

Numeryczna i doświadczalna analiza propagacji fal sprężystych przez stalowe połączenie śrubowe

Magdalena Rucka¹, Rafał Kędra²

^{1,2} *Katedra Mechaniki Budowli i Mostów, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, e-mail: ¹magdalena.rucka@pg.gda.pl, ²rafkedra@student.pg.gda.pl*

Streszczenie: W pracy przedstawiono numeryczną i doświadczalną analizę propagacji fal sprężystych w połączeniu śrubowym dwóch blach stalowych. Obliczenia numeryczne metodą elementów skończonych przeprowadzono dwuetapowo. W pierwszej fazie analizowano statyczny wpływ sił sprężających na stan odkształceń i naprężeń połączenia śrubowego, formułując warunki kontaktu zastosowane następnie w modelu dynamicznym. W analizie propagacji fal sprawdzono wpływ naprężeń wstępnych na rezultaty obliczeń. Porównawcze badania doświadczalne wykonano przy wykorzystaniu wzbudnika piezoelektrycznego oraz wibrometru laserowego.

Słowa kluczowe: propagacja fal sprężystych, węzły konstrukcji stalowych, połączenia śrubowe, modelowanie MES, badania doświadczalne

1. Wprowadzenie

Węzły są integralnym elementem konstrukcji stalowych, pozwalającym na tworzenie struktur obiektów budowlanych. Wśród różnych rodzajów połączeń spotykanych w budownictwie coraz większą popularnością cieszą się połączenia na śruby sprężające. O ich atrakcyjności decyduje duża nośność, trwałość i odporność na obciążenia dynamiczne. Użycie łączników tego typu wiąże się jednak z większą pracochłonnością niż w przypadku tradycyjnych połączeń śrubowych, ponieważ wymaga odpowiedniego przygotowania powierzchni blach w miejscu styku z łącznikiem i kontrolowanej wartości momentu dokręcającego. Wyczerpanie nośności połączenia ciernego nie powoduje w sposób bezpośredni jego awarii, prowadzi jednak do zmiany sposobu pracy łączników i czyni je podatnymi na uszkodzenia dynamiczne i zmęczeniowe [1]. Opracowanie metod diagnostyki pozwalających na wykrycie poślizgów śrub sprężających pozwoliłoby na szybkie zlokalizowanie i usunięcie uszkodzeń zanim doprowadzą do awarii całej konstrukcji. Obecnie dynamicznie rozwijają się nieniszczące metody diagnostyczne wykorzystujące propagację fal sprężystych [2]. Trudnością przy wykorzystaniu systemów ultradźwiękowych do identyfikacji uszkodzeń złożonych układów konstrukcyjnych jest interpretacja danych pomiarowych. Dlatego ich praktyczne zastosowania poprzedzają obliczenia numeryczne z użyciem metody elementów skończonych [3] czy też metody elementów spektralnych [4, 5].

Niniejsza praca jest poświęcona rozpoznaniu zjawiska propagacji fal sprężystych w stalowym połączeniu śrubowym. Obliczenia numeryczne za pomocą MES przeprowadzono dwuetapowo. W pierwszej fazie analizowano statyczny wpływ sił sprężających na stan odkształceń i naprężeń połączenia śrubowego, formułując warunki kontaktu zastosowane następnie w modelu dynamicznym. W analizie propagacji fal sprawdzono wpływ naprężeń wstępnych na rezultaty obliczeń. Porównawcze badania doświadczalne wykonano przy użyciu wzbudnika piezoelektrycznego oraz wibrometru laserowego.

2. Propagacja fal sprężystych w połączeniu dwóch blach

Fale prowadzone Lamba mogą propagować w ośrodkach ograniczonych dwiema równoległymi powierzchniami, których grubość jest rzędu długości fali. W klasycznym rozwiązaniu dla jednorodnych płyt izotropowych o stałej grubości, ze względu na kształt propagującego zaburzenia, wyróżnia się fale symetryczne i antysymetryczne, które opisują odpowiednio równania [6]:

$$\frac{\operatorname{tg}(qh)}{\operatorname{tg}(ph)} = -\frac{4k^2 pq}{(k^2 - q^2)^2}, \quad \frac{\operatorname{tg}(qh)}{\operatorname{tg}(ph)} = -\frac{(k^2 - q^2)^2}{4k^2 pq}, \quad (1)$$

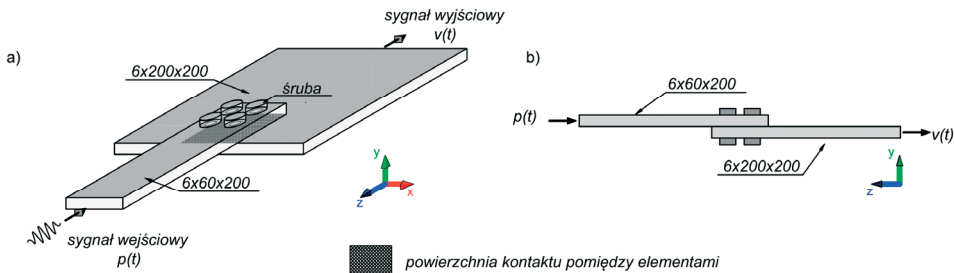
gdzie: $p^2 = \omega^2 / c_L^2 - k^2$, $q^2 = \omega^2 / c_T^2 - k^2$, k – liczba falowa, ω – częstość kołowa, c_L – prędkość fali podłużnej, c_T – prędkość fali poprzecznej, h – grubość płyty. Fale Lamba ulegają odbiciu i rozproszeniu na granicy ośrodka a także dyspersji i konwersji postaci zaburzenia na skutek interakcji z uszkodzeniami.

Propagacja fal w połączeniach blach przebiega analogicznie, ma jednak bardziej złożony charakter. Charakter zjawiska zależy od geometrii połączenia jak i sposobu scalenia jego elementów. Zaburzenia rozprzestrzeniają się pomiędzy poszczególnymi blachami poprzez miejsca ich trwałego mechanicznego połączenia lub powierzchnie styku. Dodatkowo dochodzi do dyssypacji energii fali. Na skutek występowania załamań, zmian grubości, spoin lub innych łączników propagujące zaburzenie ulega wielokrotnemu odbiciu. Zjawisko to jest najmniej intensywne w przypadku połączenia blach spoinami czołowymi. Fala ulega wówczas odbiciu na skutek występowania lokalnych zmian grubości oraz zmian parametrów mechanicznych w miejscu spoinowania. Wpływ spoin pachwinowych na propagację zaburzenia jest ściśle zależny od ich usytuowania względem kierunku rozchodzenia się fali. W połączeniach klejonych i śrubowych zaburzenia rozchodzą się na skutek trwałego połączenia powierzchni blach, wynikającego odpowiednio z zastosowania substancji klejącej i siły docisku blach.

3. Obliczenia numeryczne

3.1. Opis analizowanego węzła

Obliczenia numeryczne wykonano dla modelu węzła śrubowego składającego się z dwóch stalowych blach o wymiarach $6 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ oraz $6 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, połączonych na zakład śrubami sprężanymi (rys. 1). Średnica trzpieni łączników wynosiła 10 mm , natomiast średnica łbów/nakrętek śrub wynosiła 17 mm . Przyjęto liniowo sprężysty model materiału izotropowego o module Younga 200 GPa , współczynniku Poissona $0,3$ i gęstości objętościowej 7850 kg/m^3 .



Rys. 1. Schemat analizowanego połączenia śrubowego: a) aksonometria; b) widoku z boku

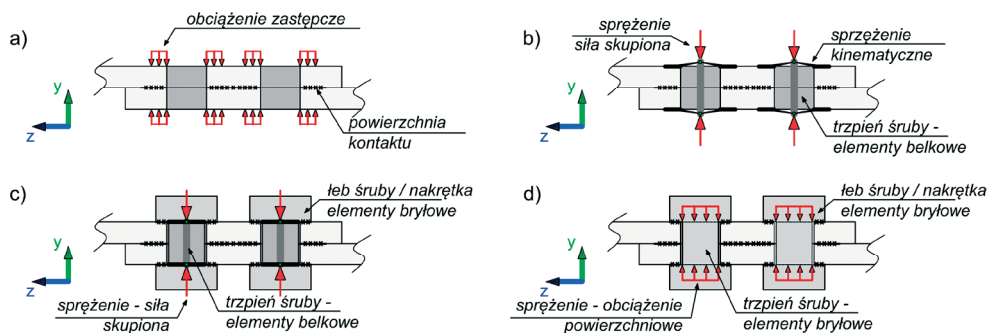


3.2. Modele obliczeniowe

Modele numeryczne połączenia śrubowego wykonano w programie Abaqus. Obliczenia przeprowadzono dwuetapowo dla czterech modeli połączeń śrubowych spotykanych w literaturze, np. [7, 8]. We wszystkich modelach (A, B, C, D) blachy zdyskretyzowano przy użyciu elementów bryłowych. Modele różnią się między sobą sposobem wymodelowania śrub i nakrętek oraz kontaktu między łbem śruby/nakrętką a blachami (por. rys. 2). Opis dotyczący dyskretyzacji poszczególnych modeli podano w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry dyskretyzacji poszczególnych modeli obliczeniowych

Model połączenia		A	B	C	D
typ elementów skończonych	łeb śruby/nakrętka	–	–	bryłowe (C3D8R)	bryłowe (C3D8R)
	trzcienie śruby	–	belkowe (B31)	belkowe (B31)	bryłowe (C3D8R)
	blachy	bryłowe (C3D6R, C3D8R)			
sposób połączenia elementów modelu (typ sprzężenia kinematycznego)	trzcienie – łeb śruby/nakrętka	–	węzeł – powierzchnia	powierzchnia – powierzchnia	powierzchnia – powierzchnia
	łeb śruby/nakrętka – blacha	–		powierzchnia – powierzchnia	powierzchnia – powierzchnia
	blacha – blacha	powierzchnia – powierzchnia			
liczba węzłów	łeb śruby/nakrętka	–	–	8520	8520
	trzcienie śruby	–	25	25	9646
	model – łączenie	13300	133100	202540	241024

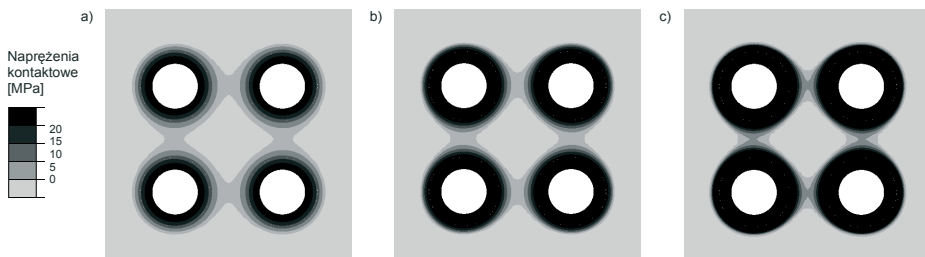


Rys. 2. Modele obliczeniowe połączenia śrubowego: a) model A; b) model B; c) model C; d) model D

W pierwszej fazie wykonano analizy statyczne w celu określenia warunków początkowych do obliczeń dynamicznych. Obliczenia statyczne wykonano dla modelu D, przy uwzględnieniu kontaktu stycznego i normalnego między blachami oraz pomiędzy blachami i łbami/nakrętkami śrub. Sprężenie łączników zrealizowano jako obciążenie osiowe trzcieni poszczególnych śrub. Na podstawie wyników obliczeń statycznych dokonano definicji płaszczyzn i własności kontaktu, które następnie użyto w analizie propagacji fal sprężystych. Obliczenia dynamiczne wykonano w module Abaqus/Explicit dla wszystkich modeli (A, B, C, D) z uwzględnieniem wstępnego stanu naprężenia wywołanego sprężeniem łączników. W analizie dynamicznej jako wzbudzenie została przyjęta paczka falowa składająca się z pięciu cykli sinusoidy o częstotliwości 100 kHz zmodulowana oknem Hanninga. Obciążenie $p(t)$ o wartości wypadkowej równej 4 N zostało przyłożone na bocznej powierzchni blachy na obszarze $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ w kierunku wzdłużnym (osi z), jak zaznaczono na rys. 1. Sygnał propagującej fali w postaci prędkości drgań $v(t)$ był rejestrowany na przeciwległym końcu połączenia, również w kierunku osi z .

3.3. Wyniki obliczeń statycznych

Przeprowadzone analizy z uwzględnieniem kontaktu między elementami połączenia pozwoliły na określenie stanu deformacji i naprężenia pod wpływem sprężenia łączników. Na rys. 3 przedstawiono rozwój stref kontaktu pomiędzy blachami w zależności od wartości siły sprężającej dla przypadku równomiernego wzrostu wyężenia wszystkich śrub. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, iż dla analizowanego schematu połączenia pod wpływem sprężenia dochodzi do uformowania się kołowych powierzchni kontaktu pomiędzy blachami. Zachowują one swój kształt do momentu, gdy strefy oddziaływań poszczególnych śrub zaczynają się pokrywać, w wyniku czego dochodzi do uformowania się powierzchni kontaktu o nieregularnym kształcie. W odniesieniu do wzajemnego oddziaływania blach i łbów/nakrętek stwierdzono, że już dla małych wartości sił sprężających strefa kontaktu obejmuje całą powierzchnię styku elementów.



Rys. 3. Naprężenia normalne wywołane kontaktem w płaszczyźnie styku blach dla wartości siły sprężającej: a) 10 kN, b) 20 kN; c) 30 kN działającej równomiernie we wszystkich łącznikach

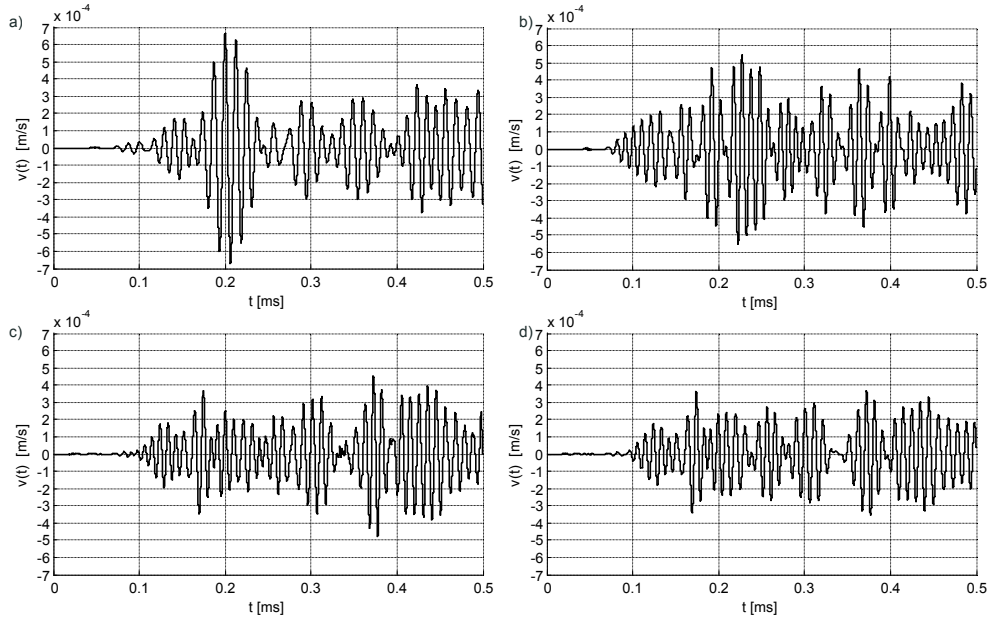
Na podstawie wyników obliczeń statycznych przyjęto uproszczony schemat formowania się stref kontaktu. W strefach wzajemnego oddziaływania na siebie dwóch blach, dla określonych wartości siły sprężającej w modelach poddanych analizie dynamicznej wprowadzono stałe kinematyczne sprężenie węzłów obu elementów. We wszystkich modelach (A, B, C, D) założono, iż strefy kontaktu blach powstające wokół poszczególnych śrub mają kształt kołowy. Ponadto w modelach C i D na styku blach i łbów/nakrętek wprowadzono stałe połączenie węzłów, niezależnie od wartości siły sprężającej.

3.4. Wyniki obliczeń dynamicznych

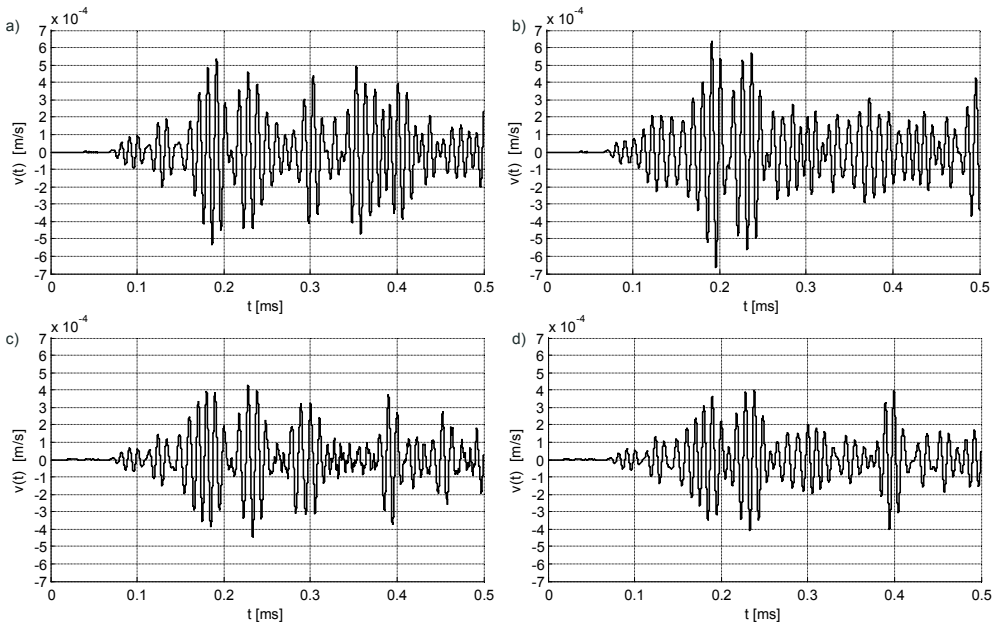
Sygnały czasowe propagujących fal dla różnych wartości siły sprężającej (10 kN i 60 kN) przedstawiono na rys. 4 i rys. 5. Wyniki uzyskane dla wszystkich modeli (A, B, C, D) wskazują na zmienność rezultatów wraz ze wzrostem siły sprężającej, realizowanej przez zmianę powierzchni kontaktu i wartości obciążenia zastępczego blach (model A) lub trzpieni (modele B, C i D). Dla obu analizowanych wartości wyężenia łączników (10 kN i 60 kN) wyniki uzyskane dla modeli C i D, uwzględniających pełną geometrię śrub, w przedziale czasowym $0 \div 0.25$ ms są bardzo zbliżone. W dalszych chwilach czasowych w modelu C pojawiają się zakłócenia sygnału wynikające ze sposobu połączenia trzpieni i łbów/nakrętek. Amplitudy sygnałów dla modelu B są większe niż dla modeli C i D z powodu przeszywnienia związanego z zastosowaniem sprężenia pomiędzy węzłami trzpieni a powierzchnią blach. Dla siły sprężającej wartości 60 kN w modelach A, C i D w czasie $0.08 \div 0.12$ ms można zaobserwować wyodrębnianie się paczki falowej w pierwszym przejściu fali odpowiadającym propagacji postaci symetrycznej.

Na rys. 6 przedstawiono mapy pól prędkości dla wartości siły sprężającej 60 kN w płaszczyźnie blachy $6 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, obrazujące sposób propagacji fal w połączeniu blach. Zaburzenie rozprzestrzenia się w promieniście wokół łączników.

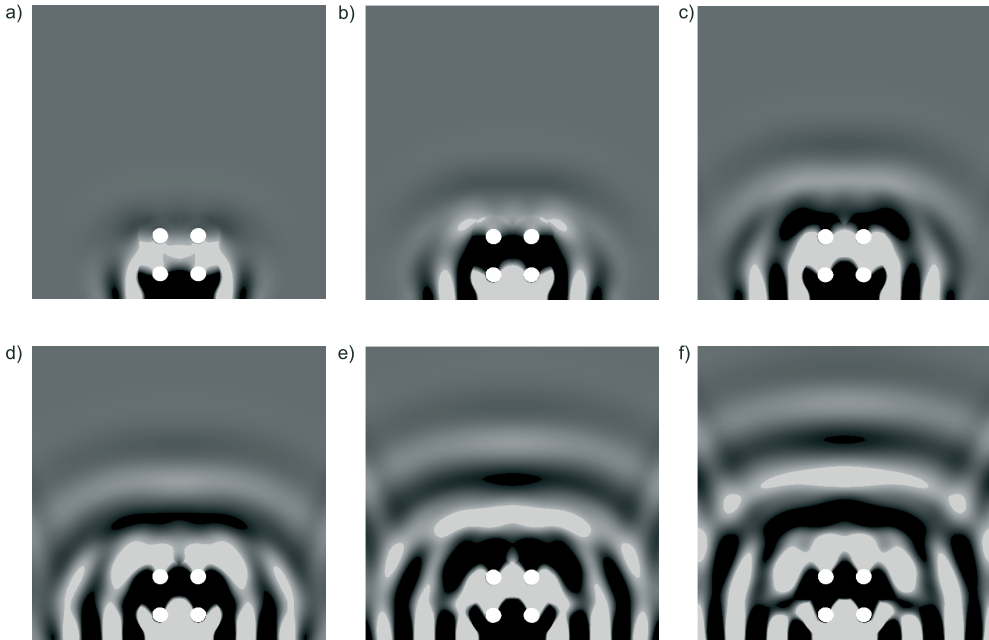
W rezultacie dochodzi do odbicia fali od płaszczyzn bocznych blachy. Przebieg prędkościowy $v(t)$ rejestrowany w punkcie pomiarowym jest więc wynikowym obrazem przemieszczeń wywołanych bezpośrednio propagacją fali poprzez połączenie jak również odbici od powierzchni swobodnych blachy.



Rys. 4. Sygnały numeryczne propagacji fali $v(t)$ w połączeniu z siłą sprężającą 10 kN: a) model A; b) model B; c) model C; d) model D



Rys. 5. Sygnały numeryczne propagacji fali $v(t)$ w połączeniu z siłą sprężającą 60 kN: a) model A; b) model B; c) model C; d) model D



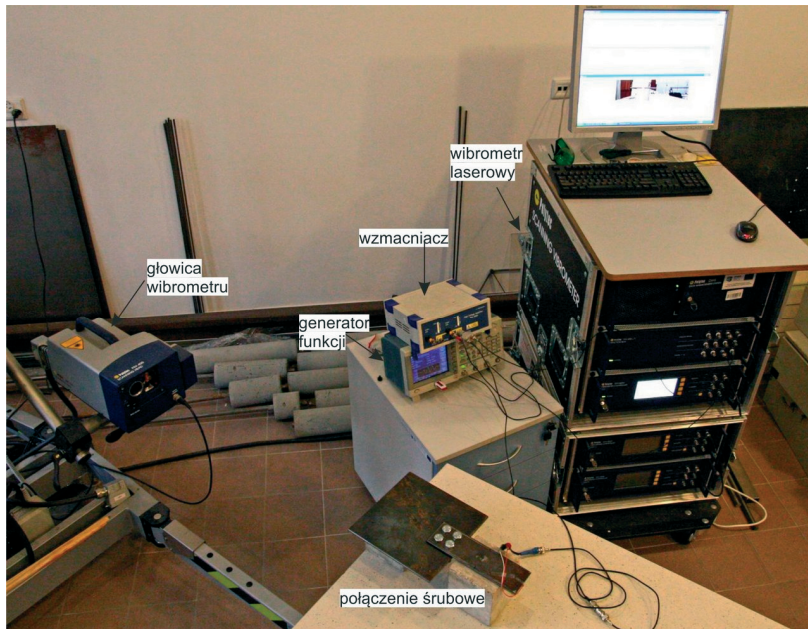
Rys. 6. Mapy pól prędkości $v(t)$ w kierunku osi z w blasze $6 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ dla modelu D i siły sprężającej o 60 kN w chwilach czasowych: a) $t = 0.045 \text{ ms}$; b) $t = 0.05 \text{ ms}$; c) $t = 0.055 \text{ ms}$; d) $t = 0.06 \text{ ms}$; e) $t = 0.065 \text{ ms}$; f) $t = 0.07 \text{ ms}$

4. Badania doświadczalne

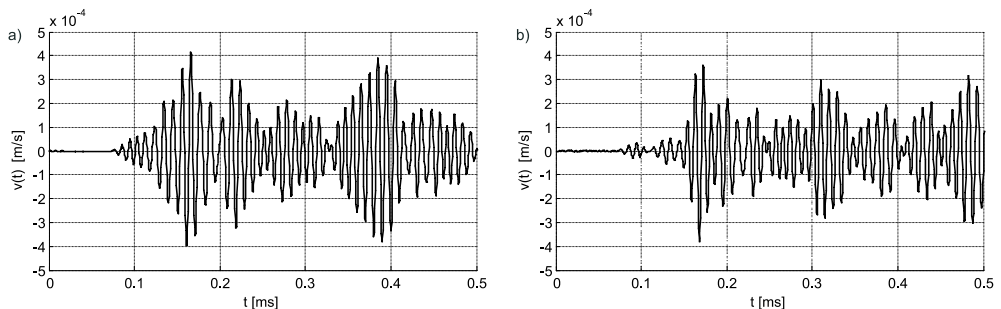
Badania doświadczalne przeprowadzono na modelu połączenia śrubowego opisanego w rozdziale 3.1. W celu zapewnienia docisku blach, śruby sprężono przy użyciu klucza dynamometrycznego. Pomiar wykonano dla dwóch wartości momentu dokręcającego: 20 Nm oraz 120 Nm. Stanowisko pomiarowe pokazano na rys. 7. Do wzbudzenia fal sprężystych użyto piezoaktuator Noliac CMAP11 przymocowany do powierzchni bocznej jednej z blach. Do wygenerowania wymuszenia zastosowano generator funkcji Tektronix AFG 3022 wraz ze wzmacniaczem wysokonapięciowym EC Electronics PPA 2000. Sygnał wyjściowy rejestrowano w pojedynczym punkcie na przeciwległym końcu połączenia za pomocą wibrometru laserowego Polytec PSV-3D-400-M z częstotliwością próbkowania równą 2,56 MHz.

Na rys. 8 pokazane są sygnały propagującej fali dla momentu dokręcającego równego 20 Nm oraz 120 Nm. Uzyskane wyniki wskazują na pewne różnice jakościowe i ilościowe przebiegów czasowych fal sprężystych w zależności od wartości momentu dokręcającego. Porównując zarejestrowane sygnały można zauważyć silne wyodrębnienie się pierwszej paczki falowej i następnie nagły spadek amplitudy w początkowym okresie pomiaru ($0,08 \div 0,11 \text{ ms}$) przy wzroście wartości momentu dokręcającego w połączeniu. Różnica ta wynika z pierwszego przejścia fali odpowiadającego propagacji postaci symetrycznej. Podobny charakter sygnałów można zaobserwować w obliczeniach numerycznych dla różnych wartości siły sprężającej (por. rys. 4d oraz rys. 5d). W późniejszym okresie ($0,2 \div 0,5 \text{ ms}$) przebieg zmienności rejestrowanego sygnału ma zupełnie inny charakter dla obu przypadków. Wynika to z wielu odbić od płaszczyzn bocznych blach, obserwowanych również w przypadku analizy z wykorzystaniem MES. Ponadto dla pomierzonych sygnałów

zaobserwowano przesunięcie w fazie. W połączeniu z momentem dokręcającym 120 Nm pierwsza paczka falowa dociera szybciej niż w połączeniu z momentem dokręcającym 20 Nm.



Rys. 7. Stanowisko eksperymentalne do pomiaru propagacji fal sprężystych w połączeniu śrubowym



Rys. 8. Pomierzony przebieg propagującej fali $v(t)$ w połączeniu śrubowym o wartości momentu dokręcającego: a) 20 Nm; b) 120 Nm

5. Wnioski

W artykule przedstawiono zjawisko propagacji fal sprężystych w stalowym połączeniu śrubowym. Zarówno wyniki badań doświadczalnych, jak i obliczeń numerycznych wskazują na zmienność charakteru sygnałów propagujących fal sprężystych w zależności od wartości siły sprężającej w śrubie. Wyniki obliczeń numerycznych w kontekście modelowania propagacji fal sprężystych w połączeniach śrubowych wskazują na potrzebę stosowania modeli przestrzennych z wykorzystaniem elementów bryłowych, które najlepiej odwzorowują rzeczywistą fizykę zjawiska. Różnice pomiędzy wynikami analiz numerycznych i eksperymentalnych wskazują na potrzebę szerszego zbadania zjawiska i zwiększenia

liczby parametrów pomiarowych, w celu dokładniejszego oszacowania wartości sił sprężających. Niezbędne jest także wyznaczenie zależności pomiędzy momentem dokręcającym a siłą sprężającą. Wykonane badania stanowią pierwszy etap prac ukierunkowanych na zastosowanie propagacji fal ultradźwiękowych do diagnostyki nieniszczącej połączeń śrubowych.

Obliczenia wykonano na komputerach Centrum Informatycznego Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej.

Literatura

- 1 Filipowicz A., Łubiński M., Żółtowski W. Konstrukcje metalowe. Część I. Podstawy projektowania. Wydawnictwo Arkady, 2003.
- 2 Rucka M. Experimental and numerical study on damage detection in an L-joint using guided wave propagation. *Journal of Sound and Vibration* 329 (2010) 1760–1779.
- 3 Moser F., Jacobs L. J., Qu J. Modeling elastic wave propagation in waveguides with the finite element method. *NDT&E International* 32 (1999) 225–234.
- 4 Chrościelewski J., Rucka M., Wilde K., Witkowski W. Zastosowanie metody elementów spektralnych do modelowania zjawisk propagacji fal sprężystych dla celów diagnostyki, 56 Konferencja Naukowa KILiW PAN oraz KN PZITB, Kielce- Krynica, 2010, s. 821–828.
- 5 Peng H., Meng G., Li F. Modeling of wave propagation in plate structures using three-dimensional spectral element method for damage detection. *Journal of Sound and Vibration* 320 (2009) 942–954.
- 6 Rose J. L. *Ultrasonic Waves in Solid Media*. Cambridge University Press, 1999.
- 7 Kang S.B., Kim J., Yoon C.J. Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints. *Applied Mathematical Modelling* 31 (2007) 895–911.
- 8 Montgomery J. Methods for modeling bolts in the bolted joint. ANSYS User's Conference 2002.

A study on propagation of elastic waves in steel bolted joints

Magdalena Rucka¹, Rafał Kędra²

^{1,2} *Department of Structural Mechanics and Bridge Structures, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdansk University of Technology,
e-mail: ¹magdalena.rucka@pg.gda.pl, ²rafkedra@student.pg.gda.pl*

Abstract: The paper presents experimental and numerical analysis of elastic waves propagation in bolted connection of two steel plates. Numerical calculations were carried out using finite element method in two stages. In the first stage, static behavior of the joint during bolts compression was analyzed. Results of static analysis were used to formulate contact conditions for dynamic models. The analysis of wave propagation was taken for four types of bolt connection model. Finally, experimental tests by using a laser vibrometer and piezoelectric actuator were made in order to validate finite element models.

Keywords: wave propagation, nodes of steel structures, bolted joints, FEM calculations, experimental investigations

