

Badania doświadczalne i numeryczne propagacji fal Lamba przez zakładkowe połączenie klejone w aspekcie diagnostyki uszkodzeń

Magdalena Rucka¹, Jacek Lachowicz¹, Erwin Wojtczak¹

¹Katedra Wytrzymałości Materiałów, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska
email: mrucka@pg.gda.pl, jaclacho@pg.gda.pl, erwwojtc@student.pg.gda.pl

STRESZCZENIE: Przedmiotem niniejszej pracy są badania propagacji fal Lamba w pojedynczym zakładkowym złączu klejonym płaskowników aluminiowych. Badania ukierunkowano na analizę możliwości zastosowania zjawiska propagacji fal sprężystych do identyfikacji uszkodzeń zakładkowych złączy klejonych. Rozważano połączenie wzorcowe (ze spoiną pełną, na całej powierzchni zakładki) oraz dwa połączenia z sztucznie wprowadzonym do spoiny defektem (spoina niepełna). Testy diagnostyczne polegały na wzbudzeniu antysymetrycznej fali Lamba w jednym z łączonych płaskowników oraz zarejestrowaniu sygnału w drugim z nich. Analizę numeryczną przeprowadzono z wykorzystaniem metody elementów skończonych w środowisku Abaqus/Explicit. Zarówno wyniki badań doświadczalnych, jak i numerycznych wskazały na pewne różnice jakościowe i ilościowe przebiegów fal sprężystych w zależności od powierzchni defektu w spoinie. W szczególności zaobserwowano znaczny spadek amplitudy sygnału propagującej fali w próbkach z uszkodzeniem złącza.

SŁOWA KLUCZOWE: propagacja fal Lamba, diagnostyka uszkodzeń, klejone połączenia zakładkowe

1. Wprowadzenie

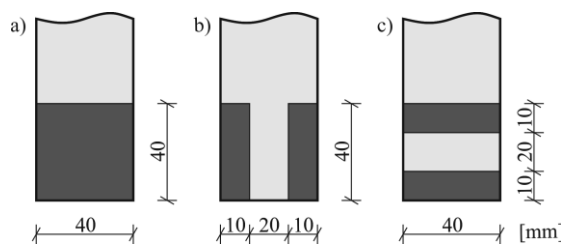
Połączenia klejone znajdują obecnie szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu [1–3], m.in. w przemyśle lotniczym i maszynowym. W ostatnich latach można zaobserwować także istotny wzrost zainteresowania technologią klejenia konstrukcyjnego w budownictwie, również w odniesieniu do łączenia elementów metalowych [3]. Najprostszym typem połączenia z wykorzystaniem kleju jest złącze zakładkowe pojedyncze. Tworzą je dwa elementy (np. płaskowniki, płyty) scalone na części swojej powierzchni. Złącze pracuje na ścinanie, a jego wytrzymałość jest determinowana przez rodzaj zastosowanego tworzywa adhezyjnego (kleju), stan powierzchni elementów łączonych w miejscu zakładki przed wykonaniem złącza, a także poprawność ukształtowania połączenia. Błędne wykonanie spoiny bądź jej stopniowa degradacja mechaniczna mogą doprowadzić do awarii całej konstrukcji. Istotną tematyką staje się zatem diagnostyka i monitorowanie stanu technicznego tego rodzaju połączeń. Obecnie dynamicznie rozwijają się metody nieniszczącej diagnostyki wykorzystujące zjawisko propagacji fal prowadzonych [4–6].

Niniejsza praca ma na celu analizę możliwości wykorzystania ultradźwiękowych fal prowadzonych do identyfikacji uszkodzeń zakładkowych złączy klejonych. Badania przeprowadzono dla połączeń zakładkowych z trzema typami spoin: połączenie wzorcowe oraz dwa połączenia z uszkodzeniem spoiny. Do pomiarów propagacji fal zastosowano piezoaktuatory płytkowe. Analizę numeryczną przeprowadzono z wykorzystaniem metody elementów skończonych w środowisku Abaqus/Explicit.

2. Przedmiot badania i metodyka badań

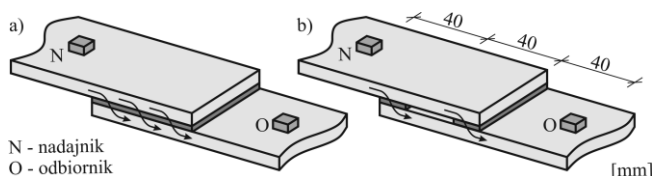
Przedmiot badania stanowi złącze zakładkowe płaskowników o przekroju poprzecznym 40 mm × 3 mm, wykonanych z aluminium. Długość zakładki przyjęto równą szerokości płaskownika, tj. 40 mm. Badaniom poddano trzy rodzaje próbek: próbka A – ze spoiną wykonaną prawidłowo (na całej powierzchni zakładki) oraz

dwa warianty z uszkodzeniem (próbki B, C) w postaci pominięcia kleju na części jej powierzchni (rys. 1).



Rys. 1. Schematy analizowanych złączy zakładkowych: a) próbka A; b) próbka B; c) próbka C

Testy diagnostyczne polegają na wzbudzeniu antysymetrycznej fali Lamba w jednym z łączonych płaskowników oraz zarejestrowaniu sygnału w drugim (rys. 2). Fala początkowo propaguje wzdłuż jednego z płaskowników jako pojedynczy mod a następnie „wycieka” do drugiego z płaskowników poprzez konwersję modów. W zależności od kondycji złącza zmienia się obszar, na którym odbywa się wielomodowa propagacja fali.



Rys. 2. Schemat ideowy metody diagnostycznej: a) złącze wykonane poprawnie; b) złącze z uszkodzeniem

3. Badania doświadczalne

Fale Lamba wzbudzano i odbierano przy użyciu piezoaktuatorów płytkowych Noliac NAC2024. Piezoaktuator działający w trybie nadajnika przymocowano do jednego z łączonych elementów (rys. 2), zaś odbiornik po drugiej stronie złącza. Jako wzbudzenie przyjęto paczkę falową zmodulowaną oknem Hanninga o 5 okresach sinusoidy i częstotliwości 100 kHz. Stanowisko pomiarowe pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Stanowisko pomiarowe

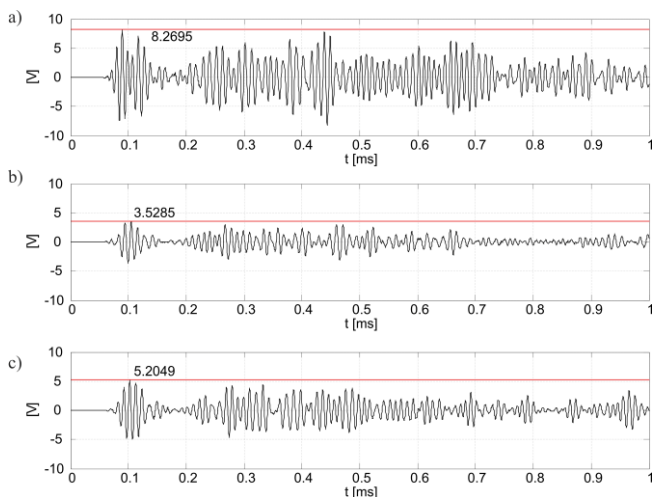
4. Obliczenia MES

Obliczenia numeryczne propagacji fal Lamba w połączeniu zakładkowym wykonano przy zastosowaniu metody elementów skończonych w środowisku Abaqus/Explicit. Do obliczeń użyto 8-wzłowy bryłowy element skończony w kształcie sześcianu foremnego o objętości 1 mm^3 . Na wszystkich krawędziach połączenia przyjęto wolne warunki brzegowe. Do analiz przyjęto moduł Younga dla aluminium równy $E = 69 \text{ GPa}$ oraz współczynnik Poissona równy $\nu = 0.33$.

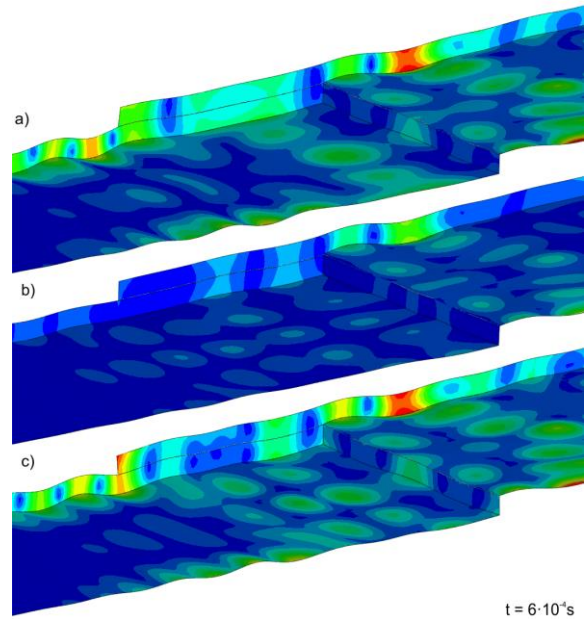
5. Analiza wyników

Na rys. 4 zaprezentowano przebiegi czasowe sygnałów propagującej fali zarejestrowane przez odbiornik, wraz z ich maksymalnymi wartościami. Można zauważyć, że w próbkach z uszkodzonym złączem (próbki B i C) wystąpił znaczny spadek wartości amplitudy sygnału. Względny spadek amplitud w próbce z uszkodzeniem pionowym spoiny (próbka B) wyniósł 57 %, zaś w próbce z uszkodzeniem poziomym spoiny (próbka C) wyniósł 37 %.

Na rys. 5 zawarto wyniki analiz numerycznych dla poszczególnych próbek. Na mapach przemieszczeń pokazana jest chwila czasowa $t = 0.6 \text{ ms}$, odpowiadająca momentowi przejścia fali przez złącze. Antysymetryczny mod fali Lamba propagujący przez pojedynczy płaskownik, w obrębie złącza ulega konwersji i przechodzi w wielomodową propagację fali. Można zaobserwować, iż w zależności od powierzchni styku występują różnice w przekazywaniu fali przez złącze.



Rys. 4. Sygnały zarejestrowane dla poszczególnych próbek: a) próbka A; b) próbka B; c) próbka C



Rys. 5. Wyniki obliczeń MES – mapy przemieszczeń w kierunku poprzecznym dla wybranej chwili czasowej: a) próbka A; b) próbka B; c) próbka C

6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono zjawisko propagacji fal Lamba w zakładkowym połączeniu klejonym dwóch płaskowników aluminiowych. Zarówno wyniki badań doświadczalnych, jak i numerycznych wskazują na pewne różnice jakościowe i ilościowe przebiegów fal sprężystych w zależności od powierzchni defektu w spoinie. W szczególności zaobserwowano znaczny spadek amplitudy sygnału propagującej fali w próbkach z uszkodzeniem złącza. Wykonane badania stanowią pierwszy etap prac ukierunkowanych na diagnostykę ultradźwiękową połączeń klejonych elementów konstrukcji metalowych.

Praca została wykonana w ramach projektu Nr 2015/19/B/ST8/00779, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

Obliczenia wykonano na komputerach Centrum Informatycznego Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej.

Literatura

- [1] Adams R. D., Wake W. C., *Structural Adhesive Joints in Engineering*, Elsevier Applied Science Publishers, London and New York, 1984.
- [2] Rudawska A., *Wybrane zagadnienia konstituowania połączeń adhezyjnych jednorodnych i hybrydowych*, Politechnika Lubelska, Lublin, 2013.
- [3] Piekarczyk M., Grec R., *Application of adhesive bonding in steel and aluminum structures*, Archives of Civil Engineering, LVIII, pp. 309–329, 2012.
- [4] Rokhlin S.I., *Lamb wave interaction with lap-shear adhesive joints: Theory and experiment*, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 89, pp. 2758–2765, 1991.
- [5] Lanza di Scalea F., Bonomo M., Tuzzeo D., *Ultrasonic Guided Wave Inspection of Bonded Lap Joints: Noncontact Method and Photoelastic Visualization*, Research in Nondestructive Evaluation, Vol. 13, pp. 153–171, 2001.
- [6] Puthillath P. K., Yan F., Kannajosyula H., Lissenden C. J., Rose J. L., Xu C., *Inspection of Adhesively Bonded Joints Using Ultrasonic Guided Waves*, 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai 2008.