

Andrzej WOJNAR\*  
Politechnika Rzeszowska

## SZTYWNOŚĆ POCZĄTKOWA POŁĄCZEŃ KOŁNIERZOWYCH I JEJ WPLYW NA ZACHOWANIE SIĘ KOMINÓW STALOWYCH

**Streszczenie.** Przedmiotem pracy są połączenia kołnierzowe najczęściej stosowane w konstrukcjach stalowych wykonanych z rur o dużej średnicy, takich jak: kominy stalowe, konstrukcje wsporcze zbiorników wieżowych, siłownie wiatrowe itp. W referacie przedstawiono model mechaniczny służący do obliczenia sztywności początkowej połączeń kołnierzowych. Do jego budowy wykorzystano metodę składnikową. Charakterystyki podatnościowe poszczególnych składników modelu zostały wyznaczone za pomocą badań doświadczalnych i symulacji numerycznych. zilustrowano również wpływ sztywności początkowej połączeń kołnierzowych na charakterystyki dynamiczne i zachowanie się kominów stalowych obciążonych parciem wiatru.

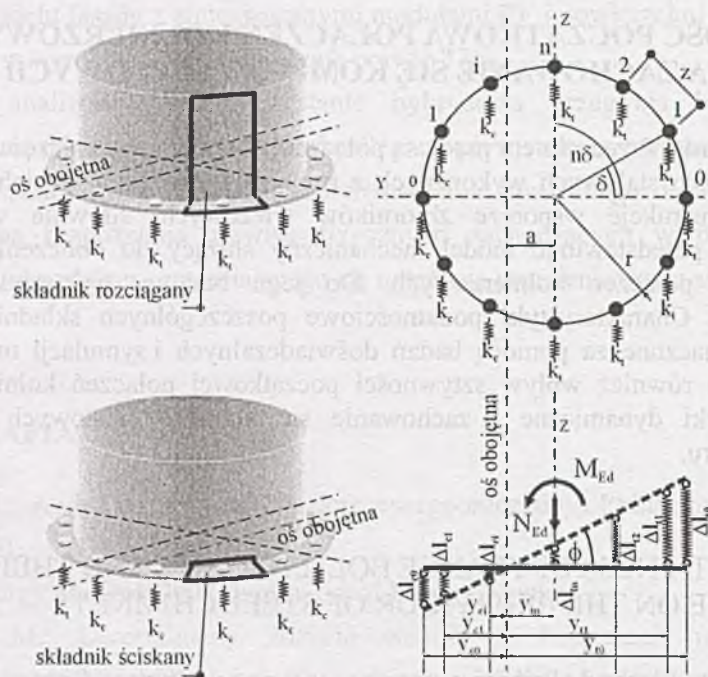
## INITIAL STIFFNESS OF FLANGE BOLTED JOINTS AND THEIR INFLUENCE ON THE BEHAVIOUR OF STEEL CHIMNEYS

**Summary.** Flange bolted joints are the most popular types of connections in steel elements with large diameter circular hollow cross section. This type of joints is used in structures such chimneys, supports of elevated tanks, wind power plants etc. Although the design codes and the analytical methods applied nowadays to calculate their bearing capacity do not cover the methods of calculation of their stiffness. The initial stiffness of flange bolted joints has an influence on the dynamic parameters and behaviour of structures with such a joints. A general, analytical model, based on component method, has been created to allow calculation of stiffness and resistance of this type of joints. To build such model, characteristics of individual joint components were evaluated by experimental tests and/or numerical simulations. Using this model, parametric study has been conducted to investigate influence of joint stiffness on the behaviour of such structures as steel chimneys.

\* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Aleksander Kozłowski.

## 1. Model mechaniczny połączenia kołnierzewego

Model mechaniczny połączenia kołnierzewego (rys. 1) opracowano przy wykorzystaniu metody składnikowej. Zastosowano w nim dwa typy składników: składnik rozciągany, modelowany sprężyną o sztywności  $k_t$  i nośności  $R_t$ , oraz składnik ściskany, modelowany sprężyną o sztywności  $k_c$  i nośności  $R_c$ .



Oznaczenia:  $n/i$  – liczba składników po stronie rozciąganej/ściskanej połączenia,  $y_c$  – odległość od osi obojętnej do środka składnika ściskanego,  $y_t$  – odległość od osi obojętnej do środka składnika rozciąganego,  $\delta$  – kąt pomiędzy osią  $Y$  a półprostą przechodzącą przez środek połączenia i składnik modelu,  $\phi$  – kąt obrotu połączenia,  $k_t/k_c$  – sztywność sprężyny rozciąganej/ściskanej,  $\Delta l_t/\Delta l_c$  – wydłużenie/skrócenie sprężyny rozciąganej/ściskanej,  $N_t/N_c$  – siła w sprężynie rozciąganej/ściskanej.

Rys. 1. Połączenie kołnierzowe i jego model mechaniczny  
Fig. 1. The flange bolted joint and its mechanical model

Model ten obciążono przymuszeniem wymuszonym obrotem połączenia o kąt  $\phi$ , co powoduje pojawienie się w sprężynach sił rozciągających  $N_t$  i ściskających  $N_c$ . Przesunięcie osi obojętnej przekroju o wartość  $a$  wyznaczono z warunku równowagi sił rzutowanych na oś podłużną pręta (powłoki cylindrycznej) według wzoru:

$$\sum N_x = 0 \Rightarrow \sum N_t - \sum N_c + N_{Ed} = 0 \quad (1)$$

gdzie:  $\sum N_t$  – suma sił po stronie rozciąganej połączenia,  $\sum N_c$  – suma sił po stronie ściskanej połączenia,  $N_{Ed}$  – siła osiowa obciążająca połączenie.

Siły w poszczególnych sprężynach określono jako iloczyn sztywności początkowej ( $k_t$ ,  $k_c$ ) i wydłużenia/skrócenia ( $\Delta l_t$ ,  $\Delta l_c$ ) sprężyny. Sztywności początkowe sprężyn określono za pomocą badań doświadczalnych i symulacji numerycznych [1]. Wartości wydłużeń i skrótów poszczególnych sprężyn uzależniono od kąta obrotu połączenia  $\phi$ , kąta  $\delta$ , określającego przy zadanym promieniu  $r$  położenie sprężyn, oraz od wielkości  $a$ , określającej położenie osi obojętnej. Ostatecznie sumę sił po stronach rozciąganej i ściskanej połączenia wyznaczono ze wzorów (2) i (3). Podstawiając równania (2) i (3) do (1), otrzymano równanie (4), którego rozwiązanie prowadzi do wyznaczenia wielkości  $a$ , określającej przesunięcie osi obojętnej w połączeniu. Sztywność początkową połączenia kołnierowego wyznaczono według wzoru (5), natomiast nośność według wzoru (6). Dokładny opis modelu mechanicznego połączenia kołnierowego zamieszczono w [2].

$$\sum N_t = k_t \cdot \phi \cdot \left[ (r + a) + 2 \sum_1^n (r \cdot \cos(n\delta) + a) \right] \quad (2)$$

$$\sum N_c = k_c \cdot \phi \cdot \left[ (r - a) + 2 \sum_1^n (r \cdot \cos(i\delta) - a) \right] \quad (3)$$

$$k_t \cdot \phi \cdot \left[ (r + a) + 2 \sum_1^n (r \cdot \cos(n\delta) + a) \right] - k_c \cdot \phi \cdot \left[ (r - a) + 2 \sum_1^n (r \cdot \cos(i\delta) - a) \right] + N_{Ed} = 0 \quad (4)$$

$$S_{j,ini} = k_t \cdot \left[ (r + a)^2 + 2 \sum_1^n (r \cdot \cos(n\delta) + a)^2 \right] + k_c \cdot \left[ (r - a)^2 + 2 \sum_1^n (r \cdot \cos(i\delta) - a)^2 \right] \quad (5)$$

$$M_{Ed} = \min \left\{ \begin{array}{l} M_{c,Rd} + M_t + N_{Ed} \cdot a \\ M_c + M_{t,Rd} + N_{Ed} \cdot a \end{array} \right\} \quad (6)$$

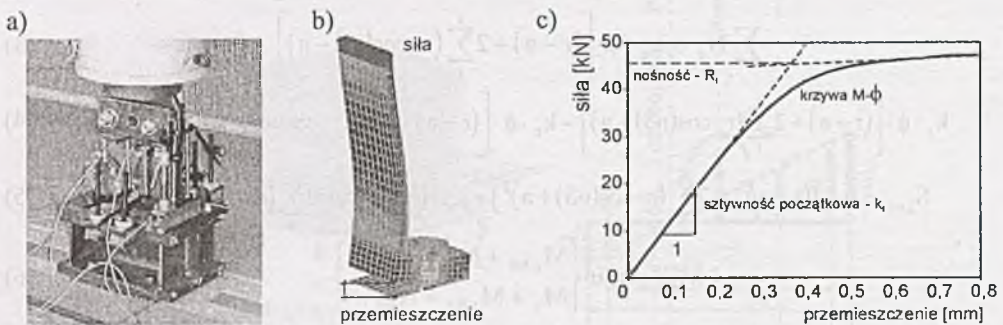
gdzie:  $M_{c,Rd}$  – wypadkowy moment zginający od sumy sił po stronie ściskanej połączenia, odpowiadający osiągnięciu przez maksymalnie wyteżony składnik ściskany nośności granicznej sprężystej;  $M_t$  – odpowiadający mu moment zginający od sumy sił po stronie rozciąganej połączenia.  $M_{t,Rd}$  – wypadkowy moment zginający od sumy sił po stronie rozciąganej połączenia, odpowiadający osiągnięciu przez maksymalnie wyteżony składnik rozciągany nośności granicznej sprężystej;  $M_c$  – odpowiadający mu moment zginający od sumy sił po stronie ściskanej połączenia.

## 2. Identyfikacja i modele obliczeniowe segmentów imitujących część rozciąganą i ściskaną połączenia kołnierowego

### 2.1. Składnik rozciągany (rys. 2)

Na podstawie analizy czynnikowej [3] wyodrębniono parametry mające wpływ na sztywność początkową i nośność rozciąganego składnika modelu mechanicznego

połączenia: grubość blachy płaszcza  $t_s$ , grubość blachy kołnierza  $t_p$ , średnicę śrub  $d$ , odległość od osi śruby do swobodnej krawędzi blachy kołnierza  $a_2$ , rozstaw śrub  $z$ , klasę śrub (rodzaj połączenia – sprężone albo niesprężone). Badania doświadczalne (rys. 2a) wykonano dla próbek charakteryzujących się czterema parametrami zmiennymi:  $t_s$ ,  $t_p$ ,  $a_2$ ,  $z$ . Podczas badań mierzono siłę obciążającą próbkę i przemieszczenia w określonych punktach próbki. Wyniki badań doświadczalnych posłużyły także do kalibracji opracowanego modelu numerycznego rozciąganego segmentu połączenia kołnierzowego (rys. 2b). Model ten był stosowany w symulacjach komputerowych, w których uwzględniono wpływ dodatkowego czynnika, jakim była średnica śruby  $d$ . Wyniki otrzymane w ten sposób uzupełniły zbiór wyników uzyskanych na podstawie badań doświadczalnych i posłużyły do opracowania funkcji pozwalających na określenie charakterystyk podatnościowych rozciąganego składnika modelu mechanicznego połączenia kołnierzowego. Sztywność początkową  $k$  i nośność  $R$ , składnika wyznaczono jak na rys. 2c.

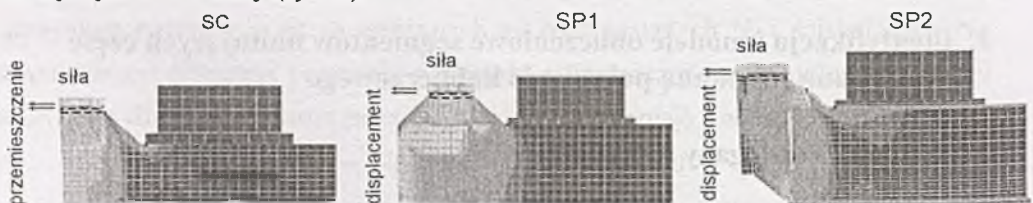


Rys. 2. Badania doświadczalne i symulacje numeryczne rozciąganego składnika modelu mechanicznego połączenia kołnierzowego

Fig. 2. An experimental tests and numerical simulations of tension component of mechanical model of flange bolted joint

## 2.2. Składnik ściskany (rys. 3)

Blachę kołnierza i płaszcza oraz łączące je spoiny modelowano ściskanymi sprężynami o sztywności  $k_c$  i nośności  $R_c$ . Wzięto pod uwagę trzy możliwe układy spoin łączące ww. blachy (rys. 3).



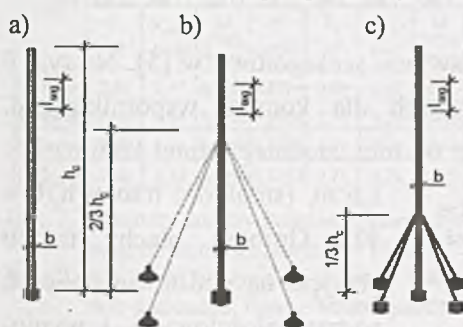
Rys. 3. Modele numeryczne ściskanego składnika modelu mechanicznego połączenia kołnierzowego

Fig. 3. Numerical models of compression component of mechanical model of flange bolted joint

W celu określenia charakterystyk podatnościowych tych sprężyn, wykonano symulacje numeryczne. Wymiary geometryczne modeli numerycznych składników określono przy zastosowaniu planów badań doświadczalnych [4]. Szywność początkową i nośność składnika wyznaczono jak w przypadku składnika rozciąganego.

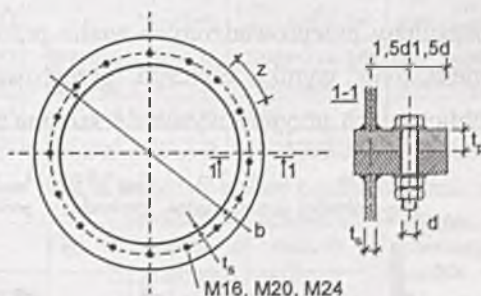
### 3. Zachowanie się kominów stalowych obciążonych parciem wiatru

W celu określenia wpływu sztywności początkowej połączeń kołnierzowych na charakterystyki dynamiczne i zachowanie się kominów stalowych, obciążonych parciem wiatru, przeprowadzono symulacje numeryczne. Wykorzystano program komputerowy Robot Millennium. Przeanalizowano zachowanie się: komina wspornikowego (rys. 4a), komina z dodatkową podporą w postaci odciągów (rys. 4b), komina z dodatkową podporą sztywną (rys. 4c).



Rys. 4. Rozpatrywane typy kominów, opis w tekście

Fig. 4. Analyzed types of steel chimneys



Rys. 5. Przyjęty typ połączenia kołnierzowego i jego wymiary geometryczne

Fig. 5. The flange bolted joint and its geometrical dimensions

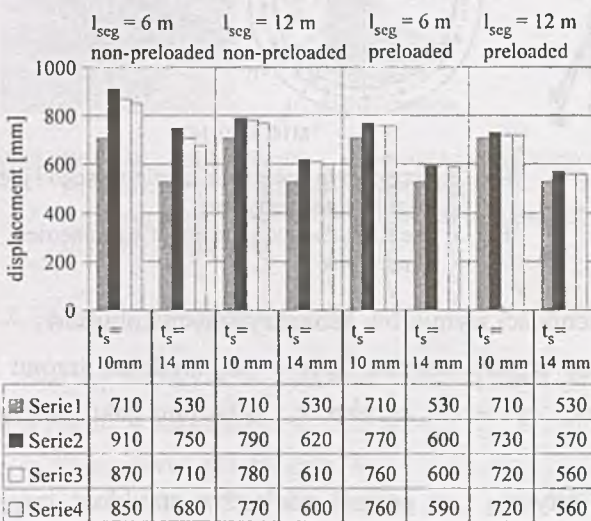
Przyjęto następujący zakres zmienności wymiarów geometrycznych kominów:

- kominy wspornikowe: smukłość trzonu komina  $h_c/b = 40$ , średnica trzonu  $b$  w przedziale od 0,8 do 1,6 m, wysokość komina  $h_c$  obliczono jako iloczyn średnicy  $b$  i smukłości trzonu;
- kominy z dodatkową podporą sztywną i w postaci odciągów: smukłość trzonu komina  $h_c/b = 50$ , średnica trzonu  $b$  w przedziale od 0,8 do 1,2 m, wysokość komina  $h_c$  obliczono jako iloczyn średnicy  $b$  i smukłości trzonu; poziom dodatkowej podpory przyjęto na wysokości  $2/3 h_c$  w przypadku kominów na odciągach i  $1/3 h_c$  w przypadku kominów z dodatkową podporą sztywną;
- długość segmentów trzonu komina  $l_{seg}$  przyjęto równą 6 i 12 m.

Liczbę połączeń kołnierzowych  $n_j$  w trzonie komina uzależniono od długości segmentów  $l_{seg}$  i wysokości komina  $h_c$ . Przyjęto jeden rodzaj połączenia kołnierzowego na całą wysokość powłoki walcowej. Wymiary geometryczne połączenia przedstawiono na rys. 5. Przyjęto grubość blachy kołnierzowej  $t_p = 16$  mm, średnicę śrub  $d$  w przedziale od 16 do 24 mm, odległość od lica powłoki walcowej do osi śruby wynoszącą  $1,5 d$ , odległość  $a_2$  od osi śruby do swobodnej krawędzi blachy kołnierza w przedziale od  $1,5 d$  do  $3,0 d$ , rozstaw śrub  $z$  w przedziale od  $4,0 d$  do  $10,0 d$ . Wzięto pod uwagę niesprężone i sprężone połączenia kołnierzowe. Trzon komina modelowano przy zastosowaniu elementów belkowych. Połączenia kołnierzowe zamodelowano jako sprężyny o sztywności początkowej wyznaczonej za pomocą opracowanego modelu mechanicznego.

#### 4. Zachowanie się kominów stalowych obciążonych parciem wiatru w linii działania wiatru

Rezultaty przeprowadzonych analiz przedstawiono szczegółowo w [5]. Na rys. 6 zamieszczono wyniki obliczeń przeprowadzonych dla komina wspornikowego. W obliczeniach przyjęto wysokość komina  $h_c = 64$  m, średnicę trzonu komina  $b =$

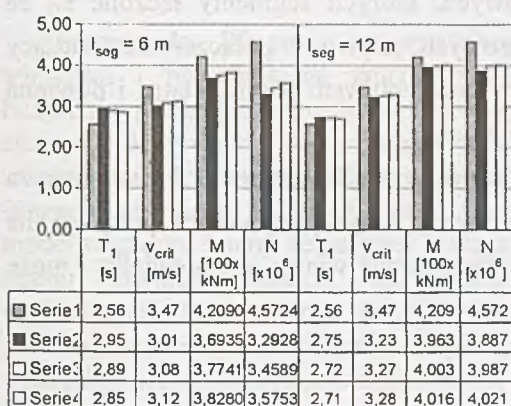


Rys. 6. Poziome przemieszczenie wierzchołka komina  
Fig. 6. Horizontal displacement of top of steel chimney

1,6 m, (smukłość trzonu  $h_c/b = 40$ ). Grubość blachy trzonu przyjęto na podstawie obliczeń wytrzymałościowych i wyniosła ona  $t_s = 10$  i  $14$  mm. Obliczenia przeprowadzono w czterech seriach: seria 1: trzon komina – bez połączeń kołnierzowych, seria 2: trzon komina z połączeniami – śruby M24, seria 3: trzon komina z połączeniami – śruby M20, seria 4: trzon komina z połączeniami – śruby M16.

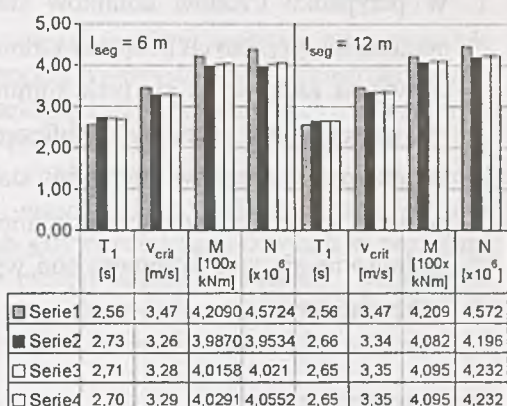
## 5. Zachowanie się kominów stalowych obciążonych wzbudzeniem wirowym

W analizie obliczeniowej wpływu sztywności połączeń kołnierzowych na zachowanie się kominów obciążonych wzbudzeniem wirowym wyznaczono następujące parametry: okres drgań własnych konstrukcji  $T_1$ , prędkość krytyczną wiatru, przy której następuje wzbudzenie wirowe  $v_{crit,1}$ , momenty zginające w trzon kominu  $M$ , spowodowane wzbudzeniem wirowym, liczbę cykli drgań  $N$  w przewidywanym czasie eksploatacji kominu (20 lat). Przeanalizowano taki sam typ kominu wspornikowego jak w pkt. 4. Rezultaty analizy przedstawiono na rys. 7 i 8.



Rys. 7. Rezultaty analizy kominu wspornikowego – połączenia niesprężone,  $t_s = 14\text{ mm}$

Fig. 7. Results of analysis of chimney with non-preloaded flange bolted joints,  $t_s = 14\text{ mm}$



Rys. 8. Rezultaty analizy kominu wspornikowego – połączenia sprężone,  $t_s = 14\text{ mm}$

Fig. 8. Results of analysis of chimney with preloaded flange bolted joints,  $t_s = 14\text{ mm}$

## 6. Wnioski

Bazując na wynikach przeprowadzonych analiz i obliczeń, wyciągnięto następujące wnioski:

1. Okres drgań własnych  $T_1$  wspornikowego kominu stalowego zwiększa się wraz ze zwiększaniem liczby połączeń na długości trzonu i wraz ze zmniejszaniem się ich sztywności.
2. Prędkość krytyczna wiatru  $v_{crit,1}$  maleje wraz ze zwiększaniem liczby połączeń i wraz ze zmniejszaniem się ich sztywności.

3. Wartość momentu zginającego  $M$ , spowodowanego siłami bezwładności od wzbudzenia wirowego, maleje wraz ze zwiększaniem liczby połączeń i wraz ze zmniejszaniem się ich sztywności.
4. Liczba cykli drgań od wzbudzenia wirowego  $N$  maleje wraz ze wzrostem liczby połączeń kołnierzowych na długości trzonu komina i wraz ze zmniejszaniem się ich sztywności.

Zaobserwowane efekty są znacznie większe w przypadku zastosowania połączeń niesprężonych niż sprężonych, w związku z czym można wyciągnąć następujące wnioski generalne:

1. W przypadku trzonów kominów stalowych, których segmenty łączone są za pomocą niesprężonych połączeń kołnierzowych, sztywność połączeń ma znaczący wpływ na zachowanie się tych kominów pod wpływem parcia wiatru i powinna być uwzględniana w analizach obliczeniowych.
2. W przypadku trzonów kominów stalowych, których segmenty łączone są za pomocą sprężonych połączeń kołnierzowych, wpływ sztywności połączeń na zachowanie się tych kominów pod wpływem parcia wiatru jest niewielki i może być pominięty.

## BIBLIOGRAFIA

1. Wojnar A., Kozłowski A.: Badania doświadczalne próbek modelujących części rozciągane połączenia kołnierzowego. Konferencja Naukowa KILiW i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 2006.
2. Wojnar A., Kozłowski A.: Model mechaniczny do określania sztywności początkowej i nośności połączenia kołnierzowego. Inżynieria i Budownictwo, nr 3/2007.
3. Wojnar A., Kozłowski A.: Badania doświadczalne próbek modelujących części rozciągane połączenia kołnierzowego. Konferencja Naukowa KILiW PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 2006.
4. Polański Z.: Planowanie doświadczeń w technice. PWN, Warszawa 1984.
5. Wojnar A., Kozłowski A., Ślęczka L.: Influence of the flange bolted joints stiffness on the behavior of steel chimneys. The 3<sup>rd</sup> International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, Cape Town, South Africa 2007, p. 413-414.