnały wygenerowane przez różnego rodzaju końcówki dołączone przez producenta do młotka modalnego. Eksperyment opierał się na badaniu detalu wzorcowego z umiejscowionym symetrycznie na nim akcelerometrem oraz równoległym do niego punktem wzbudzenia.

Zgodnie ze specyfikacją (rys. 11.5) dostarczoną przez producenta do badań wytypowano stalowe zakończenie (producent deklaruje przedział częstotliwości w dziedzinie $f \in (0 - 6000 \text{ Hz})$). Podsumowanie z badania końcówek młotka modalnego:

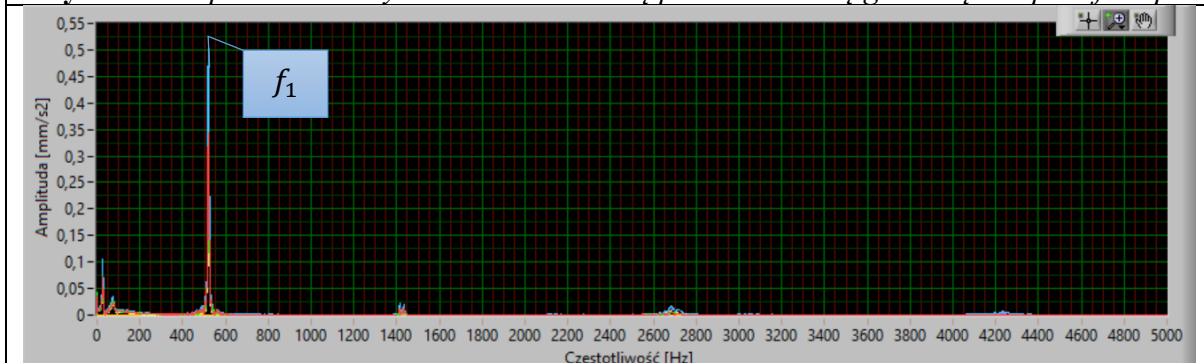
- Końcówka stalowa jako jedyna generuje sygnał bez zakłóceń w całym przedziale dziedziny (rys. 11.4).
- Trzy zbadane końcówki wskazały przynajmniej cztery częstotliwości rezonansowe. Końcówka z czarnej gumy nie wskazała dodatkowych częstotliwości rezonansowych (rys. 11.1, 11.2, 11.3, 11.4).
- Końcówki gumowe wywołały wyraźną częstotliwość rezonansową tylko w przedziale $f \in 0 - 1000 \text{ Hz}$, powyżej tej częstotliwości nie zobrazowały wyraźnych dodatkowych postaci drgań układu (rys. 11.1; 11.2).
- Końcówka stalowa oraz z peek (Polieteroeteroketon) wykazały dodatkowe częstotliwości rezonansowe w wyższych częstotliwościach (rys. 11.4).

Ze względu na wyniki badań numerycznych, w których zostały wyznaczone pasma maksymalnej badanej częstotliwości, w której końcówka młotka musi pokrywać cały przedział częstotliwości. Tylko stalowa spełnia warunek $f \in (0 - 5000 \text{ Hz})$ w całym paśmie częstotliwości (Rys. 11.5).

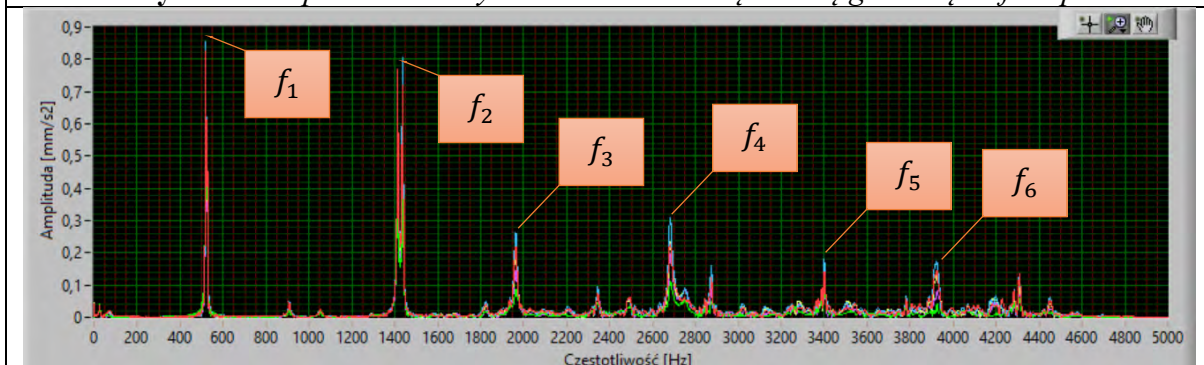
Tabela 11.1 Zestawienie widm amplitudowych dla różnych końcówek młotka modalnego.



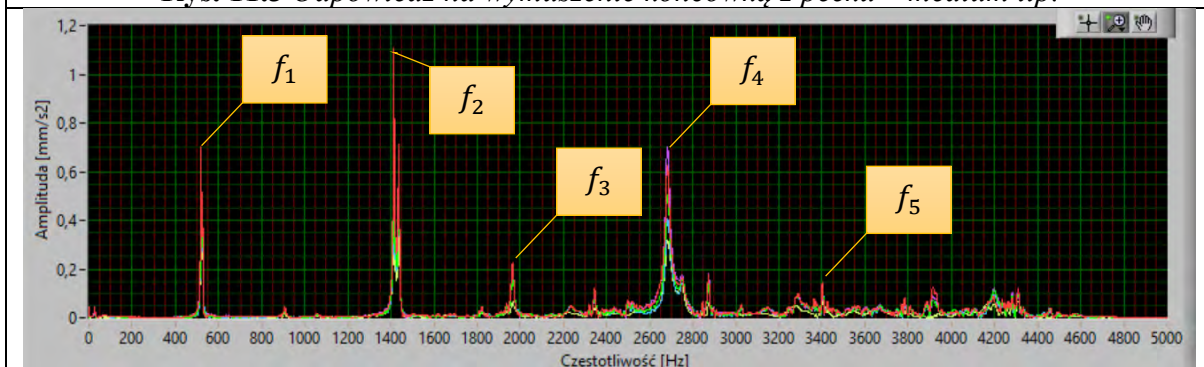
Rys. 11.1 Odpowiedź na wymuszenie końcówką pomarańczową gumową – super sfot tip.



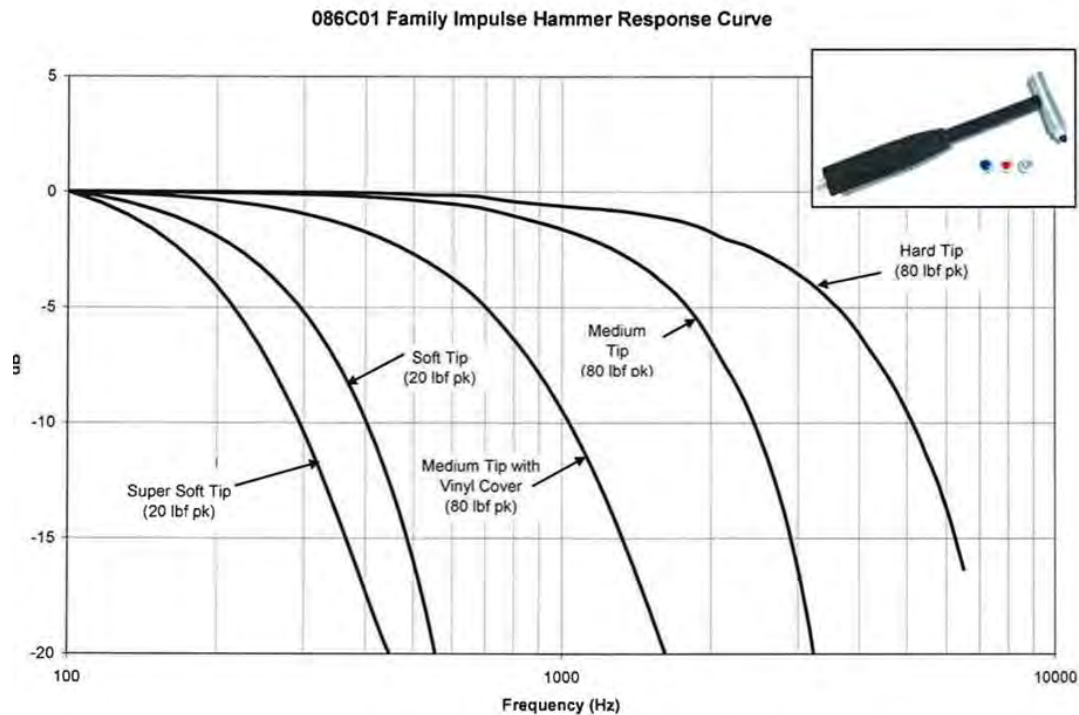
Rys. 11.2 Odpowiedź na wymuszenie końcówką czarną gumową – sfot tip.



Rys. 11.3 Odpowiedź na wymuszenie końcówką z peku – medium tip.



Rys. 11.4 Odpowiedź na wymuszenie końcówką stalową – hard tip.

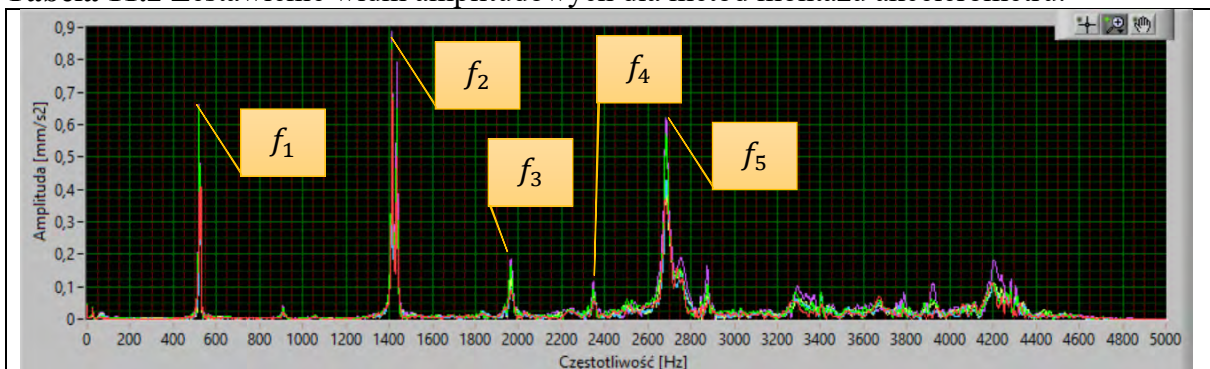


Rys. 11.5 Charakterystyka pasm częstotliwości pomiarowych dla końcówek młotka modalnego.

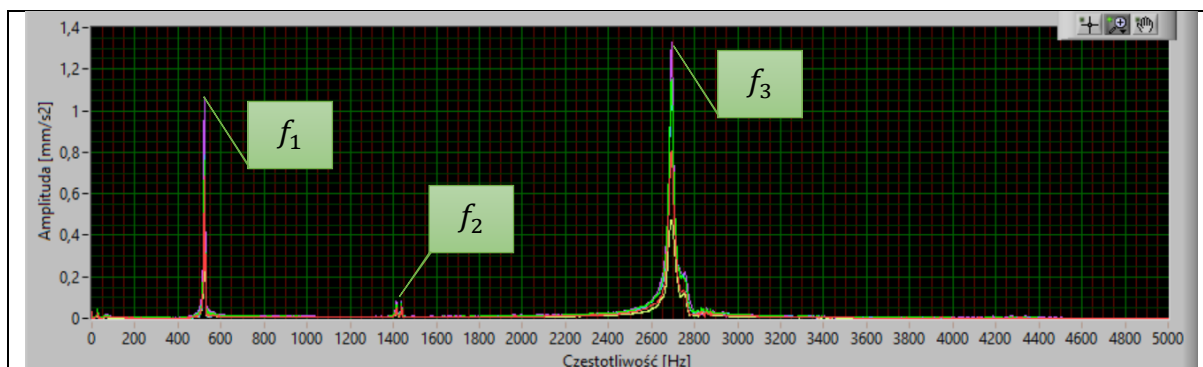
Następnym krokiem w konfiguracji było zbadanie wpływu jaki niesie ze sobą sposób montażu akcelerometru na obiekcie badanym. Sprawdzone zostały dwa rodzaje zamocowania akcelerometru: przy użyciu wosku pszczelego oraz za pomocą elektromagnesu. W tabeli 11.2 zebrano sygnały odpowiedzi układu względem sposobu mocowania.

Mocowanie za pomocą wosku pszczelego wygenerowało sygnał posiadający trzy częstotliwości rezonansowe dla badanej próbki (rys. 11.6), natomiast w przypadku mocowania akcelerometru za pomocą elektromagnesu sygnał cechował się pięcioma częstotliwościami rezonansowymi (rys. 11.7). Mocowanie przy użyciu wosku pszczelego nie generuje zakłóceń, natomiast w przypadku elektromagnesu zdarzały się próby, w których sygnał posiadał zakłócenia w postaci zmienności na przebiegu amplitudy (rys. 11.6). Oba sposoby mocowania prawidłowo wskazały częstotliwości rezonansowe (rys. 11.6; 11.7), ponieważ kolumny jako miejsca pomiarowe najbliżej detalu na przyrządzie wykonane są mosiądzu, który nie posiada własności magnetycznych, z uwagi na ten fakt do dalszych badań akcelerometr mocowany został przy użyciu wosku pszczelego.

Tabela 11.2 Zestawienie widm amplitudowych dla metod montażu akcelerometru.

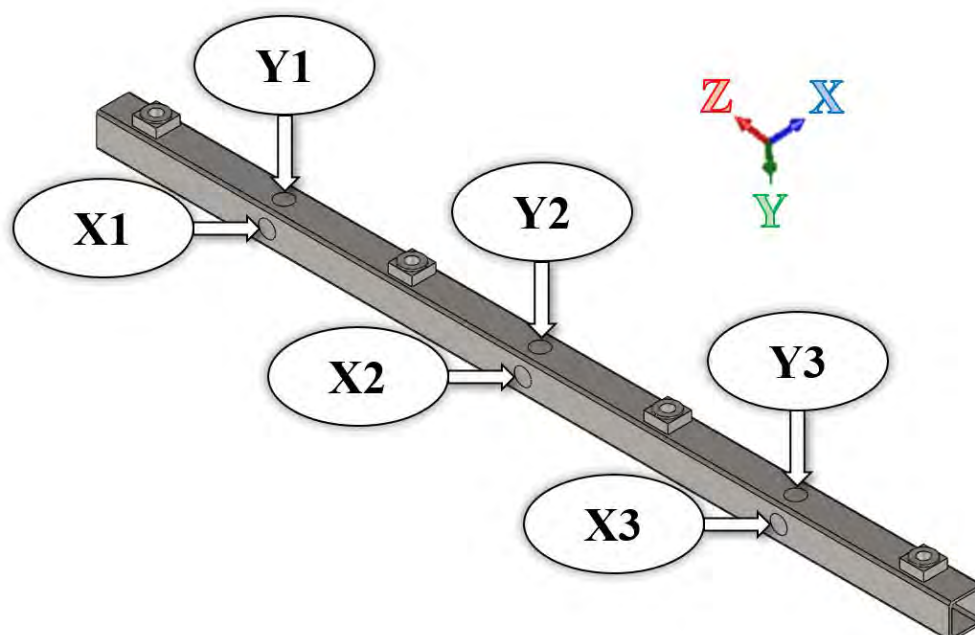


Rys. 11.6 Odpowiedź na wymuszenie akcelerometr zamontowany przy użyciu magnesu.



Rys. 11.7 Odpowiedź na wymuszenie akcelerometr zamontowany przy użyciu wosku pszczelego.

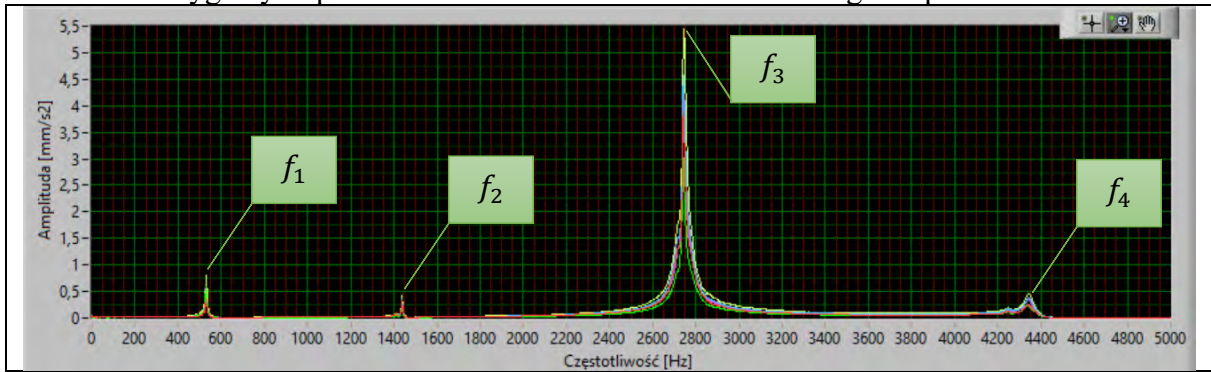
Kolejnym krokiem badawczym we wstępnej konfiguracji było zbadanie wpływu kierunku wymuszenia oraz rejestrowania odpowiedzi układu. W tym celu na profilu wyszczególniono 6 punktów (rys. 11.8) – 3 w osi Y oraz 3 w osi X.



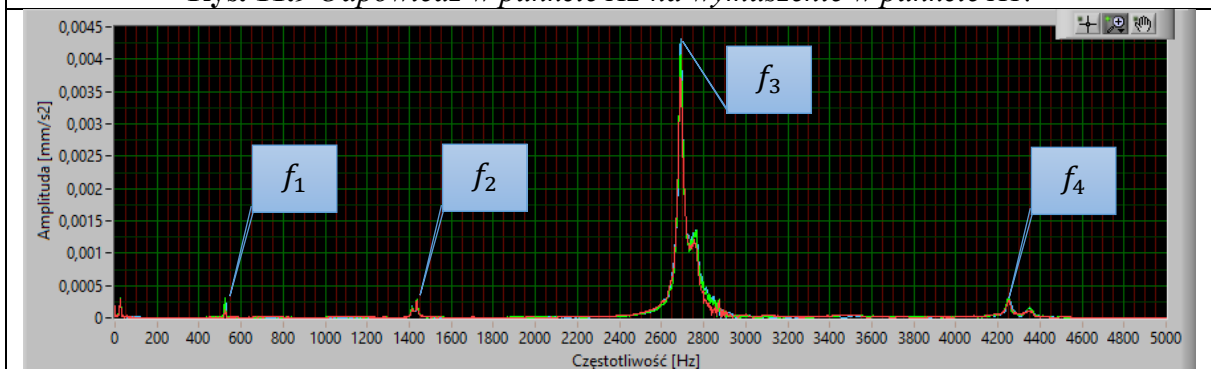
Rys. 11.8 Detal z podziałem na punkty, w których dokonane jest wymuszenie oraz zbierana odpowiedź układu.

Następnie umiejscowiono akcelerometr we wszystkich zaznaczonych punktach, dokonując wymuszenia w wszystkich pozostałych pięciu punktach. Wyniki dla czterech odpowiedzi, które posiadały największą liczbę częstotliwości rezonansowych zamieszczono w tabeli (tab. 11.3). Na podstawie wykresów odpowiedzi (rys. 11.9 - 11.12) wynika, iż wymuszenie zgodnie z kierunkiem jak i prostopadle do osi pomiarowej akcelerometru cechuje się czterema wyraźnymi częstotliwościami rezonansowymi. W przypadku pomiarów prostopadłych jak i równoległych sygnał odpowiedzi cechuje się brakiem zakłóceń oraz przynajmniej trzema częstotliwościami rezonansowymi. Wspólna częstotliwość rezonansowa o największej amplitudzie we wszystkich przypadkach pojawia się dla przedziału $f \in (2500-2800 \text{ Hz})$. Przedział ten jest szczególnie istotny w badaniach braku nakrętek pomiędzy poszczególnymi detalami. Jako punkt pomiarowy wytypowano konfigurację pokazaną na rysunku (rys. 11.10). Uderzenie następuje w punkcie Y2, natomiast odpowiedź rejestrowana jest w punkcie X2 (rys. 11.8).

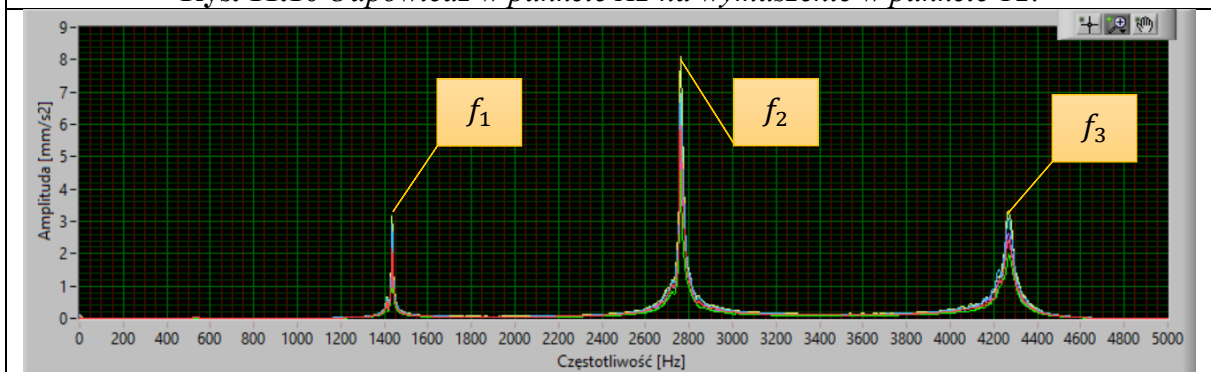
Tabela 11.6 Sygnały odpowiedzi dla akcelerometru zamocowanego na próbce.



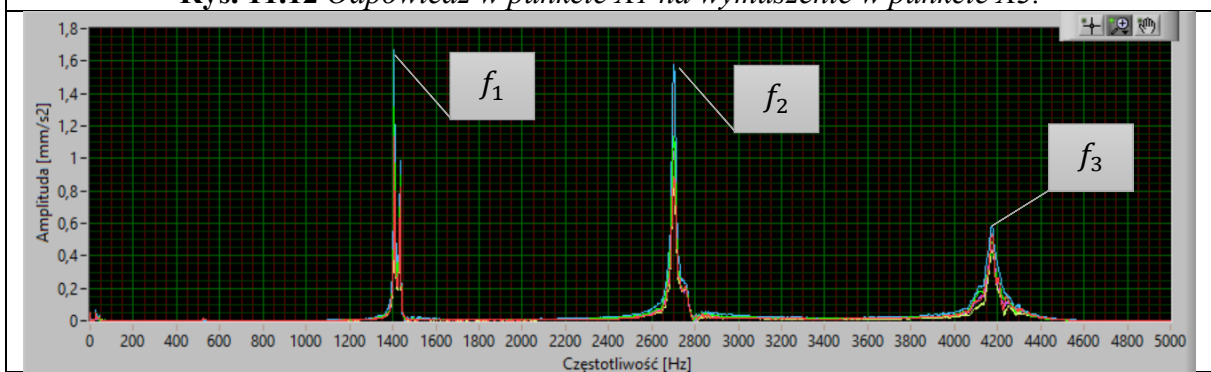
Rys. 11.9 Odpowiedź w punkcie X2 na wymuszenie w punkcie X1.



Rys. 11.10 Odpowiedź w punkcie X2 na wymuszenie w punkcie Y2.



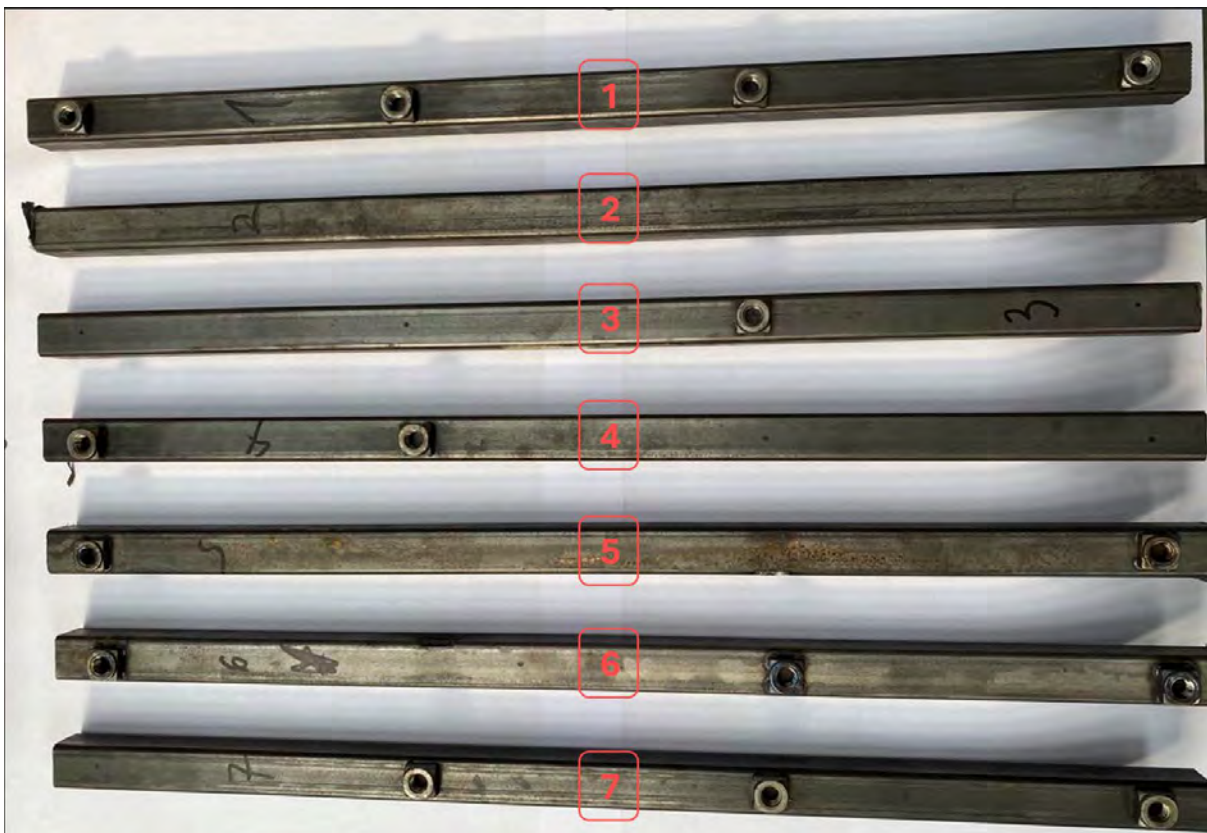
Rys. 11.12 Odpowiedź w punkcie X1 na wymuszenie w punkcie X3.



Rys. 11.13 Odpowiedź w punkcie Y1 na wymuszenie w punkcie X3.

11.2. Badanie detali

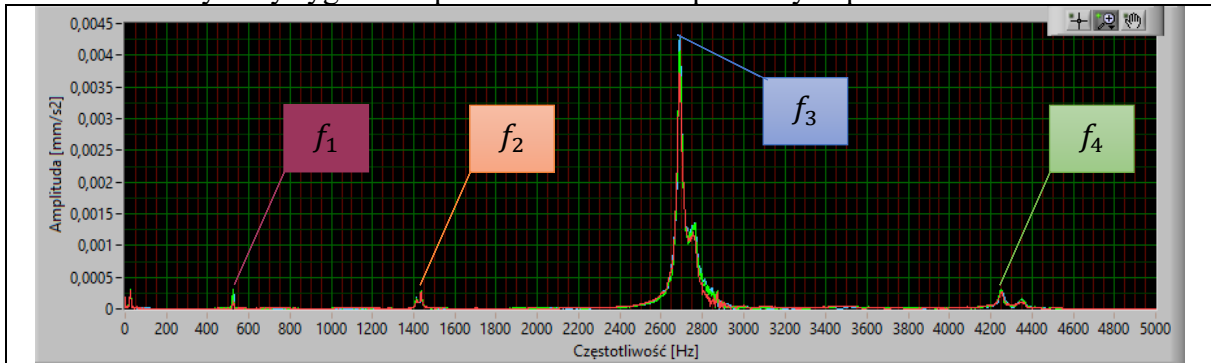
Na podstawie wstępnych badań przeprowadzonych na detalu wzorcowym ustalono konfigurację prowadzenia badań. W ramach badań przeprowadzono testy dla 7 próbek o znicowanej konfiguracji (rys. 11.14). Widma odpowiedzi dla trzech pierwszych detali zebrano w tabeli (tab. 11.7), wraz z nałożonym białym sygnałem detalu wzorcowego nr 1. Pozostałe wyniki częstotliwości rezonansowych zebrano w tabeli zestawiającej wszystkie zbadane próbki (tab. 11.8). Pomiar odbywał się zgodnie z konfiguracją wytypowaną w poprzednim rozdziale (uderzenie następuje w punkcie Y2, natomiast odpowiedź rejestrowana jest w punkcie X2 (rys. 11.8)). Dokonywane były poprzez pięciokrotne uderzenie dla każdego mocowania akcelerometru (mocowanie zostało powtórzone trzykrotnie w celu wyeliminowania błędów przemieszczeniem punktu mocowania akcelerometru). Odpowiedź w dziedzinie częstotliwości została uśredniona poprzez średnią arytmetyczną.



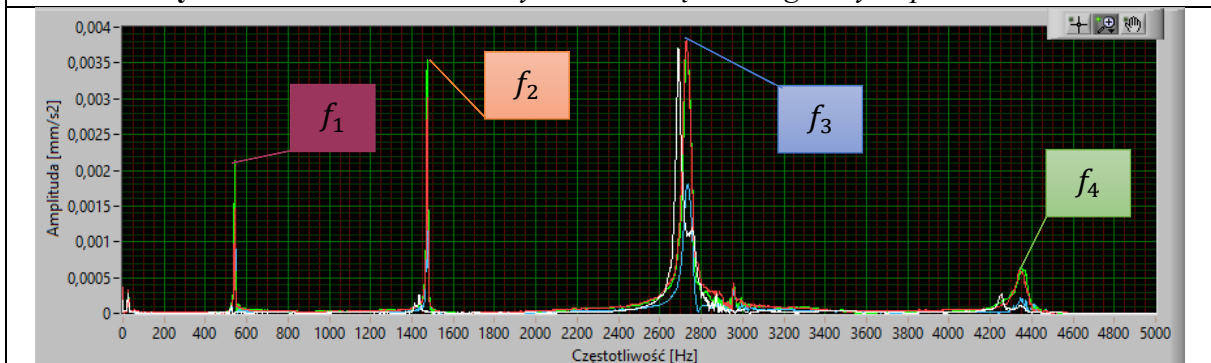
Rys. 11.14 *Próbki detali do badań: 1 – detal wzorcowy; 2 – profil bez zgrzanej nakrętki; 3- profil bez nakrętki 1, 2 oraz 4; 4 – profil bez nakrętki 3 oraz 4; 5 – profil bez nakrętki 2 oraz 3; 6 – profil bez nakrętki numer 2; 7 – profil bez nakrętki numer 1.*

Wykresy odpowiedzi w dziedzinie częstotliwości dla wszystkich próbek posiadały cztery wyraźne częstotliwości rezonansowe, które zostały zebrane w tabeli (tab. 11.8). Porównując częstotliwości rezonansowe f_1 (rys. 10.18) pomiędzy poszczególnymi próbkami widać wyraźną zmianę częstotliwości w wyniku braku poszczególnych nakrętek. Wykresy dla pozostałych częstotliwości rezonansowych f_2 (rys. 10.19), f_3 (rys. 10.20), f_4 (rys. 10.21) również dowodzą zmiany częstotliwości w wyniku braku nakrętki w badanym komponencie. Największe zmiany zachodzą dla częstotliwości o największej amplitudzie f_3 . Badanie wstępne detali potwierdza możliwość zastosowania analizy modalnej do oceny komponentów zgrzewanych garbowo wielopunktowo.

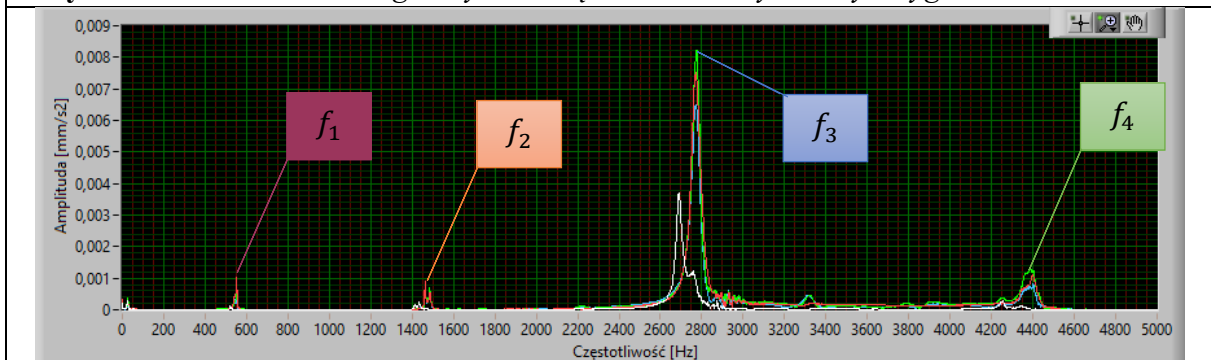
Tabela 11.7 Wykresy sygnału odpowiedzi dla trzech pierwszych próbek.



Rys. 11.15 Detal nr 1 ze wszystkimi nakrętkami zgrzanymi prawidłowo

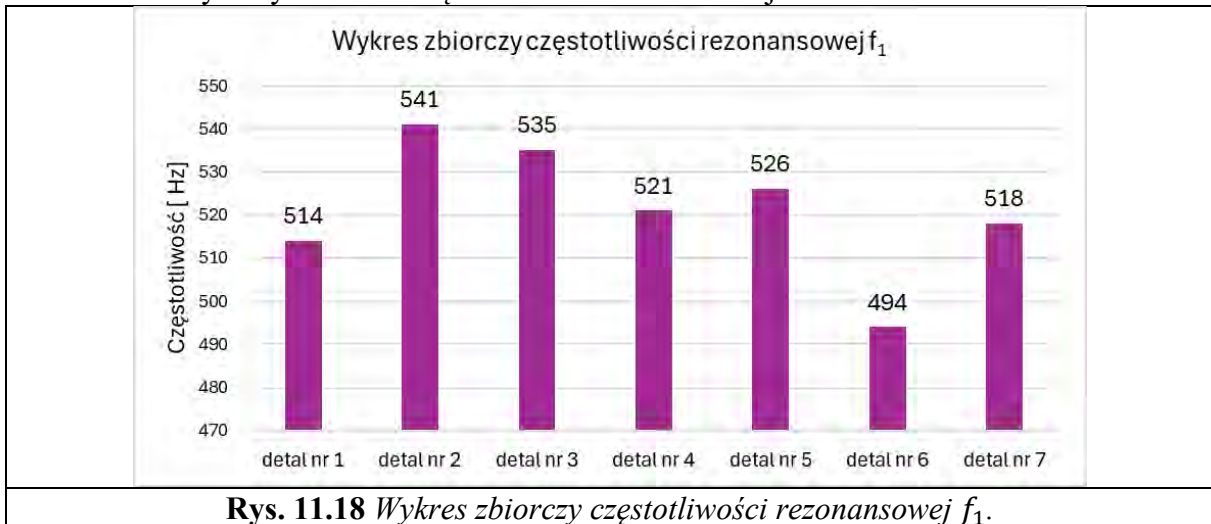


Rys. 11.16 Detal nr 2 bez zgrzanych nakrętek z nałożonym białym sygnałem detalu nr 1.

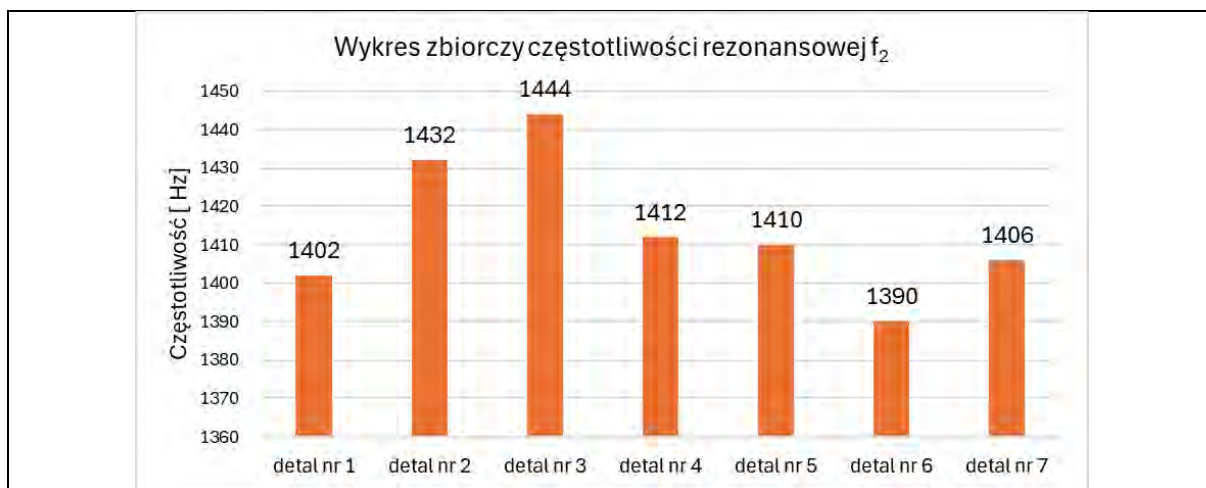


Rys. 11.17 Detal nr 3 bez zgrzanej nakrętki 1, 2 i 4 z nałożonym białym sygnałem detalu nr 1.

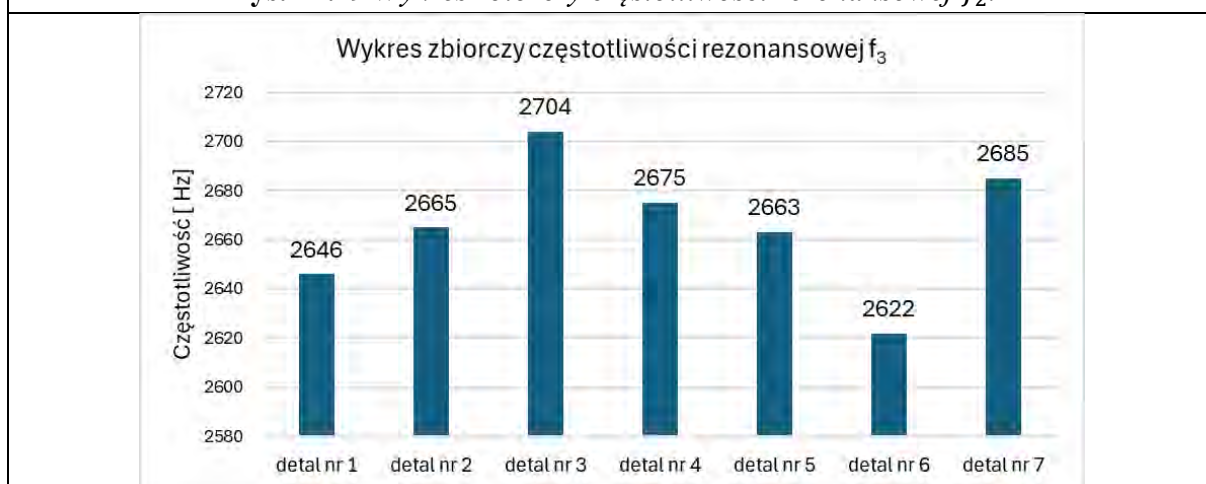
Tabela 11.8 Wykresy zbiorcze częstotliwości rezonansowej.



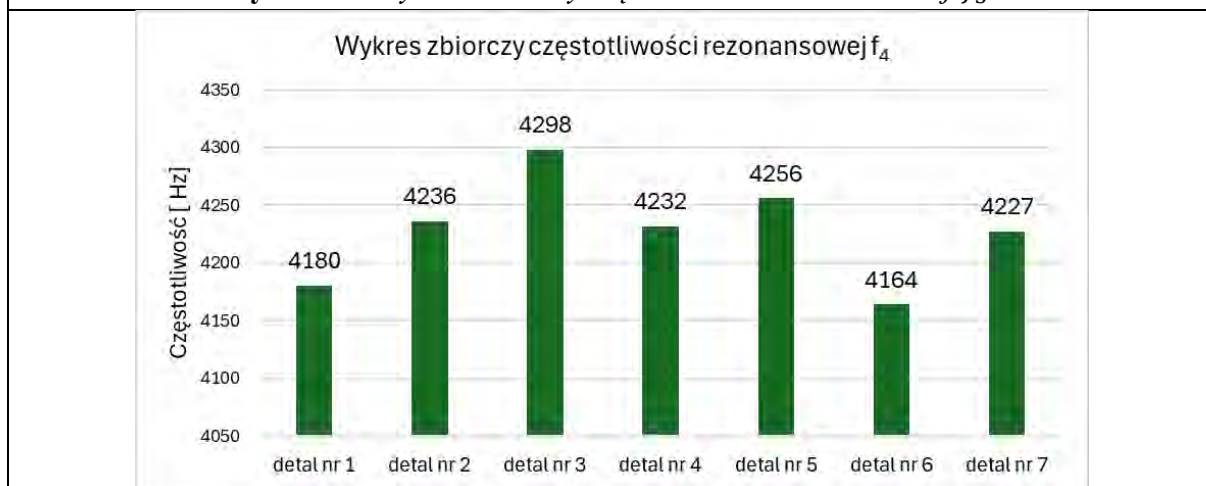
Rys. 11.18 Wykres zbiorczy częstotliwości rezonansowej f_1 .



Rys. 11.19 Wykres zbiorczy częstotliwości rezonansowej f_2 .



Rys. 11.20 Wykres zbiorczy częstotliwości rezonansowej f_3 .



Rys. 11.21 Wykres zbiorczy częstotliwości rezonansowej f_4 .

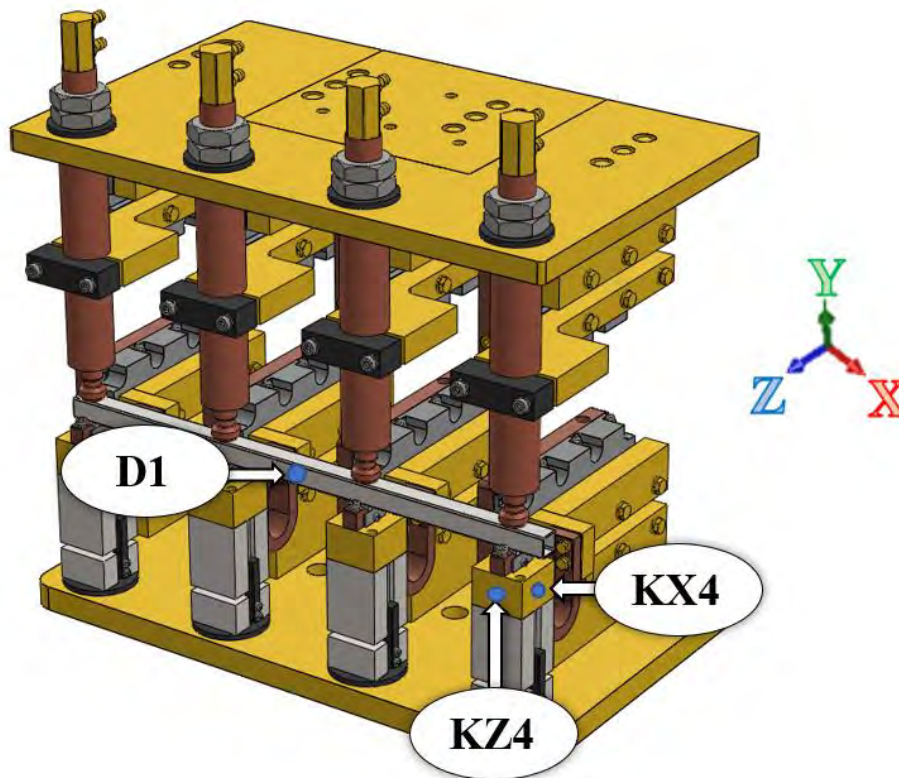
11.3. Badanie stanowiska

Następnym krokiem badawczym było przebadanie przy użyciu analizy modalnej stanowiska zgrzewalniczego (rys. 11.22). Przyrząd zgrzewalniczy z punktami charakterystycznymi pokazano na rysunku (rys. 10.7), dla których zostało sprawdzone widmo dla próbki wzorcowej nr 1.



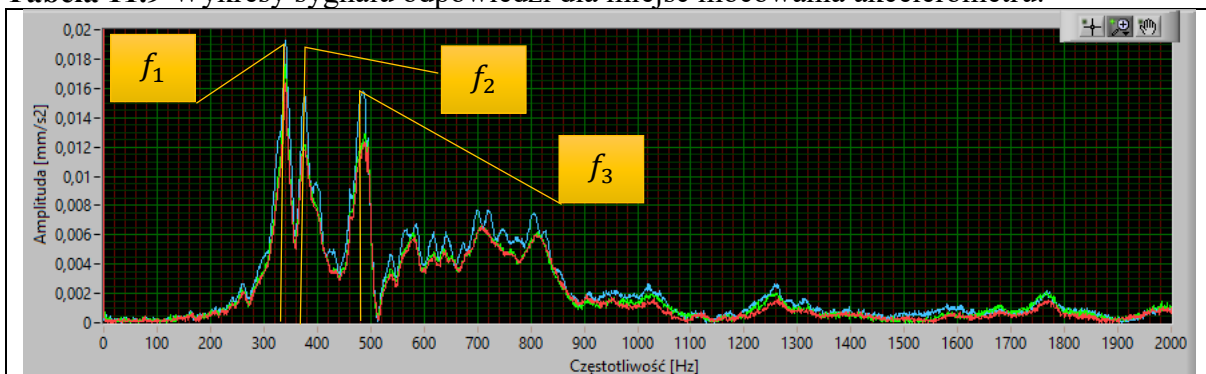
Rys. 11.22 *Stanowisko zgrzewalnicze do badania jakości komponentów z zastosowaniem analizy modalnej.*

W pierwszej kolejności sprawdzono miejsca wymuszenia próbki oraz mocowania akcelerometru. Wytypowano w tym celu trzy punkty KX4, KZ4 oraz D1, w których zamocowany był akcelerometr (rys. 11.23). Punkty te zostały wytypowane w oparciu o analizę numeryczną, w której występowały maksymalne wartości przemieszczenia dla przedziału częstotliwości $f \in (400 - 800 \text{ Hz})$ pojawiały się na kolumnach, natomiast dla przedziału $f \in (2400 - 3300 \text{ Hz})$ odkształcenie pojawiało się na próbkach poddawanych badaniom. Dla punktów tych wymuszenie następowało w punktach zaznaczonych na schemacie w rozdziale 10 (rys. 10.7). Badanie odbywało się pod działaniem siły docisku o wartości 12 kN .

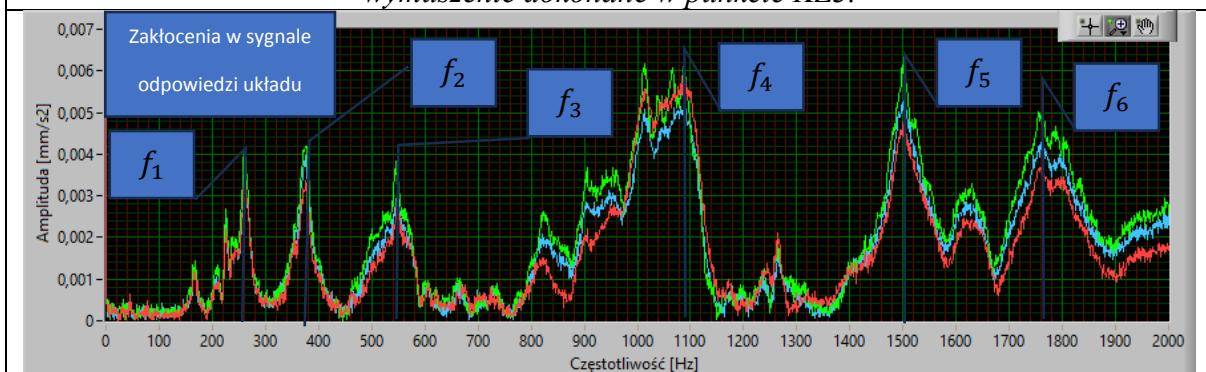


Rys. 11.23 Punkty mocowania akcelerometru na badanym układzie.

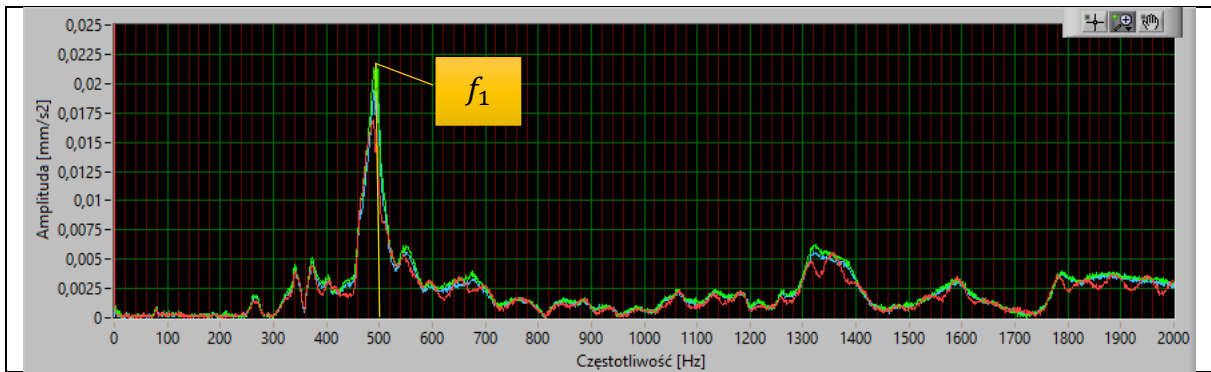
Tabela 11.9 Wykresy sygnału odpowiedzi dla miejsc mocowania akcelerometru.



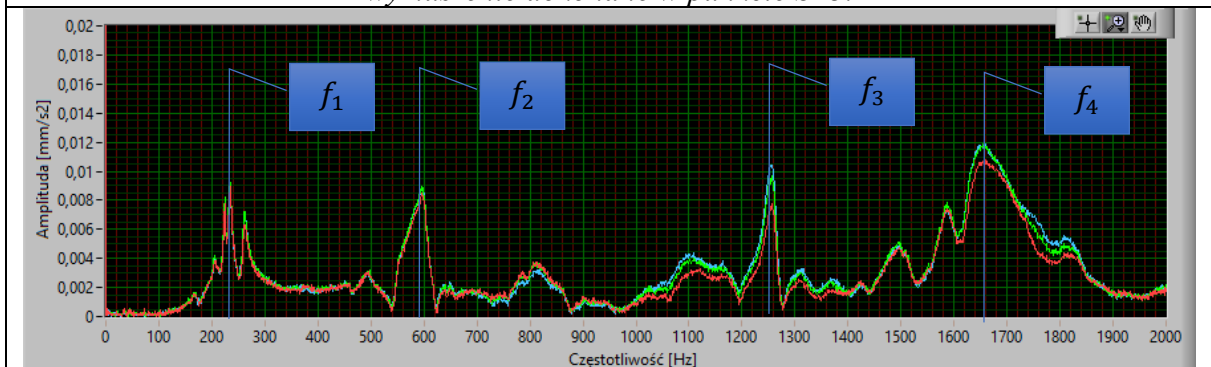
Rys. 11.24 Akcelerometr zamocowany w punkcie KZ4, wymuszenie dokonane w punkcie KZ3.



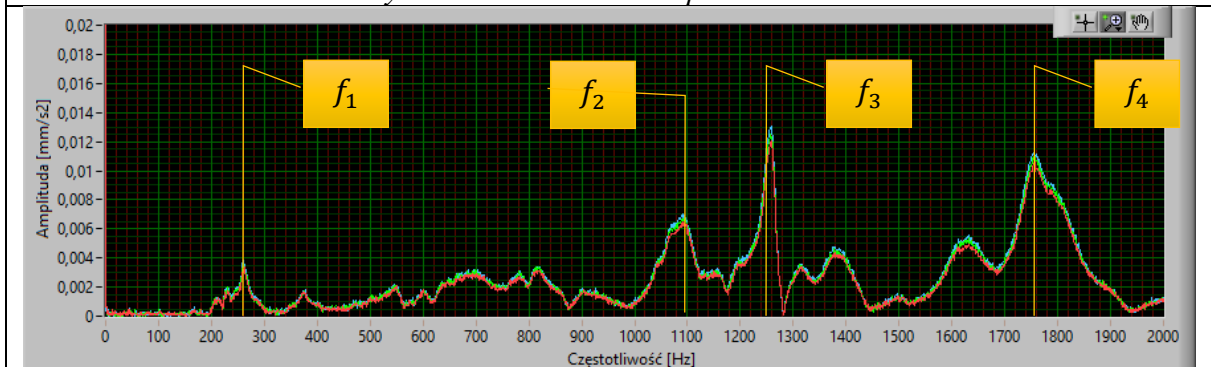
Rys. 11.25 Akcelerometr zamocowany w punkcie KZ4, wymuszenie dokonane w punkcie KX4.



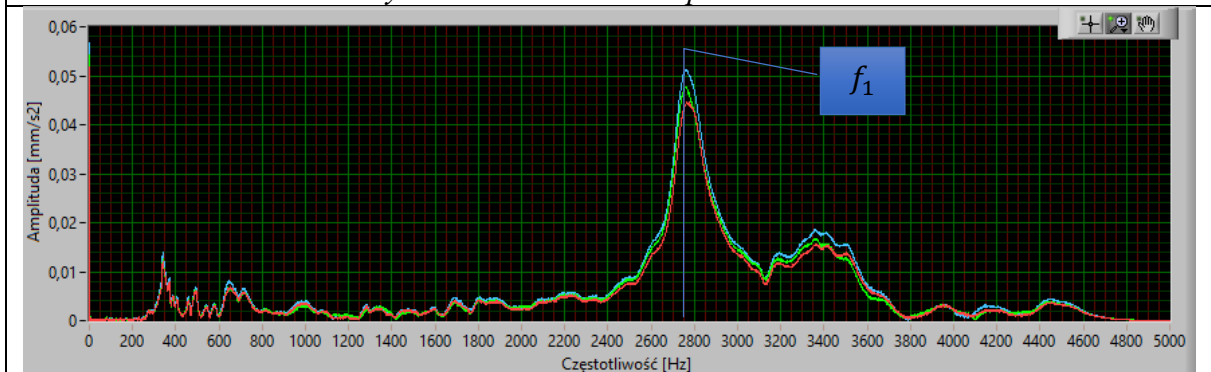
Rys. 11.26 Akcelerometr zamocowany w punkcie KZ4, wymuszenie dokonane w punkcie SZ3.



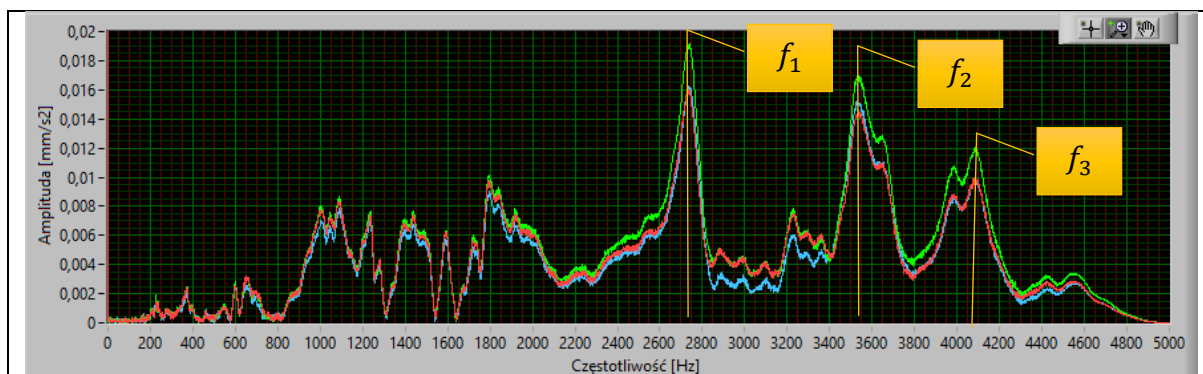
Rys. 11.27 Akcelerometr zamocowany w punkcie KX4, wymuszenie dokonane w punkcie SX4.



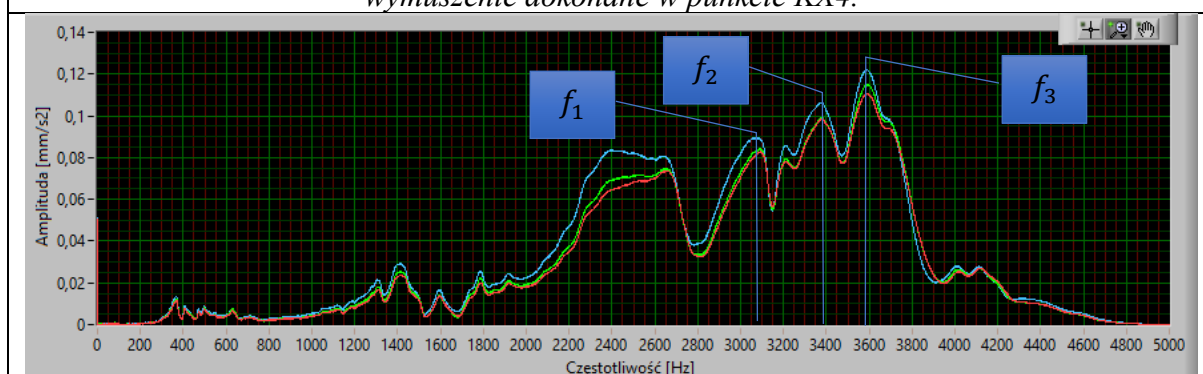
Rys. 11.28 Akcelerometr zamocowany w punkcie KX4, wymuszenie dokonane w punkcie SZ4.



Rys. 11.29 Akcelerometr zamocowany w punkcie D1, wymuszenie dokonane w punkcie KZ4.



Rys. 11.30 Akcelerometr zamocowany w punkcie D1, wymuszenie dokonane w punkcie KX4.



Rys. 11.31 Akcelerometr zamocowany w punkcie D1, wymuszenie dokonane w punkcie SZ3.

Najistotniejsze wyniki zebrano w tabeli 11.9 w postaci wykresów, na których zaznaczano częstotliwości znaczące dla eksperymentu. Wykresy odpowiedzi (rys. 11.29, Rys. 11.30) posiadają widmo pozbawione zakłóceń, prezentują wyraźną częstotliwość rezonansową dla $f_1 = 2763 \text{ Hz}$, pokrywającą się z przedziałem wytypowanym w badaniach numerycznych. Punkt mocowania D1 posiada największe amplitudy dla częstotliwości powyżej 1000 Hz . Pomimo braku największej liczby częstotliwości rezonansowych punkt D1 prezentuje postać o największym znaczeniu dla badań, ponieważ wielkość przyspieszenia odczytywana jest bezpośrednio z detalu badanego prowadząc do największych różnic w częstotliwości rezonansowej.

Podczas rejestracji sygnałów z akcelerometrów zamontowanych na kolumnach stwierdzono, że użyteczny zakres dziedzin zwiera się w przedziale $f \in (0 - 2000 \text{ Hz})$ (powyżej częstotliwości $f = 2000 \text{ Hz}$ zarejestrowane zostały zakłócenia sygnału). Dziedzina na wykresach odpowiedzi dla punktów KZ4 oraz KX4 została ograniczona do tego przedziału.

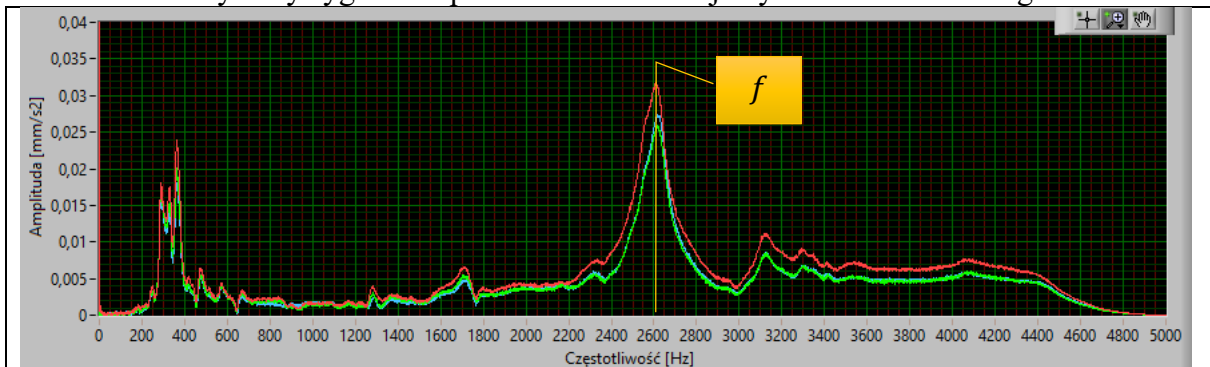
Mocowanie akcelerometru na kolumnie w punkcie KZ4 pozwala zarejestrować sygnały postaci rezonansu dla częstotliwości poniżej 1000 Hz . Wykresy (rys. 11.24, Rys. 11.25, Rys. 11.26) obrazują wyraźne częstotliwości rezonansowe w przedziale wytypowanym w badaniach numerycznych $f \in (400 - 800 \text{ Hz})$. Dla mocowania akcelerometru w punkcie KZ4, wymuszenie powinno następować równoległe do osi akcelerometru.

Mocowanie w punkcie KX4 (rys. 11.27, Rys. 11.28) wykazuje częstotliwości rezonansowe $f_3 = 1256 \text{ Hz}$ dla przedziału $f \in (1000 - 2000 \text{ Hz})$, który pokrywa się z badaniami numerycznymi, w których częstotliwość rezonansowa wynosiła odpowiednio $f_3 = 1240 \text{ Hz}$. Częstotliwość rezonansowa prowadzi do postaci drgań, w wyniku, których ulegała deformacji kolumna 1 oraz 4 tylko głównie w kierunku osi X (rys. 10.54). Przedział ten pozwala na ocenę głównie przygrzania nakrętki znajdującej się na kolumnie numer 4.

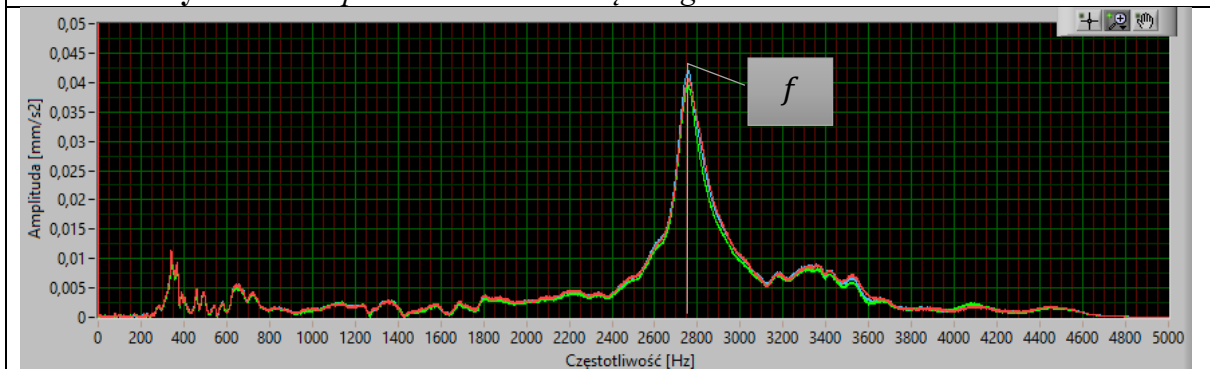
Do badania niezgodności na detalach wytypowano mocowanie akcelerometru w punkcie D1, a wymuszenie dokonane zostało w punktach KZ4 oraz KX4. Badania dowodzą, że pomiar dla mocowania akcelerometru na kolumnach w osi Z również jest właściwy z uwagi na postać drgań przypadająca dla $f_1 = 495 \text{ Hz}$ (rys. 11.26), która pokrywa się z badaniami numerycznymi dla tego kierunku.

Kolejno zweryfikowany został wpływ siły generowanej przez elektrody zgrzewarki na odpowiedź generowaną przez detal wzorcowy. W tym celu zostały zadane siły docisku o wartości 3, 6, 9 oraz 12 kN, podczas, której następowało wymuszenie próbki w punkcie KZ4 (punkt wybrany został w oparciu o widmo (rys. 11.29), które posiada pojedynczą wartość częstotliwości rezonansowej, która pozwala na jednoznaczny wpływ siły układu dociskowego na widmo amplitudowe). Wyniki dla dwóch sygnałów odpowiedzi względem zadanej siły docisku zgrzewarki zebrano w tabeli (tab. 11.10). Sygnał odpowiedzi podczas działania siły docisku 3 kN (rys. 11.32) posiada wyraźne zakłócenie, które może wpływać na analizę sygnału. Sygnał odpowiedzi podczas działania siły docisku 12 kN (rys. 11.33) nie posiada widocznych zakłóceń oraz cechuje się większą wartością amplitudy. Do dalszych rozważań zostało przyjęte obciążenie siłą docisku 12 kN podczas eksperymentu.

Tabela 11.10 Wykresy sygnału odpowiedzi dla zadanej siły docisku elektrod zgrzewarki.



Rys. 11.32 Odpowiedź układu obciążonego siłą docisku elektrod 3 kN.

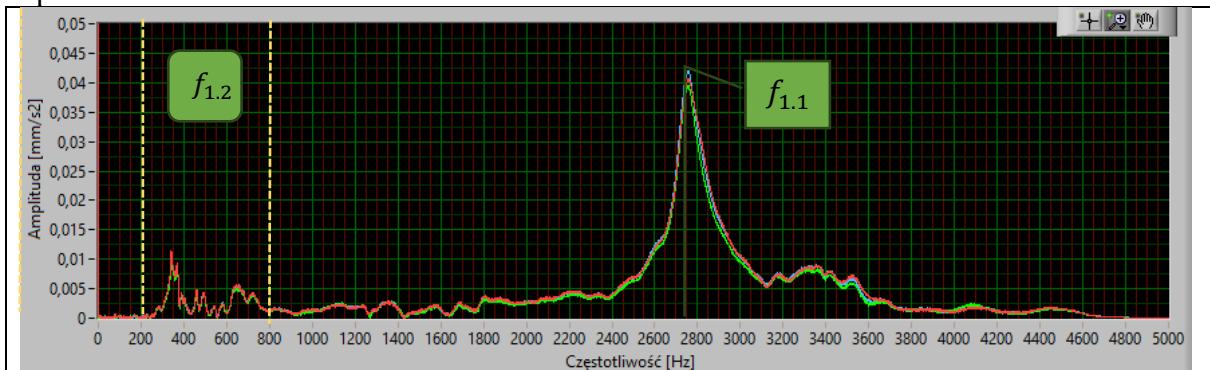


Rys. 11.33 Odpowiedź układu obciążonego siłą docisku elektrod 12 kN.

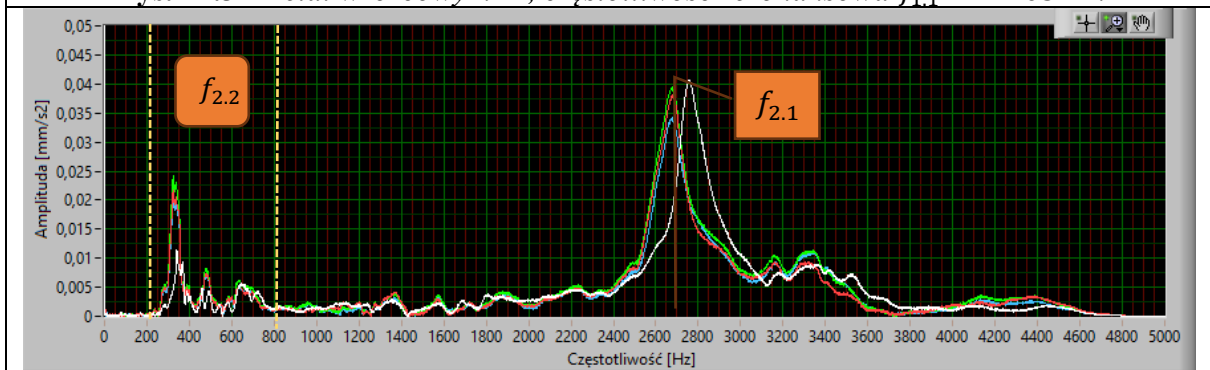
Po zweryfikowaniu powyższych zależności, które wpływają na jakość sygnału generowanego przez analizę modalną stanowiska zgrzewalniczego zdecydowano się na zastosowanie do ostatecznego badania detali siły docisku 12 kN, mocowania akcelerometru w punkcie D1 oraz wymuszeniu układu w punkcie KZ4 oraz KX4. Detale (rys. 11.14) nieposiadające zgrzanych nakrętek były usytuowane na nakrętkach w przyrządzie, ale nie posiadały trwałego połączenia (istniała tylko siła tarcia na styku komponentów) pomiędzy profilem a nakrętką. Miało to na celu symulację braku powstałego połączenia podczas procesu zgrzewania. Wyniki badań detali wymuszonych w punkcie KZ4 zostały przedstawione w tabeli 11.11, natomiast

porównanie częstotliwości rezonansowych pomiędzy punktami KZ4 oraz KX4 przedstawiono na wykresie (rys. 11.41).

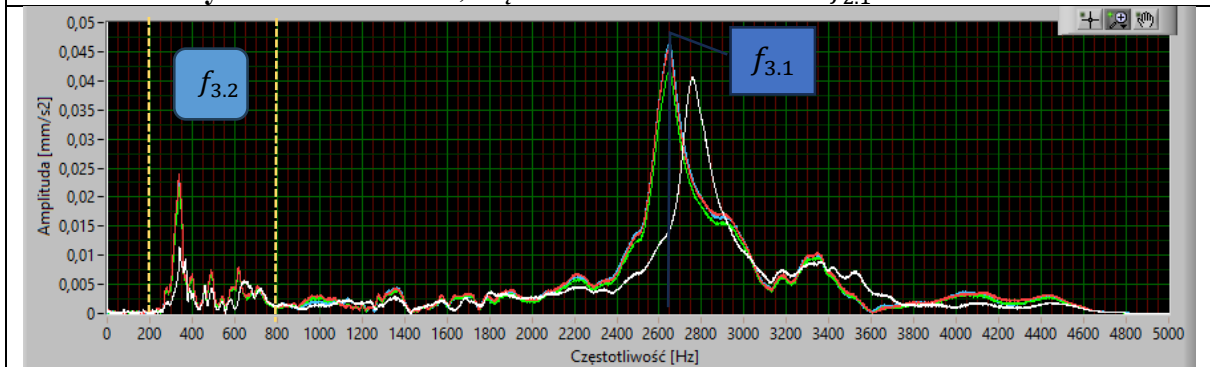
Tabela 11.11 Wykresy sygnału odpowiedzi w punkcie D1 na wymuszenie w postaci impulsu w punkcie KZ4.



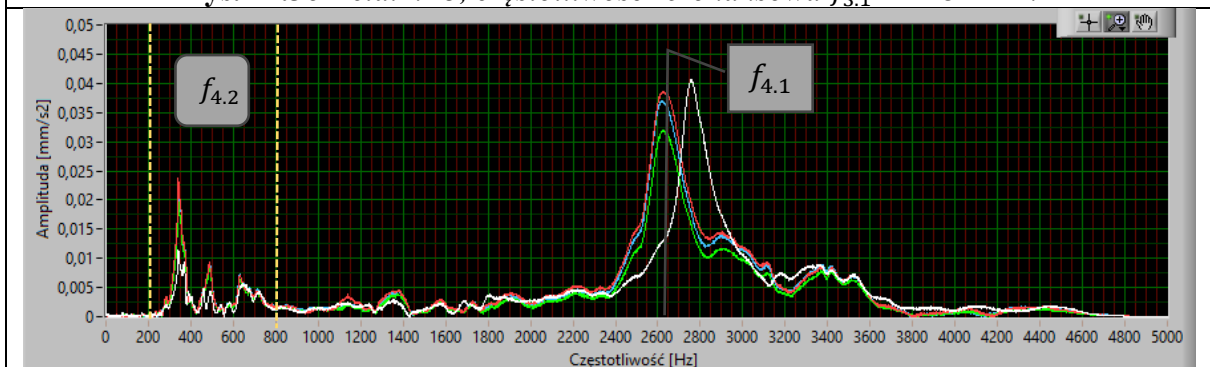
Rys. 11.34 Detal wzorcowy nr 1, częstotliwość rezonansowa $f_{1.1} = 2705$ Hz.



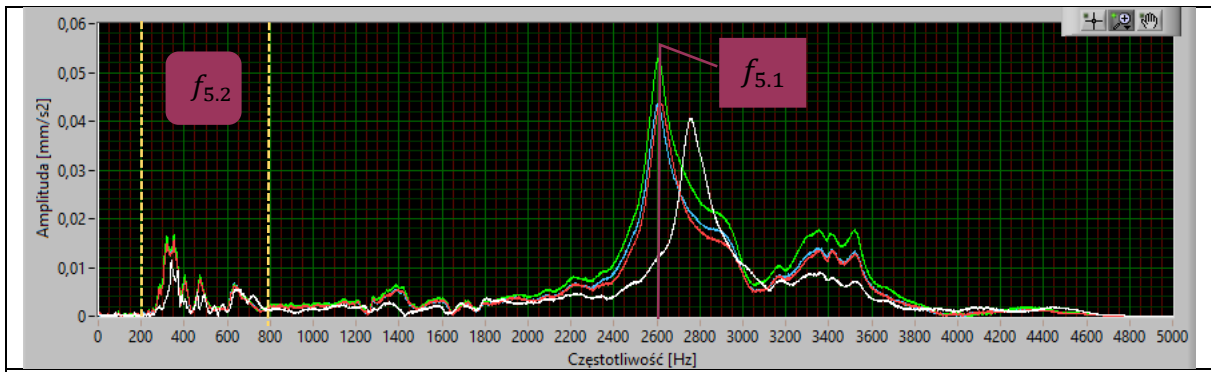
Rys. 11.35 Detal nr 2, częstotliwość rezonansowa $f_{2.1} = 2677$ Hz.



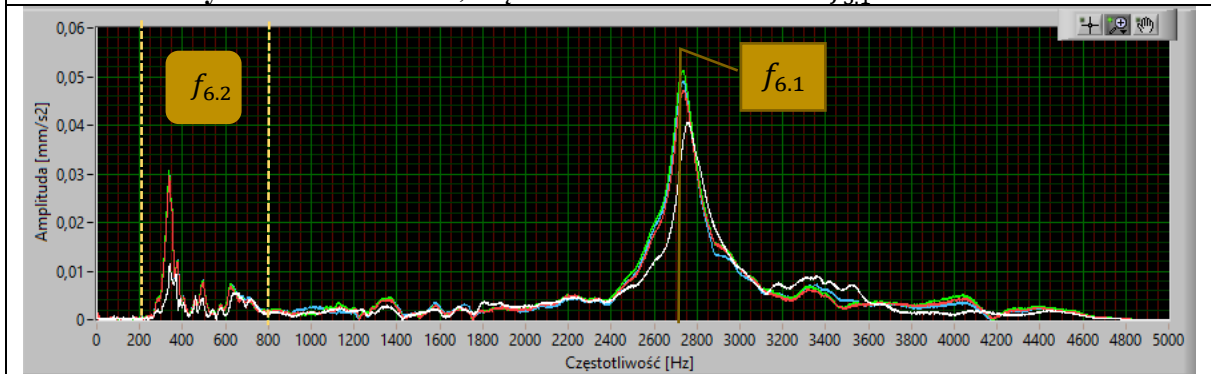
Rys. 11.36 Detal nr 3, częstotliwość rezonansowa $f_{3.1} = 2642$ Hz.



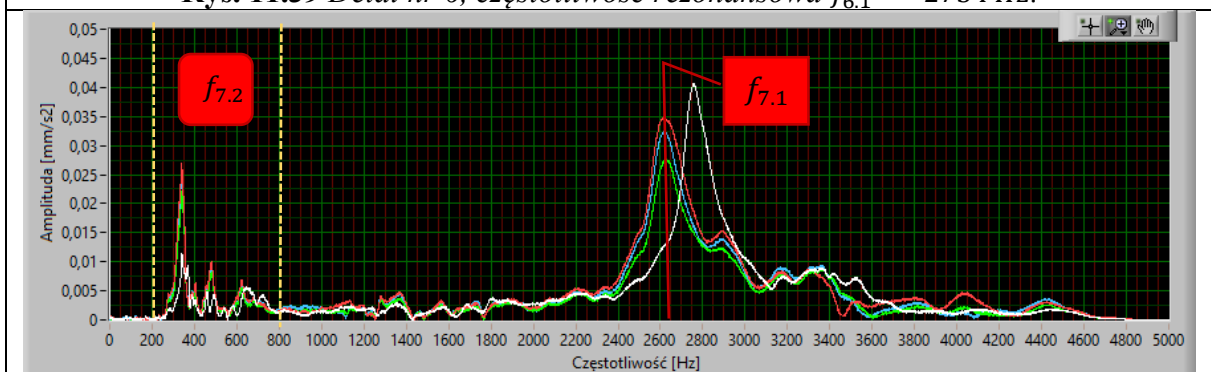
Rys. 11.37 Detal nr 4, częstotliwość rezonansowa $f_{4.1} = 2630$ Hz.



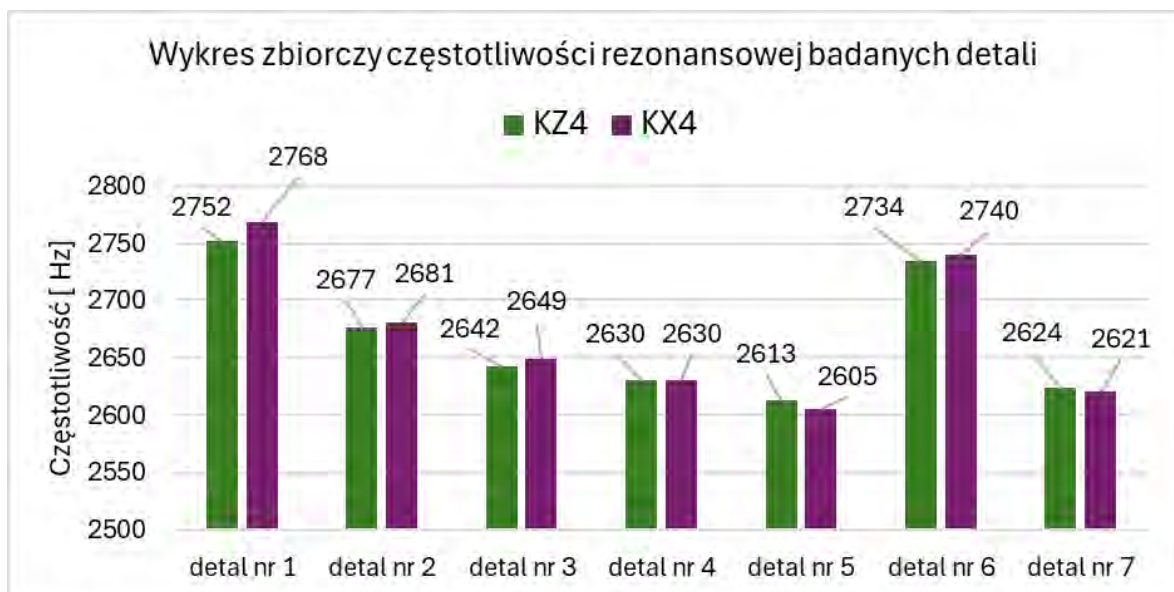
Rys. 11.38 Detal nr 5, częstotliwość rezonansowa $f_{5.1} = 2613$ Hz.



Rys. 11.39 Detal nr 6, częstotliwość rezonansowa $f_{6.1} = 2734$ Hz.



Rys. 11.40 Detal nr 7, częstotliwość rezonansowa $f_{7.1} = 2624$ Hz.



Rys. 11.41 Wykres zbiorczy częstotliwości rezonansowych dla punktu KZ4 oraz KX4.

Analiza przebiegów widm amplitudowych pokazuje, że odpowiedzi dla punktu KZ4 oraz KX4 dowodzą zmiany częstotliwości rezonansowej w wyniku wystąpienia niezgodności w połączeniu profilu z nakrętką. Szczególnie widoczne jest to na wykresie zestawiającym poszczególne częstotliwości rezonansowe (rys. 11.41). Wszystkie wykresy zebrane w tabeli 11.11 obrazują dodatkową postać drgań dla przedziału $f_2 \in (200 - 800 \text{ Hz})$, która posiada mniejszą amplitudę, względem postaci pojawiającej się dla częstotliwości $f_1 \in (2400 - 3300 \text{ Hz})$. Postać dla przedziału f_2 , w badaniach wstępnych była obserwowalna przy mocowaniu akcelerometru na kolumnie w osi Z i również może być zastosowana do weryfikacji jakości komponentów co pokazano w rozdziale 15.

11.4. Podsumowanie badań eksperymentalnych

Uzyskane rezultaty wskazują, że zaobserwowane zmiany częstotliwości dowodzą zmiany częstotliwości rezonansowej dla poszczególnych detali, pozwalają na detekcję niezgodności w połączeniu pomiędzy nakrętką a profilem. Przebieg odpowiedzi w dziedzinie częstotliwości dla kilku mocowań akcelerometru dostarcza więcej częstotliwości rezonansowych dla danej próbki, co może pozwolić na przyszłe określenie miejsca, w którym nakrętka nie została prawidłowo zgrzana.

Analiza modalna jest właściwym narzędziem do oceny jakości detali zgrzewanych wielopunktowo garbowo. Badania wykazały wyraźne różnice częstotliwości rezonansowych, które pozwalają na dalsze badania nad weryfikacją jakości połączenia.

Odpowiedź układu dostarcza informacji o rozkładzie masy drgającej. Informacja ta może posłużyć do przyszłej kontroli pozycji detali łącznych, np. weryfikacji pozycji nakrętki względem profilu w przypadku rozszerzenia liczby miejsc pomiarowych odpowiedzi układu.

Jakość widma częstotliwościowego jest zależna od budowy oprzyrządowania zgrzewalniczego - w stanowisku badawczym detal znajdował się pomiędzy obsadami a kolumnami, które nie były sztywno przytwierdzone do pozostałej masy zgrzewarki. Układ wraz z detalem posiadał zmniejszoną sztywność, co pozwoliło na zmniejszenie uczestniczenia masy całego stanowiska w odpowiedzi układu, tym samym generowało to dużo czytelniejsze wyniki eksperymentu.

Narzędzie generujące w przyszłości, wymuszenie układu powinno zostać starannie dobrane, z uwagi na jakość widma, które otrzymywane jest w trakcie próby. Końcówki młotka modalnego z gumy nie sprawdziły się w przypadku tak dużego i sztywnego układu. Zatem dobór odpowiedniego elementu wymuszającego powinien zostać oparty na wielkości, sztywności i masie obiektu wymuszanego.

Istotne znaczenie ma miejsce wymuszenia. Badania wskazują, że im bliżej miejsca powstawania połączenia tym odpowiedź układu w dziedzinie częstotliwości posiada mniejszą ilość zakłócenia nałożonego na sygnał, powodując większe zmiany w przypadku połączenia o niewystarczających właściwościach mechanicznych. Dla badanego układu wymuszeniem dostarczającym najlepsze rezultaty jest punktowe uderzenie w czwartą kolumnę w osi X lub Z. Uderzenia powodujące momenty skręcające bądź siłę ścinającą dla nakrętek wykazywały porównywalny wpływ na jakość sygnału odpowiedzi.

Przeprowadzone badania dowodzą, że zarówno kierunek równoległy do osi akcelerometru, jak i prostopadły dostarcza odpowiedzi w dziedzinie częstotliwości umożliwiającej analizę jakości złączy. Zasadnym jest zastosowanie akcelerometrów wieloosiowych w przyszłej aplikacji przemysłowej.

Odpowiedzi w dziedzinie częstotliwości zaprezentowane w badaniach poza wskazaniem częstotliwości rezonansowych, dostarczają informacje takie jak: lokalne minima oraz prędkość narastania zbocza. Parametry te są dodatkowymi cechami sygnału, które poddane odpowiedniej analizie mogą dostarczyć dodatkowe informacje o złączu w przyszłych badaniach.

Częstotliwości własne w przedziale 2200 – 3200 *Hz* pozwalają na zarejestrowanie przy pomocy czułych mikrofonów. W przyszłości możliwe jest zastąpienie akcelerometru czułym mikrofonem, który pozwoli na analizę bezkontaktową.

Zwiększona siła docisku zwiększa naprężenia wewnątrz układu, powodując mniejszą podatność na wystąpienie zakłóceń sygnału. Badania dowiodły, że zwiększanie siły docisku elektrod poprawia jakość otrzymywanych odpowiedzi.

12. Porównanie analizy eksperymentalnej z analizą numeryczną

Porównując wyniki analizy numerycznej z eksperymentalną, stwierdzić można analogiczne rezultaty.

Przed wszystkim zarówno metoda numeryczna jak i eksperymentalna dowiodły, że badanie jakości złączy zgrzewanych wielopunktowo garbowo jest możliwe. W obu badaniach częstotliwości rezonansowe ulegały zmianom wartości w wyniku niezgodności połączenia. Wyniki analizy porównawczej zebrane zostały w tabeli (tab. 12.1).

Wyniki numerycznej analizy modalnej przedstawiające częstotliwość rezonansową, dla której przemieszczenie zachodzi na detalu badanym dla pasma częstotliwości $f_1 \in (400 - 800 \text{ Hz})$ oraz $f_2 \in (2400 - 3300 \text{ Hz})$. Częstotliwości rezonansowe dla profilu wzorcowego wynosiły $f_1 = 513 \text{ Hz}$ (rys. 12.2) oraz $f_2 = 2984 \text{ Hz}$ (rys. 12.5). Wynik badania eksperymentalnego odpowiadający tym przedziałom to częstotliwości rezonansowe $f_1 = 495 \text{ Hz}$ (rys. 12.1) oraz $f_2 = 2705 \text{ Hz}$ (rys. 12.4). Porównując te wartości w przypadku pierwszego przedziału różnica wynosi 18 Hz (0.36%). Natomiast w przypadku przedziału drugiego zmiana częstotliwości o ponad 200 Hz spowodowana jest uproszczeniem w odwzorowaniu obiektu badanego poprzez model numeryczny (uproszczenie przedstawiono w rozdziale 7).

Brak uwzględnienia zgrzewarki wraz z wysięgami przyczynił się do zmniejszenia masy całkowitej układu, co z kolei zwiększyło częstotliwości rezonansowe w analizach numerycznych. Zjawisko to jest zgodne z zasadą, że większa masa obiektu skutkuje niższymi częstotliwościami rezonansu. Mocowanie zostało odwzorowane przy założeniu braku przemieszczenia, co nie w pełni odzwierciedla rzeczywisty układ badany. W rzeczywistości dolny wysięg pod wpływem siły docisku ulega odkształceniu sprężystemu. Warunki prowadzenia badania zakładały jednak wiązania sieci o nieskończonym współczynniku sztywności, co doprowadziło do zwiększenia wartości częstotliwości, przy której występuje rezonans.

Kolejnym uproszczeniem zastosowanym w modelu było pominięcie połączeń śrubowych, co wynikało z potrzeby oszczędności mocy obliczeniowej. Zbadanie modelu przyrządu wraz z detalem dla tak dużego pasma częstotliwości wymagało znacznych zasobów obliczeniowych oraz dużej pojemności pamięci do przechowywania obliczonych rezultatów.

Pomimo przedstawionych uproszczeń, eksperyment odzwierciedla w sposób stosunkowo wiarygodny z uwagi na postacie drgań (rys. 12.3, 12.6) powstające w dla tych częstotliwości w badaniu numerycznym.

Dowodem właściwego odwzorowania badania eksperymentalnego za pomocą symulacji numerycznej jest częstotliwość rezonansowa $f_3 = 1240 \text{ Hz}$ (rys.12.8). W badaniach numerycznych postać prowadzi do deformacji pierwszej i czwartej kolumny w osi X, podczas badań eksperymentalnych postać została zaobserwowana w przypadku mocowania akcelerometru w punkcie KX4, gdzie zbadana częstotliwość rezonansowa wynosi $f_3 = 1256 \text{ Hz}$ (rys. 12.7).

Analizując postacie drgań uzyskane z badań numerycznych dla częstotliwości rezonansowych, stwierdzono, że prawidłowo wskazano potencjalne punkty mocowania akcelerometru w badaniach eksperymentalnych. Wstępne badania w kontekście eksperymentu przeprowadzono w sposób systematyczny, dążąc do uzyskania widma amplitudowego o jak najwyższej czytelności i jednoznaczności.

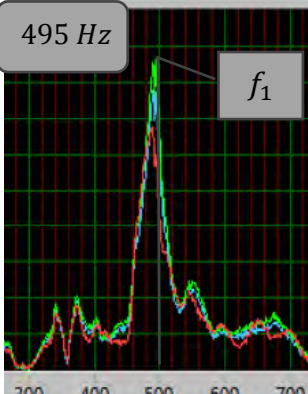
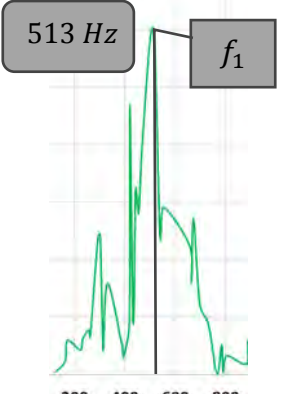
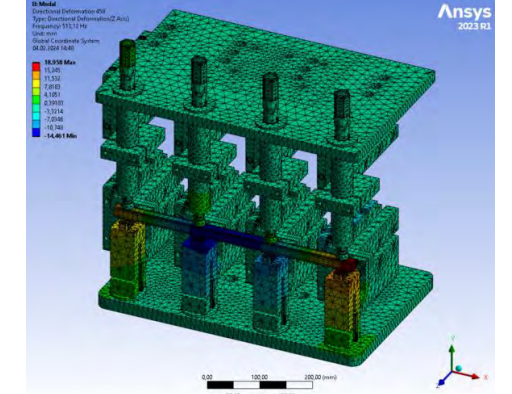
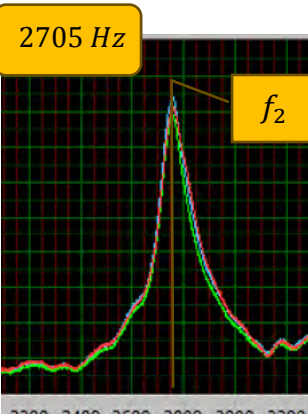
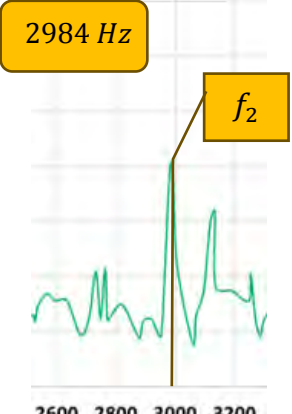
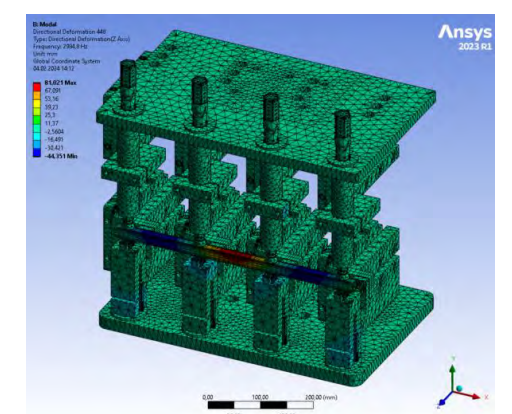
Otrzymane wyniki wskazują na możliwość precyzyjnego określenia położenia nakrętki, w której występuje niezgodność. Przy odpowiednim sterowaniu procesem istnieje możliwość korekty parametrów w kolejnym cyklu zgrzewania, pod warunkiem że niezgodność wynikała

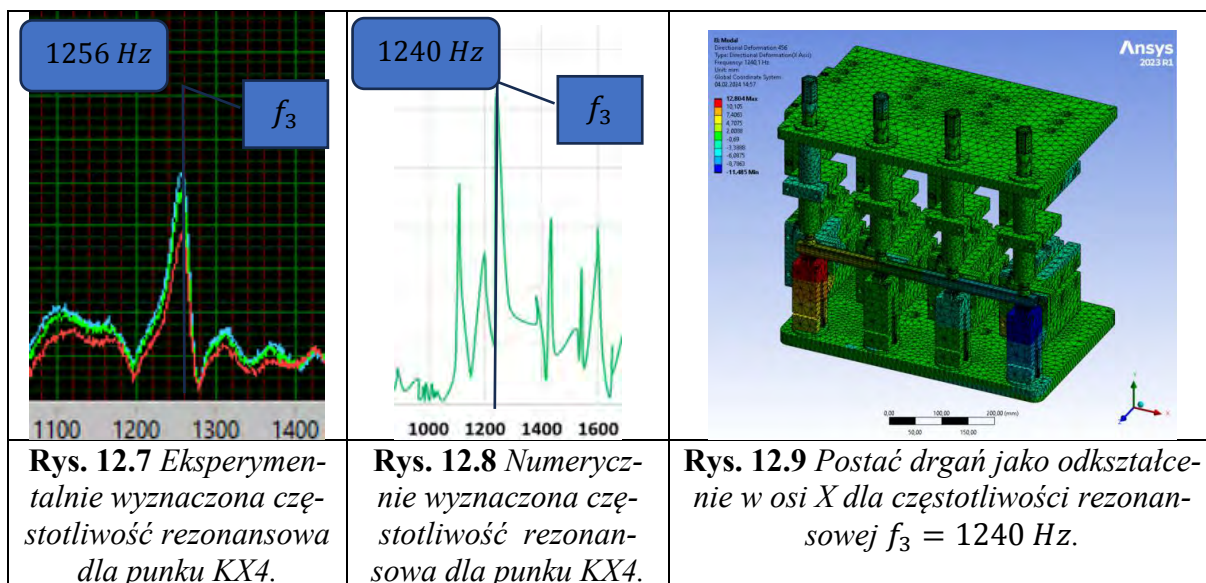
z niewłaściwych parametrów procesu, a nie z początkowych niezgodności mechanicznych komponentu.

W przypadku analizy numerycznej oraz eksperymentalnej zauważono, że siła docisku miała duży wpływ na otrzymane rezultaty. Siła docisku elektrod zwiększa sztywność układu, prowadząc do zwiększenia naprężeń wewnątrz układu. Naprężenia te powodują przesunięcie częstotliwości drgań w wyższe częstotliwości rezonansowe. Układ posiadający większą sztywność generował spektrum o mniejszej ilości zakłóceń. Genezą powstawania zakłóceń w sygnale jest tłumienie wewnętrzne pozostałych składowych układu. Przesunięcie częstotliwości rezonansowej przez siłę docisku elektrod zmniejszyło wpływ zakłóceń na badania eksperymentalne. Badanie numeryczne wpływu siły na przemieszczenie prezentuje zwiększone zakłócenia przebiegu przemieszczenia w wyniku zbyt małej siły układu dociskowego. Jeżeli siła docisku była niedostateczna, wówczas układ nie wykazywał ruchu harmonicznego o amplitudzie pozwalającej na właściwe zarejestrowanie częstotliwości rezonansowej.

Symulacja komputerowa wraz z analizą eksperymentalną dowiodły, że w celu uzyskania dokładnych wyników należy przebadać układ w dwóch kierunkach X oraz Z (rys. 11.23).

Tabela 12.1 Zestawienie wyników częstotliwości rezonansowych dla eksperymentu, badania numerycznego oraz wizualizacja postaci drgań dla tej częstotliwości.

		
<p>Rys. 12.1 Eksperymentalnie wyznaczona częstotliwość rezonansowa dla punktu KZ4.</p>	<p>Rys. 12.2 Numerycznie wyznaczona częstotliwość rezonansowa dla punktu KZ4.</p>	<p>Rys. 12.3 Postać drgań jako odkształcenie w osi Z dla częstotliwości rezonansowej $f_1 = 513$ Hz.</p>
		
<p>Rys. 12.4 Eksperymentalnie wyznaczona częstotliwość rezonansowa dla punktu D1.</p>	<p>Rys. 12.5 Numerycznie wyznaczona częstotliwość rezonansowa dla punktu D1.</p>	<p>Rys. 12.6 Postać drgań jako odkształcenie w osi Z dla częstotliwości rezonansowej $f_2 = 2984$ Hz.</p>



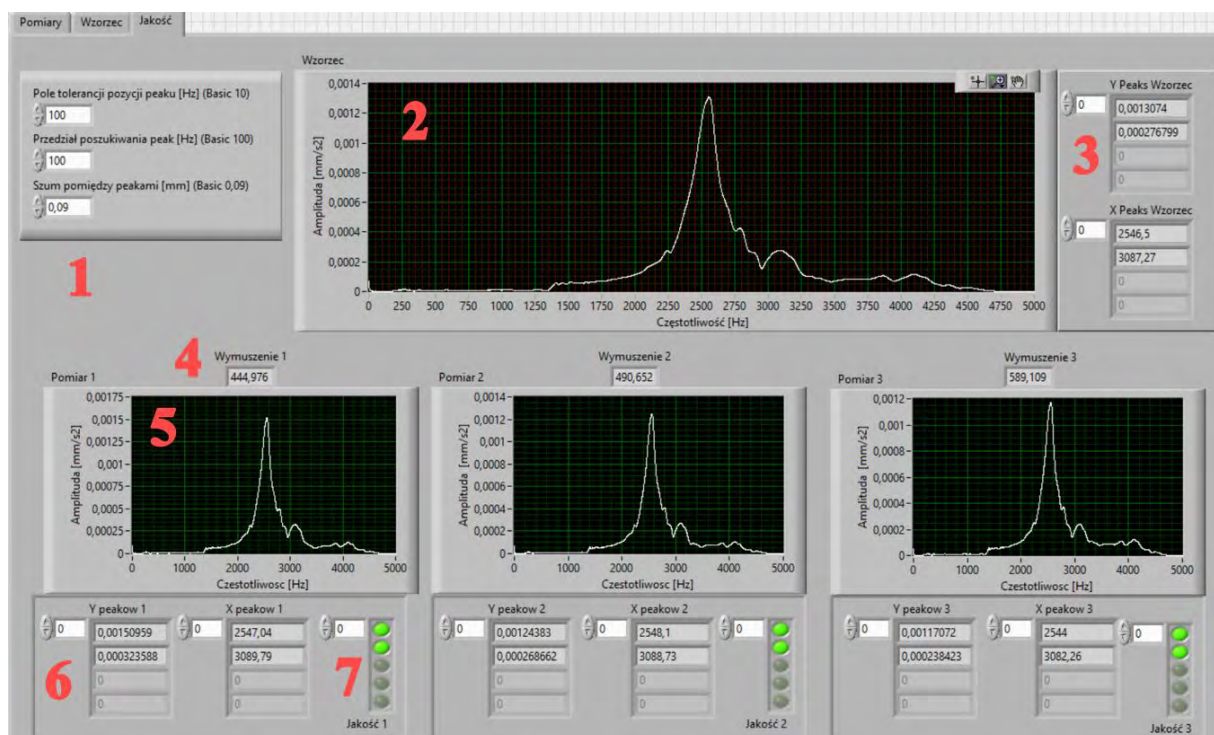
Dla rzeczywistego odwzorowania eksperymentu niezbędne jest przeprowadzenie badania odpowiedzi dynamicznej na impuls wymuszenia, które charakteryzuje się liczbom kroków $k = 10000$ o czasie kroku $t = 0,001$ s. W wyniku tego częstotliwość próbkowania pozwala na wykonanie algorytmu FFT dla dziedziny $0 - 5000$ Hz. Ilość karków oraz ich czas jest związany z częstotliwością Nyquista, która jest równa połowie częstotliwości próbkowania dla sygnałów analogowych.

Badanie to nie zostało przeprowadzone z powodu ogromnej liczby danych, co uniemożliwia przetworzenie i zapisanie ich przy użyciu dostępnej konfiguracji sprzętowej do obliczeń. Zmniejszenie liczby kroków mogłoby prowadzić do niewłaściwej rozdzielczości pomiarowej, co z kolei mogłoby skutkować błędnymi wnioskami końcowymi lub przeoczeniem istotnych częstotliwości rezonansowych. Rozwiązaniem problemu obliczeniowego tego zagadnienia jest wbudowany moduł do przeprowadzania numerycznej analizy modalnej. Badania przedstawione w rozdziale 10 zostały przeprowadzone poprzez moduł analizy modalnej w oprogramowaniu ANSYS.

13. Algorytm do oceny jakości zgrzein wykorzystujący analizę modalną

Algorytm do oceny jakości zgrzein został przedstawiony za pomocą dwóch nowych stanów w maszynie stanów. Kontrola jakości za jego pomocą odbywa się poprzez panel użytkownika w zakładce jakość (rys. 13.1). Panel użytkownika przedstawia się następująco:

1. Konfiguracja dokładności z jaką poszukiwane jest maksimum lokalne sygnału. Użytkownik ma możliwość ustawienia pola znajdującej wartości maksymalnej (zakłócenie pomiędzy lokalnymi maksimumami) w odniesieniu do wartości sąsiednich, przedziały poszukiwania lokalnych maksimumów oraz pola tolerancji sygnału wzorcowego, które określa przedział, w jakim zawierać mają się wartości szczytowe, by zostały uznane za prawidłowe.
2. Wykres zapisanego detalu wzorcowego przedstawiający przebieg amplitudy w zależności od częstotliwości.
3. Znalezione na sygnale wzorca wartości amplitudy maksymalnej wraz z częstotliwością, przy której wstępuje.
4. Wartość wymuszenia z jaką został wzbudzony układ.
5. Graf sygnału, który jest weryfikowany.
6. Wartości maksymalnej amplitudy oraz odpowiadająca jej wartość częstotliwość znalezione na badanym detalu.
7. Sygnalizatory optyczne (diody) informujące użytkownika o jakości sprawdzanego komponentu.

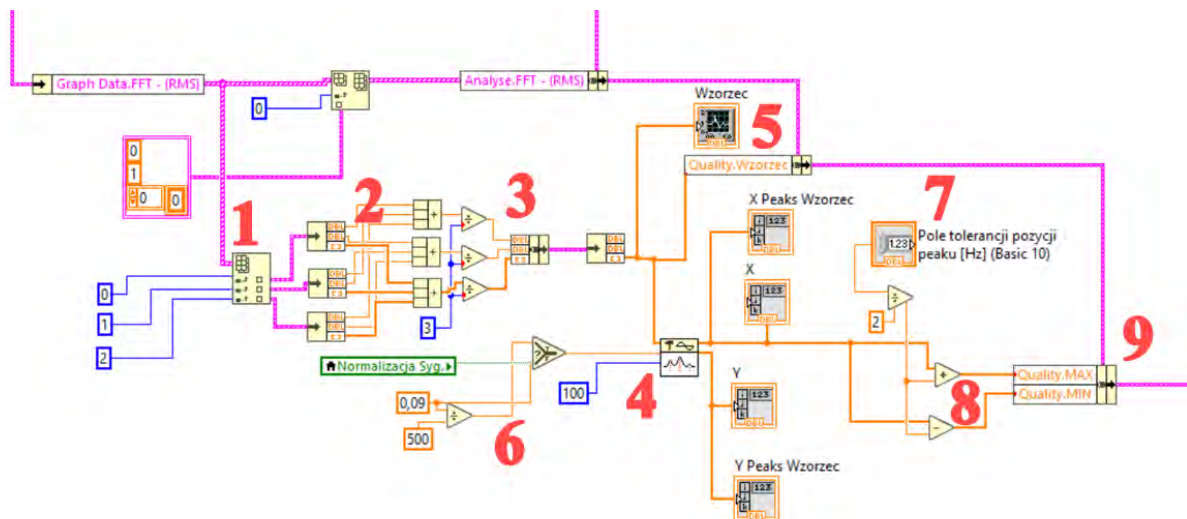


Rys. 13.1 Interfejs użytkownika przeprowadzającego modalną kontrolę jakości.

Pierwszy z algorytmów składowych tworzy sygnał wzorcowy (rys. 13.2), który służy do weryfikacji jakości zgrzewanych komponentów. Wykonywany jest w następujących krokach:

1. Przeprowadzenie procesu indeksacji serii sygnałów (w przypadku, pracy na wielu sygnałach) polega na segregacji sygnałów odpowiedzi w obszarze częstotliwości.

2. Sygnał ten jest rozdzielany przez blok o nazwie „Unbundle”, który pozwala na wydzielenie wartości amplitudy.
3. Bloki sumacyjne, które sumują sygnały, następnie wykonywana jest średnia arytmetyczna tworząca sygnał uśredniony z pomiarów.
4. Blok „Peak Detector” znajduje maksima lokalne zgodnie z parametrami zadanymi przez użytkownika.
5. Blok „Waveform Graph” wyświetlający funkcje wzorcową na panelu użytkownika.
6. Blok konfiguracyjny stosowany do zmiany rozdzielczości pomiędzy sygnałem normalizowanym lub nienormalizowanym.
7. Parametr pola tolerancji maksima lokalnego sygnału wzorcowego zdefiniowana przez użytkownika.
8. Skalowanie sygnałów do wartości pole tolerancji.
9. Uporządkowanie danych poprzez indeksację do zmiennych wartości brzegowych częstotliwości wzorcowej oraz przesłanie ich do przepływu danych maszyny stanów.

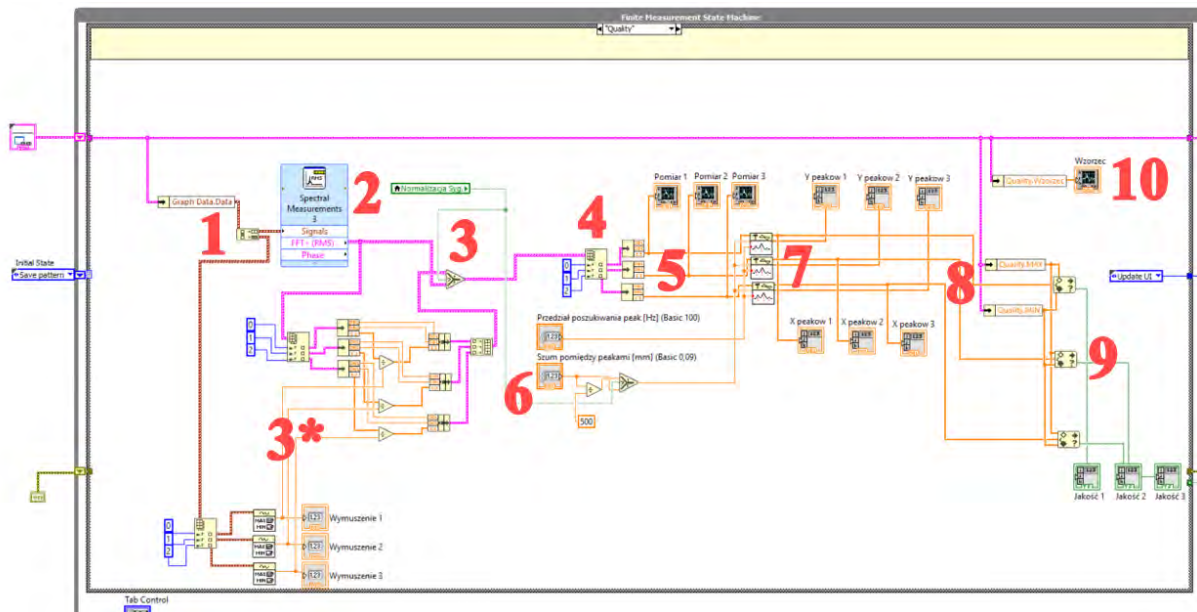


Rys. 13.2 Schemat blokowy programu do tworzenia wzorcowego sygnału z odpowiedzi detalu wzorcowego.

Druga z procedur służy do wykonania algorytmu jakości (rys. 13.3), przebiega on w następujących krokach:

1. Zebranie danych z pomiaru bieżącego oraz rozdzielenie ich na sygnał z akcelerometru i młotka modalnego.
2. Wykonanie transformaty Fouriera z sygnału odpowiedzi układu.
3. Użytkownik decyduje, czy sygnał poddawany analizie ma być normalizowany o sygnał młotka modalnego czy nie. Odnoga z gwiazdką przeprowadza następujące czynności: indeksowanie sygnałów z młotka modalnego, znalezienie maksimów przez blok „Waveform Min Max”, przesłanie wartości do pola wymuszenia, indeksowanie sygnałów z akcelerometru po analizie FFT, rozdzielnie sygnałów przez blok „Unbundle”, podzielenie sygnałów przez sygnały z młotka modalnego, zebranie sygnałów przez blok „Bundle”, zgrupowanie sygnałów i przekazanie ich do bloku decyzyjnego o sygnale znormalizowanym.
4. Indeksowanie sygnałów po bloku decyzyjnym sygnału do dalszej analizy.
5. Rozpakowanie sygnału przez blok „Unbundle” oraz „Waveform Graph” wyświetlający sygnały poszczególnych odczytów na panelu użytkownika.

6. Moduł konfiguracyjny wykorzystywany do dostosowywania rozdzielczości poszukiwania maksimów, dodatkowo zadaje stałą wykorzystywaną do dzielenia pomiędzy sygnałem znormalizowanym a nienormalizowanym.
7. Moduł „Peak Detector” identyfikuje wartości maksymalne zgodnie z parametrami określonymi przez użytkownika.
8. Przywołanie zmiennych z wartościami brzegowymi maksymalnej i minimalnej wartości częstotliwości wzorcowej z przepływu danych maszyny stanów.
9. Bloki „In Range and Coerce” porównują sygnał badany do wartości brzegowych z punktu 8, a następnie jeżeli sygnał zawiera się w polu zapalają diodę jako znak prawidłowo wykonanego złącza.



Rys. 13.3 Schemat blokowy programu do sprawdzenia jakości komponentu.

Przedstawiony algorytm może w przyszłości zostać rozszerzony o detekcję minimów lokalnych sygnału czy szybkości narastania zbrocza. Pozwoli to na wyeliminowanie możliwych błędów pomiarowych przy sygnale odpowiedzi detalu z niezgodnościami zbliżonymi do wzorca. Dodatkowo przy implementacji systemu kontrolującego jakości detali zgrzewanych wielopunktowo wymagana jest kalibracja algorytmu do sygnału wzorcowego.

14. Zestawienie metod kontroli jakości

Kontrola jakości przy użyciu metody opartej na pomiarach zmianach rezystancji w czasie została wykonana za pośrednictwem oprogramowania System PQS firmy Harms&Wende.

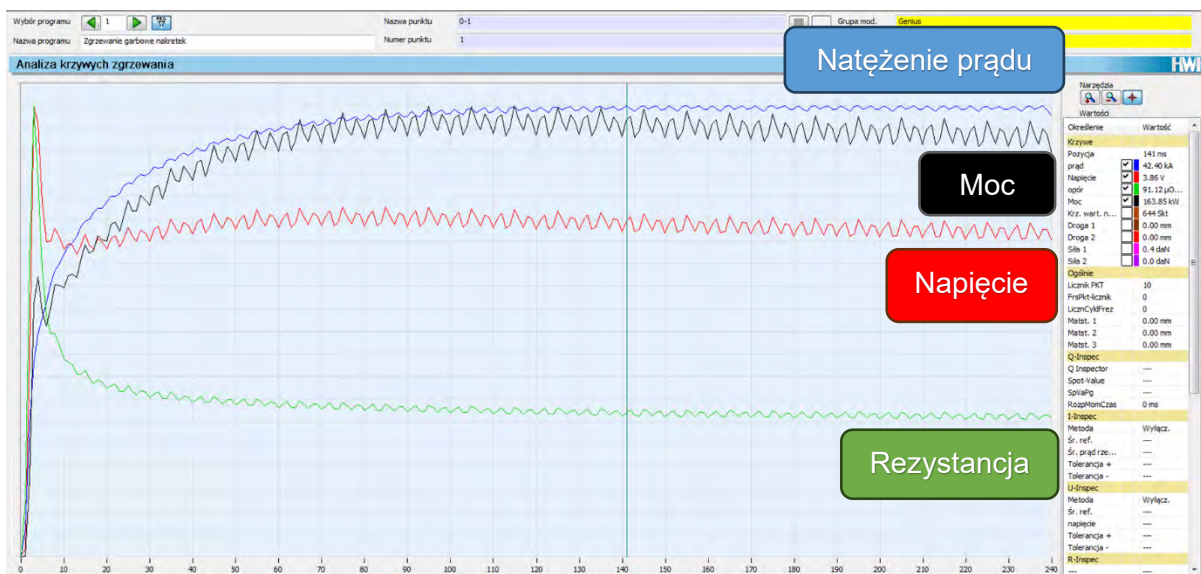
Główne cechy systemu PQS:

- dokonywanie pomiarów wartości RMS (ang. root mean square) oraz przebiegów sygnałów takich jak prąd, napięcie, rezystancja, moc, siła i przemieszczenie elektrod;
- możliwość współpracy z dowolnym kontrolerem zgrzewania;
- obserwowanie procesu na podstawie ustalonych wartości granicznych lub / i krzywych sygnałów;
- zapisywanie danych procesowych w bazie danych z możliwością długotrwałego archiwizowania;
- rejestrowanie identyfikatorów partii lub komponentów;
- centralne zarządzanie do 16 punktów pomiarowych na jednym PC;
- łatwa integracja systemu z systemem kontroli zgrzewania Genius;
- możliwość połączenia maszyny za pomocą różnych systemów magistrali polowej lub 24V I/O;
- sprawdzanie jakości poprzez monitorowanie procesów.

PQS jest używany przez wielu czołowych producentów samochodów i dostawców produktów do pełnego monitorowania procesu zgrzewania rezystancyjnego.

Okno oprogramowania umożliwiające zebranie danych do przeprowadzenie kontroli jakości metodą zmiany rezystancji w czasie (rys. 14.1).

Próbkami wytypowanymi do badań zostały detale posiadające niezgodności przedstawione w rozdziale 9 na ilustracji (rys. 9.4). Niezgodność złącza w nakrętce symulowana jest poprzez sfrezowanie dwóch z czterech garbów. Pozwoliło to zweryfikować skuteczność systemu pomiarowego opierającego się na zmianach w przebiegu rezystancji podczas procesu zgrzewania. Aby przeprowadzić testy, wykonano serię próbek z komponentami o różnych konfiguracjach garbów o mniejszej wysokości w nakrętkach.



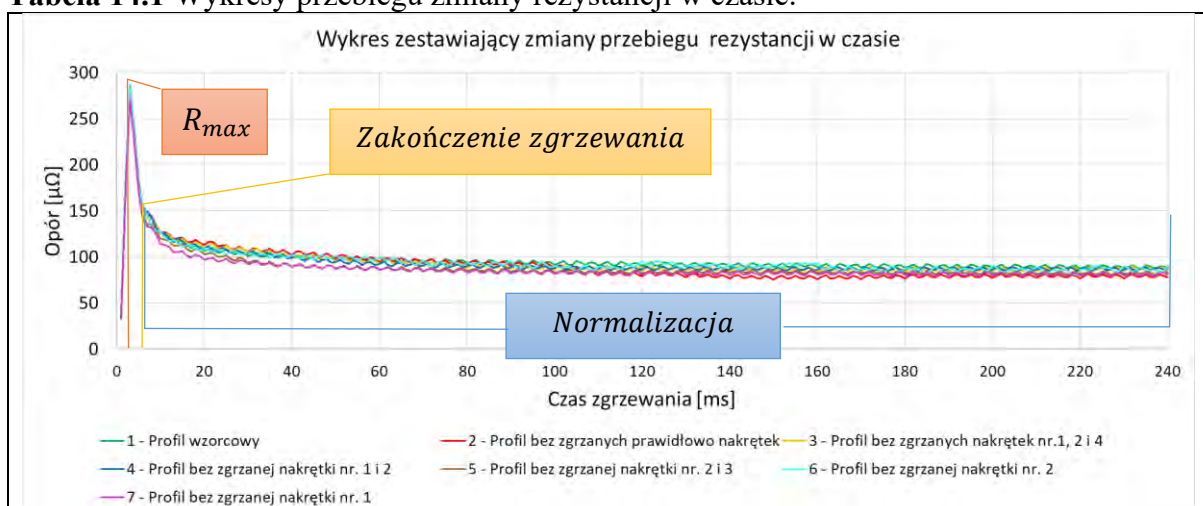
Rys. 14.1 Widok ekranu z panelu do monitorowania przebiegu procesu zgrzewania firmy Harms&Wende.

14.1. Wyniki kontroli jakości poprzez rezystancje dynamiczną

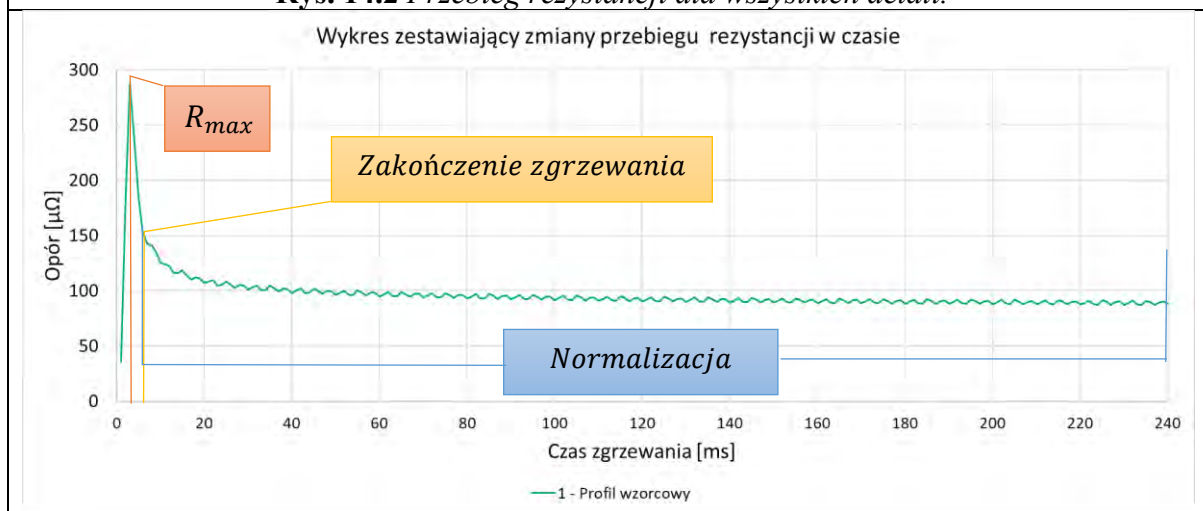
Analiza zmiany przebiegu rezystancji przedstawiona na wykresie (rys. 14.3) pozwala zaobserwować, że proces formowania się złącza trwa 6 ms. W tym czasie garby ulegają uplastycznieniu i osiadają, w wyniku generowania energii elektrycznej. Podczas uplastycznienia garbu rezystancja osiąga wartość szczytową R_{max} , po której następuje spadek prowadzący do utrzymania stałej rezystancji (w pewnym zakresie tolerancji). Wskazuje to na zakończenie procesu tworzenia połączeń metalicznych. Utrzymanie stałego poziomu rezystancji wskazuje na normalizację połączenia poprzez dalsze generowanie energii elektrycznej, co prowadzi do jego normalizacji.

Analiza wykresu (rys. 14.4) nie wykazała istotnych różnic w maksymalnej rezystancji pomiędzy badanymi próbkami. Jedynymi detalami wyróżniającymi się na tle pozostałych są próbki nr 5 oraz 7, natomiast spadek maksymalnej rezystancji nie ukazuje dostatecznej zmiany umożliwiającej ocenę jakości komponentu. Porównanie próbki wzorcowej nr 1 z próbką nr 2, która posiada niezgodności we wszystkich nakrętkach (rys. 14.4) dowodzi, że niewielka jest różnica w przebiegu zarejestrowanych rezystancji. Wyklucza to możliwość jednoznacznej identyfikacji jakości połączeń wykonanych metodą wielopunktową na podstawie przebiegu rezystancji dynamicznej. Wykres (rys. 14.2) nie przedstawia charakterystycznych różnic pozwalających na ocenę jakości połączeń i procesu zgrzewania pomiędzy detalami.

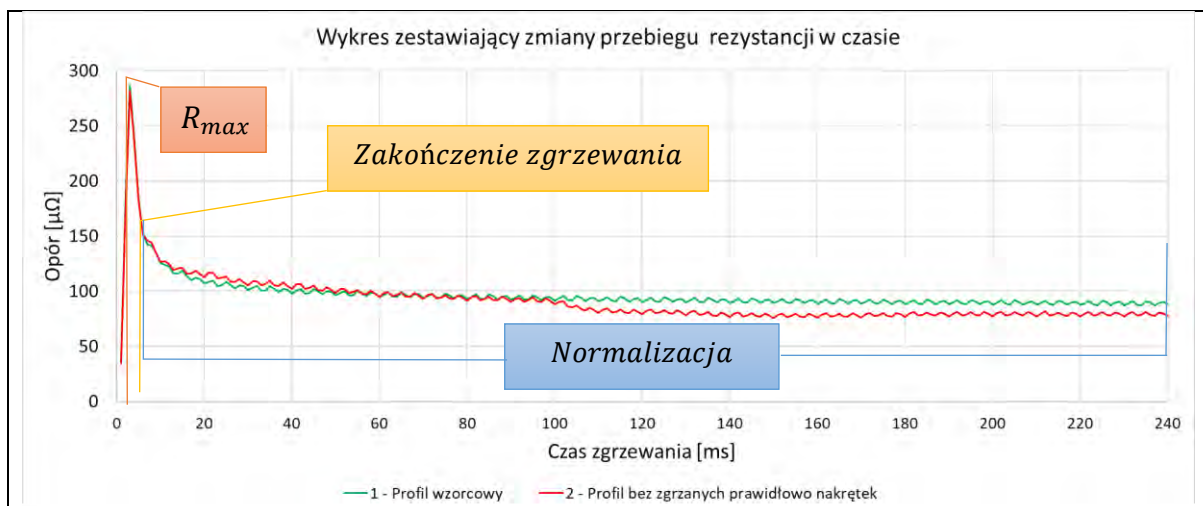
Tabela 14.1 Wykresy przebiegu zmiany rezystancji w czasie.



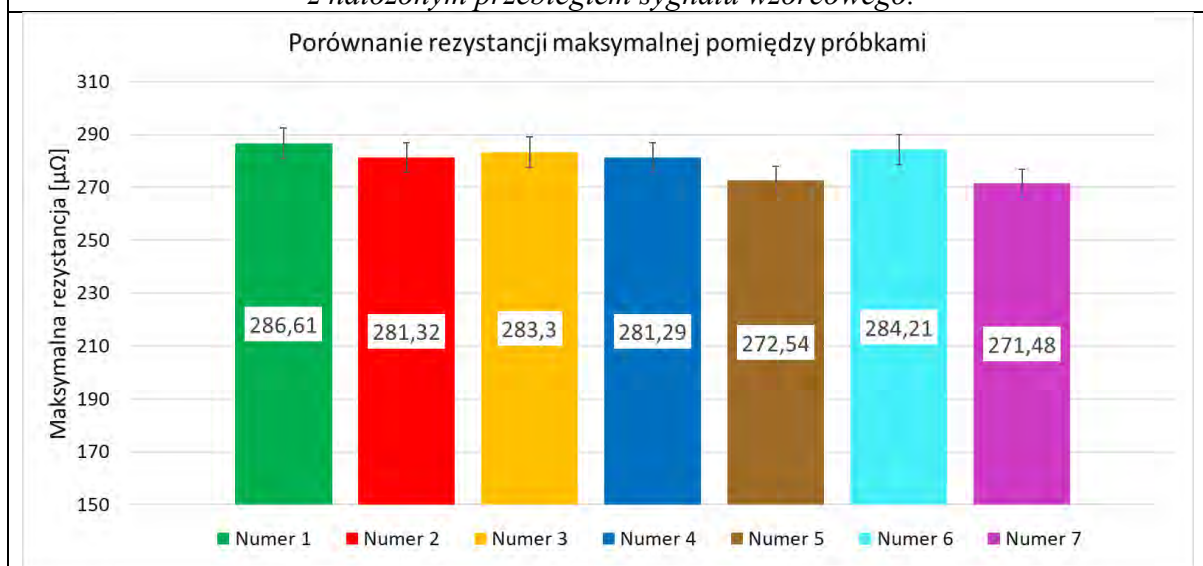
Rys. 14.2 Przebieg rezystancji dla wszystkich detali.



Rys. 14.3 Przebieg rezystancji dla detalu nr 1 - $R_{1max} = 286,61 \mu\Omega$.



Rys. 14.4 Przebieg rezystancji dla detalu nr 2 - $R_{2\ max} = 281,32\ \mu\Omega$, z nałożonym przebiegiem sygnału wzorcowego.



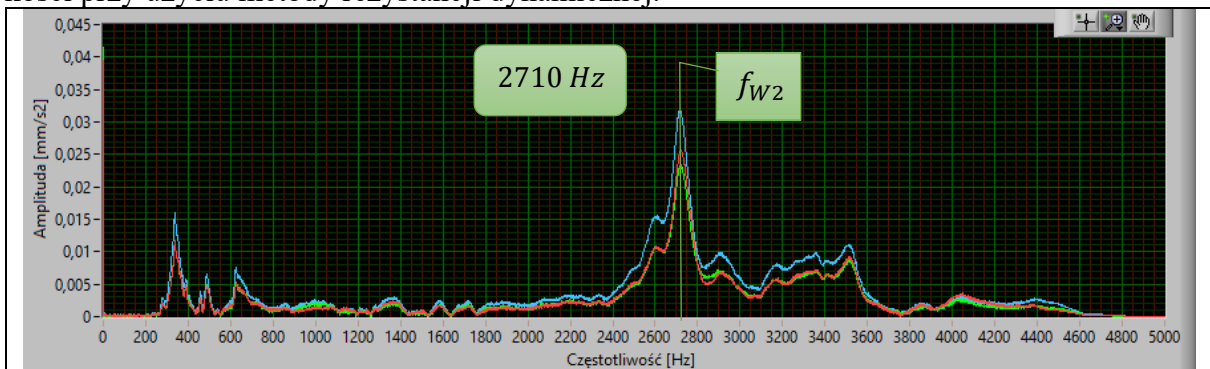
Rys. 14.4 Wykres maksymalnej wartości rezystancji dla poszczególnych próbek.

14.2. Wyniki kontroli jakości metodą analizy modalnej

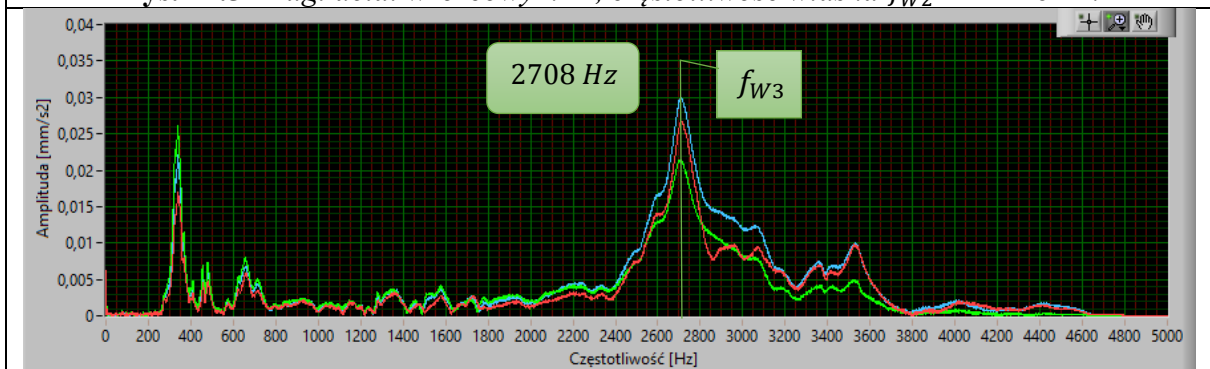
W celu porównania metody modalnej z metodą rezystancji dynamicznej wykonane zostały dwa kolejne detale wzorcowe (pierwszą próbką wzorcową jest detal z badań eksperymentalnych (rys. 11.34)) w celu weryfikacji powtarzalności częstotliwości rezonansowej pomiędzy próbkami wzorcowymi. Przebieg odpowiedzi dla dwóch kolejnych detali wzorcowych przedstawiono na wykresach (rys. 14.5, 14.6). Próbkki wzorcowe różnią się pomiędzy sobą o 5 Hz przesunięcia częstotliwości rezonansowej, tak małe przemieszczenie maksimum uznano za dopuszczalne.

Badanie z zastosowaniem analizy modalnej odbywało się po przeprowadzonym procesie zgrzewania z zarejestrowanym przebiegiem rezystancji w czasie. Mocowanie akcelerometru znajdowało się na badanym detalu w punkcie D1, natomiast wymuszenie następowało punkcie KZ4 oraz KX4. W tabeli (tab. 14.2) przedstawiono przebiegi wraz z częstotliwością rezonansową poszczególnych próbek oraz nałożonym białym sygnałem próbki wzorcowej.

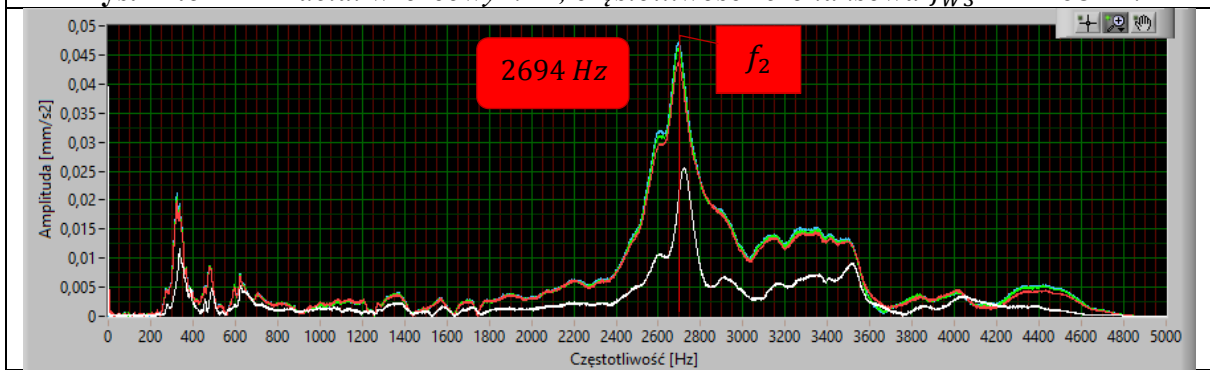
Tabela 14.2 Wykresy odpowiedzi w dziedzinie częstotliwości detali poddawanych kontroli jakości przy użyciu metody rezystancji dynamicznej.



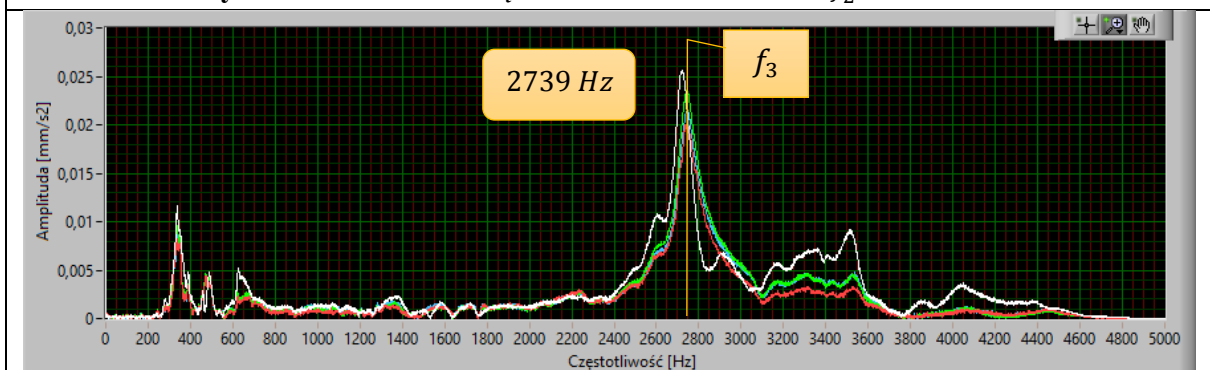
Rys. 14.5 Drugi detal wzorcowy nr 1, częstotliwość własna $f_{w2} = 2710$ Hz.



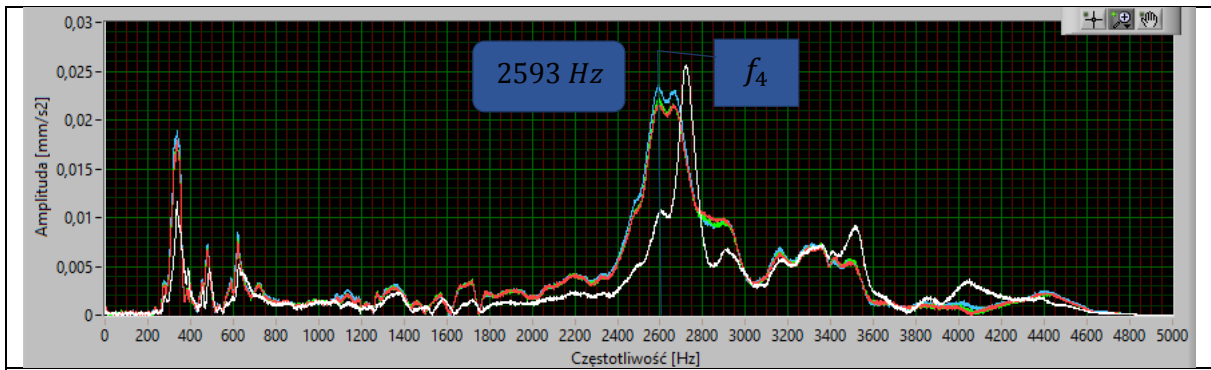
Rys. 14.6 Trzeci detal wzorcowy nr 1, częstotliwość rezonansowa $f_{w3} = 2708$ Hz.



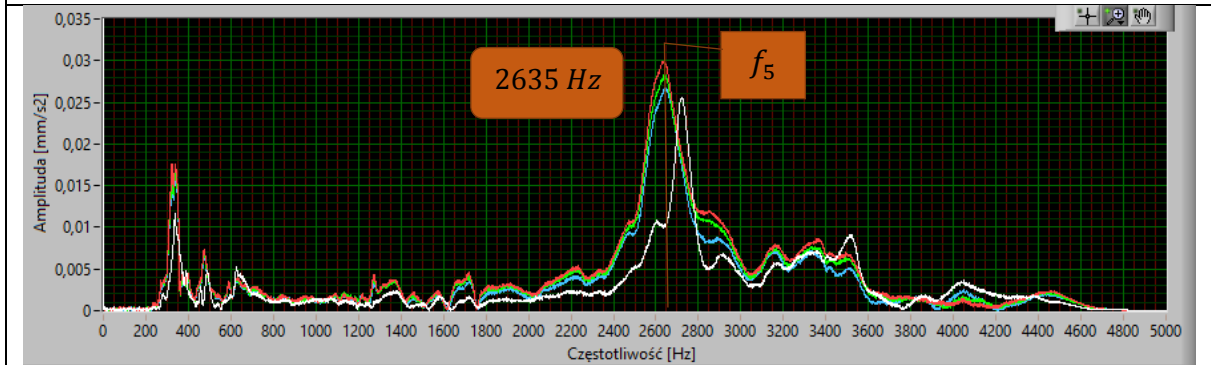
Rys. 14.7 Detal nr 2, częstotliwość rezonansowa $f_2 = 2694$ Hz.



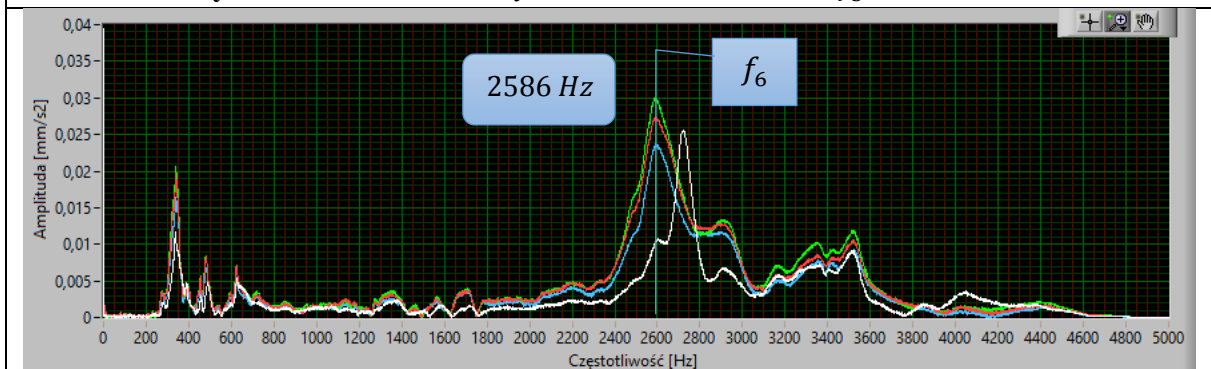
Rys. 14.8 Detal nr 3, częstotliwość rezonansowa $f_3 = 2739$ Hz.



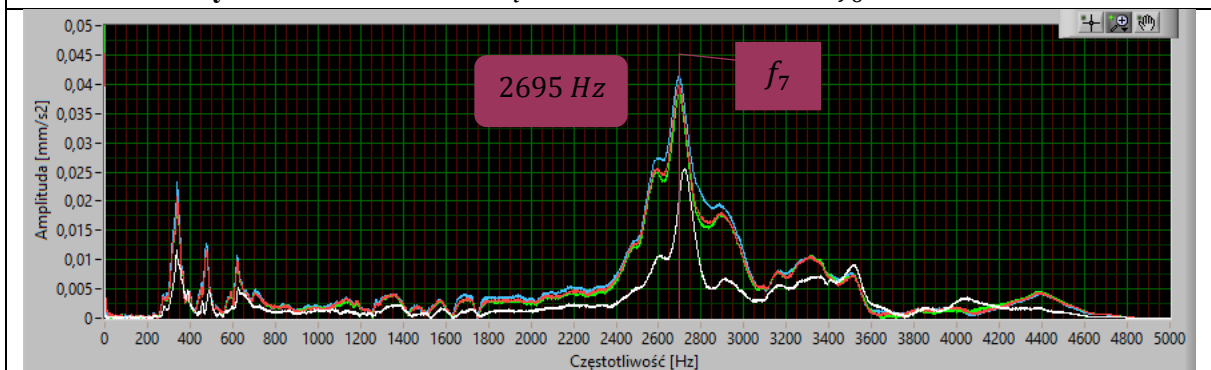
Rys. 14.9 Detal nr 4, częstotliwość rezonansowa $f_4 = 2593$ Hz.



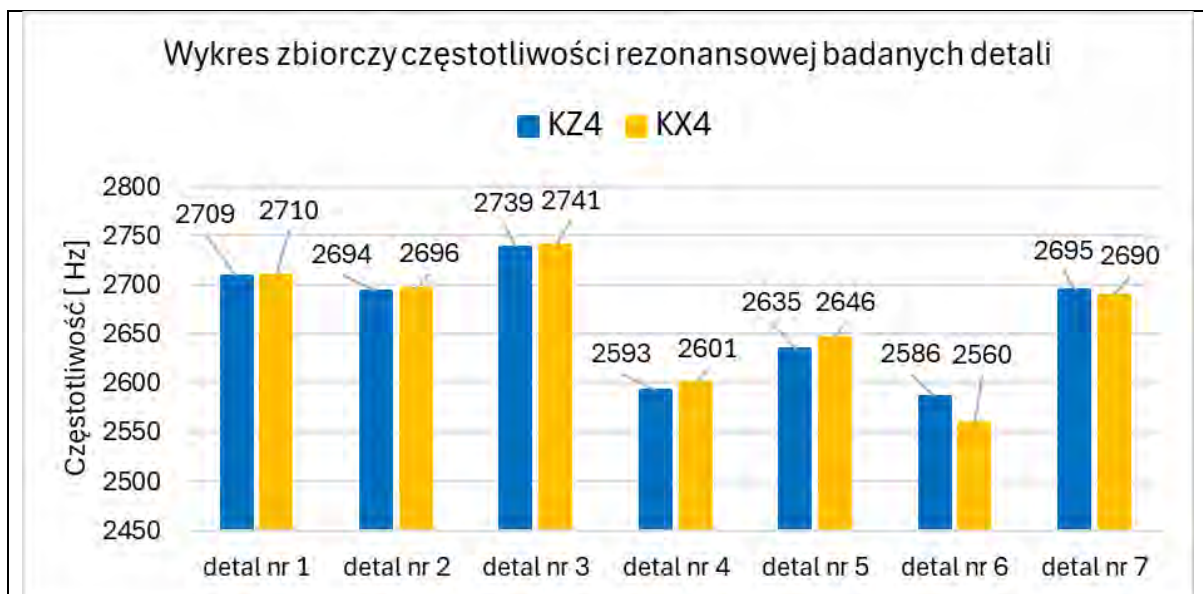
Rys. 14.10 Detal nr 5, częstotliwość rezonansowa $f_5 = 2635$ Hz.



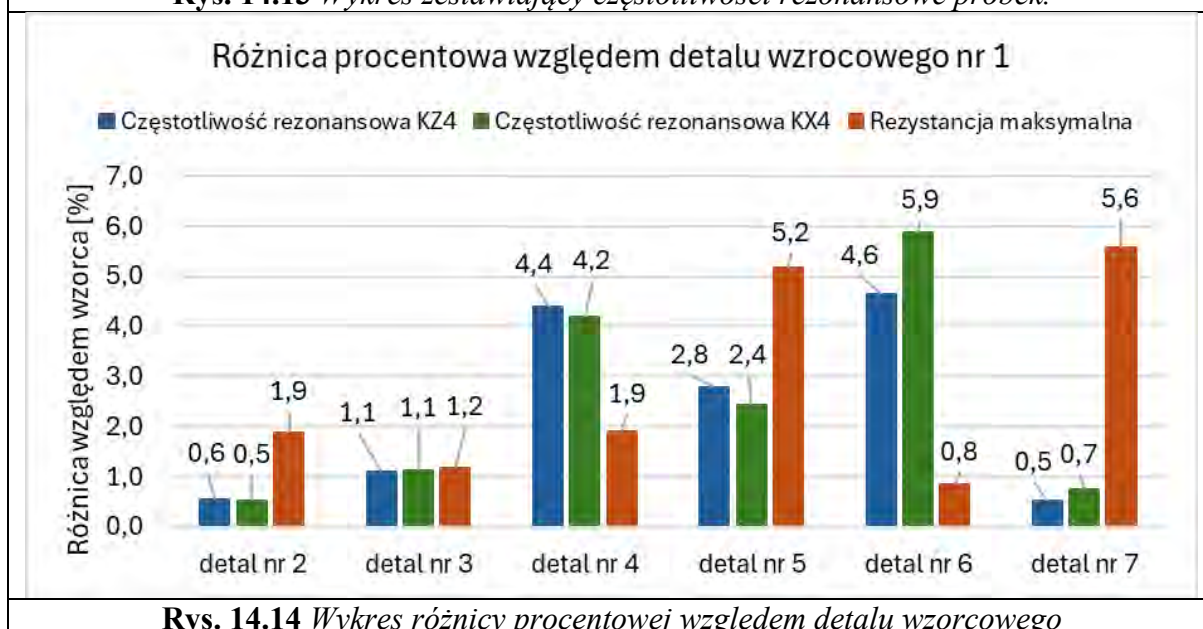
Rys. 14.11 Detal nr 6, częstotliwość rezonansowa $f_6 = 2586$ Hz.



Rys. 14.12 Detal nr 7, częstotliwość rezonansowa $f_7 = 2695$ Hz.



Rys. 14.13 Wykres zestawiający częstotliwości rezonansowe próbek.



Rys. 14.14 Wykres różnicy procentowej względem detalu wzorcowego

W wyniku wystąpienia niezgodności w badanych próbkach analiza modalna wykazała zmianę częstotliwości rezonansowych. Wykres zestawiający częstotliwości rezonansowe wszystkich zbadanych komponentów dla dwóch punktów wymuszenia zaprezentowano na ilustracji (rys. 14.13). Różnicę procentową względem detalu wzorcowego pomiędzy częstotliwościami rezonansowymi przedstawiono na wykresie (rys. 14.14).

14.3. Podsumowanie

Analiza wyników doprowadziła do następujących głównych wniosków:

Technika monitorowania zmian rezystancji w czasie stosowana do oceny jakości wielopunktowych elementów zgrzewanych rzutowo pozwala na ocenę jakości danego elementu.

Elementy ze sfrezowanymi garbami w nakrętce nie wykazują spadku lub wzrostu maksymalnej rezystancji oraz wartości chwilowych sygnału w trakcie procesu zgrzewania, co pozwoliłoby na jednoznaczną identyfikację wystąpienia niezgodności w trakcie procesu.

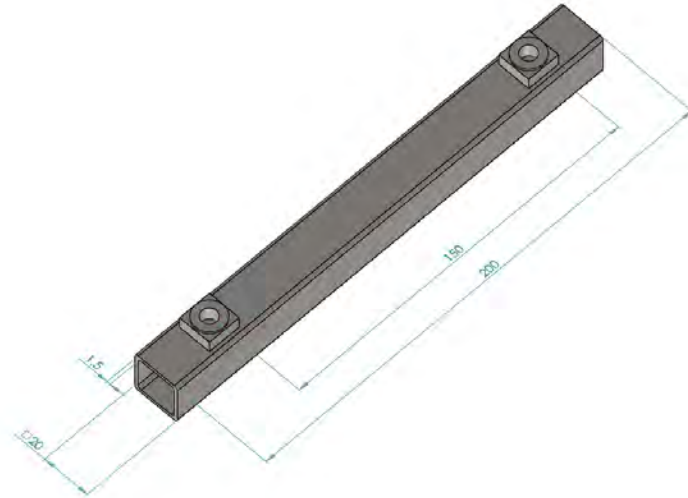
Informacje uzyskane z dynamicznych zmian rezystancji podczas procesu nie dostarczają danych pozwalających na identyfikację, w którym z czterech złączy wystąpiły problemy podczas procesu zgrzewania.

Próbki zbadane za pomocą analizy modalnej wykazały zmiany częstotliwości rezonansowej w wyniku występowania niezgodności w połączeniu. Różnice pomiędzy częstotliwościami rezonansowymi poszczególnych próbek są wykrywalne (rys. 14.14) oraz powtarzalne (przedstawiono w rozdziale 15), aby dokonać oceny jakości połączeń na ich podstawie.

Porównując kontrole jakości za pomocą analizy modalnej względem rezystancji dynamicznej, dotychczasowe badania dowodzą, że istnieje możliwość zastosowania analizy modalnej w celu dostarczenia informacji o jakości komponentu.

15. Kontrola jakości metodą analizy modalnej

W celu weryfikacji skuteczności metody kontroli jakości za pośrednictwem analizy modalnej, stworzono próbki detali w postaci profilu kwadratowego 20x20x1,5 ze stali S235JR ze zgrzanymi symetrycznie dwoma nakrętkami DIN928 (rys. 15.1). W ramach badań zaplanowano dziewięć przypadków, gdzie wykonano połączenia z różnymi parametrami bądź sztucznie wywołanymi niezgodnościami zgrzewalniczymi, takimi jak zabrudzenia czy spiłowanie garbu (rys. 15.2).



Rys. 15.1 Profil kwadratowy posiadający zgrzane techniką garbową dwie nakrętki M8 DIN 928.

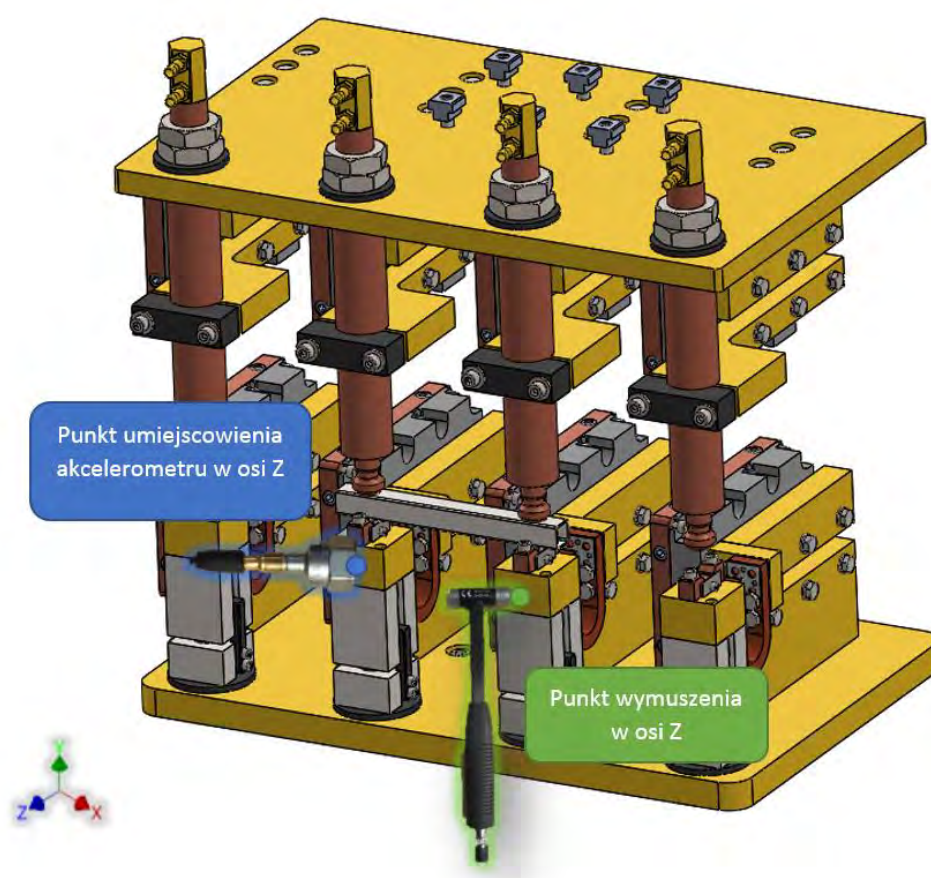


Rys. 15.2 Profile kwadratowe przeznaczone do badań.

Badania z wykorzystaniem analizy widmowej zostały przeprowadzone przy użyciu algorytmu opracowanego we wcześniejszych rozdziałach pracy. Wszystkie próbki detali zebrano w tabeli 15.1 oraz zostały one przebadane zgodnie ze schematem (rys. 15.3), detal n 1 oraz 2 zostały wytypowane jako detale wzorcowe, względem których porównywane zostaną pozostałe próbki. Punkt wymuszenia oraz rejestrowania odpowiedzi został zmieniony w stosunku do poprzednich badań z uwagi na ergonomię oraz powtarzalność pomiarów (nie są konieczne przekładnie akcelerometru pomiędzy poszczególnymi próbkami).

Tabela 15.1 Parametry zgrzewania detali do analizy spektralnej.

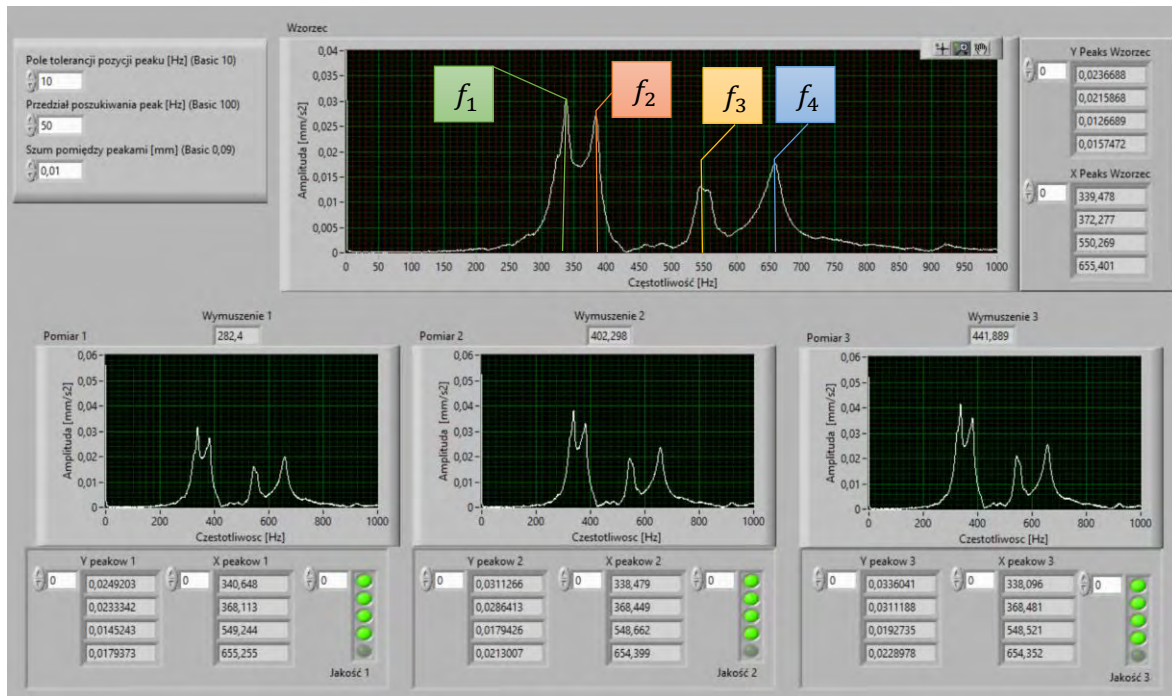
Nr	Parametry		Uwagi
	Prąd zgrzewania [kA]	Siła docisku elektrod [kN]	
1	40	8	Wzorzec 1
2	40	8	Wzorzec 2
3	40	6	
4	40	10	
5	40	8	Zabrudzony profil
6	40	8	Sfrezowane garby
7	30	8	
8	20	8	
9	20	12	



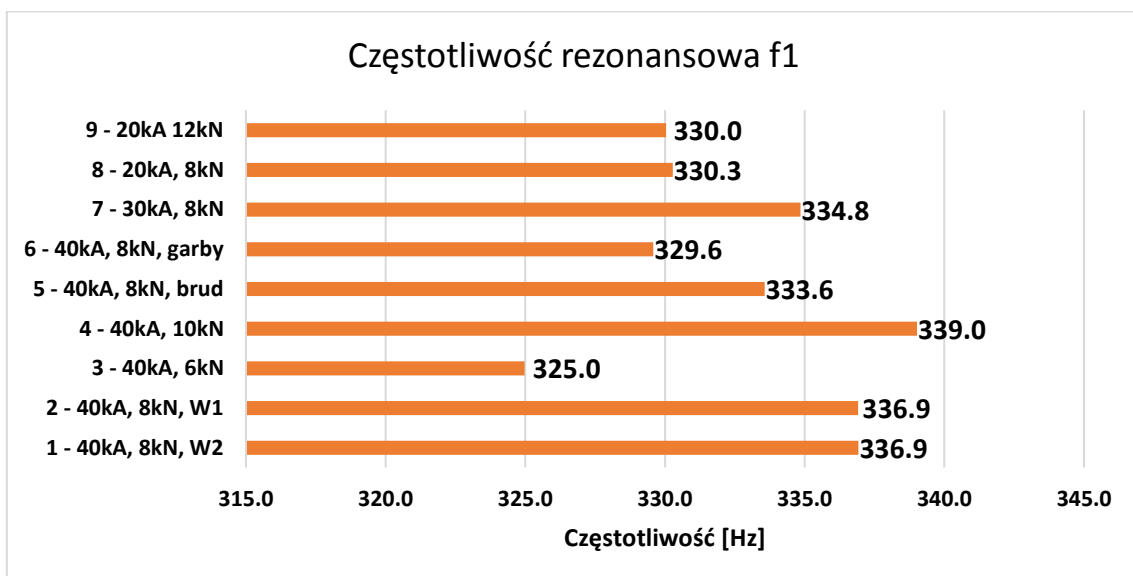
Rys. 15.3 Schemat stanowiska do badania jakości z zastosowaniem analizy widmowej.

15.1. Wyniki badań z zastosowaniem analizy widmowej

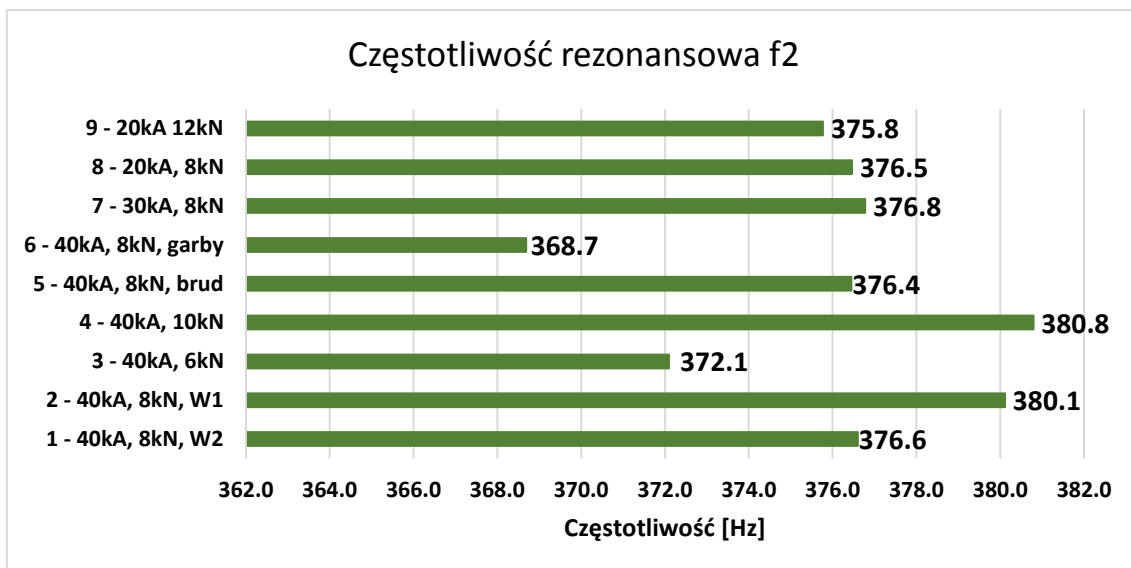
Zbadano częstotliwości rezonansowe wszystkich dziewięciu próbek, interfejs programu z przeprowadzonej kontroli za pomocą oprogramowania do kontroli jakości z wykorzystaniem analizy widmowej przedstawiono poniżej (rys. 15.4). Algorytm wykazał cztery wartości szczytowe odpowiednio dla częstotliwości f_1 , f_2 , f_3 oraz f_4 , które zostały zaznaczone na widoku oprogramowania (rys. 15.4). Wyniki dla poszczególnych próbek zebrano w cztery wykresy, które odpowiadają poszczególnym częstotliwościom rezonansowym.



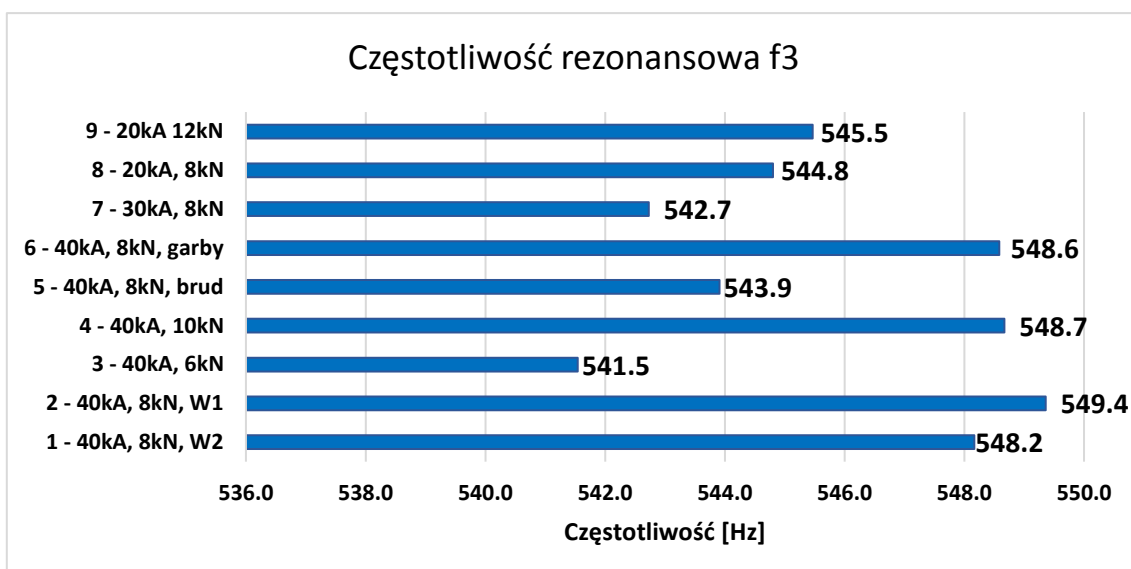
Rys. 15.4 Widok oprogramowania do widmowej kontroli jakości zestawiający detal wzorcowy nr 1 z detalem wzorcowym nr 2.



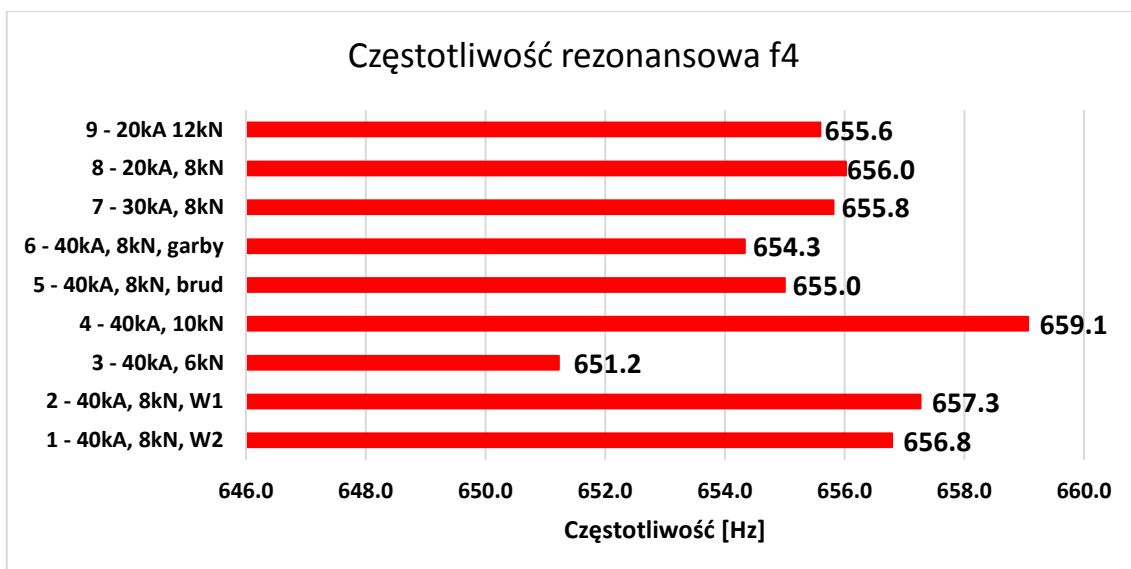
Rys. 15.5 Wykres częstotliwości rezonansowej f_1 dla próbek poddanych badaniu.



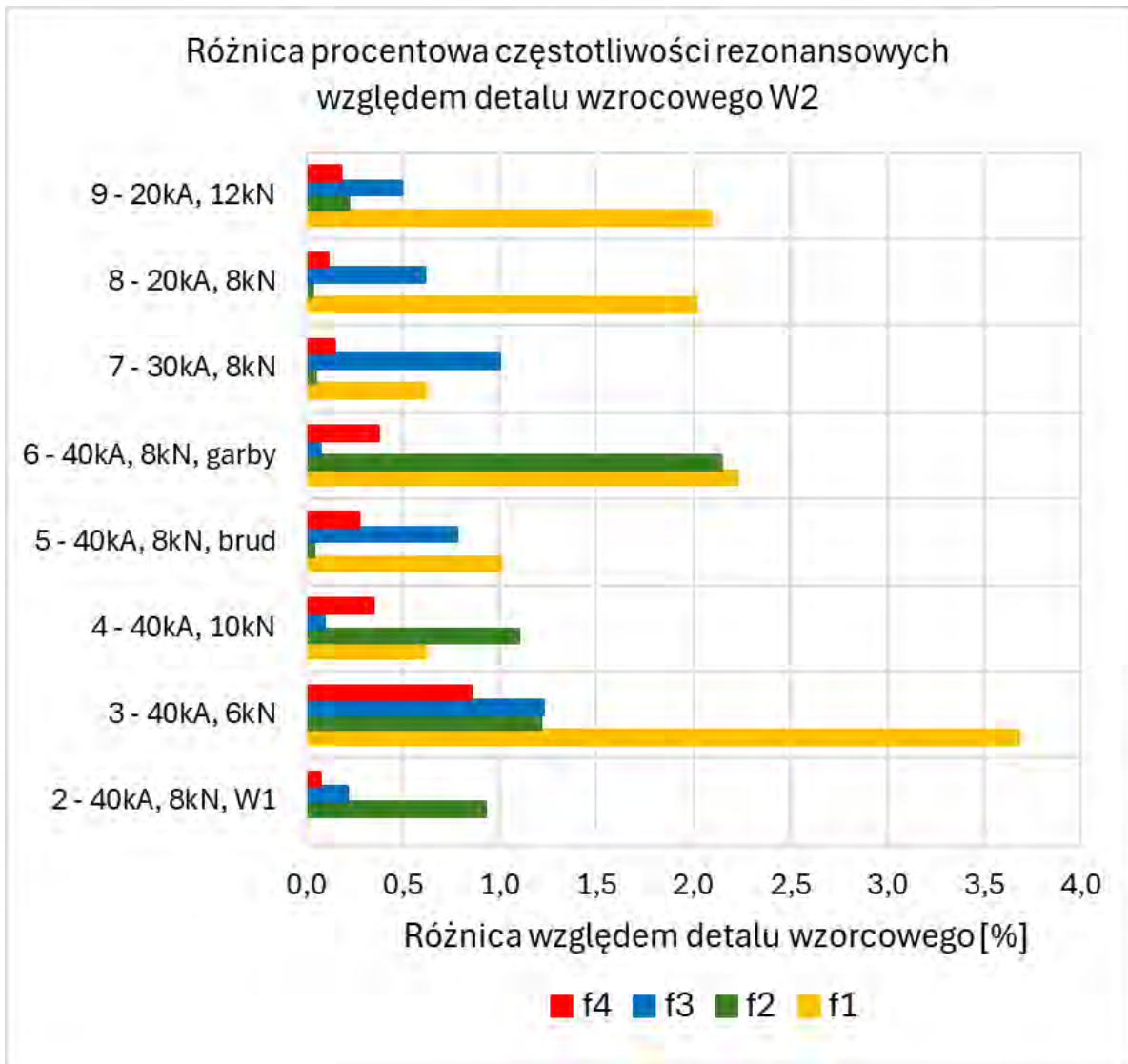
Rys. 15.6 Wykres częstotliwości rezonansowej f_2 dla próbek poddanych badaniu.



Rys. 15.7 Wykres częstotliwości rezonansowej f_3 dla próbek poddanych badaniu.



Rys. 15.8 Wykres częstotliwości rezonansowej f_4 dla próbek poddanych badaniu.



Rys. 15.9 Wykres różnicy procentowej częstotliwości rezonansowych względem detalu wzorcowego W2.

Częstotliwości rezonansowe próbek pozwalają na ocenę jakości wykonanych połączeń. W przypadku wszystkich wykresów (rys. 15.5; 15.6; 15.7; 15.8), detale wzorcowe nie wykazują zmian częstotliwości rezonansowych przekraczających 3,5 Hz. Kolejny detal nr 4 także zachowuje stabilność pomiarów, informując o właściwych własnościach mechanicznych złącza. Jest to spowodowane zwiększoną siłą docisku elektrod, która w przypadku zwiększenia o 2 kN nie wpływa w znaczący sposób na złącze. Detale 7, 8 oraz 9 wykazują wyraźne zmiany częstotliwości rezonansowych z uwagi na znaczne obniżenie wartości prądu zgrzewania do 30 kA oraz 20 kA, co skutkuje zbyt małą energią do wytworzenia prawidłowego złącza. Detal nr 6, w którym zostały sfrezowane garby również wykazał znaczącą różnicę częstotliwości rezonansowej względem detali wzorcowych szczególnie w odniesieniu do wykresu (rys. 15.6). Największą różnicę dla wszystkich częstotliwości rezonansowych zarejestrowano w przypadku próbki nr 3, która cechowała się siłą docisku zmniejszoną do 6 kN. Wyniki świadczą o możliwości kontrolowania procesu zgrzewania garbowego wielopunktowego, pomimo iż równice częstotliwości rezonansowych są małe, to ocenę jakości badanych detali można prowadzić w oparciu o wszystkie 4 dostępne pasma. Pozwala to na podniesienie wiarygodności i skuteczności metody.

15.2. Weryfikacja połączenia skaningową mikroskopią akustyczną

Jako pierwsza metoda weryfikacji badań z użyciem analizy widmowej przeprowadzona została skaningowa mikroskopia akustyczna (SAM), która stanowi cenne narzędzie w diagnostyce jakości połączeń zgrzewanych. Metoda ta umożliwia precyzyjne określenie podstawowych parametrów złącza, takich jak średnica zgrzeiny. Ponadto pozwala na weryfikację połączenia pod kątem obecności wewnętrznych niezgodności spawalniczych, takich jak pęcherze, pory i wtrącenia-

Należy jednak pamiętać, że metoda SAM ma swoje ograniczenia wynikające z fizyki fal ultradźwiękowych. Na przykład niezgodności płaskie, które nie są ustawione prostopadle do kierunku propagacji fali, mogą być wykrywane w mniejszym stopniu lub wcale. Ponadto, nierówności powierzchni badanego elementu (np. szew profilu) mogą powodować rozpraszanie fali padającej na obiekt, co uniemożliwia dokładną rejestrację sygnałów powracających do głowicy ultradźwiękowej. Warto zatem uwzględnić te aspekty podczas analizy wyników uzyskanych za pomocą skaningowej mikroskopii akustycznej.

Skanowanie połączeń zgrzewanych garbowo odbywa się w płaszczyźnie poziomej, oznaczanej jako X-Y. Jest to metoda immersyjna, co oznacza, że próbka musi być zanurzona w cieczy, aby zapewnić odpowiednie sprzężenie akustyczne między nią a materiałem badanym. Najczęściej używa się wody demineralizowanej z dodatkiem inhibitora korozji. Aby uniknąć drgań konstrukcji urządzenia oraz ruchów próbki podczas badania, ważne jest odpowiednie skonfigurowanie ruchu skanującego. Należy dobrać krok skanowania, prędkość oraz dopuszczalne poziomy przyspieszenia i opóźnienia głowicy skanującej.

W badaniach wykorzystano urządzenie firmy OKOS NDT CF-330 (rys. 15.10), które jest wyposażone w głowicę ultradźwiękową o częstotliwości środkowej 20 MHz. Przetwornik ma średnicę 6,3 mm, a odległość ogniskowej wynosi 12,5 mm. Podczas badań rejestrowano obrazy C-scan (w płaszczyźnie leżącej na styku nakrętki z profilem). W celu umożliwienia dojścia głowicy ultradźwiękowej do badanego połączenia, nakrętki zostały wycięte z częścią profilu (rys. 15.11) poprzez proces przecinania elektroerozyjnego EDM. W tabeli przedstawiono C-scan wraz z wartością pola powierzchni zgrzeiny zmierzonego przy pomocy algorytmu w oprogramowaniu MatLab.

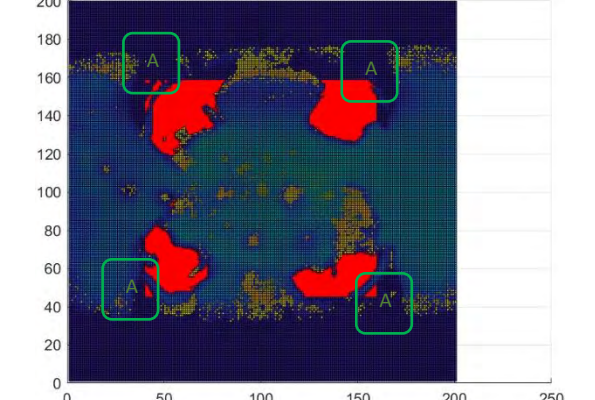
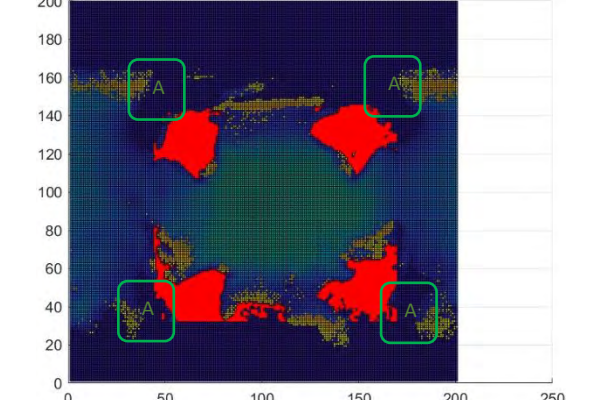
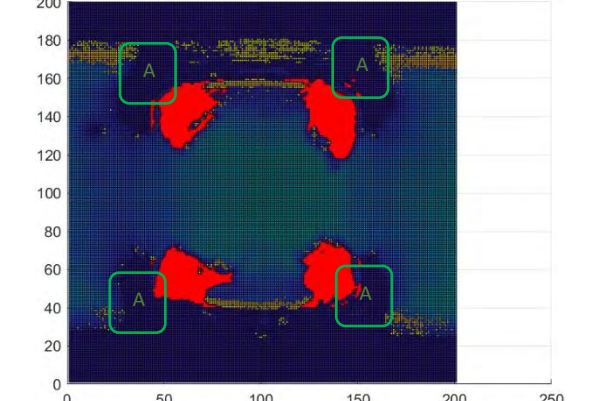
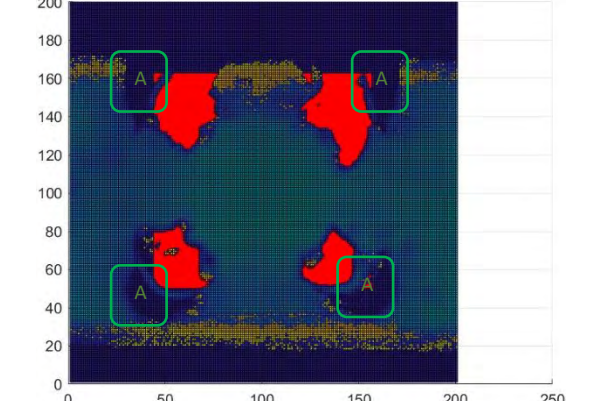
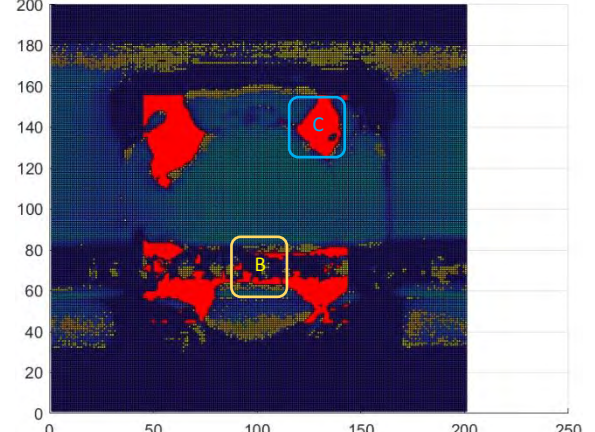
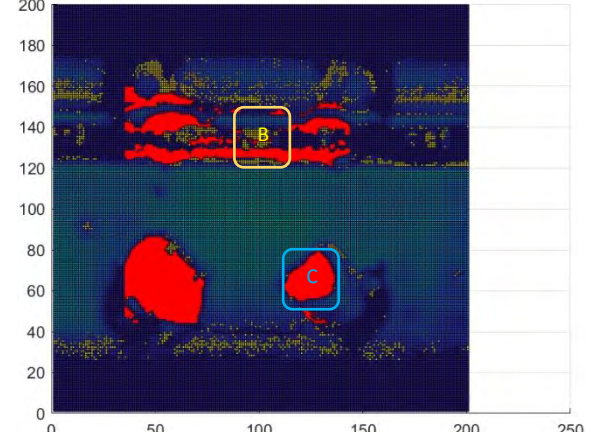


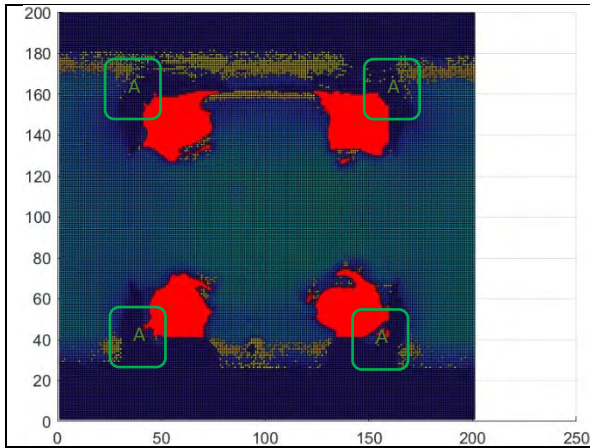
Rys. 15.10 Widok skaningowego mikroskopu akustycznego OKOS CF-300.



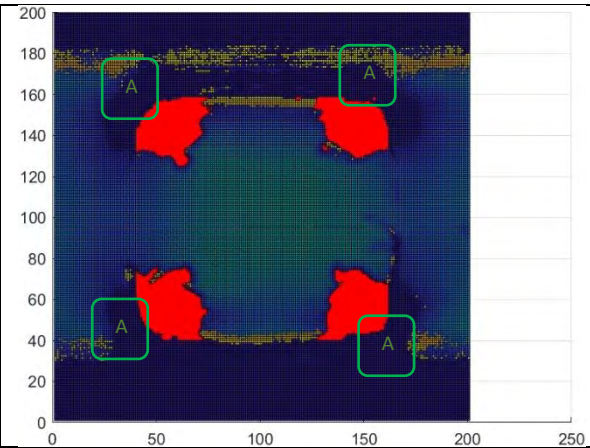
Rys. 15.11 Wycięta część profilu ze zgrzaną garbowo nakrętką DIN 928.

Tabela 15.2 Zestawienie C-scan'ów zgrzein garbowych wraz z polem powierzchni.

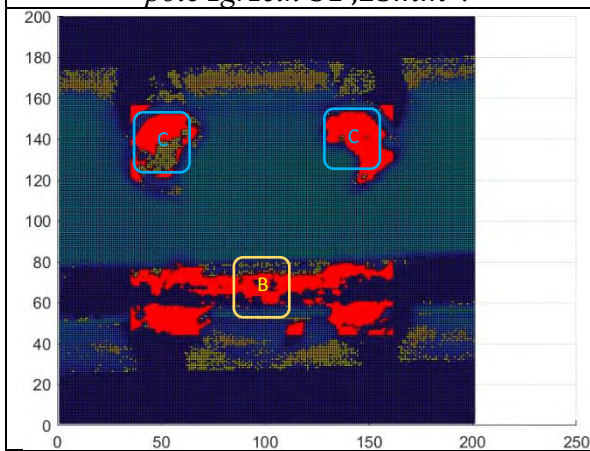
	
<p>Rys. 15.12 Detal nr 1.1 – W2 40 kA, 600 daN; pole zgrzein 31,91 mm².</p>	<p>Rys. 15.13 Detal nr 1.2 – W2 40 kA, 600 daN; pole zgrzein 35,61 mm².</p>
	
<p>Rys. 15.14 Detal nr 2.1 – W1 40 kA, 600 daN; pole zgrzein 29,74 mm².</p>	<p>Rys. 15.15 Detal nr 2.2 – W1 40 kA, 600 daN; pole zgrzein 31,31 mm².</p>
	
<p>Rys. 15.16 Detal nr 3.1 – 40 kA, 600 daN; pole zgrzein 24,27 mm².</p>	<p>Rys. 15.17 Detal nr 3.2 – 40 kA, 600 daN; pole zgrzein 29,94 mm².</p>



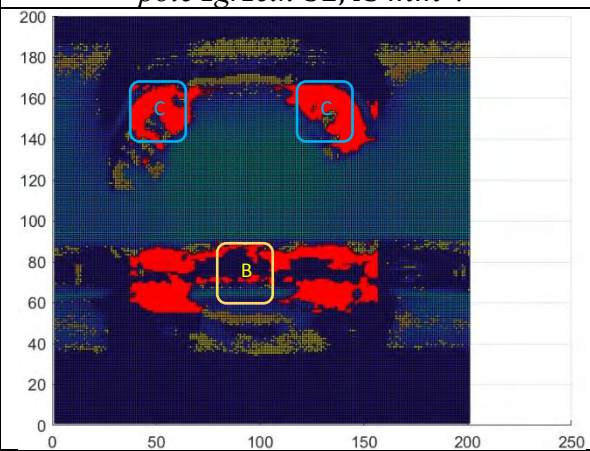
Rys. 15.18 Detal nr 4.1 –
40 kA, 1000 daN;
pole zgrzein 31,25mm².



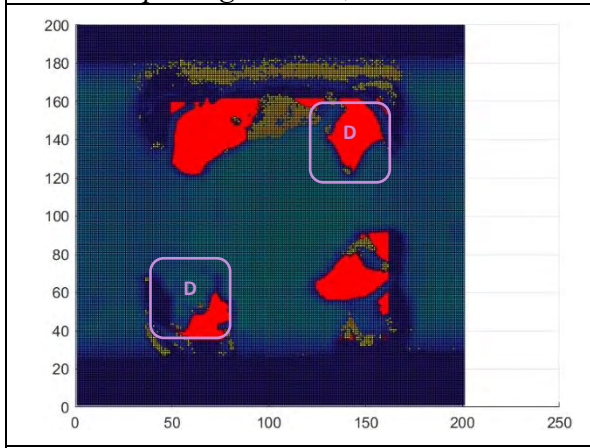
Rys. 15.19 Detal nr 4.2 –
40 kA, 1000 daN;
pole zgrzein 32,45 mm².



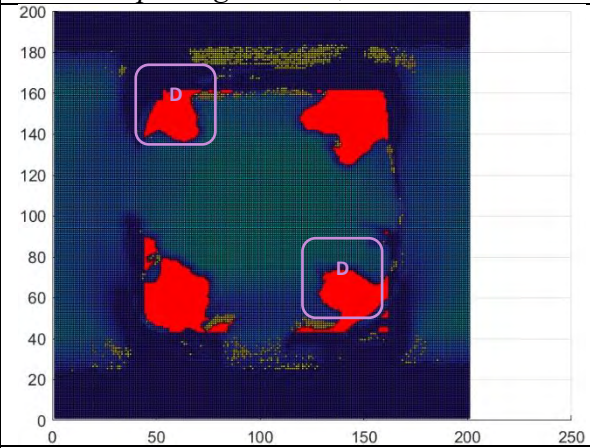
Rys. 15.20 Detal nr 5.1 – zabrudzenia
40 kA, 800 daN;
pole zgrzein 31,50 mm².



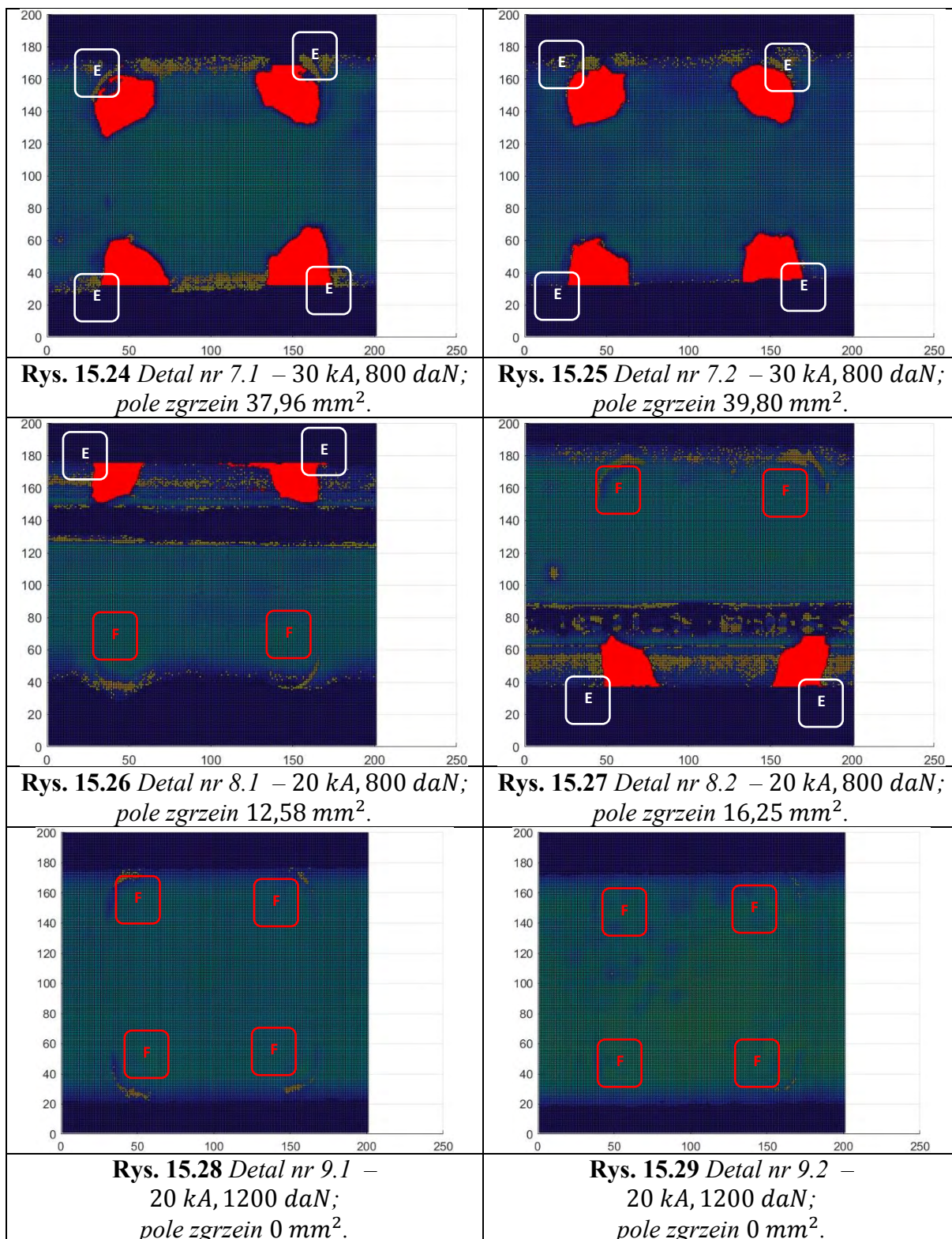
Rys. 15.21 Detal nr 5.2 – zabrudzenia
40 kA, 800 daN;
pole zgrzein 31,98 mm².



Rys. 15.22 Detal nr 6.1 – spilowane garby
40 kA, 800 daN;
pole zgrzein 30,09 mm².



Rys. 15.23 Detal nr 6.2 – spilowane garby
40 kA, 800 daN;
pole zgrzein 31,78 mm².



Na podstawie wyników zamieszczonych w Tabeli 15.2, detale wzorcowe (rys. 15.12 - 15.15) posiadają zbliżone pola powierzchni zgrzein w przypadku nakrętki nr 1 oraz 2. Dodatkowo należy zauważyć znaczącą strefę wymieszania się materiału rodzimego z uplastycznionymi garbami (oznaczono literą A na C-scanie), która dostarcza informacji o właściwym osiadczeniu garbu. Wszystkie 4 garby posiadają równomierne pole powierzchni.

Poddając analizie C-scan detal nr 3 (rys. 15.16, 15.17) zaobserwowano wyraźny szew profilu walcowanego (oznaczono literą B), który w znaczącym stopniu zakłócił powstawanie

połączenia. Profil ten nie wykazuje równomiernego kształtu charakterystycznego dla właściwie wykonanego połączenia garbowego (oznaczono literą C), które jest wynikiem zbyt małej siły docisku.

Detal nr 4 (rys. 15.18, 15.19) wykazuje prawidłowe połączenia garbowe, z wyraźną strefą wymieszania garbu (oznaczono literą A) z materiałem rodzimym oraz kształtem i wielkością pola powierzchni analogiczna jak w przypadku detali wzorcowych. Tutaj również wszystkie 4 garby posiadają równomierne pole powierzchni, dowodząc właściwie wykonanego połączenia wielopunktowego garbowego.

W detalu nr 5 (rys. 15.20, 15.21), który posiadał zabrudzoną powierzchnię w trakcie procesu zgrzewania zauważono dodatkowo wyraźny szew profilu walcowanego w miejscu wykonywanego złącza (oznaczono literą B). Połączenia wykonane w tym detalu nie posiadają odpowiedniego kształtu oraz strefy wymieszania z materiałem rodzimym (oznaczono literą C).

Detal nr 6 (rys. 15.22, 15.23) nie posiadał dwóch garbów w nakrętce, jest to wyraźnie widoczne na obrazach z mikroskopii ultradźwiękowej (oznaczono literą D). Pomimo braku dwóch garbów pozostałe dwa posiadają połączenia poprawnie wykonane z bardzo dużą powierzchnią zgrzeiny, która informuje o dobrych własnościach mechanicznych tego połączenia.

W przypadku detalu, w którym nastąpiło zmniejszenie prądu zgrzewania do 30 kA (rys. 15.24, 15.25) wystąpił brak wymieszania garbu z materiałem rodzimym (oznaczono literą E), sugeruje to brak właściwego przetopu z materiałem rodzimym pomimo dużej powierzchni zgrzein.

W odniesieniu do dwóch ostatnich detali nr 8 oraz 9 (rys. 15.26 - 15.29), których parametr prądu zgrzewania wynosił 20 kA, zauważono zupełny brak połączenia (oznaczony literą F) lub niewłaściwe wymieszanie z materiałem rodzimym (oznaczono literą E), złącza te są niepoprawne pod kątem własności mechanicznych.

Weryfikując wyniki przedstawione w badaniach skaningową mikroskopią akustyczną dostrzeżono wyraźne różnice w połączeniach pomiędzy poszczególnymi próbkami. Jednakże próbki wzorcowe w odniesieniu do próbki, której proces zgrzewania odbywał się z siłą 10 kN, wykazują analogiczny wygląd zgrzeiny świadczący o porównywalnych własnościach mechanicznych połączenia. Pozostałe próbki w sposób znaczący odbiegają od detali wzorcowych, co zostało zarejestrowane jako różnice częstotliwości rezonansowych podczas badań z zastosowaniem analizy modalnej.

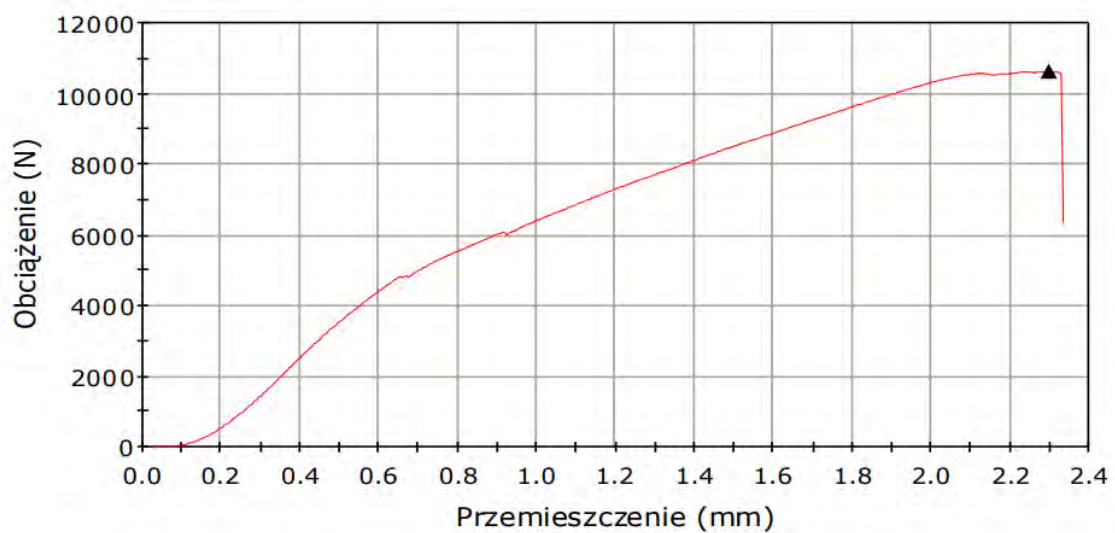
15.3. Weryfikacja badaniami wytrzymałościowymi - siły zerwania zgrzein

Badania wytrzymałościowe stanowią kluczowy element w ocenie właściwości mechanicznych połączeń zgrzewanych. Maszyna, na której przeprowadzono badania wytrzymałościowe był to INSTRON model 3369 (rys. 15.30). Umożliwia ona przeprowadzenie testów rozciągania, ściskania i zginania. Jest to dwukolumnowa maszyna umożliwiająca statyczną próbę rozciągania, która wykonuje testy na próbkach o maksymalnej sile do 50 kN [109].

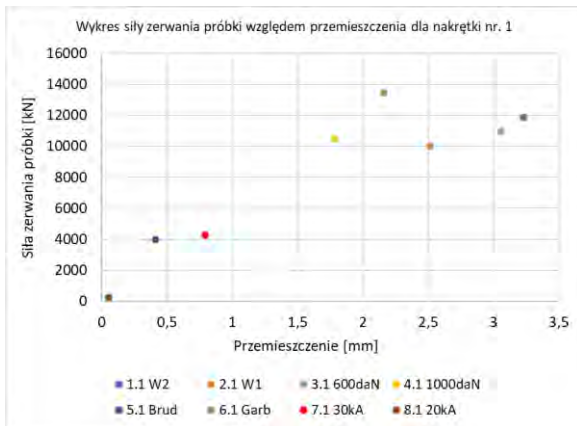
Statyczną próbę rozciągania połączeń garbowych przeprowadzono na próbkach wyciętych do badań z zastosowaniem mikroskopii ultradźwiękowej (rys. 15.10). Przebieg pojedynczej statycznej próby rozciągania dla detalu nr 3 przedstawiono na wykresie przemieszczenia w odniesieniu do siły rozciągającej próbkę do momentu zerwania (rys. 15.31).



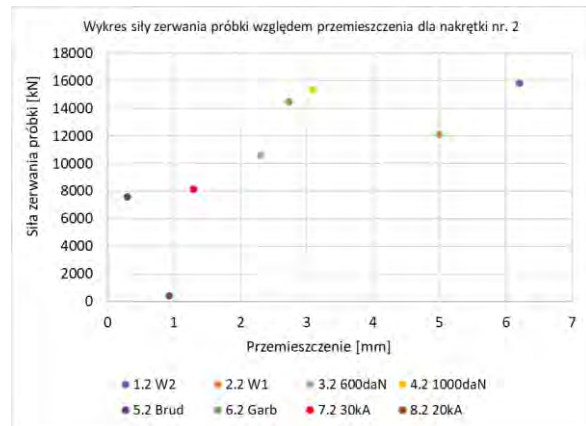
Rys. 15.30 Maszyna wytrzymałościowa firmy INSTRON model 3369 wraz zamocowaną próbką.



Rys. 15.31 Wykres statycznej próby rozciągania detalu nr 3 dla pierwszej nakrętki.



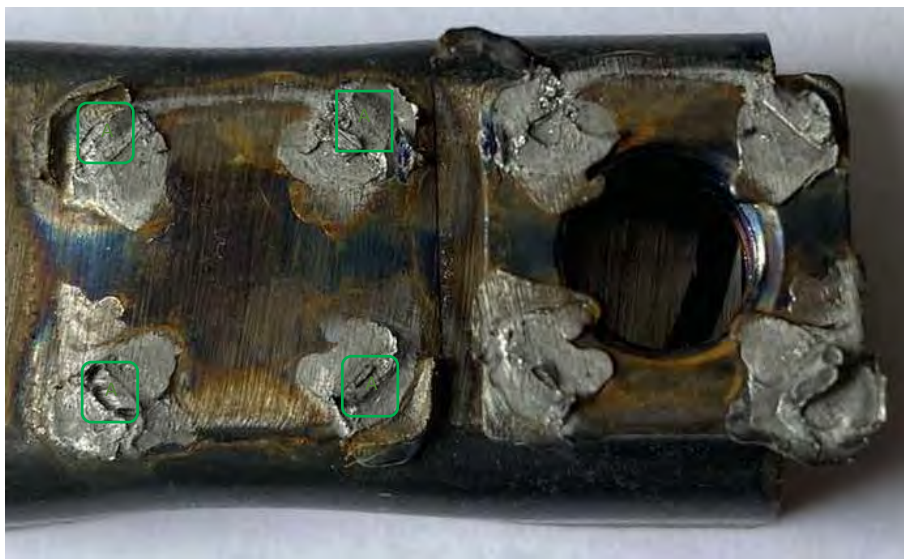
Rys. 15.32 Wykres zbiorczy siły zerwania pierwszej nakrętki.



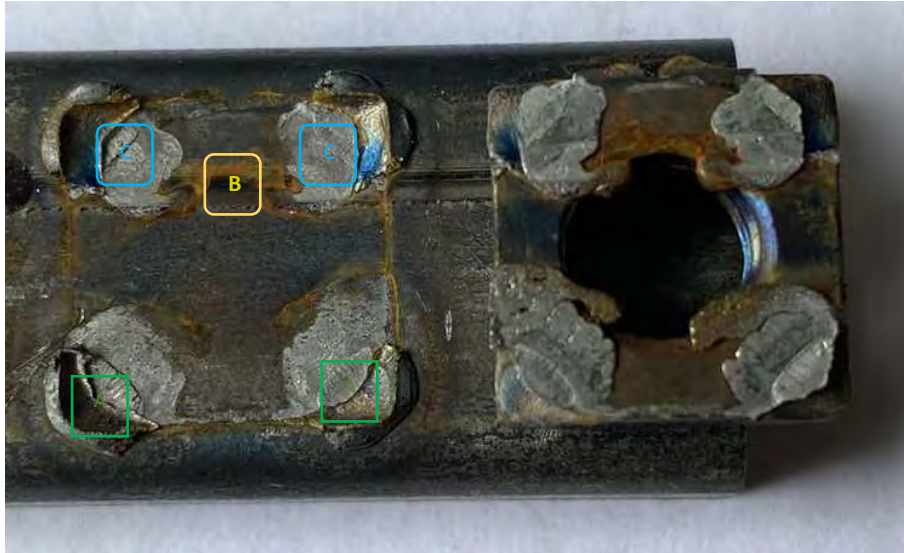
Rys. 15.33 Wykres zbiorczy siły zerwania drugiej nakrętki.

Na podstawie analizy wykresów (rys. 15.32, 15.33) zestawiających przemieszczenie względem siły zerwania dla poszczególnych nakrętek, dostrzeżono największe przemieszczenia zarejestrowane dla detali wzorcowych nr 1 oraz 2. Detale, których prąd zgrzewania został zmniejszony do wartości 30 oraz 20 kA nie spełniły minimalnych własności wytrzymałościowych. Próbką, w której proces zgrzewania odbywał się na zabrudzonej powierzchni również nie osiągnęła minimalnej siły zerwania. Detal nr 6 ze sfrezowanymi garbami spełnił minimalne własności mechaniczne pomimo niewłaściwych dwóch połączeń, co zostało zaprezentowane na rysunku (rys. 15.22, 15.23). Największy wpływ na siłę zerwania próbek ma wielkość prądu zgrzewania, drugorzędną rolę odgrywa wartość siły docisku.

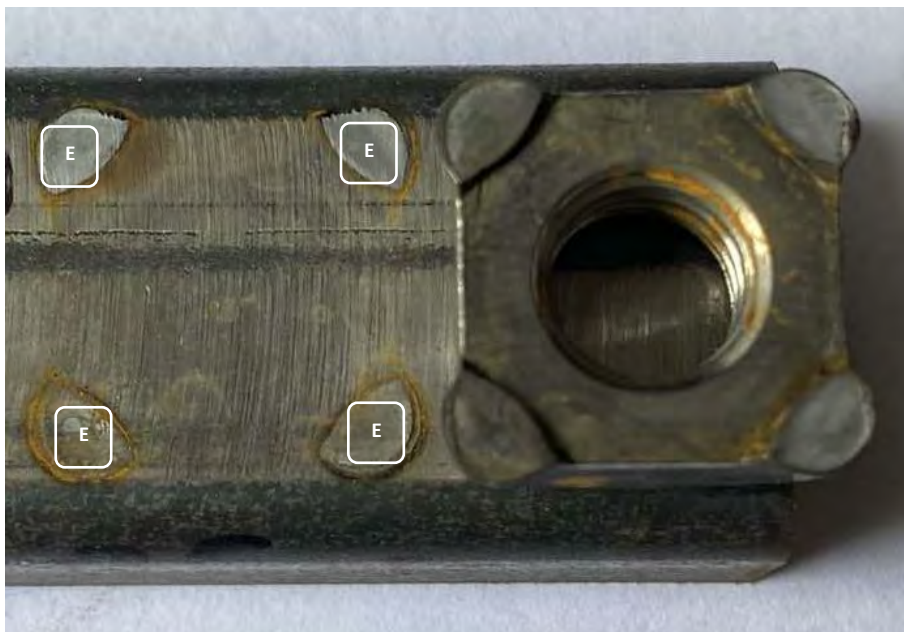
Zestawiając fotografie zerwanego połączenia garbowego detalu wzorcowego W2 (rys 15.34) z odpowiadającym mu C-scanem (rys. 15.13), dostrzeżono wyraźne strefy wymieszania zaznaczone analogicznie literą A na fotografii (rys. 15.34). Porównując fotografie detalu nr 5 (rys. 15.35) z odpowiadającym mu C-scanem (rys. 15.21), dostrzeżono mniejsze pole powierzchni garbów oznaczone literą A oraz szew profilu walcowanego zaznaczony literą B. Sama nakrętka w tym przypadku nie wykazuje wyrwania materiału rodzimego z profilu, do którego została zgrzana. Przechodząc do ostatniej fotografii połączenia detalu nr 7 (rys. 15.36) i odpowiadającym mu C-scanowi (rys. 15.24), połączenie jest nieprawidłowe z uwagi na brak wymieszania z materiałem profilu, do którego zgrzewana jest nakrętka – oznaczono literą E.



Rys. 15.34 Fotografia zerwanego połączenia garbowego po statycznej próbie rozciągania dla detalu wzorcowego nr 1 dla drugiej nakrętki.



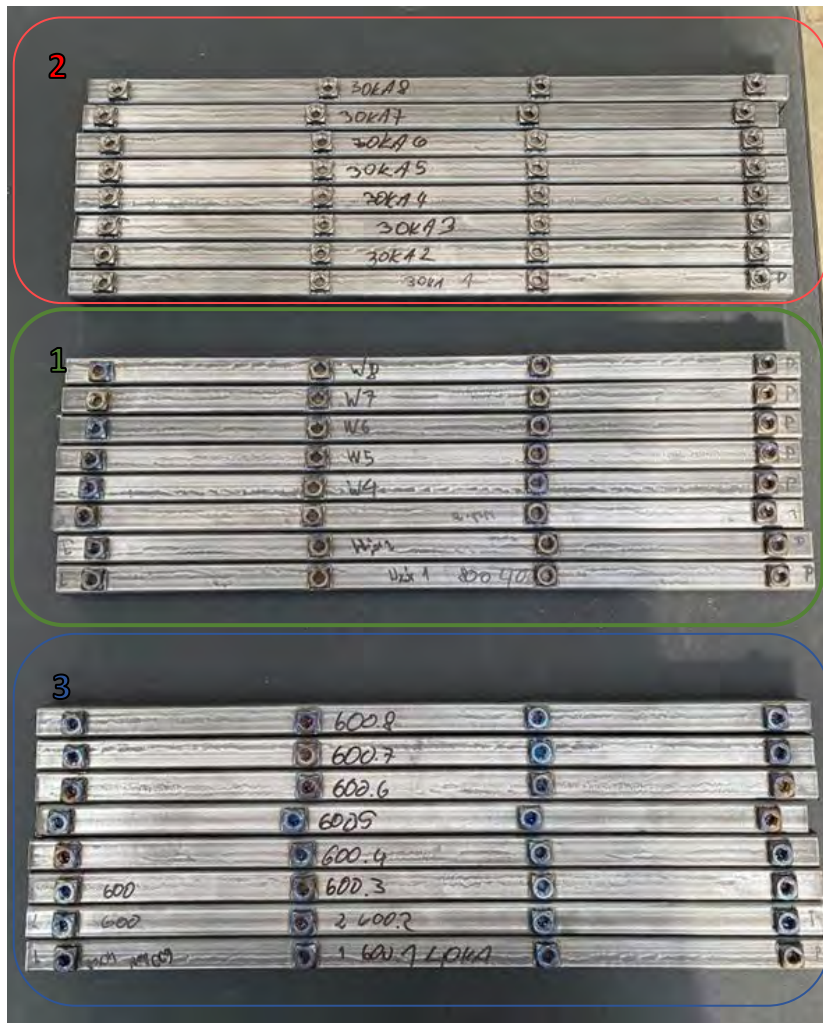
Rys. 15.35 Fotografia zerwanego połączenia garbowego po statycznej próbie rozciągania dla detalu nr 5 dla drugiej nakrętki.



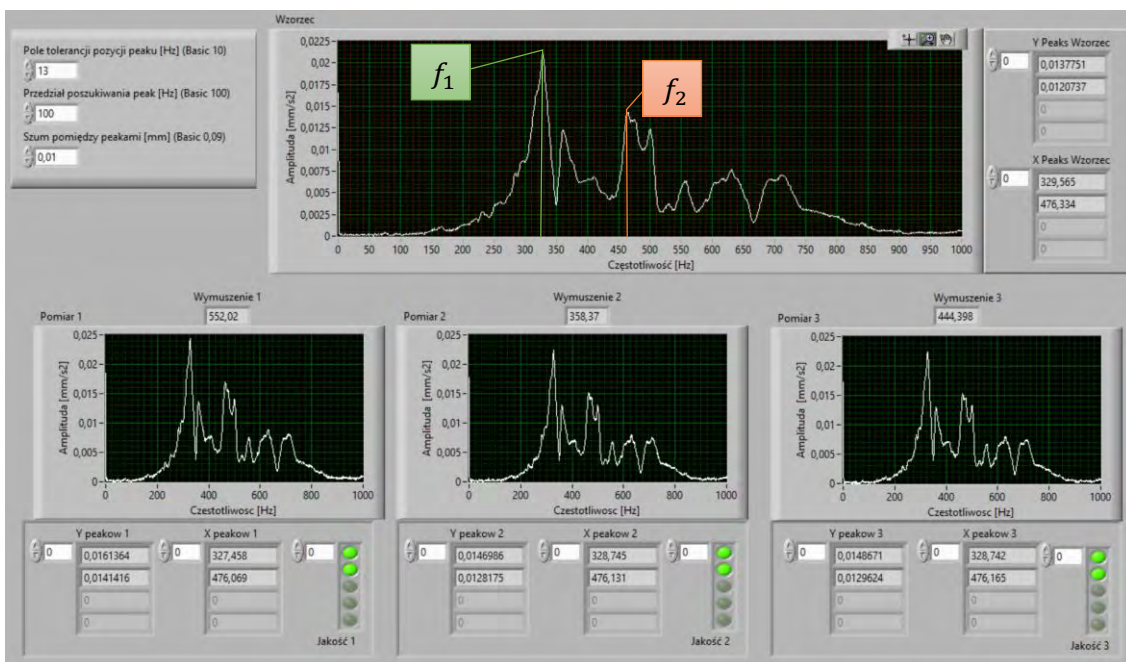
Rys. 15.36 Fotografia zerwanego połączenia garbowego po statycznej próbie rozciągania dla detalu nr 7 dla pierwszej nakrętki.

15.4. Statystyczna weryfikacja powtarzalności pomiarowej

W celu weryfikacji powtarzalności pomiarowej dla kontroli jakości poprzez analizę modalną, wytypowano trzy próbki o różnych parametrach procesu zgrzewania: próbka wzorcowa nr 1 - prąd zgrzewania 40 kA, siła docisku 8 kN; detal nr 2 – prąd zgrzewania 30 kA, siła docisku 8 kN, detal nr 3 – prąd zgrzewania 40 kA, siła docisku 6 kN. Detale te zostały wykonane w liczbie 8 sztuk dla każdego zestawu parametrów (rys. 15.37). Odpowiedź zestawiającą dwa detale wzorcowe wraz z zaznaczonymi częstotliwościami rezonansowymi przedstawiono na rysunku (rys. 15.38). Próbki zostały przebadane w tej samej konfiguracji wymuszenia oraz rejestrowania sygnału odpowiedzi jak próbki z dwoma nakrętkami.



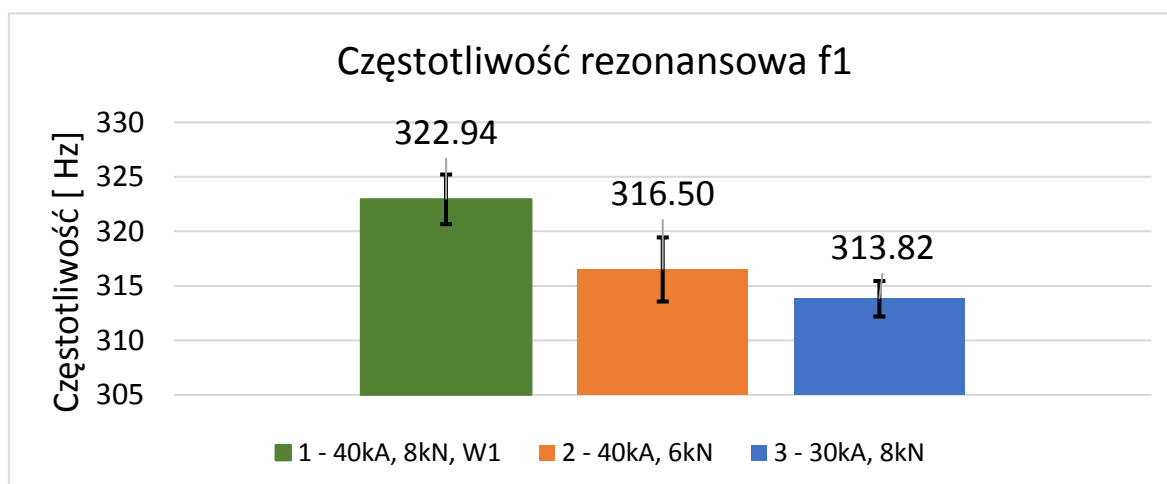
Rys. 15.37 Próbki po 8 sztuk dla różnych parametrów procesu zgrzewania garbowego wielopunktowego.



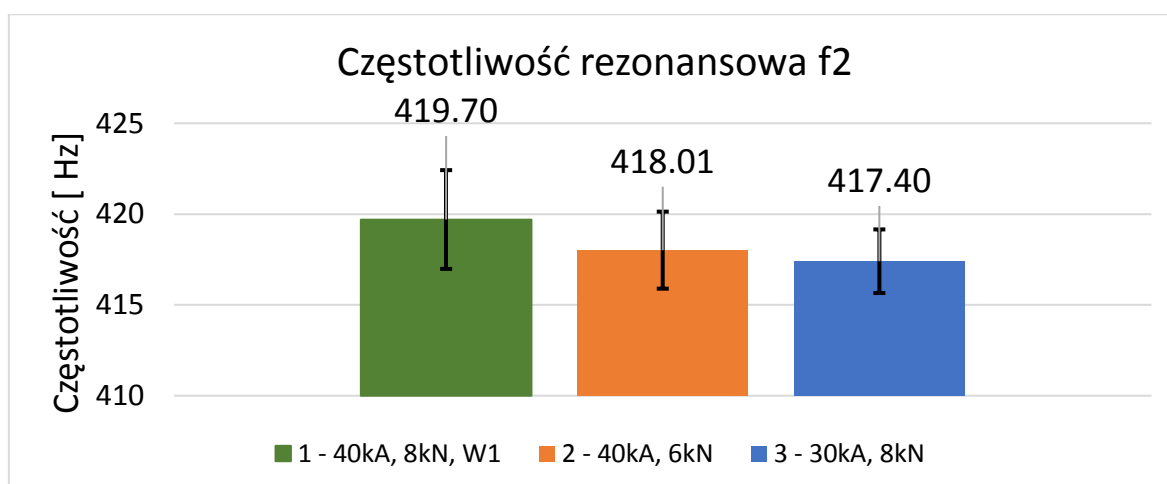
Rys. 15.38 Widok oprogramowania do widmowej kontroli jakości zestawiający odpowiedź dwóch detali wzorcowych, z zaznaczonymi częstotliwościami rezonansowymi.

Tabela 15.2 Wartości częstotliwości rezonansowych poszczególnych próbek.

1 - 40kA, 8kN, W1	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	2 - 40kA, 6kN	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	3 - 30kA, 8kN	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]
1	323.3	476.3	1	314.2	469.7	1	311.5	467.5
2	323	475.2	2	315.0	469.5	2	313.2	471.7
3	324.3	473.2	3	311.3	468.5	3	312.1	467.2
4	322.2	469.5	4	320.3	473.2	4	316.3	469.1
5	326.1	473.1	5	318.2	466.5	5	313.4	471.1
6	318.3	467.5	6	320.6	473.1	6	314.4	468.7
7	321.2	471.3	7	316.3	471.4	7	316.2	472.2
8	325.09	471.1	8	316.2	470.4	8	313.4	469.2
Mediana	323.2	472.2	Mediana	316.3	470	Mediana	313.4	469.1
Średnia	322.9	419.7	Średnia	316.5	418	Średnia	313.8	417.4
σ	2.3	2.7	σ	2.9	2.1	σ	1.6	1.8



Rys. 15.39 Częstotliwości rezonansowe f_1 badanych detali wraz z zaznaczonym odchyleniem standardowym badanych komponentów.



Rys. 15.40 Częstotliwości rezonansowe f_2 badanych detali wraz z zaznaczonym odchyleniem standardowym badanych komponentów.

Tabela 15.3 Analiza wariancji jednoczynnikowej dla częstotliwości rezonansowej f_1 .

Analiza wariancji: jednoczynnikowa f_1						
Źródło wariancji	SS	df	MS	F	Wartość-p	Test F
Pomiędzy grupami	351.56	2	175.78	27.98	0.000001197	3.47
W obrębie grup	131.95	21	6.28			
Razem	483.52	23				

Tabela 15.4 Analiza wariancji jednoczynnikowej dla częstotliwości rezonansowej f_2 .

Analiza wariancji: jednoczynnikowa f_2						
Źródło wariancji	SS	df	MS	F	Wartość-p	Test F
Pomiędzy grupami	28.66	2	14.33	2.52	0.104811	3.47
W obrębie grup	119.61	21	5.70			
Razem	148.27	23				

Wyniki dla częstotliwości rezonansowych poszczególnych grup próbek zebrano w tabeli 15.2, a wyniki zostały poddane analizie statystycznej.

Badania obrazują statystycznie różny wynik dla częstotliwości rezonansowej f_1 . Dowodzi tego tabela (tab. 15.3) dla której wartość $p = 0.000001197$ wskazuje na wynik statystycznie różny względem dwóch pozostałych grup próbek. W przypadku drugiej analizowanej częstotliwości rezonansowej f_2 wyniki wariancji jednoczynnikowej (tab. 15.4) również obrazuje wynik statystycznie różny, jednak zmiany dla tej częstotliwości są mniejsze, ponieważ wartość $p = 0,105$. Większa wartość wskaźnika p informuje o mniejszej różnicy statystycznej pomiędzy grupami.

Mediana odczytana z tabeli 15.2 dla częstotliwości rezonansowej f_1 pokazuje wyraźną zmianę częstotliwości rezonansowej o 7 oraz 10 Hz odpowiednio dla grupy próbek nr 2 oraz nr 3; w przypadku częstotliwości f_2 mediana częstotliwości rezonansowej ulega zmianie o 2 oraz 3 Hz pomiędzy grupami próbek.

W aspekcie kontroli jakości częstotliwość rezonansowa f_1 umożliwia ocenę jakości detali wykonanych metodą zgrzewania garbowego wielopunktowego. Wykres średniej częstotliwości z nałożonym odchyleniem standardowym (rys. 15.39) prezentuje różnicę pomiędzy grupami próbek. Różnice te oraz fakt o statystycznie różnym wyniku dowodzą możliwości kontroli jakości poprzez analizę modalną. Wykres częstotliwości rezonansowej f_2 (rys. 15.40) dowodzi braku wyraźnej różnicy pomiędzy grupami. Z uwagi na brak powtarzalności pomiarowej oraz mniejszą statystyczną różnicę pomiarową to częstotliwość rezonansowa f_2 uniemożliwia ocenę jakości.

15.5. Podsumowanie badań z zastosowaniem analizy modalnej

Algorytm wykorzystujący analizę modalną do oceny jakości na podstawie zmiany wartości częstotliwości rezonansowej poszczególnych próbek (rys. 15.2) dowiódł możliwość zastosowania tej metody do oceny komponentów zgrzewanych metodą grabową wielopionową. Algorytm prawidłowo rozróżniał próbki względem próbek wzorcowych, o czym świadczy zmiana wszystkich czterech wykrytych częstotliwości rezonansowych dla poszczególnych próbek.

Badania z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii akustycznej (SAM) dowodzą wyraźnych zmian w poszczególnych połączeniach pomiędzy próbkami. Różnice te prowadzą do zmiany częstotliwości rezonansowej poszczególnych próbek.

Badania wykazały, że złącza charakteryzujące się najwyższą siłą zerwania w odniesieniu do przemieszczenia należały do detali wzorcowych, które można odróżnić od pozostałych badanych próbek. Różnice w wynikach wytrzymałościowych wskazują na występowanie różnic poszczególnych złączach, które skutkują zmianą wartości częstotliwości rezonansowej próbek.

Badania statystyczne potwierdzają zmianę wartości częstotliwości rezonansowych w zależności od parametrów procesu zgrzewania. Dodatkowo dostarczają informacji, że nie wszystkie postacie drgań, a tym samym częstotliwości rezonansowe można uznawać za znaczące do badania jakości komponentu.

16. Podsumowanie prac badawczych i wnioski

Niniejsza praca prezentuje zastosowanie analizy modalnej do oceny jakości złączy zgrzewanych wielopunktowo garbowo. Badania przeprowadzone na rzecz weryfikacji zastosowania pomiaru przy użyciu analizy modalnej do oceniania niezgodności w połączeniach zgrzewanych wielopunktowo garbowo przyniosły oczekiwane rezultaty. Metoda została zweryfikowana pozytywnie we wszystkich przeprowadzonych eksperymentach, dowodząc, że na podstawie zmiany wartości częstotliwości rezonansowej możliwe jest dokonanie oceny jakości złącza wielopunktowego garbowego. Wyniki prowadzonych prac badawczych we współpracy z przedsiębiorstwem aparatury spawalniczej ASPA Sp. z o.o. umożliwią wdrożenie systemu do modalnej kontroli jakości jako dodatkowe opcjonalne wyposażenie zgrzewarki garbowej.

16.1. Wnioski poznawcze

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają zasadność postawionej tezy naukowej i umożliwiają sformułowanie następujących wniosków poznawczych:

1. Zastosowanie analizy modalnej pozwala na ocenę procesu zgrzewania garbowego wielopunktowego pod kątem detekcji niezgodności zgrzewalniczych w elementach listew wtryskowych łączonych tą metodą.
2. Porównując kontrole jakości za pomocą analizy modalnej względem rezystancji dynamicznej, dotychczasowe badania dowodzą, że istnieje możliwość zastosowania analizy modalnej w celu dostarczenia informacji o jakości komponentu.
3. Symulacja komputerowa pozwala wyznaczyć punkty mocowania akcelerometru w celu uzyskania widma pozwalającego na analizę jakości komponentu wykonywanego poprzez zgrzewanie garbowe wielopunktowe.
4. Częstotliwości rezonansowe uzyskane w badaniach eksperymentalnych pokrywały się z częstotliwościami z analiz numerycznych.
5. Badania numeryczne oraz eksperymentalne potwierdziły znaczący wpływ siły docisku elektrod na badany układ. Przemieszczenia posiadały większą amplitudę w wyniku zwiększenia siły docisku do 12 kN.
6. Pomiar odpowiedzi w postaci przyspieszenia może odbywać się wielu w punktach pomiarowych (te są skorelowane z postacią drgań). Ważnym jest, aby postać prowadziła do deformacji detalu badanego w osi, dla której prowadzony jest pomiar. Zwiększenie wiarygodności pomiarowej może nastąpić poprzez pomiary za pomocą akcelerometrów wieloosiowych.
7. Analiza modalna dowiodła możliwości rozróżnienia próbek w zależności od parametrów zadanych w procesie zgrzewania. Próbki zostały zweryfikowane poprzez mikroskopię akustyczną oraz niszczącą próbę wytrzymałościową, dowodząc zmian metalograficznych w wykonanym połączeniu.
8. Badania statystyczne eksperymentu dowodzą powtarzalności znajdowanych częstotliwości rezonansowych.

16.2. Wnioski utylitarne

Na podstawie własnych doświadczeń oraz przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące praktyczne wnioski:

1. Praca badawcza przyniosła dodatkowe informacje o niezgodnościach podczas procesu zgrzewania garbowego wielopunktowego. Informacje te będą stanowiły parametr korekcyjny, umożliwiający modyfikację parametrów procesu w celu poprawy jakości złącza.

2. Badania wskazują na potencjalne możliwości przemysłowego zastosowania tej metody, jest ona łatwa w implementacji, ponieważ wymaga tylko akcelerometru o odpowiedniej rozdzielczości pomiarowej.
3. Do wytypowania miejsc mocowania akcelerometru w zastosowaniach przemysłowych projektanci oprzyrządowania zgrzewalniczego posłużą się badaniami numerycznymi, które zobrazują miejsca, w których zasadnym jest umiejscowienie czujnika przyspieszenia.
4. Wszystkie detale wytwarzane poprzez proces zgrzewania garbowego wielopunktowego z zaimplementowanym systemem do kontroli modalnej były weryfikowane jakościowo pod kątem niezgodności i uzyskano zgodność na poziomie 100%.

16.3. Przyszłe badania

Przyszłe prace badawcze związane z podjętym tematem pracy:

1. Zwiększenie skuteczności pomiarowej algorytmu poprzez rozszerzenie o poszukiwanie lokalnych minimów oraz analizę narastania zbocza sygnału odpowiedzi w dziedzinie częstotliwości.
2. Przeprowadzenie analizy numerycznej pozwala na rzeczywiste odwzorowanie dynamicznego wzbudzenia impulsowego i pomiaru przyspieszenia w punkcie (ograniczenia z uwagi na moc obliczeniową niezbędną do wykonania eksperymentu numerycznego dla liczby kroków analizy dynamicznej $k = 1000$).
3. Przemysłowe zastosowanie kontroli modalnej w przyrządzie do zgrzewania garbowego wielopunktowego.
4. Połączenie systemu CyberMicroWeld z informacjami dostarczanymi z analizy modalnej zgrzewania garbowego wielopunktowego.
5. Badania z zastosowaniem analizy modalnej do oceny pozycji nakrętki względem profilu.
6. Wykorzystanie innych rodzajów wzbudzenia elementu zgrzewanego do drgań, np. pochodzących z samego procesu.

Bibliografia

1. N. Athi, S.R. Wylie, J.D. Cullen, A.I. Al-Shamma'a „*Ultrasonic Non-Destructive Evaluation for Spot Welding in the Automotive Industry*”, IEEE SENSORS 2009 Conference, Liverpool, 2009.
2. J. Nowacki, A. Wypych „*Application of thermovision method to welding thermal cycle analysis*”, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering Volume 4, 2010.
3. U. Sreedhar, C.V. Krishnamurthy, K. Balasubramaniam, V. D. Raghupathy, S. Ravisankar „*Automatic defect identification using thermal image analysis for online weld quality monitoring*”, Journal of Materials Processing Technology, 2012.
4. A. Ambroziak, Z. Koralewicz. M. Korzeniowski, P. Kustroń „*METODY KONTROLI JAKOŚCI ZGRZEIN PUNKTOWYCH W CZASIE RZECZYWISTYM*”, EKSPLOATACJA I NIEZAWODNOŚĆ, Nr2/2005.
5. Y. Cho, S. Rhee „*Primary circuit dynamic resistance monitoring and its application to quality estimation during resistance spot welding*”, WELDING RESEARCH, 2002.
6. P. Podrżaj, I. Polajnar, J. Diaci, Z. Kariž „*Estimating the strength of resistance spot welds based on sonic emission*”, Science and Technology of Welding & Joining, 2005
7. F. Chen, E.Y. Kuo, P.M. Wung, C.T. Griffen „*Nondestructive Evaluation of Spot Weld Integrity/Quality: Method Comparison*”, SAE TECHNICAL PAPER SERIES, Detroit, 1999.
8. W. Peterson, F. Donald, Jr. Morrisett „*ASM Handbook Welding Fundamentals and Processes*”, Resistance Welding Processes, 2011.
9. A. C. Karloff, A. M. Chertov, R. Gr. Maev „*Real-Time Ultrasonic Expulsion Detection and Indentation Measurement in Resistance SPOT Welds*”, 2010.
10. S. J. Ling, J. Sanny, W. Moebs „*Fizyka dla szkół wyższych Tom I*”, Katalyst Education, 2018.
11. P. Kustron, J. Kocimski, A. M. Chertov, S. Titov, M. Korzeniowski, A. Ambroziak, R. Gr. Maev „*In-Line Ultrasonic Investigation of SPOT Weld Quality Using Multi-Transducer Set-Up*”, 2010.
12. N. Athi, S.R. Wylie, J.D. Cullen, A.I. Al-Shamma'a „*Ultrasonic Non-Destructive Evaluation for Spot Welding in the Automotive Industry*”, IEEE SENSORS 2009 Conference, Liverpool, 2009.
13. R.Gr. Maev, A.A. Denisov, A. M. Chertov „*Automation of Resistance Spot Weld Inspection*” Institute for Diagnostic Imaging Research, Tessonics Inc.
14. Polska Norma PN-74 M-69020, „*Klasyfikacja jakości zgrzein punktowych.*”.
15. A. Straube, A. Torzewski, B. Winzen „*PQSweld – System kontroli dla zgrzewania punktowego i garbowego na bazie fuzzy logic.*”, Seminarium Inst. Spaw. Gliwice 2004.
16. www.tessonics-europe.com
17. F. Garza, M.Das „*On Real Time Monitoring and Control of Resistance Spot Welds Using Dynamic Resistance Signatures*”, Proceedings of the 44th IEEE 2001 Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2001.
18. X. Wan, Y. Wang, D. Zhao „*Quality monitoring based on dynamic resistance and principal component analysis in small scale resistance spot welding proces*”, Int J Adv Manuf Techno, 2016.
19. D. Watney, G. Nage1 „*Forms of dynamic resistance curves generated during resistance spot welding*”, Proceedings of the sheet metal welding conference, Dearborn, Michigan, s.1-8, 1983.

20. S.A. Gedeon, C.D. Sorensen, „*Measurement of dynamic electrical and mechanical properties of resistance spot welds*”, *Welding journal*, vol.66, #12, s.378-385, 1987.
21. Medar, Patent 4,885.45 1. „*Automatic stepper for resistance welding*”, 1989
22. L. Zhou, T. Li, W. Zheng, Z. Zhang, Z. Lei, L. Wu, S. Zhu, W. Wang „*Online monitoring of resistance spot welding electrode wear state based on dynamic resistance*”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2020.
23. K. Asokkumar, S. Manoharan, V.R. Samuel, S. Manoi, K.G.K. Murti “*Evaluation of dynamic resistance as quality criterion for resistance spot welding*”, *Indian welding journal*, s.24-3 I, 1997.
24. C.K. Datta „*Study of dynamic resistance curves in resistance spot and seam welding*”, *Indian Welding Journal*, 1996.
25. D. Mintz „*Control motivated modelling and study of resistive Dot welding*”, *Praca magisterska*, Rensselaer polytechnic institute, 1997.
26. K.I. Johnson „*Resistance welding quality control techniques*”, *Metal construction and British Welding journal*, s.176-181, 1969.
27. H.S. Cho, Y.J. Cho „*A study of the thermal behavior in resistance spot welds*”, *Welding Journal*, vol.68, s.236-244.
28. G. C. Goodwin and K. S. Sin „*Adaptive Filtering Prediction and Control*”, Prentice Hall, New Jersey, 1984.
29. F. Garza, M. Das „*Identification of time-varying resistance during welding*”, *IEEE IMTC conference*, Baltimore, 2000.
30. F. Garza, „*Classification of Spot Welds From a Linear, TimeVarying Model of the Resistance Signature*”, *Praca doktorska*, Oakland university, Rochester.
31. Z.W. Yang, H.P. Yan, Y. Li, G.J. Kou, G. Tian, W. Zhang „*A Novel Inclined Excitation Method for Crack Detection of Non-Ferromagnetic Materials Using Eddy Current Thermography. Strength Mater*”, s.558–568, 2019.
32. O. Sherepenko, A. Mohamadizadeh, A. Zvorykina, M. Worswick, E. Biro, S. Jüttner, „*Determination of resistance spot weld failure path in ultra-high-strength press-hardened steel by control of fusion boundary transient softening*” *J. Mater. Sci.*, 2021.
33. B. Oswald-Tranta “*Lock-in inductive thermography for surface crack detection in different metals. Quant. Infrared Thermogr.*”, 2019.
34. D. Türler, D. Hopkins and F. Reverdy „*Nondestructive Evaluation of Spot Welds Using Acoustic and Thermographic Imaging Techniques*”, *SAE TECHNICAL PAPER SERIES*, 2003.
35. J. Schlichting, S. Brauser, L.A. Pepke, Ch. Maierhofer, M. Rethmeier, M. Kreutzbruck „*Thermographic testing of spot welds*”, *NDT&E International*, 2012.
36. A. Runnemalm, J. Ahlberg A. Appelgren, S. Sjökvist, „*Automatic Inspection of Spot Welds by Thermography*”, 2014.
37. P. Myrach, F. Jonietz, M. Ziegler, Hubert Suwala, M. Rethmeier „*Spot Weld Inspections Using Active Thermography*”, 2015.
38. F. Jonietz, P. Myrach, H. Suwala, M. Ziegler „*Examination of Spot Welded Joints with Active Thermography*” 2016.
39. R. Usamentiaga, C. Ibarra-Castanedo, M. Klein, X. Maldague, J. Peeters, A. Sanchez-Beato, „*Nondestructive Evaluation of Carbon Fiber Bicycle Frames Using Infrared Thermography*”, *Sensors*, 2017.
40. V.M. Chernyshev, F.S. Kuznetsov, A.A. Ermakov „*Visual techniques in x-ray quality control of welded joints*”, *Chemical and Petroleum Engineering*, 1967.
41. K. Ferenc „*Spawalnictwo*”, *Wydawnictwo Naukowe PWN*, 2016.

42. J-D. Lee, S-J. Lee, J-H. Bang „*Weld Quality Evaluation Method for the Resistance Spot Welds using X-ray Transmission Inspection*”, Journal of Welding and Joining, 2014.
43. J. Pliarczyk „*Poradnik inżyniera Tom 1. Spawalnictwo*”, WNT, 2022.
44. K. Ferenc, J. Ferenc „*Konstrukcje spawane – połączenia*”, PWN, 2010.
45. W. Robert Jr. Messler „*Principles of Welding*”, WILEY-VCH, 2004.
46. H. Zhang, J. Senkara „*Resistance welding fundamental and applications*”, Taylor & Francis Group, 2006.
47. H. Tohmyoh, M. Ito, Y. Hasegawa, Y. Matsui „*Extraction of the outer edge of spot welds from the acoustic image with the aid of image processing*”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021.
48. D. Stocco, D. Vilela, G. F. Batalha „*SPOT WELD FATIGUE DURABILITY PERFORMANCE THROUGH THE USE OF FEA*”, SAE Technical Papers, 2009.
49. A. McPherson, B. Laramore „*Electrical machines and transformers*”, John Wiley and sons, 1990.
50. R. Chtourou, G. Haugou, N. Leconte, B. Zouari, F. Chaari, E. Markiewicz „*Experimental characterization and macro-modeling of mechanical strength of multi-sheets and multi-materials spot welds under pure and mixed modes I and II*”, EDP Sciences, 2015.
51. Polska norma PN-EN 28167:2002 pt. „*Garby do zgrzewania rezystancyjnego*”.
52. Polska norma PN-EN ISO 18278-1:2005 pt. „*Zgrzewanie rezystancyjne - Zgrzewalność - Część 1: Ocena zgrzewalności dla zgrzewania rezystancyjnego punktowego, liniowego i garbowego metali*”.
53. Polska norma PN-EN ISO 18278-2:2005 pt. „*Zgrzewalność - Część 2: Alternatywne procedury dotyczące oceny blach stalowych do zgrzewania punktowego*”.
54. Polska norma PN-EN ISO 17657-1:2009 pt. „*Pomiar prądu zgrzewania*”.
55. Polska norma PN-EN ISO 14327:2005 pt. „*Zgrzewanie rezystancyjne - Procedury dotyczące określania zgrzewalności dla zgrzewania rezystancyjnego punktowego, garbowego i liniowego*”.
56. Polska norma PN-EN ISO 14554-2:2002 pt. „*Wymagania dotyczące jakości zgrzewania - Zgrzewanie rezystancyjne metali - Część 2: Podstawowe wymagania dotyczące jakości*”.
57. Polska norma PN-EN ISO 14554-1:2004 pt. „*Wymagania dotyczące jakości zgrzewania - Zgrzewanie rezystancyjne metali - Część 1: Pełne wymagania dotyczące jakości*”.
58. Polska norma PN-EN ISO 14373:2007 pt. „*Zgrzewanie rezystancyjne - Procedura zgrzewania punktowego nie powlekanych i powlekanych stali niskowęglowych*”.
59. Polska norma PN-EN ISO 10447:2007 pt. „*Zgrzewanie rezystancyjne - Badanie na odrywanie i na odrywanie przecinakami zgrzein punktowych i garbowych*”.
60. Z. Mikno „*Projection Welding with Pneumatic and Servomechanical Electrode Operating Force Systems*”, Welding Journal (Welding Research), vol. 95, s. 286-299, 2016.
61. Z. Mikno „*Projection Welding of Nuts Involving the Use of Electromechanical and Pneumatic Electrode Force*”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 99, s. 1405-1425, 2018.
62. Z. Mikno „*Zgrzewanie garbowe – analiza procesu*”, Materiały konferencji „*Symulacja 2013*”, Spała, s. 1-9, 2013.
63. Z. Mikno, Z. Bartnik, A. Lange, M. Sikorski „*Wybrane aspekty zgrzewania garbowego blach stalowych w obliczeniach MES*”, Przegląd Spawalnictwa 10/2012, s. 65-71, 2012.
64. M. Korzeniowski, T. Piwowarczyk, P. Kustroń, A. Ambroziak, Z. Mikno „*Analiza zależności kształtowo-wymiarowych zgrzein garbowych w elementach przeniesienia napędu wykonanych technologią MIAB*”, Przegląd Spawalnictwa 8/2016, s. 5-10, 2016.

65. M. Korzeniowski, T. Piwowarczyk, A. Ambroziak, Z. Mikno „Analiza zależności kształtowo - wymiarowych zgrzein garbowych w elementach przeniesienia napędu wykonanych technologią MIAB”, Materiały konferencji 57. Naukowo-Techniczna Konferencja Spawalnicza „Innowacje w inżynierii spajania”, Jachranka, s. 5-10, 2015.
66. Z. Mikno „Projection Welding of Nuts Involving the Use of Electromechanical and Pneumatic Electrode Force”, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 99, s. 1405-1425, 2018.
67. Z. Mikno, Z. Bartnik „Projection Welding With Pneumatic and Servo-Mechanical Electrode Pressure Force System”, Proceedings of the 20th Technical Sessions of Welding and Joint Technologies, Madrid/Spain, s. 1-10, 2014.
68. Z. Mikno „Analysis of Projection Welding in Relation to the Non-parallelism of Electrodes”, Proceedings of the 8th International Seminar on Advances in Resistance Welding, 10-12.09.2014, Baveno/Italy, s. 147-160, 2014.
69. Z. Mikno, Z. Bartnik, W. Derlukiewicz, S. Kowieski „Zgrzewanie garbowe w obliczeniach metodą elementów skończonych”, 2013.
70. H. Papkala „Zgrzewanie oporowe metali”, KaBe, Krosno, 2003.
71. R. Chtourou, N. Leconte, B. Zouari, F. Chaari, E. Markiewicz, B. Langrand „*Macro-modeling of spot weld strength and failure: formulation and identification procedure based on pure and mixed modes of loading*”, 2017.
72. S-J. Kang, B. K. Chun, „*Strength analysis of automotive seat belt Anchorage*”, Int. J. of Vehicle Desig, 2001.
73. H. Wu, M. Meng, R. Fang, Y.F. Huang, S. Zhan „*Improved simulation method of automotive spot weld failure with an account of the mechanical properties of spot welds*”, Materials Science and Engineering, 2017.
74. S. Bhuvaneshwaran, R. Padmanaban „*Prediction of spot weld fatigue life using finite element approach*”, 2020.
75. Y. Xia, Q. Zhou, P.C. Wang i inni „*Development of high-efficiency modeling technique for weld-bonded steel joints in vehicle structures—Part I: Static experiments and simulations*”, International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009.
76. Polska norma PN-80-69040 pt. „*Spawalnictwo. Wytyczne projektowania, wykonania i kontroli złączy zgrzewanych grabowo na zakładkę*”.
77. Polska norma PN-74/M-69020 pt. „*Spawalnictwo. Klasyfikacja jakości zgrzein punktowych*”.
78. P. Avitabile „*Modal Testing A Practitioner's Guide*”, John Wiley & Sons, 2018.
79. C. Yinghui, W. Jing, L.Xiaohui, „*Real-time deformation using modal analysis on graphics hardware*”, BeiHang University, 2006.
80. X. Zhao, K. Wang, Y. Lu „*Modal and Strength Analysis of High-speed Rotor Based on Magnetic Bearing*”, Paryż, 2017.
81. Md. H. Zubaye, J. Wu „*Modal Analysis of Commercial Aircraft Engine Noise Source and Noise Reduction Technology*”, Pekin, 2018.
82. M. R. Ashory „*HIGH QUALITY MODAL TESTING METHODS*”, Praca doktorancka, 1999.
83. F. M. R. L. de Magalhães „*OPERATIONAL MODAL ANALYSIS FOR TESTING AND MONITORING OF BRIDGES AND SPECIAL STRUCTURES*”, Praca doktorancka.
84. R. B. Randall „*Vibration-based Condition Monitoring Industrial, Automotive and Aerospace Applications*”, 2011.
85. W. Fiebig „*Drgania i hałas w inżynierii maszyn*”, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2019.
86. W. Heylen, S. Lammens, P. Sas „*MODAL ANALYSIS THEORY AND TESTING*”, Belgia, 2005.

87. M. Żółtkowski „*THE MODAL ANALYSIS IN BRICKS WALLS DESTRUCTION*”, 2003.
88. M. R. Hatch „*Vibration Simulation Using MATLAB and ANSYS*”, Chapman & Hall/CRC, 2001.
89. K. Wyckaert, F. Augusztinovicz, P. Sas „*Vibro-acoustical modal analysis: Reciprocity, model symmetry, and model validity*”, 1996.
90. J. Rakowski „*Teoria sprężystości*”, Politechnika Poznańska, 2004.
91. Z. Starczewski „*Drgania mechaniczne*”, Warszawa, 2010.
92. W. Rudin „*Analiza rzeczywista i zespolona*”, Warszawa, 1998.
93. J. Park, Y. Moon, S. Jung, I. Kang „*A Study on the Vibration Modal Testing and Analytical Model Updating of Liquid Rocket Engine of KSLV-II*”, EUCASS, 2019.
94. E. B. Skrodzka „*Eksperymentalna analiza modalna gitar i skrzypiec*”, Poznań, 2016.
95. J. Giergiel „*Drgania układów mechanicznych*”, Kraków, 1986.
96. Cz. Cempel „*Drgania mechaniczne*”, Poznań, 1984.
97. Innovating the HP Way „*The Fundamentals of Modal Testing*”.
98. P. Lengvarský, J. Bocko „*Theoretical Basis of Modal Analysis*”, 2013
99. A. E. Zonst „*Understanding the Fast Fourier Transform*”, Citrus Press, Titusville
100. A. Arumugam „*Review of Experimental and Finite Element Analyses of Spot Weld Failures in Automotive Metal Joint*”, 2020.
101. J. Chróścielewski „*Wprowadzenie do MES*”, 1991.
102. G. Lakshmi Narasaiah „*Finite element analysis*”, BS Publications, 2008.
103. S. S. Rao „*Finite element Method in Engineering*”, Elsevier Science & Technology Books, 2004.
104. D. V. Hutton „*Fundamentals Of Finite Element Analysis*”, The McGraw–Hill Companies, 2004.
105. T. R. Chandrupatla, A. D. Belegundu „*Introduction to finite elements in engineering*”, Prentice-Hall, 2002.
106. F. Hartmann, C. Katz „*Structural Analysis with Finite Elements*”, Springer, 2007.
107. E. Madenci, I. Guven „*The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS*”, Springer, 2006.
108. Bathe, K-J. „*Finite Element Procedures*”, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1996.
109. Strona internetowa, www.instron.com, dostęp: 28.07.2024.

Badanie złączy zgrzewanych przy użyciu analizy modalnej

Streszczenie

W niniejszej rozprawie doktorskiej przeprowadzono badania z zastosowaniem analizy modalnej do wykrywania niezgodności powstałych podczas procesu zgrzewania garbowego wielopunktowego.

We wstępnej części pracy przedstawione zostały próbki detali do badań wraz ze stanowiskiem zgrzewalniczym wyposażonym w komponenty niezbędne do przeprowadzenia eksperymentalnej analizy modalnej.

Pierwszą częścią pracy było przeprowadzenie metodą elementów skończonych analizy modalnej stanowiska przyrządu zgrzewalniczego wraz z próbką, której jakość poddawana jest weryfikacji. Badania wyznaczyły 221 częstotliwości rezonansowych wraz z formami drgań. Częstotliwości rezonansowe objawiające się największą amplitudą oraz deformacją skoncentrowaną na detalu badanym zostały zebrane w tabelę. Na ich podstawie wytypowane zostały miejsca mocowania akcelerometru do dalszych rozważań eksperymentalnych. Badania numeryczne zakończono badaniem dynamicznym w postaci symulacji wymuszenia impulsowego. Pozwala ono na weryfikację wpływu siły docisku na przeprowadzany eksperyment.

Drugą częścią pracy badawczej było przeprowadzenie eksperymentalnej analizy modalnej w punktach wytypowanych podczas badań numerycznych. W tym celu została przeprowadzona wstępna konfiguracja sprzętu niezbędnego do badań modalnych oraz wstępne zbadanie odpowiedzi w dziedzinie częstotliwości komponentów wytypowanych do badań. Następnym krokiem analizy eksperymentalnej było zorientowanie na dokonaniu analizy modalnej na stanowisku zgrzewalniczym w postaci zgrzewarki, przyrządu oraz próbki badanej. Badania te skoncentrowały się na pomiarach, w których określono kierunki oraz lokalizację punktu wymuszenia względem odpowiedzi układu w celu uzyskania widma amplitudowego o najwyższej jakości sygnału. W wyniku ustalenia najlepszej konfiguracji przystąpiono do eksperymentu mającego na celu sprawdzenia zmiany wartości częstotliwości rezonansowych w wyniku występowania niezgodności złącza.

Eksperyment dowiódł, że wszystkie częstotliwości rezonansowe próbek uległy zmianie. Częstotliwości rezonansowe w przypadku eksperymentu pokrywają się z wynikami zarejestrowanymi za pomocą analiz numerycznych.

Trzecią częścią pracy zostało zestawienie metody rezystancji dynamicznej zastosowanej dla procesu zgrzewania garbowego wielopunktowego z metodą analizy modalnej. Badania dowiodły nieskuteczność pomiarów rezystancji dynamicznej w zestawieniu z metodą analizy modalnej.

Ostatnią częścią pracy było opracowanie algorytmu oraz sprawdzenie jego możliwości w weryfikowaniu niezgodności w procesie zgrzewania wielopunktowego garbowego. Weryfikacja algorytmu przeprowadzona została próbkami statystycznymi, skaningową mikroskopią akustyczną (SAM) oraz próbkami wytrzymałościowymi. Algorytm prawidłowo rozróżnił próbki o różnych parametrach procesu na podstawie zmian częstotliwości rezonansowej.

Investigation of welded joints using modal analysis

Abstract

This doctoral dissertation presents research involving the application of modal analysis for detecting inconsistencies arising during the multipoint embossing welding process.

In the introductory part of the dissertation, the test samples and the welding station equipped with the necessary components for conducting experimental modal analysis are presented.

The first part of the study involved conducting a finite element modal analysis of the welding fixture, and the sample, the quality of which is being verified. The research identified 221 resonance frequencies along with their mode shapes. The resonance frequencies exhibiting the highest amplitude and deformation concentrated on the tested sample were compiled into tables. Based on these, locations for mounting the accelerometer for further experimental considerations were selected. The numerical studies concluded with a dynamic test in the form of an impulse excitation simulation, allowing for the verification of the influence of clamping force on the conducted experiment.

The second part of the research involved conducting an experimental modal analysis at the points selected during the numerical studies. For this purpose, preliminary configuration of the equipment necessary for modal analysis was performed, and an initial examination of the frequency response of the components selected for testing was carried out. The next step in the experimental analysis was focused on conducting a modal analysis on the welding station, which consisted of the welding machine, fixture, and the test sample. These studies concentrated on measurements in which the directions and location of the excitation point relative to the system's response were determined to achieve a frequency spectrum with the highest signal quality. Upon establishing the best configuration, an experiment was conducted to verify the changes in resonance frequencies due to the presence of joint inconsistencies.

The experiment proved that all resonance frequencies of the samples changed. The resonance frequencies from the experiment matched the results recorded through numerical analysis.

The third part of the study involved comparing the dynamic resistance method applied to the multipoint embossing welding process with the modal analysis method. The research demonstrated the ineffectiveness of dynamic resistance measurements compared to the modal analysis method.

The final part of the study involved developing an algorithm and testing its capabilities in verifying inconsistencies in the multipoint embossing welding process. The algorithm verification was conducted using statistical tests, scanning acoustic microscopy (SAM), and strength tests. The algorithm correctly distinguished samples with different process parameters based on changes in resonance frequencies.