

dr inż. Olga Kawa¹⁾

ORCID: 0000-0001-7464-9599

dr hab. inż. Anna Knitter-Piątkowska¹⁾

ORCID: 0000-0002-8082-6966

dr hab. inż. Robert Studziński^{1)*}

ORCID: 0000-0002-0906-8701

Application of wavelet transform for damage detection in steel nodes of statically loaded truss girders

Wykorzystanie transformacji falkowej do wykrywania uszkodzeń w węzłach stalowych dźwigarów kratowych obciążonych statycznie

DOI: 10.15199/33/2024.12.04

Abstract. The article discusses non-destructive methods for identifying damage in welded truss joints using wavelet transform in a discrete form. Analyses showed that detecting damage required processing the difference between signals from the damaged and undamaged structure. With BIM development, recording reference points for the structural condition is straightforward, providing a basis for assessing the structure's technical condition.

Keywords: damage identification; steel structures; wavelet transformation; welds.

Streszczenie. Artykuł porusza problematykę nieniszczących metod identyfikacji uszkodzeń węzłów spawanych kratownic. Do identyfikacji uszkodzeń wykorzystano transformację falkową. Przeprowadzone analizy wykazały, że do wykrycia uszkodzenia w węzle kratownicy konieczne było przetworzenie różnicy sygnałów konstrukcji uszkodzonej i nieuszkodzonej. W kontekście rozwoju BIM, rejestracja punktów odniesienia stanu konstrukcji jest procesem prostym i dającym podstawę do późniejszej oceny jej stanu technicznego.

Słowa kluczowe: identyfikacja uszkodzeń; konstrukcje stalowe; transformacja falkowa; spoiny.

Due to their structure, trusses are one of the most versatile elements used in civil engineering and construction [1]. They allow the creation of lightweight yet extremely rigid structural systems, making them an excellent solution in the design of bridges, roof girders and towers. Their main advantage is their ability to carry high loads with minimal material consumption, leading to significant savings in both cost and structural weight. Thanks to their high flexural stiffness, the trusses allow large spans to be covered, while offering a large usable space for adaptation, enabling changes and modifications to be made to the design without the need for complex transformation of the entire structure.

Modern steel trusses are often designed using tubular cross-sections [2], where the diagonal bars and chords are joined using welds. These welds, functioning as the connecting elements, operate under complex stress conditions. Factors such as improper weld execution, material fatigue, corrosion, and material defects can lead to the formation of cracks, delaminations, and other flaws [3]. Welding defects and non-conformities are distinguished in this context. The difference lies in

Kratownice, ze względu na konstrukcję, stanowią jeden z najbardziej wszechstronnych elementów stosowanych w inżynierii lądowej i budownictwie [1]. Pozwalają na tworzenie lekkich, a jednocześnie wyjątkowo sztywnych układów konstrukcyjnych, co czyni je doskonałym rozwiązaniem w projektowaniu mostów, dźwigarów dachowych oraz wież. Ich główną zaletą jest zdolność do przenoszenia dużych obciążeń przy minimalnym zużyciu materiału, co prowadzi do znacznych oszczędności zarówno w kosztach, jak i masie konstrukcji. Dzięki dużej sztywności giętnej, kratownice umożliwiają przekrycie dużej rozpiętości, oferując jednocześnie dużą przestrzeń użytkową do adaptacji, umożliwiając wprowadzenie zmian i modyfikacji w projekcie bez konieczności skomplikowanych przekształceń całej konstrukcji.

Współcześnie projektowane kratownice stalowe wykonuje się często z przekrojów rurowych [2], w których pręty skratowania i pasy łączone są za pomocą spoin. Spoiny, jako elementy łączące pręty, pracują w złożonym stanie naprężenia. Czynniki takie, jak niewłaściwe wykonanie spoin, zmęczenie materiału, korozja, a także wady materiałowe mogą prowadzić do powstawania pęknięć, rozwarstwień i innych defektów [3]. Rozróżniamy wady lub niezgodności spawalnicze. Różnica między nimi polega na tym, że w przypadku wystąpienia wady konieczna jest naprawa spoiny, natomiast niezgodności, o ile mieszczą się

¹⁾ Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu

^{*)} Correspondence address:
robert.studzinski@put.poznan.pl

the fact that a defect necessitates weld repair, whereas non-conformities, provided they fall within standard limits, do not require intervention. Common welding defects include lack of fusion, porosity, notching, lack of penetration, edge misalignment, cracks, and more [4].

Weld damage in tubular trusses is a serious engineering problem that can lead to major failures and safety hazards for building occupants. Effective monitoring, diagnostics and repair of weld defect is therefore crucial to ensuring the long-term reliability and durability of tubular truss structures, especially in critical infrastructure facilities.

Early detection, localization and assessment of structural damage is one of the most important challenges of modern engineering, which has gained a particular interest in recent years. Non-destructive testing plays a key role in solving this problem. There are many non-destructive methods that allow for the identification of damaged structural elements, most of which are based on the analysis of structural response signals. The set of signals used in the analysis may include: displacements, rotation angles, velocities, accelerations or natural frequencies.

This paper presents the application of discrete wavelet transform as a tool for detecting weld damage in welded trusses. The structural response signal in the form of displacements and rotation angles has been analyzed.

Basics of wavelet analysis

Wavelets are functions that, by meeting certain mathematical criteria, form a representation of signals or data. In wavelet analysis, the input data is decomposed into components with different frequencies, and each component is then analyzed with a resolution matched to its scale. This approach mitigates the effects of the Heisenberg uncertainty principle, which in this context implies the impossibility of precisely analyzing a signal simultaneously in both the time domain and the frequency domain.

It is assumed that there exists a function $\Psi(t)$, called the wavelet function (mother wavelet), which is continuous and belongs to the $L^2(\mathbb{R})$ domain. The function $\Psi(t)$ must satisfy the admissibility condition [5]. The wavelet function can take real or complex values. In the cases considered, wavelets with real values will be used. To decompose a signal, a set of functions (a wavelet family) needs to be derived. This family can be obtained through the translation and scaling of ψ , which can be expressed by the following relation:

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

where t is the time or spatial coordinate, a is the scaling parameter, b represents the wavelet's translation in the time (or space) domain; $(a, b \in \mathbb{R})$, with the exception of $a \neq 0$. The term $|a|^{-\frac{1}{2}}$ is a normalization factor that ensures constant wavelet energy regardless of the scale, i.e., $\|\psi_{a,b}\| = \|\psi\| = 1$ [6].

In the study, the Discrete Wavelet Transform (DWT) is used. In this case, the wavelet family is obtained by substituting $a = \frac{1}{2^j}$ i $b = \frac{k}{2^j}$ into equation (1), which leads to:

w normach, nie wymagają interwencji. Do wad spawalniczych zaliczamy m.in.: **brak przetopu, porowatość, podtopienie, brak penetracji, przesunięcie brzegów, pęknięcia i inne** [4].

Uszkodzenia spoin w kratownicach rurowych stanowią istotny problem inżynierski, który może prowadzić do poważnych awarii i zagrożeń dla bezpieczeństwa użytkowników obiektów budowlanych. Skuteczne monitorowanie, diagnostyka oraz naprawa uszkodzeń spoin są zatem kluczowe do zapewnienia długoterminowej niezawodności i trwałości kratowych konstrukcji rurowych, szczególnie w obiektach infrastruktury krytycznej. Wczesne wykrywanie, lokalizowanie i ocena uszkodzeń konstrukcji to jedno z najważniejszych wyzwań współczesnej inżynierii, które w ostatnich latach zyskało szczególne zainteresowanie. Badania nieniszczące odgrywają kluczową rolę w rozwiązaniu tego problemu. Istnieje wiele nieniszczących metod, pozwalających na identyfikację uszkodzonych elementów konstrukcji, z których większość bazuje na analizie sygnałów odpowiedzi konstrukcji. Zbiór sygnałów wykorzystywany w analizie mogą stanowić: przemieszczenia, kąty obrotu, prędkości, przyspieszenia czy częstotliwości własne.

W artykule zaprezentowano zastosowanie dyskretnej transformacji falkowej jako narzędzia do detekcji uszkodzeń spoin w kratownicach spawanych. Analizie poddany został sygnał odpowiedzi konstrukcji w postaci przemieszczeń oraz kątów obrotu.

Podstawy analizy falkowej

Falki są funkcjami, które spełniając pewne matematyczne wymagania, tworzą reprezentację sygnałów lub danych. W ramach analizy falkowej dane wejściowe są dzielone na składniki o różnej częstotliwości, a następnie każdy element jest analizowany z rozdzielczością dopasowaną do jego skali. Pozwala to ograniczyć skutki zasady nieoznaczoności Heisenberga, która w tym wypadku oznacza brak możliwości precyzyjnej analizy sygnału jednocześnie w dziedzinie czasu i w dziedzinie częstotliwości.

Zakłada się, że istnieje funkcja $\Psi(t)$, zwana funkcją falkową (falką matką), która jest ciągła i należy do dziedziny $L^2(\mathbb{R})$. Funkcja $\Psi(t)$ musi spełniać warunek dopuszczalności [5] i może mieć wartość rzeczywistą lub zespoloną. W rozważanych przypadkach zastosowane zostaną falki o wartościach rzeczywistych. W celu dekompozycji sygnału należy wyprowadzić zbiór funkcji (rodzinę falek). Można go uzyskać poprzez translację i skalowanie funkcji ψ , którą można zapisać za pomocą zależności:

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

gdzie t – współrzędna czasowa lub przestrzenna; a – parametr skalujący; b – przesunięcie falki w dziedzinie czasu (przestrzeni); $(a, b \in \mathbb{R})$, z wyjątkiem $a \neq 0$. Liczba $|a|^{-\frac{1}{2}}$ jest współczynnikiem normalizującym, który zapewnia stałą energię falki niezależnie od skali, tj. $\|\psi_{a,b}\| = \|\psi\| = 1$ [6].

W pracy zastosowano dyskretną transformację falkową (DWT – Discrete Wavelet Transform). W tym przypadku rodzinę falek można uzyskać przez podstawienie $a = \frac{1}{2^j}$ i $b = \frac{k}{2^j}$ do równania (1), co prowadzi do:

$$\Psi_{j,k}(t) = 2^{\frac{j}{2}} \cdot \Psi(2^j t - k) \quad (2)$$

where k and j are the translation, and scaling parameters, respectively.

In the case of one-dimensional Discrete Wavelet Transform (DWT), the multi-resolution analysis of a discrete signal, such as the response of a structure, can be represented using Mallat's algorithm [5]:

$$f_j = S_j + D_j + \dots + D_j + \dots + D_1 \quad (3)$$

where each component in the signal's representation is associated with a specific frequency range and provides information at a particular scale level ($j = 1, \dots, J$). The discrete parameter J describes the level of multi-resolution analysis (MRA), S_j represents the signal approximation, D_j corresponds to the detail of the transformed signal at scale level j , and D_1 corresponds to the most detailed representation of the transformed signal. The function f_j must be approximated using $N = 2^j$ discrete values to meet the dyadic DWT requirements.

Description of the numerical experiment

A shell model of the truss, composed of 36,000 triangular, six-node finite elements, was analyzed. In engineering practice, such complex models are rarely used, as simplified beam models are usually sufficient for evaluating limit states of strength and serviceability. However, to account for the damage of a weld section connecting the chord to the truss diagonals, the bar models are insufficient. In such cases, modern computational tools, which allow for an easy transformation of a beam model into a more detailed shell model, are particularly useful. The use of a shell model enables precise representation of the damage to the fragments or the entire weld, significantly increasing the accuracy of the analysis.

To identify damage in the structure, the discrete wavelet transform (DWT) was applied, utilizing the response signal of the structure (vertical displacements and angles of rotation of the lower chord) obtained from the AxisVM software. Orthogonal wavelets were used for the analysis, with the Daubechies 4, 6, and 8 wavelet families being employed. These wavelets are characterized by compact support and an order between 2 and 20 [7]. The order of the wavelet applied depends on the continuity class of the transformed signal. Previous research by the authors has shown high effectiveness in damage detection using Daubechies wavelets in similar tasks [8, 9].

Numerical example

The subject of the analysis is a double-trapezoidal steel truss with a span of $L = 24$ m, a height at the ridge of $h = 2$ m, a node spacing of $c = 2$ m, and an upper chord inclination angle of $\alpha = 2,9^\circ$, Figure 1. It was designed using S235 steel with square hollow cross-sections. The profiles were selected in

$$\Psi_{j,k}(t) = 2^{\frac{j}{2}} \cdot \Psi(2^j t - k) \quad (2)$$

gdzie: k i j – odpowiednio parametry skali i przesunięcia.

W przypadku jednowymiarowej dyskretnej transformacji falkowej, analizę wielorozdzielczą sygnału dyskretnego, np. odpowiedzi konstrukcji, można przedstawić za pomocą algorytmu Mallata [5]:

$$f_j = S_j + D_j + \dots + D_j + \dots + D_1 \quad (3)$$

gdzie każdy składnik w reprezentacji sygnału jest związany z określonym zakresem częstotliwości i dostarcza informacji na poziomie skali ($j = 1, \dots, J$). Dyskretny parametr J opisuje poziom analizy wielorozdzielczej (MRA – Multi-resolution Analysis), S_j jest aproksymacją sygnału, D_j szczegółem przekształconego sygnału na poziomie skali j , a D_1 odpowiada najbardziej szczegółowej reprezentacji przekształconego sygnału. Funkcja f_j musi być aproksymowana przez $N = 2^j$ dyskretne wartości, aby spełnić wymagania diadyczne DWT.

Opis eksperymentu numerycznego

Przeanalizowano model powłokowy kratownicy, zbudowany z 36 000 trójkątnych, sześciowęzłowych elementów skończonych. W praktyce inżynierskiej tak złożone modele rzadko znajdują zastosowanie, ponieważ do oceny stanów granicznych nośności i użyteczności zazwyczaj wystarczają uproszczone modele prętowe. W celu uwzględnienia uszkodzenia fragmentu spoiny łączącej pas z prętem skratowania, modele prętowe okazują się jednak niewystarczające. W takich przypadkach pomocne okazuje się wykorzystanie nowoczesnych narzędzi obliczeniowych, które umożliwiają łatwe przekształcenie modelu prętowego na bardziej szczegółowy model powłokowy. Zastosowanie modelu powłokowego pozwala na precyzyjne odwzorowanie uszkodzeń fragmentów lub całej spoiny, co znacznie zwiększa dokładność analizy.

W celu identyfikacji uszkodzeń w konstrukcji zastosowano dyskretną transformację falkową, wykorzystując sygnał odpowiedzi konstrukcji (przemieszczenia pionowe i kąty obrotu pasa dolnego) uzyskany z programu AxisVM. Do analizy zastosowano falki ortogonalne (rodzina funkcji falkowych Daubechies 4, 6 i 8, charakteryzująca się zwartym nośnikiem i rzędem zawierającym się między 2 a 20 [7]). Rząd zastosowanej falki zależy od klasy ciągłości transformowanego sygnału. Wcześniejsze nasze badania wykazały dużą skuteczność detekcji uszkodzeń z wykorzystaniem falek Daubechies w podobnej klasie zadań [8, 9].

Przykład numeryczny

Przedmiotem analizy jest dwutrapezowa kratownica stalowa o rozpiętości $L = 24$ m, wysokości w kalenicy $h = 2$ m, rozstawie węzłów $c = 2$ m i kącie nachylenia pasa górnego $\alpha = 2,9^\circ$ (rysunek 1.) Została ona zaprojektowana ze stali S235 z kwadratowych przekrojów rurowych. Profile dobrano w taki spo-

such a way that the conditions for Ultimate Limit State (ULS) and Serviceability Limit State (SLS) given in EC3 [10] were met. The ULS and SLS verification was performed for the bar model of the truss, which was then converted into a shell model in the AxisVM software. The shell model reproduced the simply supported scheme in the bar model (a hinged and roller support) by means of equivalent linear support.

A numerical model of the truss built from shell elements (3D model), allows for the geometric representation of spatial welded connections between the diagonals and the truss chords (Figure 1). In this approach, it is possible to define weld continuity damage in any manner. The defects are implemented as partial or full discontinuity of the connection between the individual edges of the truss diagonals and the cross-section of the top and bottom chords. The structural response signal used for wavelet analysis is obtained for the characteristic combination corresponding to the decisive design combination from the lower chord of the girder. This signal consists of a set of translational displacements and rotational angles of discrete points (nodes) located along the line shown in Figure 2. The analysis focuses on the welded connection between the diagonal member and the lower chord of the truss, Figure 2.

The weakening of the cross-section was modeled by simulating the absence of a connection between specific edges of the diagonal member and the upper flange of the lower chord. This damage was considered along one, two, three, or all edges of the diagonal's walls. Figure 3 illustrates examples of such damage: the absence of a connection along one wall (Fig. 3a) and along three walls (Fig. 3b).

sób, aby spełnione zostały warunki SGN i SGU podane w EC3 [10]. Weryfikacja SGN i SGU przeprowadzona została dla modelu prętowego kratownicy, który następnie przekonwertowano na model powłokowy w programie AxisVM. W modelu powłokowym odwzorowano schemat swobodnego podparcia w modelu prętowym (podpora przegubowa i przegubowo-przesuwna) za pomocą ekwiwalentnego podparcia liniowego.

Numeryczny model kratownicy zbudowany z elementów powłokowych (model 3D) pozwala na geometryczne odwzorowanie przestrzennych połączeń spawanych między prętami skratowania a pasami kratownicy (rysunek 1). W takim przypadku możliwe jest definiowanie uszkodzeń ciągłości spoin w dowolny sposób. Uszkodzenia powstają jako częściowy lub pełny brak ciągłości połączenia poszczególnych krawędzi skratowania z przekrojem pasa górnego i dolnego. Sygnał odpowiedzi konstrukcji, wykorzystywany do analizy falkowej, jest odczytywany w przypadku kombinacji charakterystycznej odpowiadającej obliczeniowej kombinacji decydującej z pasa dolnego dźwigara. Stanowi go zbiór przemieszczeń translacyjnych i kątów obrotu punktów dyskretnych (węzłów), zlokalizowanych wzdłuż prostej pokazanej na rysunku 2. Analizie poddano połączenie spawane krzyżulca z pasem dolnym kratownicy (rysunek 2).

Oslabienie przekroju zostało zamodelowane przez symulację braku połączenia pomiędzy poszczególnymi krawędziami krzyżulca a półką górną pasa dolnego. Uszkodzenie to uwzględniono wzdłuż jednej, dwóch, trzech lub wszystkich krawędzi ścianek pręta. Na rysunku 3 przedstawiono przykłady takiego uszkodzenia: brak połączenia wzdłuż jednej ścianki (rysunek 3a) oraz wzdłuż trzech ścianek (rysunek 3b).

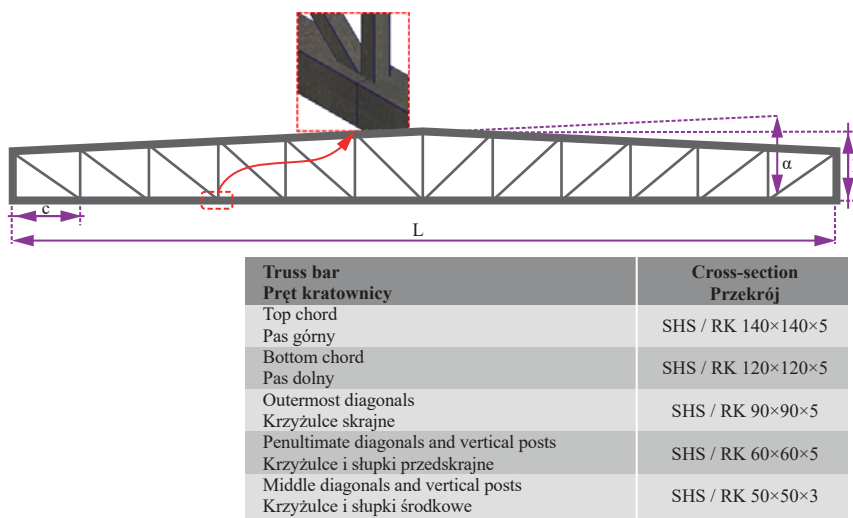


Fig. 1. Steel truss geometry
Rys. 1. Geometria kratownicy stalowej

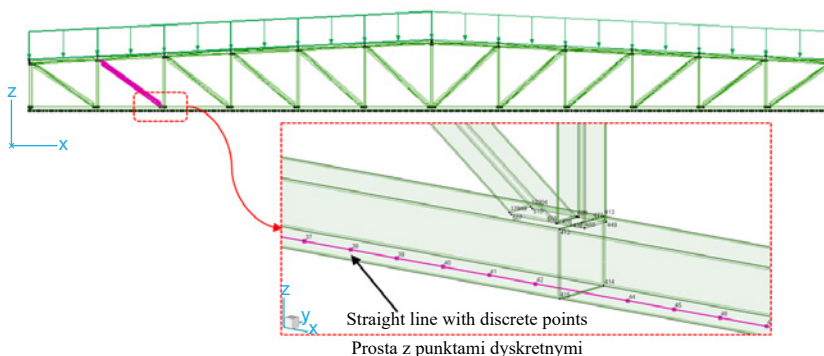


Fig. 2. Diagonal in which the failure of the weld in connection with the bottom chord was taken into account; line with discrete points to record the data
Rys. 2. Krzyżulec, w którym uwzględniono uszkodzenie spoiny w połączeniu z pasem dolnym; prosta z punktami dyskretnymi

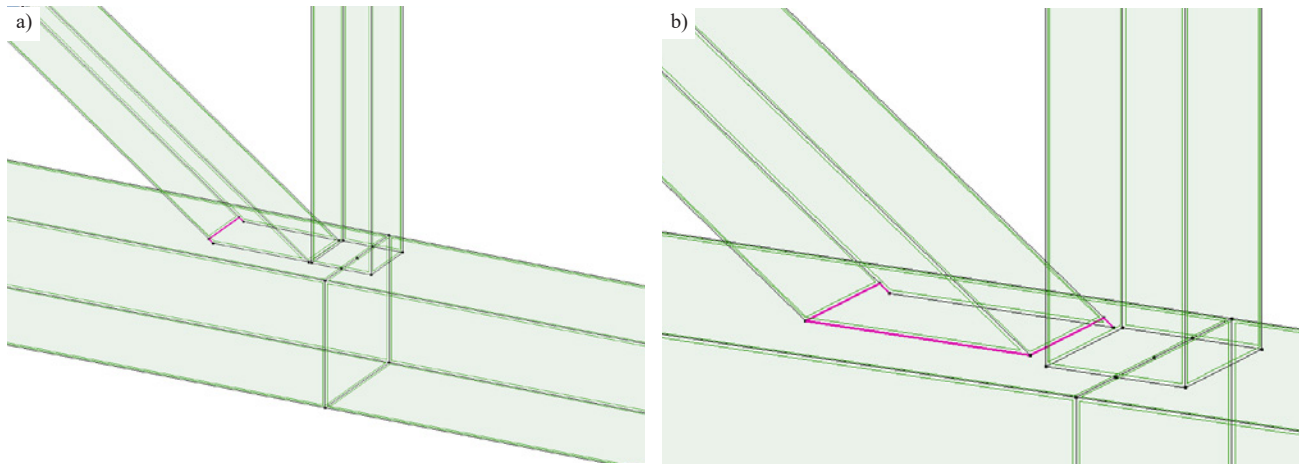


Fig. 3. Failure of the weld: a) along one edge, b) along three edges
Rys. 3. Uszkodzenie spoiny: a) wzdłuż jednej krawędzi, b) wzdłuż trzech krawędzi

Results

An indicator of the presence of damage in a structural element is the occurrence of disturbances in the transformed signal. When decomposing the structural response signal from a node with damage caused by the detachment of the member along three edges, disturbances in the transform were observed, localized differently than the actual damage site. It was noted that the signal disturbances are primarily caused by changes in the vertical displacement diagram of the truss with damage (blue line, Figure 4).

In the next step, the decomposition of the difference between the response signals of the damaged and undamaged structures was performed to obtain precise information about the location of the defective node. The analysis considered the detachment of the weld along one edge (Figure 3a), two edges, or three edges (Figure 3b) of the truss diagonal, yielding qualitati-

Wyniki

Wskaznikiem obecności uszkodzenia w elemencie konstrukcyjnym jest występowanie zakłóceń transformowanego sygnału. Przy dekompozycji sygnału odpowiedzi konstrukcji z węzłem uszkodzonym przez odspojenie pręta na trzech krawędziach uzyskano zaburzenia transformaty, zlokalizowane inaczej niż miejsce zniszczenia. Zauważono, że zakłócenia sygnału powodują głównie miejsca zmiany na wykresie przemieszczeń pionowych kratownicy z uszkodzeniem (linia niebieska, rysunek 4).

W następnym kroku przeprowadzono dekompozycję różnicy sygnału odpowiedzi konstrukcji uszkodzonej i nieuszkodzonej w celu uzyskania precyzyjnej informacji o lokalizacji węzła z defektem. Analizie poddano oderwanie spoiny na jednej (rysunek 3a), dwóch lub trzech krawędziach (rysunek 3b) krzyżulca kratownicy, uzyskując tożsame jakościowo wyniki

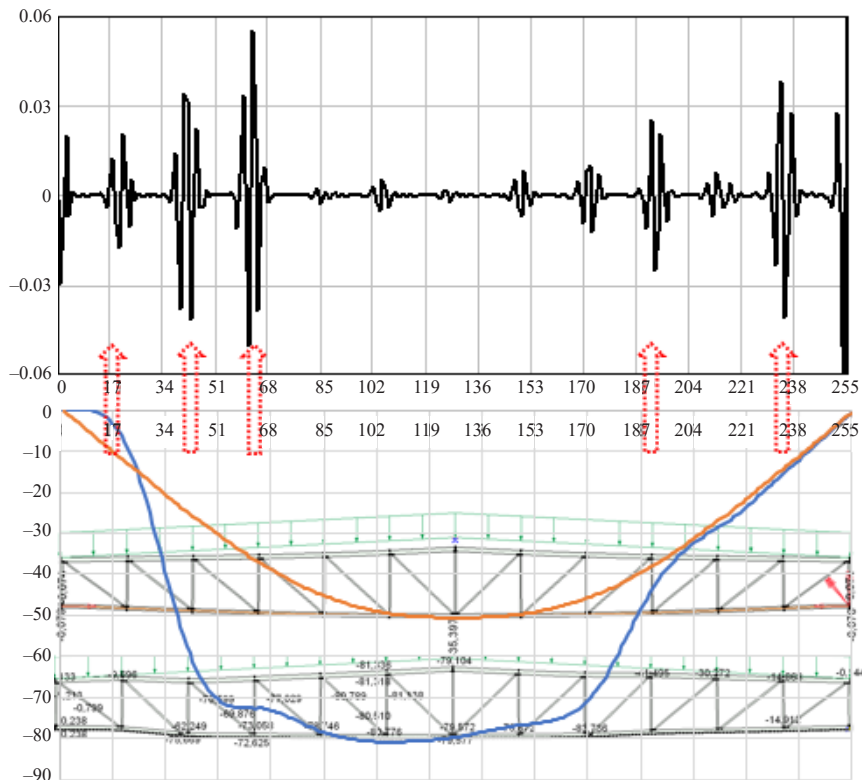


Fig. 4. Analysis of the response of the structure in terms of vertical displacements: from the top DWT of the signal – Daubechies wavelet 8 (D1), bottom chord deflection line of the undamaged truss (orange line); bottom chord deflection line of the damaged truss (blue line)

Rys. 4. Analiza odpowiedzi konstrukcji w postaci przemieszczeń pionowych: od góry DWT sygnału – falka Daubechies 8 (D1), linia ugięcia pasa dolnego kratownicy nieuszkodzonej (linia pomarańczowa); linia ugięcia pasa dolnego uszkodzonej kratownicy (linia niebieska)

vely consistent results for damage identification. The results presented below correspond to damage along three edges. Displacement measurements were taken at 256 discrete points along the lower chord of the truss, meeting the DWT requirements for a data count equal to 2^n . The authors' prior research suggests a minimum of 32 points, with no specific guidelines regarding the density of measurement point distribution. An advantage of the proposed method is the ability to shift the transformation window to any area of interest where potential deterioration is suspected. The analysis was performed using DWT with the Daubechies wavelet, detail 1 (D1). The decomposition of the discrete signal, representing the difference in vertical displacements recorded for the damaged and undamaged structures (Figure 5a) as well as the difference in rotation angles (Figure 5b), correctly identified the defect location. The results, which pertain to the weld detachment along three edges, show a clear peak in the transformation window, unambiguously indicating the presence of the damage in both cases.

identyfikacji uszkodzenia. Wyniki odnoszą się do uszkodzenia na trzech krawędziach. Pomiaru przemieszczeń dokonano w 256 dyskretnych punktach pasa dolnego kratownicy, co spełnia wymagania DWT dotyczące liczby danych równej 2^n . Nasze doświadczenia z wcześniejszych badań wskazują na minimalną liczbę punktów 32, bez wytycznych dotyczących gęstości rozmieszczenia punktów pomiarowych. Zaletą proponowanej metody jest możliwość dowolnego przesuwania okna transformacji w interesujący obszar, w którym występuje potencjalna deterioracja. Analizę przeprowadzono przy użyciu DWT, z wykorzystaniem falki Daubechies, detal 1 (D1). Dekompozycja dyskretnego sygnału w postaci różnicy przemieszczeń pionowych zarejestrowanych dla konstrukcji uszkodzonej i nieuszkodzonej (rysunek 5a), jak i różnicy kątów obrotu (rysunek 5b) prawidłowo zlokalizowała miejsce defektu. Prezentowane wyniki dotyczą zerwania spoiny na trzech krawędziach. W obu przypadkach widoczny jest ewidentny pik w oknie transformacji jednoznacznie wskazujący na obecność uszkodzenia.

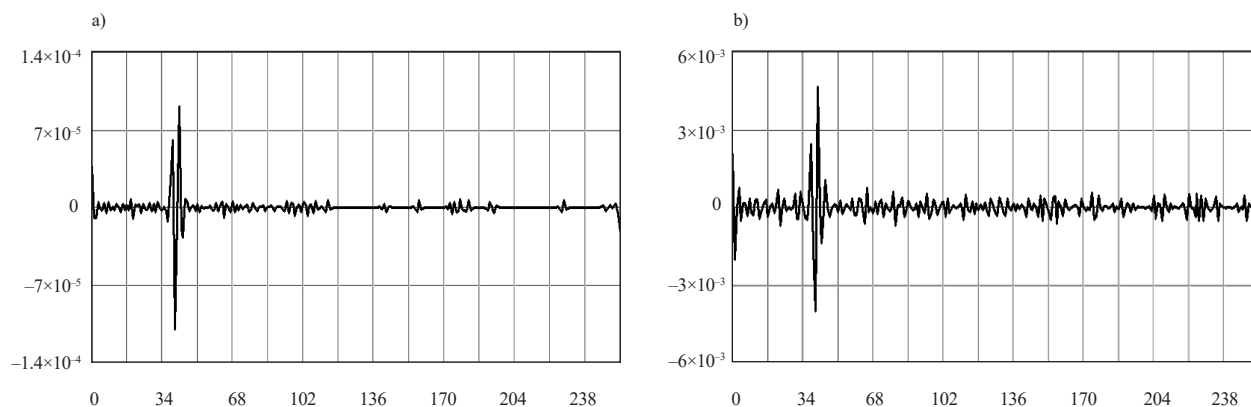


Fig. 5. DWT (D1) of the difference in signals recorded for the damaged and undamaged structure: a) Daubechies wavelet 8, signal: vertical displacement, b) Daubechies wavelet 6, signal: angles of rotation

Rys. 5. DWT (D1) różnicy sygnałów zarejestrowanych w konstrukcji uszkodzonej i nieuszkodzonej: a) falka Daubechies 8, sygnał: przemieszczenie pionowe, b) falka Daubechies 6, sygnał: kąty obrotu

Summary

The article addresses the issue of detecting damage in welded nodes of truss girders using non-destructive methods. The results of the analyses demonstrate that wavelet analysis is an effective method for identifying damage in a node, whether the weld discontinuity occurs along all edges or just a single edge. Although identifying damage in the truss node required transforming the difference between the signals of the damaged and undamaged structure, this cannot be seen as a drawback or limitation of the method. In the context of increasing digitization in the construction industry and processes referred to as Building Information Modelling/Management (BIM) [11–13], it is feasible to record the reference state of a structure upon completion of construction using 3D scanning techniques in the form of a point cloud [14] and assign it to a digital resource for comparison with a point cloud recorded at any stage during its operation.

Podsumowanie

W artykule poruszono problem wykrywania uszkodzeń w spawanych węzłach dźwigarów kratowych metodami nieniszczącymi. Wyniki przeprowadzonych badań pokazują, że analiza falkowa jest skuteczną metodą identyfikacji uszkodzeń w węzle zarówno w przypadku braku ciągłości spoiny na wszystkich krawędziach, jak i na pojedynczej krawędzi. Pomimo że do wykrycia uszkodzenia w węzle kratownicy konieczne było przekształcenie różnicy sygnałów konstrukcji uszkodzonej i nieuszkodzonej, nie można tego postrzegać jako wady lub niedogodności metody. W kontekście postępującej cyfryzacji w budownictwie oraz stosowania Building Information Modelling/Management (BIM) [11–13] możliwe jest zarejestrowanie stanu referencyjnego konstrukcji po zakończeniu budowy przy użyciu technik skanowania 3D w postaci chmury punktów [14] i przypisanie go do zasobu cyfrowego w celu porównania z chmurą punktów zarejestrowaną na dowolnym

The displacement difference signal between reference and current points, subjected to wavelet transformation, can be used to monitor the structure over subsequent years of its service life. In the proposed approach, creating a numerical model of the actual structure is unnecessary. It is sufficient to obtain the structural response signal, for instance, in the form of displacements recorded at discrete points, and then subject it to DWT analysis.

etapie eksploatacji. Sygnał różnicy przemieszczeń punktów referencyjnych i aktualnych, poddany transformacji falkowej, może służyć do monitorowania konstrukcji w kolejnych latach jej użytkowania. W proponowanym podejściu nie ma potrzeby tworzenia modelu numerycznego rzeczywistej konstrukcji. Wystarczy uzyskać sygnał odpowiedzi konstrukcji, np. w postaci przemieszczeń zarejestrowanych w dyskretnych punktach, a następnie poddać go analizie DWT.

Received: 02.09.2024 r.

Revised: 14.10.2024 r.

Published: 20.12.2024 r.

Wpłynął do redakcji: 02.09.2024 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 14.10.2024 r.

Opublikowano: 20.12.2024 r.

Literature

- [1] Ambrose K. Design of Building Trusses. ISBN: 978-0-471-55842-2, s. 448, 1994.
- [2] Bródka J, Broniewicz M. Konstrukcje stalowe z rur. ISBN: 83-213-4187-x, s. 384, 2001.
- [3] Bródka J, Broniewicz M. Obliczanie połączeń spawanych węzłów kratownic z rur prostokątnych. Konstrukcje Stalowe. 2002, 4, 29-34.
- [4] Litwin M, Górecki M. Assembly mistakes of steel structures. Budownictwo i Architektura, 4(1), pp. 063–072. 2009. doi: 10.35784/bud-arch.2334.
- [5] Mallat S. A wavelet tour of signal processing. Academic Press, San Diego, 1999.
- [6] Strang G., Nguyen T. Wavelets and filter banks. Wellesley-Cambridge Press, Wellesley, 1996.
- [7] Daubechies I. Ten lectures on wavelets. Society for Industrial & Applied Mathematics, Philadelphia, 1992.
- [8] Knitter-Piątkowska A, Guminiak M. Application of 1-D and 2-D Discrete Wavelet Transform to crack identification in statically and dynamically loaded plates. Engineering Transactions. 2020; 68(2), s.137–157. doi:10.24423/Eng-Trans.1115.20200304
- [9] Knitter-Piątkowska A, Przychodzki M, Guminiak M. Application of the Discrete Wavelet Transform to damage detection in a guy cable of guyed antenna mast. 2024; Preprints.org. doi: 10.20944/preprints202403.1259.v1.
- [10] PN-EN 1993-1-1:2005 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [11] Kensek K.M. Building Information Modeling. London: Routledge, 2014.
- [12] Zima K, Ciepłucha W, Majta M. Technologia BIM w projektowaniu architektonicznym, Materiały Budowlane 2022; 10 (602): 39–42. DOI: 10.15199/33.2022.10.10
- [13] Gajewski J, Fajtek D. Zastosowanie wybranych technologii BIM w inwentaryzacji oraz projektowaniu konstrukcji budowlanych, Materiały Budowlane 2020; 3 (571): 48–50. DOI: 10.15199/33.2020.03.04
- [14] Jerushan J. Integrating Scan Data to enhance BIM: An Overview of Techniques, Mapping Strategies and Building Life-Cycle Applications. Przegląd Elektrotechniczny 2024; 1(10): 95–102. DOI: 10.15199/48.2024.10.17

Research carried out in the framework of 0412/SBAD/0080 and 0411/SBAD/0008, Poznan University of Technology.