

Wpływ nieliniowości warstwy stykowej między elementami łączonymi w połączeniu kołnierzowym napiętym wstępnie na wartości sił roboczych w śrubach

Rafał Grzejda¹

¹Zakład Podstaw Konstrukcji Maszyn, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
email: rafal.grzejda@zut.edu.pl

STRESZCZENIE: Przedstawiono modelowanie niesymetrycznego połączenia kołnierzowego napiętego wstępnie i obciążonego zewnątrz siłą normalną. Fizyczny model połączenia zbudowano jako parę elementów (którymi są odkształcalny kołnierz oraz nieodkształcalna ostoja) zaciskanych za pomocą uproszczonych modeli śrub. Pomiędzy elementami łączonymi wprowadzono model warstwy stykowej Winklera. Zbadano wpływ nieliniowości warstwy stykowej na obliczeniowe wartości sił roboczych w śrubach. Wysznięto wnioski o dużym znaczeniu poznawczym dla modelowania napiętych wstępnie połączeń kołnierzowych.

SŁOWA KLUCZOWE: kołnierzowe połączenie wielośrubowe, napięcie wstępne, stan eksploatacyjny, siła robocza w śrubie

1. Wprowadzenie

Mechaniczne charakterystyki połączeń kontaktowych obciążonych normalnie są zwykle nieliniowe [1-3]. Charakter tej nieliniowości zależy jednak od wartości sił działających na połączenie. W przypadku kołnierzowych połączeń wielośrubowych, w których łączeniu podlegają elementy zacisknięte napiętymi wstępnie śrubami, wartości tych sił są znaczne. Można wówczas założyć, że charakterystyka normalna połączenia kontaktowego między elementami łączonymi jest prawie liniowa.

Do modelowania połączeń kołnierzowych stosuje się najczęściej metodę elementów skończonych (MES). Elementy łączone są wówczas traktowane jako bryły przestrzenne. Natomiast śruby modeluje się za pomocą:

- sprężyn [4],
- elementów belkowych z nieodkształcalnym łbem [5],
- elementów belkowych z odkształcalnym łbem [6],
- elementów przestrzennych [7, 8].

Stosowanie uproszczonych modeli śrub umożliwia osiągnięcie zadowalających wyników obliczeń w znacznie krótszym czasie, niż w przypadku pełnych modeli przestrzennych [5].

Celem pracy jest udowodnienie tezy, że modelowanie kołnierzowych połączeń wielośrubowych może być prowadzone bez uwzględnienia nieliniowości warstwy stykowej między elementami łączonymi. Badania zrealizowano na podstawie modelu MES połączenia kołnierzowego ze śrubami modelowanymi jako elementy belkowe z odkształcalnym łbem oraz z liniową warstwą stykową pomiędzy elementami łączonymi. Wyniki obliczeń porównano z wynikami uzyskanymi dla analogicznego modelu połączenia z nieliniową warstwą stykową pomiędzy elementami łączonymi, które zaprezentowano w pracy [6].

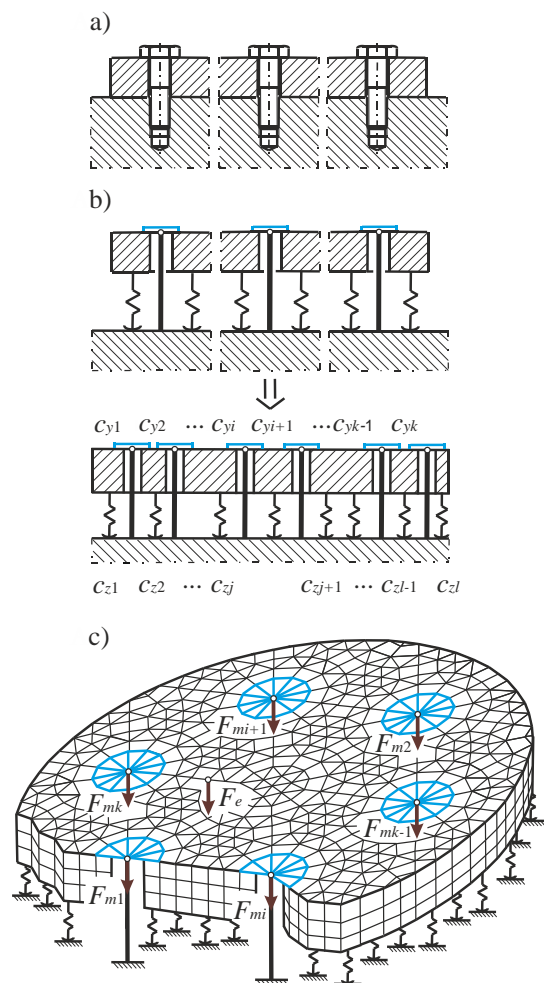
2. Model połączenia kołnierzowego

Model połączenia kołnierzowego zbudowany jest z odkształcalnego elementu kołnierzowego mocowanego do nieodkształcalnej ostoi za pomocą k śrub o sztywności c_{yi} (dla $i = 1, 2, 3, \dots, k$). Śruby modelowane są jako elementy typu "spider bolt" [6] napinane wstępnie siłą F_{mi} (rys. 1). Pomiędzy elementami łączonymi wprowadza się umowną warstwą stykową traktowaną jako liniowy model Winklera [9] zbudowany z l sprężyn. Napięty wstępnie układ zostaje zewnątrz obciążony normalną siłą F_e .

Równanie równowagi układu wielośrubowego o schemacie pokazanym na rys. 1a można przedstawić w postaci:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{p} \quad (1)$$

gdzie: \mathbf{K} – macierz sztywności,
 \mathbf{q} – wektor przemieszczeń,
 \mathbf{p} – wektor obciążeń.



Rys. 1. Model połączenia kołnierzowego: a) schemat, b) właściwości sprężyste układu, c) podział na elementy skończone

Przyjmując systemowe podejście do modelowania połączenia [6] równanie (1) sprowadza się do postaci:

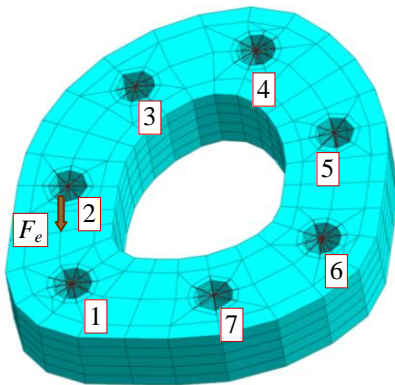
$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{BB} & \mathbf{K}_{BF} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_{FB} & \mathbf{K}_{FF} & \mathbf{K}_{FC} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{CF} & \mathbf{K}_{CC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{q}_B \\ \mathbf{q}_F \\ \mathbf{q}_C \end{bmatrix} = \mathbf{p} \quad (2)$$

gdzie: \mathbf{K}_{BB} , \mathbf{K}_{FF} , \mathbf{K}_{CC} – macierze sztywności podukładów,
 \mathbf{K}_{BF} , \mathbf{K}_{FB} , \mathbf{K}_{FC} , \mathbf{K}_{CF} – macierze sprzężeń pomiędzy podukładami,
 B – podukład śrub,
 F – podukład kołnierza,
 C – podukład warstwy stykowej.

Wykorzystując tak zdefiniowany model można wyznaczyć siły robocze i odkształcenia w śrubach w połączeniu kołnierzowym znajdującym się w warunkach obciążeń eksploatacyjnych.

3. Obliczenia połączenia kołnierzowego w stanie eksploatacyjnym

Aby zademonstrować użyteczność proponowanej metody, wykonano przykładowe obliczenia połączenia kołnierzowego pokazanego na rys. 2. Połączenie zostało napięte wstępnie siłą $F_m = 20$ kN przykładaną kolejno do 7 śrub M10, a następnie obciążone zewnątrz siłą $F_e = 50$ kN.



Rys. 2. Model MES połączenia kołnierzowego przyjęty do obliczeń

Linowe sprężyny tworzące warstwę stykową zostały opisane charakterystyką [10]:

$$R_j = A_j \cdot (26,873 \cdot u_j) \quad (3)$$

gdzie: R_j – siła w środku ciężkości j -tej elementarnej powierzchni styku (dla $j = 1, 2, 3, \dots, l$),
 A_j – pole powierzchni j -tej elementarnej powierzchni styku,
 u_j – ugięcie j -tej sprężyny liniowej.

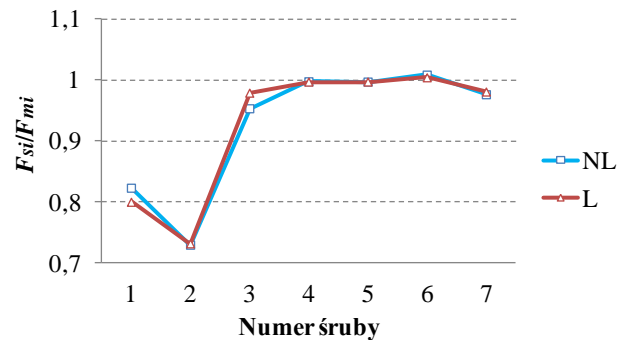
Wyniki obliczeń porównano z wynikami otrzymanymi dla analogicznego modelu nieliniowego [6] na rys. 3. Na wykresie przyjęto następujące oznaczenia:

- model liniowy – L,
- model nieliniowy – NL.

Ilościowego porównania wyników można dokonać na podstawie wskaźnika W :

$$W = \left| \frac{F_{si}^L - F_{si}^{NL}}{F_{si}^{NL}} \right| \cdot 100\% \quad (4)$$

gdzie: F_{si}^L – siła robocza w i -tej śrubie odniesiona do napięcia wstępnego wg modelu liniowego,
 F_{si}^{NL} – siła robocza w i -tej śrubie odniesiona do napięcia wstępnego wg modelu nieliniowego.



Rys. 3. Wartości sił w śrubach w połączeniu kołnierzowym obciążonym zewnątrz

Na podstawie wartości wskaźnika W należy stwierdzić, że stosowanie modelu liniowego może prowadzić do otrzymania wartości sił roboczych w śrubach różniących się o 3 % w stosunku do odpowiadających im wartości sił uzyskanych dla modelu nieliniowego.

4. Podsumowanie

Analizując wyniki prac wysunięto następujące wnioski:

- 1) W przypadku wielośrubowych połączeń kołnierzowych napiętych wstępnie i obciążonych normalną siłą zewnętrzną, nieliniowość warstwy stykowej może mieć znikomy wpływ na wartości sił roboczych w śrubach.
- 2) Stosowanie modelu liniowego zapewnia otrzymanie wyników obliczeń porównywalnych do wyników dla modelu nieliniowego w znacznie krótszym czasie.

Literatura

- [1] Hanaor D. A. H., Gan Y., Einav I., *Normal contact stiffness at fractal interfaces*, 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, Byron Bay 2014.
- [2] Konowalski K., *Experimental research and modeling of normal contact stiffness and contact damping of machined joint surfaces*, Advances in Manufacturing Science and Technology, Vol. 33, No. 3, pp. 53–68, 2009.
- [3] Shi X., Polycarpou A. A., *Measurement and modeling of normal contact stiffness and contact damping at the meso scale*, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 127, No. 1, pp. 52–60, 2005.
- [4] Azim M. R., *An analytical investigation on bolt tension of a flanged steel pipe joint subjected to bending moments*, International Journal of Engineering and Applied Science, Vol. 2, No. 3, pp. 71–81, 2013.
- [5] Grzejda R., *Modelling of bolts in multi-bolted connections using MIDAS NFX*, Technical Sciences, Vol. 18, No. 1, pp. 61–68, 2015.
- [6] Grzejda R., *Modelling nonlinear multi-bolted connections: A case of the operational condition*, 15th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development 2016", Jelgava 2016.
- [7] Błachowski B., Gutkowski W., *Effect of damaged circular flange-bolted connections on behaviour of tall towers, modelled by multilevel substructuring*, Engineering Structures, Vol. 111, pp. 93–103, 2016.
- [8] Leń D., Ślęczka L., *Modele obliczeniowe śrubowych połączeń kołnierzowych okrągłych prętów rozciąganych osiowo*, Inżynieria i Budownictwo, Vol. 71, Nr 2, s. 91–94, 2015.
- [9] Frydrych K., *Badania nad kształtowaniem się wartości współczynnika podatności podłoża dla celów obliczeń statycznych obudowy tuneli*, Rozprawa doktorska, AGH, Kraków 2012.
- [10] Grzejda R., *Non-linearity of the contact layer between elements joined in a multi-bolted connection and the preload of the bolts*, Combustion Engines, Vol. 55, No. 2, pp. 3–8, 2016.