Adam Szeliziński

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

Streszczenie

Przedmiotem rozprawy jest rozwój metodologii analiz badań wibrodiagnostycznych w monitorowaniu uszkodzeń połączeń spawanych cienkościennych konstrukcji okrętowych. Celem pracy było opracowanie nowych metod diagnostyki elementów spawanych konstrukcji okrętowych, mogące znaleźć zastosowanie w rozwijanych okrętowych systemach typu SHM (Structural Health Monitoring). Opracowano trzy niezależne metody detekcji uszkodzeń połączeń spawanych blach cienko- i grubościennych. Wszystkie bazują na wykryciu nieliniowości w charakterystykach dynamicznych badanej konstrukcji. Pierwsza polega na badaniu zmian w czasie, w widmie częstotliwościowym sygnału drganiowego. Kolejna polega na zastosowaniu technik okien czasowych do badania sygnałów. W ostatniej opracowanej metodzie badano zmiany dekrementu tłumienia w czasie i w zależności od siły wymuszenia.

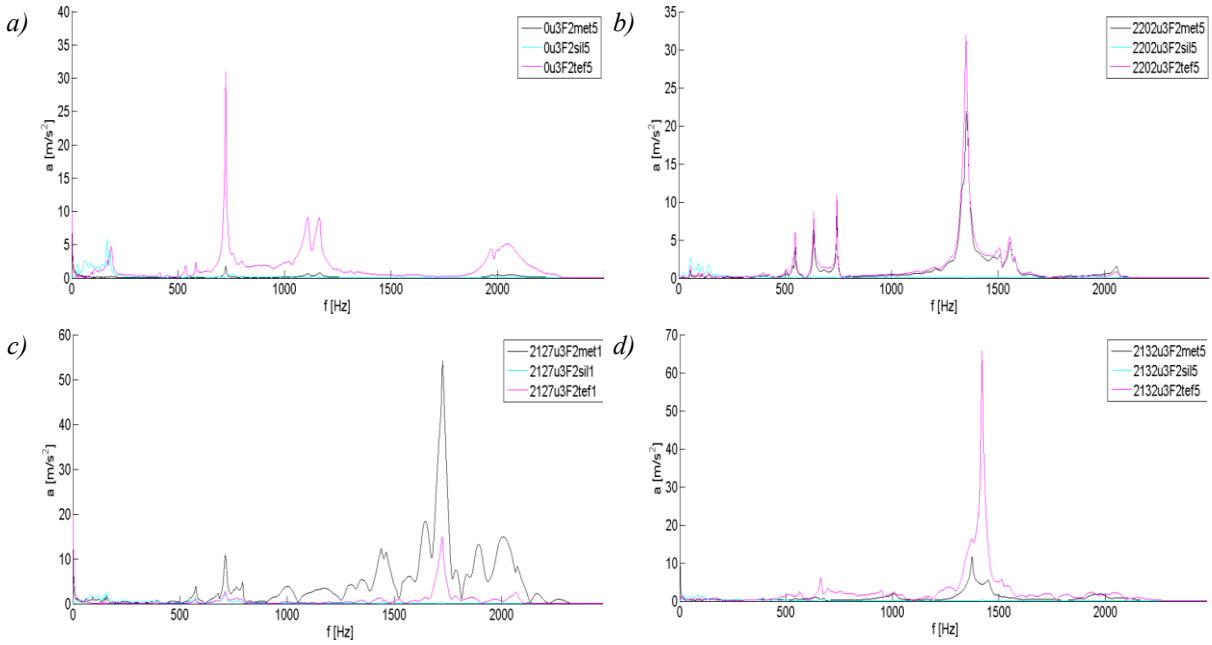
Dysertację wykonano jako składającą się ze wstępu, czterech zasadniczych rozdziałów oraz wniosków. W rozdziale pierwszym przybliżono budowę różnych złącz spawanych, jednak najwięcej uwagi poświęcono metodom wykrywania uszkodzeń tych połączeń. Omówiono zarówno metody powszechnie stosowane, jak i te mniej znane, nie unikając również metod nieskomercjalizowanych.

Rozdział drugi to określenie tezy i celu pracy. Postawiono sobie za cel opracowanie kluczowych elementów autonomicznego systemu monitoringu żywotności (SHM) spawanych konstrukcji cienkościennych z uszkodzeniami, ze szczególnym uwzględnieniem konstrukcji kadłuba statku. Założono, że planowany system SHM będzie bazował na metodach wibrodiagnostycznych. Główny wysiłek badawczy skupiono na rozwoju metod analiz sygnałów drganiowych powstałych pod wpływem wymuszeń impulsowych, które byłyby wywoływane bądź przez środowiskowo bądź przez specjalne urządzenia badawcze. Głównym celem tych metod jest wczesne wykrycie powstających w trakcie eksploatacji uszkodzeń połączeń spawanych, i tym samym opracowanie metod pozwalających na zapobieganie

katastrofalnym zdarzeniom morskim. W szczególności postanowiono znaleźć odpowiedź na pytanie czy można stworzyć autonomiczny system SHM, wykorzystujący badania wibrodiagnostyczne, który ostrzegałby nieprzeszkoloną w tym zakresie załogę statku przed potencjalnymi, katastrofalnymi uszkodzeniami - pęknięciem kadłuba statku. W oparciu o przeprowadzony przegląd literatury i zebrane doświadczenia własne autora sformułowano następującą tezę rozprawy doktorskiej:

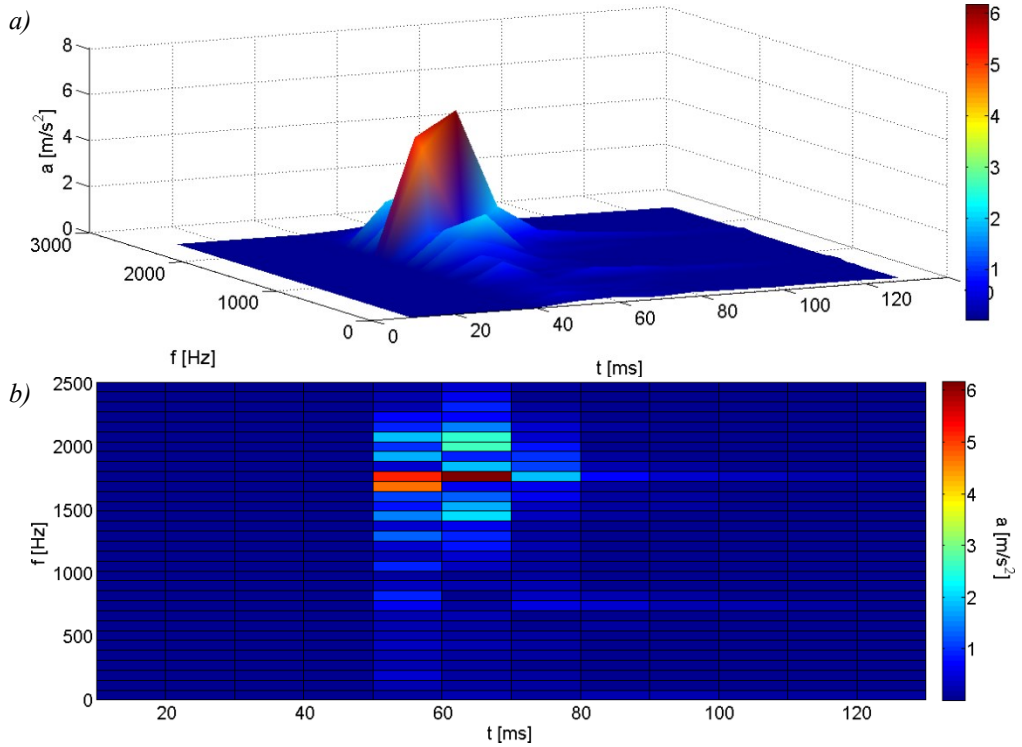
„Możliwe jest zdefiniowanie nowych parametrów i charakterystyk dynamicznych konstrukcji okrętowych opartych na analizach badań wibrodiagnostycznych”.

Kolejny rozdział, 3, dotyczy pierwszego etapu badań gdzie obiektami badanymi były płyty o znacznej grubości. Na potrzeby realizacji tego etapu pracy zbudowano specjalne stanowisko pomiarowe. Przeprowadzono badania dla czterech płyt spawanych, o znacznej grubości, charakteryzującymi się typowymi dla przemysłu okrętowego uszkodzeniami spoin. Płyty o takich wymiarach charakteryzują się silnym sygnałem diagnostycznym. Przeprowadzono analizę przydatności do dalszych badań różnych rodzajów wymuszeń (różnych czasów trwania impulsu wymuszającego). Przykładowy obraz amplitud w funkcji częstotliwości drgań, uzyskanych przy pomocy młotka modalnego z końcówką silikonową, teflonową i metalową przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Widma amplitudowo – częstotliwościowe przyspieszeń drgań dla odpowiedzi rejestrowanej na płytach przy zastosowaniu różnych końcówek młotka modalnego (met, sil, tef) w miejscu uderzenia F2 dla a) płyty bez połączenia spawanego – 0, b) płyty spawanej z połączeniem spawanym bez wad w spoinie – 2202, c) płyty spawanej z wadą typu przyklejenie brzegowe w spoinie – 2127, d) płyty spawanej z wadą typu pęknięcie o zdefiniowanej długości w spoinie 2132

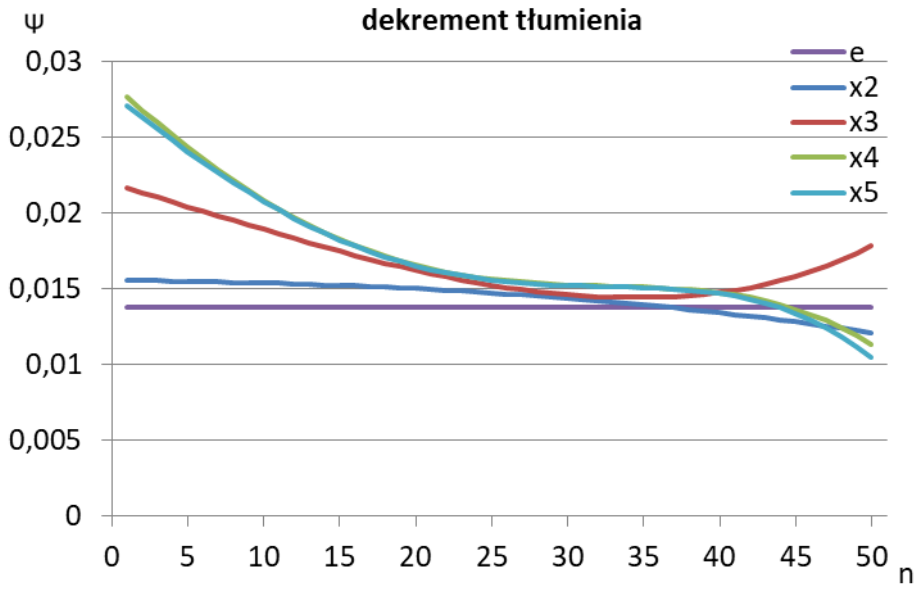
Zaobserwowano, że rzeczywista obwiednia sygnału impulsu siły wymuszającej może być daleka od idealnej, teoretycznej delty Diraca. Do dalszych badań wybrano młotek modalny z końcówką metalową. Uzyskane przebiegi czasowe przyspieszeń drgań rejestrowanych czujnikami piezoelektrycznymi, w różnych punktach obiektów badanych, poddano następnie analizie FFT w dziedzinie częstotliwości. Realizacja pierwszego etapu badań pozwoliła na potwierdzenie możliwości opracowania systemu monitoringu stanu technicznego konstrukcji okrętowych w oparciu o metody drganiowe. Uzyskane sygnały analizowano również według zaproponowanej metody umożliwiającej kontrolę parametrów drganiowych jednocześnie, jako dziedzina czasu i częstotliwości (analizy 2D i 3D). Przykładowy przebieg amplitud przyśpieszeń drgań w funkcji częstotliwości i czasu przedstawiono na rysunku 2.



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

Można zaobserwować wyraźną zmianę w czasie rozkładu częstotliwości rezonansowych. Kolejną zaproponowaną metodą analiz sygnałów jest metoda okien czasowych gdzie dla poszczególnych okien wyznaczano wartość średnią. Stwierdzono, że wartości średniej amplitudy dla kolejnych okien czasowych implementowanych dla sygnałów pochodzących z płyt charakteryzujących się różnymi uszkodzeniami przyjmują różne wartości. Ostatnią z metod analizy sygnałów zaproponowanych w tym rozdziale jest metoda polegająca na określaniu dekrementu tłumienia. Zaproponowano dwie zależności opisujące logarytmiczny dekrement tłumienia, jedna z nich służy do wyznaczenia uśrednionego tłumienia konstrukcji

względem maksymalnej amplitudy, natomiast druga służy do oceny lokalnej zmiany dekrementu tłumienia przy założeniu znajomości dwóch dowolnych amplitud tego samego przebiegu. Zmiany dekrementu tłumienia dla płyty z silnym uszkodzeniem spawu zaprezentowano na przykładowym rysunku 3.

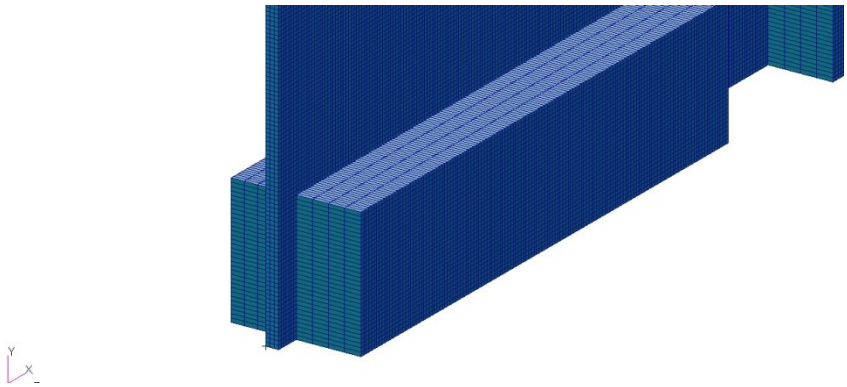


Rys. 3. Dekrement tłumienia dla płyty spawanej wadą typu pęknięcie o zdefiniowanej długości (2132) względem wartości maksymalnej dla badania z zastosowaniem końcówki metalowej na młotku modalnym

Zaproponowana metoda analizy pozwala na wykrycie nieliniowości w badanej konstrukcji, a co za tym idzie na wykrycie uszkodzenia połączenia spawanego.

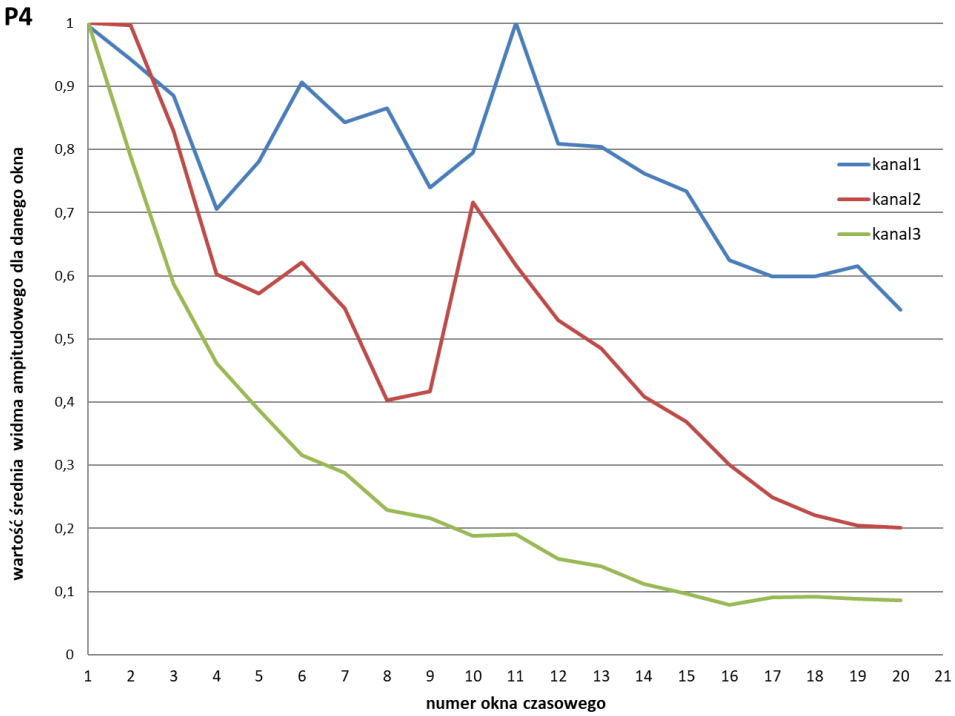
W rozdziale czwartym opisano badania blach konstrukcji cienkościennych oraz wyniki uzyskane podczas tych badań. Gabaryty płyt cienkościennych dobrano tak aby miały charakterystyki dynamiczne jak najbardziej zbliżone do rzeczywistych konstrukcji okrętowych. Stanowisko badawcze na potrzeby realizacji tego etapu badań zostało doposażone w wibrometr laserowy umożlwiający bezkontaktowy pomiar przemieszczeń badanych elementów. Badaniu poddano siedem płyt o takich samych wymiarach. Jedna z nich bez połączenia spawanego, druga z idealnym połączeni spawanym i pięć charakteryzujących się typowymi uszkodzeniami połączeń spawanych. Zweryfikowano poprawność przebiegu badań poprzez porównanie widm amplitudowych przyspieszeń drgań dla dziesięciu kolejnych uderzeń młotkiem modalnym. Uzyskano pełną powtarzalność w dziedzinie częstotliwości. Posługując się programem bazującym na metodzie elementów skończonych - „Patran-Nastran”, zamodelowano badane elementy i porównano wyniki numerycznej analizy modalnej z wynikami uzyskanymi podczas pomiarów. Przykład modelu MES płyty

z uszkodzonym spawem, który posiada ponad 1,5 mln stopni swobody przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Warunki brzegowe dla poszczególnych modeli płyty: 2D, 2-3D, 3-D oraz 3-D det

Uzyskane podczas pomiarów sygnały poddano analizie z wykorzystaniem metod użytych we wcześniejszym rozdziale. Przykład wykorzystania metody okien czasowych do wykrycia uszkodzeń (nieliniowości) w połączeniu spawanym został zaprezentowany na rysunku 5.



Rys. 5. Rozkład wartości średnich dla okien w funkcji numeru okna - płyta z brakiem przetopu w spoinie, uzyskane z trzech akcelerometrów

Pracę zakończono sformułowaniem wniosków. W ramach pracy nad systemem SHM niezbędne jest opracowanie procedury, efektywnej z punktu widzenia naukowego i utylitarnego, przeprowadzania badań wibrodiagnostycznych połączeń spawanych, poprzez określenie: sposobu i miejsca wymuszenia konstrukcji, optymalnego pozycjonowania czujników, parametrów pomiarowych takich jak czas czy częstotliwość próbkowania.

Podczas prowadzonych badań i ich późniejszych analiz stwierdzono, że w przyszłym systemie SHM może nie być wystarczające zastosowanie jednego czujnika do monitorowania jednego kluczowego elementu. W przypadku skomplikowanej konstrukcji spawanej, jaką jest kadłub statku dokładne określenie liczby czujników będzie każdorazowo wymagało dodatkowej analizy. Układ czujników powinien składać się z co najmniej kilkunastu akcelerometrów umieszczonych głównie w rejonie owręża.

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

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

W wyniku realizacji pracy potwierdzono postawioną hipotezę. Opracowanie pakietu metod analiz sygnałów drganiowych wymuszanych impulsowo pozwalających na ich przyszłe zastosowanie w autonomicznych systemach monitoringu opartych o elementy sztucznej inteligencji jest potwierdzeniem realizacji głównego celu pracy. Podczas realizacji głównego celu pracy zrealizowano również wszystkie wcześniej założone cele szczegółowe, które były sformułowane następująco:

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

do analiz wybrano płyty o znacznej grubości, w których spodziewane efekty nieliniowe będą znaczne,

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

W szczególności praca zaowocowała opracowaniem wyspecjalizowanego urządzenia do wykrywania uszkodzeń konstrukcji cienkościennych, które zostało zgłoszone do opatentowania.