

dr inż. Kamil Pawłowski<sup>1)</sup>  
 ORCID: 0000-0003-0937-5055

# Nośność hybrydowych połączeń nitowano-śrubowych z wykorzystaniem śrub wysokiej wytrzymałości

## *The bearing capacity of hybrid bolted and riveted joints with use of high strength bolts*

DOI: 10.15199/33.2023.05.05

**Streszczenie.** Prezentowane wyniki stanowią wstępne podsumowanie dotychczasowych badań własnych dotyczących połączeń zakładkowych, hybrydowych, nitowano-śrubowych. Rozważano elementy próbne z połączeniami dwuciętymi, w których jeden z nitów został wymieniony na śrubę wysokiej wytrzymałości. W poszczególnych elementach śruby osadzano w otworach zwykłych lub pasowanych, a następnie sprężano. Zagadnienie związane z wymianą nitów na śruby podjęto z uwagi na częste stosowanie takiej praktyki w przypadku remontów zabytkowych konstrukcji stalowych. Jednak nośność takich połączeń nie jest dotychczas potwierdzona badaniami modelowymi i analizami obliczeniowymi. Wyniki wykonanych badań zilustrowano na wykresach obciążenie – przemieszczenie, które można porównać z wynikami referencyjnymi dotyczącymi połączenia na dwa nity. Ponadto ustalono siłę niszczącą połączenia oraz oszacowano ich sztywność translacyjną. Ważnym etapem prowadzonych badań była analiza różnych układów łączników w połączeniu, a wnioski płynące z otrzymanych badań potwierdzają aktualny stan wiedzy zawarty w [1, 2].

**Słowa kluczowe:** połączenia hybrydowe; nity; śruby; połączenia zakładkowe.

**Abstract.** The results presented in this article are a preliminary summary of the authors' research on the lap connections, hybrid joints, and riveted bolt joints. The analysed test elements with double-notched joints, in which one of the rivets was replaced with a high-resistance bolt. The bolts in specific elements were placed in regular or fitted holes and then pre-stressed. The issue related to the replacement of rivets with bolts was analysed due to the fact that this is a commonly used practice in the renovation of historic steel structures. However, the bearing capacity of those joints has not yet been confirmed by model studies with computational analyses. The results of the performed tests are presented in form of load-displacement diagrams, which may be compared to the reference results for double-riveted joints. Apart from that, the joint breaking force was determined and the translational stiffness was assessed. An important element of the conducted research was the analysis of various arrangements of connectors in a joint. The results of the analyses confirm the current state of knowledge presented in publications [1, 2].

**Keywords:** hybrid joints; rivets; bolts; lap connections.

Konstrukcje stalowe od lat cieszą się popularnością z uwagi na ich niekwestionowaną lekkość, możliwość dokonywania wielu adaptacji oraz łatwość montażu. Należy jednak zwrócić uwagę także na wady tych konstrukcji, spośród których wyróżnić można m.in. dużą korozyjność. Wzmacnianie samej konstrukcji stalowej, tj. jej prętowych elementów, jest tematem wielu badań, które przynoszą nowe rozwiązania, m.in. stosowanie kompozytów wzmacnianych włóknami węglowymi [3]. Oprócz prętów, wymiany wymagają także łączniki, którymi w dawnych konstrukcjach stalowych były nity. Typową praktyką jest zamiana nitów na śruby. Określenie nośności połączenia hybrydowego nito-

wano-śrubowego jest bardzo złożonym zagadnieniem, gdyż wpływa na nią: stan elementów konstrukcji, jej historia zmęczenia, działanie korozji, oddziaływanie związane z mechaniką połączenia (np. wpływ sprężenia powstały przy wykonywaniu połączenia nitowanego) oraz interakcja ze sprężeniem od łącznika śrubowego. Analizowane zagadnienie jest aktualne i dotyczy konstrukcji stalowych stosowanych w różnych gałęziach gospodarki [4 ÷ 6]. Stalowe obiekty nitowane na masową skalę były wznoszone w wielu krajach, ponad sto lat temu, i obecnie często wymagają modernizacji. Badania, omawiane w artykule, stanowią krok w kierunku sformułowania wytycznych do projektowania połączeń hybrydowych nitowano-śrubowych w istniejących, często zabytkowych konstrukcjach, w których zapewnienie dalszej, bezpiecznej pracy ma nie

tylko wymiar techniczny, ale także społeczny, gdyż są to obiekty związane z dziedzictwem kulturowym.

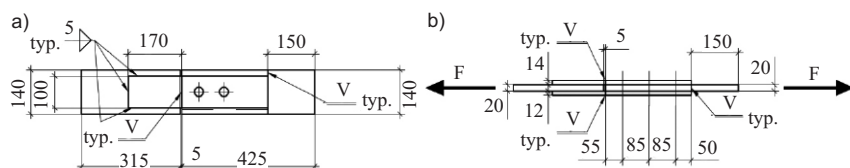
Remont połączenia nitowanego można wykonać z użyciem śrub pasowanych, co jest korzystne z uwagi na sposób współpracy łączników starych i nowych, jednak zabieg ten jest technologicznie trudny dla wykonawcy remontu. W związku z tym nowe połączenia często wykonywane są z wykorzystaniem otworów normalnych, zgodnie z zapisami normy [7]. Wpływa to na zmianę pracy połączenia oraz na inny, od zakładanego, rozkład obciążeń na poszczególne łączniki w połączeniu. Wpływ ten objawia się nie tylko w samym połączeniu, ale ma także przełożenie na globalne odkształcenia konstrukcji, gdyż ewentualne poślizgi w połączeniu mogą doprowadzić do przekroczenia stanów granicznych użyteczności konstrukcji [8].

<sup>1)</sup> Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji; kamil.pawlowski@upwr.edu.pl

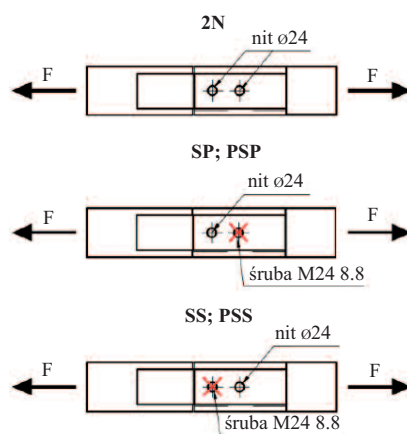
## Program badań hybrydowych połączeń zakładkowych nitowano-śrubowych

Prezentowane wyniki badań dotyczą wykorzystania śrub M24 wysokiej wytrzymałości klasy 8.8 w połączeniach hybrydowych, nitowano-śrubowych. Zastosowano zestawy śrubowe typu HR do połączeń sprężanych oraz śruby pasowane. Elementy do badań zostały pobrane z kolejowych konstrukcji mostowych, które przeznaczono do rozbiórki. Istniejąca konstrukcja była w bardzo dobrym stanie technicznym, tj. nie wykazywała uszkodzeń mechanicznych lub spowodowanych korozją. Połączenia nitowane, użyte do wykonania elementów do badań, były zlokalizowane bezpośrednio przy dźwigarach głównych przęsła mostu. Otwory po usuniętych nitach nie wykazywały oznak przecięcia łączników lub przekroczenia dopuszczalnych naprężeń w blachach połączenia. Wykonanie elementów do badań wymagało przygotowania ich w sposób umożliwiający zapewnienie odpowiedniego schematu obciążenia w próbie statycznego rozciągania w maszynie wytrzymałościowej. W celu określenia wpływu umiejscowienia łącznika na nośność połączenia, w badaniach przyjęto dwa typy elementów: w którym wymieniany był nit skrajny oraz w którym wymieniany był nit pośredni. Każdorazowo połączenie składało się z dwóch łączników. Referencyjnie analizowano nośność elementu z dwoma nitami.

Przeprowadzono łącznie testy na 28 elementach. Przebadano 6 połączeń w pełni nitowanych, uznając je za referencyjne do określenia wpływu wymiany istniejącego nitu na śrubę. Zbadano 11 połączeń z umiejscowieniem śruby jako łącznika skrajnego oraz 11 połączeń z umiejscowieniem śruby jako łącznika pośredniego. W połączeniu hybrydowym zastosowano śruby M24 klasy 8.8. Geometrię typowego elementu, używanego w badaniach, zaprezentowano na rysunku 1. Schematy oraz nazewnictwo typów połączeń, używane w dalszej części artykułu, przedstawiono na rysunku 2. Próbkę referencyjną, w których elementy połączono na 2 nity, oznaczono jako 2N. Uzyskano bardzo dużą zbieżność otrzymywanych wyników. Następnie przygotowano po-



Rys. 1. Geometria analizowanych połączeń hybrydowych: a) widok z góry; b) widok z boku  
Fig. 1. Diagram of the analysed hybrid joints: a) plan view; b) side view



Rys. 2. Analizowane połączenia hybrydowe (opis w artykule)

Fig. 2. The analysed hybrid joints (description in article)

łączenia sprężone na śruby niepasowane; z wymienionym skrajnym nitem oznaczono jako SS, natomiast z wymienionym nitem pośrednim SP. Zbadano po sześć połączeń każdego z dwóch wymienionych rodzajów. Ostatnim typem były połączenia sprężone na śruby pasowane, które oznaczono jako PSP i PSS (odpowiednio wymienionego nitu pośredniego i skrajnego). Zbadano po pięć połączeń każdego z tych dwóch typów.

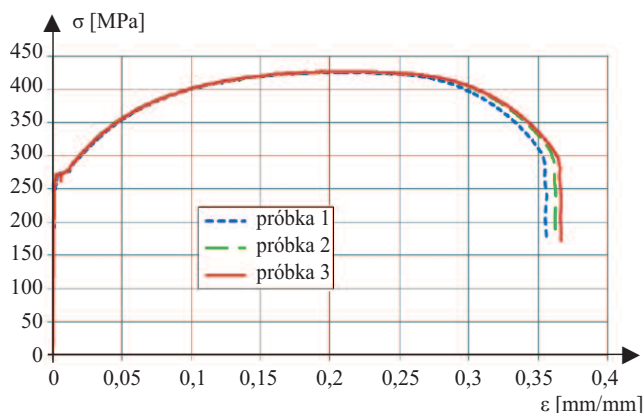
Podczas badań analizowano wiele układów łączników w połączeniu. Zgodnie z aktualnym stanem wiedzy [2], nośność łącznika w połączeniu zakładkowym, w przypadku nośności na docisk, zależy od jego umiejscowienia względem krawędzi elementów i innych łączników. W związku z tym zdecydowano o badaniu połączeń, gdzie wymieniano na śruby nity skrajne lub pośrednie. Do badań połączeń hybrydowych nitowano-śrubowych przygotowano próbki w sposób zapewniający ich pracę jako połączeń zakładkowych. W tym celu do elementów wyciętych z konstrukcji mostu dospawano blachy umożliwiające ich montaż w maszynie wytrzymałościowej. Elementy przeznaczone do wykonania połączeń sprężanych pasowanych zostały dobrane i przygoto-

wane tak, aby spełniać wymagania normowe, w tym wymiaru otworu [8]. Elementy sprężano za pomocą klucza dynamometrycznego metodą kontrolowanego momentu dokręcenia. Wartość momentu dokręcenia przyjęto na podstawie danych dostarczonych przez producenta zestawów śrubowych. Aby określić przewidywaną nośność elementów, przeprowadzono obliczenia analityczne na podstawie dotychczasowego stanu wiedzy. Wartość obliczeniowej nośności poszczególnych połączeń zakładkowych oszacowano na podstawie [2] zgodnie z wzorami podanymi w tabelicy 3.4. W obliczeniach tych posługiwano się charakterystykami wytrzymałościowymi blach, określonymi na podstawie własnych badań, przeprowadzonych na normowych próbkach, które zbadano w statycznej próbie rozciągania, posługując się maszyną wytrzymałościową Instron/Satec KN 600. Otrzymana z badań, wykonanych na trzech normowych próbkach, wartość dolnej granicy plastyczności wyniosła 264,10 MPa, a średnia wartość wytrzymałości stali na rozciąganie – 426,80 MPa.

## Wyniki badań

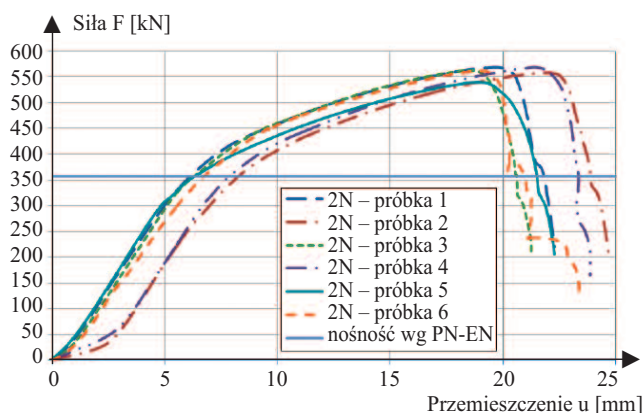
Na rysunkach 3 ÷ 8 przedstawiono wyniki badań analizowanych połączeń, a na fotografii elementy połączeń po badaniu w maszynie wytrzymałościowej. Każdy z wykresów obrazuje zależność pomiędzy siłą wyrażoną [kN] a przemieszczeniem łączonych elementów [mm].

Wartości maksymalnej siły zrywającej połączenia przedstawiono w tabeli 1. Na podstawie tych wielkości określono zmianę nośności połączeń po wykonaniu remontu z wykorzystaniem śrub wysokiej wytrzymałości. Zważywszy na fakt zmiennego, w poszczególnych analizowanych próbkach, końca fazy liniowo-sprężystej pracy połączenia zaleca się indywidualne rozpatrywa-



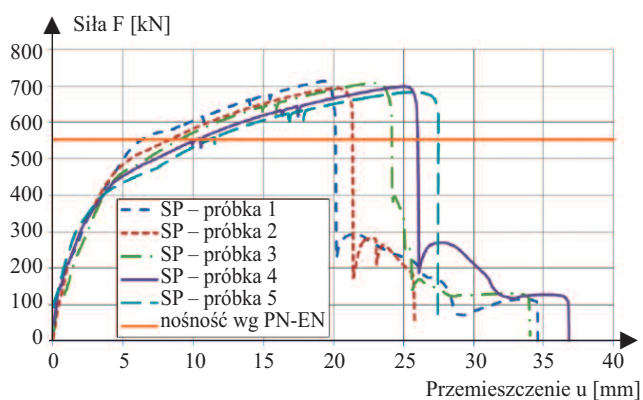
Rys. 3. Zależność naprężenie – odkształcenie w przypadku analizowanych próbek

Fig. 3. The strain – deformation relation for analysed samples



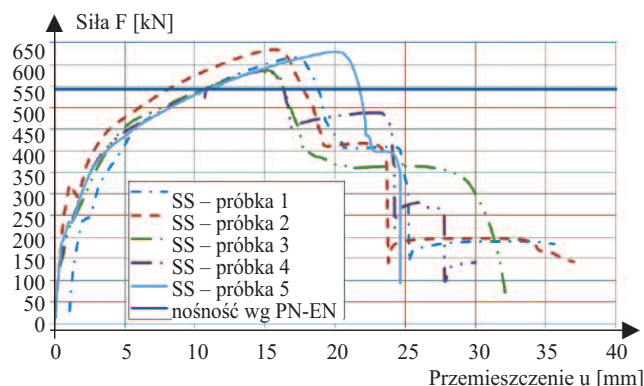
Rys. 4. Zależność siła – przemieszczenie w przypadku połączeń referencyjnych – 2 nity

Fig. 4. The force – displacement relation for the reference joint – 2 rivets



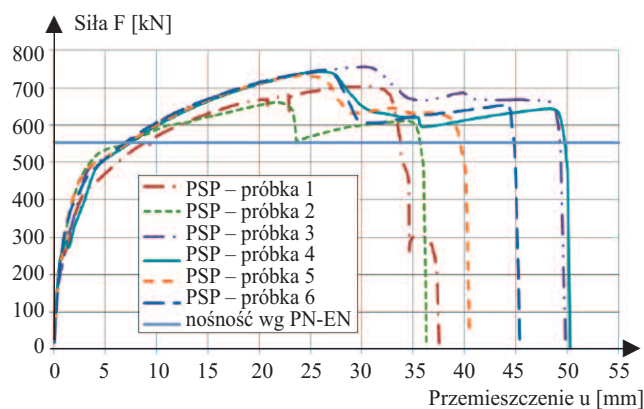
Rys. 5. Zależność siła – przemieszczenie w przypadku połączeń sprężonych – śruba pośrednia

Fig. 5. The force – displacement relation for the compression joint – intermediate bolt



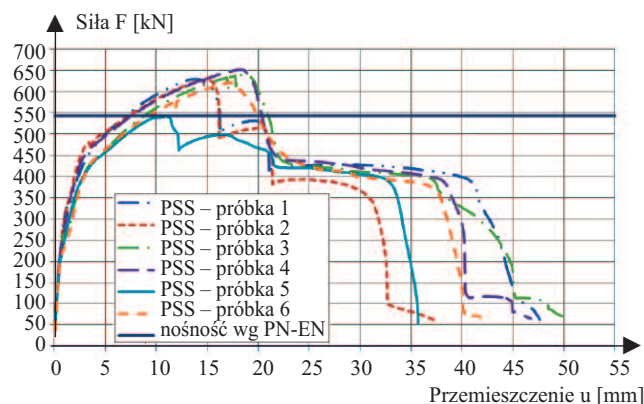
Rys. 6. Zależność siła – przemieszczenie w przypadku połączeń sprężonych – śruba skrajna

Fig. 6. The force – displacement relation for the compression joint – marginal bolt



Rys. 7. Zależność siła – przemieszczenie w przypadku połączeń sprężonych ze śrubą pasowaną – śruba pośrednia

Fig. 7. The force – displacement relation for the compression joint with fitted bolt – intermediate bolt



Rys. 8. Zależność siła – przemieszczenie w przypadku połączeń sprężonych ze śrubą pasowaną – śruba skrajna

Fig. 8. The force – displacement relation for the compression joint with fitted bolt – marginal bolt

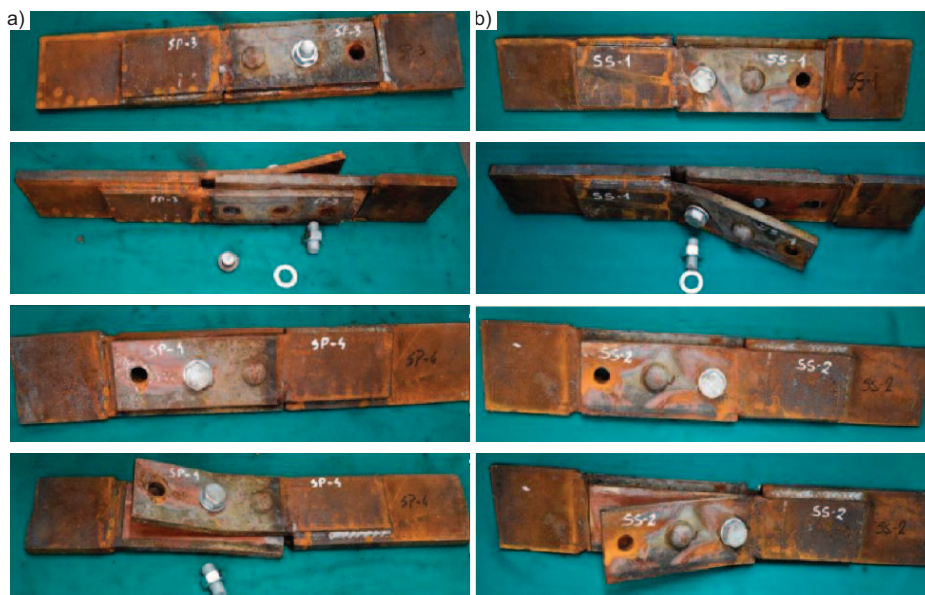
nie każdego z przypadków. Dodatkowo w analizowanych połączeniach uplastycznienie występuje poniżej obliczeniowej wytrzymałości połączenia wyznaczonej zgodnie z [2], co nakazywałoby zastosowanie dodatkowego współczynnika redukcyjnego w przypadku

szacowania nośności połączenia hybrydowego.

Na podstawie uzyskanych wyników (tabela 1) określono sztywność translacyjną połączeń, wyznaczoną dla zakresu liniowo-sprężystego pracy połączeń (tabela 2).

## Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań połączeń hybrydowych nitowano-śrubowych oraz właściwości stali konstrukcyjnej, z której wykonano połączenia, można przedstawić następujące wnioski:



Elementy połączeń po badaniu w maszynie wytrzymałościowej: a) elementy z nitem i śrubą pośrednią; b) połączenie z nitem i śrubą skrajną  
 Connection elements after testing in tensile strength machine: a) elements with a rivet and an inner bolt; b) a connection with a rivet and an end bolt

Tabela 1. Wartość siły niszczącej w analizowanych połączeniach  
 Table 1. The value of the breaking force of the analyzed connections

| Typ połączenia | Wartość pomierzonej siły zrywającej [kN] |        |        |        |        |        | Wartość średnia [kN] | Odchylenie standardowe [kN] | Zmiana nośności połączenia spowodowana wymianą nita na śrubę [%] |
|----------------|--|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------|-----------------------------|--|
|                | 1  | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |                      |                             |  |
| 2N             | 568,82                                   | 558,48 | 562,79 | 568,67 | 539,8  | 562,65 | 560,2                | 10,8                        | 100,00   |
| SP             | 713,17                                   | 674,69 | 708,35 | 698,82 | 628,35 |        | 684,7                | 34,8                        | 122,22   |
| SS             | 616,2                                    | 634,2  | 586,35 | 584,74 | 626,57 |        | 609,6                | 22,9                        | 108,82   |
| PSP            | 703,63                                   | 661,17 | 755,78 | 743,28 | 732,57 | 746,25 | 723,8                | 35,5                        | 129,20   |
| PSS            | 629,37                                   | 628,08 | 639,3  | 651,69 | 541,77 | 621,06 | 618,5                | 39,1                        | 110,41   |

Tabela 2. Wartość sztywności translacyjnych połączeń  
 Table 2. Value of translational stiffness of connections

| Typ połączenia                             | PSS   | PSP | SS    | SP  | 2N |
|--|-------|-----|-------|-----|----|
| Wartość sztywności translacyjnej K [kN/mm] | 180,2 | 175 | 161,2 | 153 | 60 |

• prezentowane badania wykazały różnice w nośności pomiędzy połączeniem nitowanym a złożonym z łącznika w postaci jednego nita i jednej śruby oraz że istnieje realny wpływ na wartość siły niszczącej połączenie w konstrukcji nitowanej, w przypadku częściowej wymiany istniejących nitów na śruby;

• największy wpływ na wartość siły niszczącej połączenia hybridowego miało położenie śruby (śruba jako łącznik skrajny lub pośredni). Połączenia SS i PSS mają nośność graniczną o ok. 10% większą od połączeń grupy 2N, podczas gdy nośność połączeń SP i PSP była większa od odpowiednio – 22 i 29%;

• połączenia, w których wymieniono nity na śruby, charakteryzują się różnymi (w przypadku poszczególnych analizowanych układów) wartościami siły, przy której następuje koniec fazy liniowo-sprężystej pracy połączenia. Wpływ ten wymaga bardziej złożonych badań, które będą miały na celu określenie możliwości przeciążania poszczególnych łączników połączenia hybridowego;

• należy zwrócić uwagę, że jedno z połączeń grupy PSS miało wyjątkowo małą nośność graniczną wynoszącą 541,77 kN. Jest to wartość zbliżona do średniej nośności połączeń na nity 2N i odpowiada wartości nośności wyliczonej wg [2]. Daje to podstawę do podania w wątpliwość, czy zasadne jest twierdzenie, że zastosowanie połączenia hybridowego o większej wytrzymałości łączników (względem istniejących w połączeniu) zapewni zwiększenie wytrzymałości całego układu. W tym kon-

tekście zagadnienie wymaga dalszych szczegółowych badań, a dotyczące go wnioski należy formułować bardzo ostrożnie.

Wykonywanie remontów polegających na wymianie istniejących skorodowanych nitów, na nowe śruby niepasowane, może spowodować nadmierne ugięcie konstrukcji przy wybieraniu luzów otworów o nominalnie większej średnicy niż średnica śruby. W skrajnych przypadkach może dojść do przeciążenia nitów, przed włączeniem do współpracy śrub, a finalnie do uszkodzenia konstrukcji lub jej katastrofy. W analizowanych przypadkach trudnym do uchwycenia był początek uplastyczniania się elementów połączenia. Jednak w kolejnych planowanych badaniach możliwe będzie zastosowanie tensometrii elektrooporowej, która pozwoli na uzyskanie pełniejszej informacji co do ugięcia elementów pod obciążeniem.

Literatura

[1] Biegus A. Połączenia śrubowe, Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa – Wrocław 1997.  
 [2] EN 1993-1-8 Eurocode 3 Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints.  
 [3] Kowal M. Effect of Adhesive Joint End Shapes on the Ultimate Load-Bearing Capacity of Carbon Fibre-Reinforced Polymer/Steel Bonded Joints. *Advances in Science and Technology Research Journal*. (ISSN 2299-8624). 2021; 15 (4): 299 – 310.  
 [4] Pawłowski K. The bearing capacity of hybrid bolted and riveted joints in steel bridge structures. 2021, DOI: 10.1201/9781003132134-43.  
 [5] Chen Y, Sakura R, Yamaguchi T, Hayashi G, Yamauchi M, Ueno K. Load transferring mechanism of long riveted joint partially replaced by high-strength bolts. 2022, DOI: 10.2749/prague. 2022.0173.  
 [6] Chen Y, Yamaguchi T, Hayashi G, Yamauchi M, Ueno K. Study on the mechanism of load transferring of riveted joints with high strength bolts as frictional joints. *Steel Construction Engineering*. (ISSN1884-0329). 2022; 29 (113): 1 – 14.  
 [7] EN 1090-2 Execution of steel structures and aluminium structures – Part 2: Technical requirements for steel structures.  
 [8] Kozioł P, Pawłowski K. Analysis of the influence of slip in bolted joints on global structural deformations. 2018, DOI: 10.7862/rb. 2018.58.

Praca była wspierana przez Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu jako projekt badawczy dla młodych naukowców po doktoracie „Innowacyjny Naukowiec, nr NO60/0003/20”.

Przyjęto do druku: 02.03.2023 r.