

## Modelowanie MES zakładkowego połączenia śrubowego przy użyciu uproszczonego modelu śruby

Rafał Grzejda<sup>1</sup>

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

**STRESZCZENIE:** Przedstawiono modelowanie i obliczenia zakładkowego połączenia śrubowego. Przeprowadzono analizę sił występujących w śrubach na podstawie wzorów teoretycznych oraz za pomocą metody elementów skończonych. W przypadku obliczeń teoretycznych zastosowano zalecenia podane w normie PN-EN 1993-1-8. W przypadku obliczeń numerycznych wykorzystano uproszczony model śruby. Otrzymane wyniki sprawdzono pod kątem spełnienia przyjętego kryterium nośności połączenia. Przedstawiono wybrane wyniki badań numerycznych modelu połączenia w postaci mapy przemieszczeń modelu pod wpływem zadanego obciążenia zewnętrznego. Na podstawie porównania wyników obliczeń teoretycznych oraz wyników obliczeń numerycznych określono przydatność uproszczonego modelu śruby do obliczeń sił roboczych w śrubach w połączeniach zakładkowych.

**SŁOWA KLUCZOWE:** zakładkowe połączenie śrubowe, modelowanie MES, Eurokod 3

### 1. Wprowadzenie

W zależności od celu modelowania, zakładkowe połączenia śrubowe można obliczać według różnych metod. W przypadku projektowania inżynierskiego tego typu połączeń przydatne są normy PN-EN 1993-1-1 [1] i PN-EN 1993-1-8 [2]. Nie można ich jednak stosować do połączeń obciążonych dynamicznie [3, 4]. W bardziej złożonych analizach powszechne jest wykorzystanie metody elementów skończonych (MES) oraz przestrzennych modeli połączeń [5-7].

Pomiędzy wymienionymi metodami obliczeń można umiejscowić modelowanie MES zakładkowych połączeń śrubowych przy użyciu uproszczonych modeli śruby zaprezentowanych między innymi w pracach [8-10]. Stosowanie takich modeli umożliwia osiągnięcie zadowalających wyników obliczeń w znacznie krótszym czasie, niż w przypadku pełnych modeli przestrzennych.

Zgodnie z normą [2] zakładkowe połączenia śrubowe można podzielić w następujący sposób:

- połączenia typu dociskowego kategorii A,
- połączenia cierne w stanie granicznym użyteczności kategorii B,
- połączenia cierne w stanie granicznym nośności kategorii C.

Połączenia kategorii B i C w tej klasyfikacji należą do połączeń napinanych wstępnie siłą  $F_m$  liczoną według wzoru [3]:

$$F_m = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s \quad (1)$$

gdzie:

$f_{ub}$  – wytrzymałość na rozciąganie stali śruby [MPa],

$A_s$  – pole przekroju czynnego rdzenia śruby przy rozciąganiu [mm<sup>2</sup>].

Zakładkowe połączenia śrubowe można również podzielić ze względu na ich geometrię. Wyróżnia się wówczas:

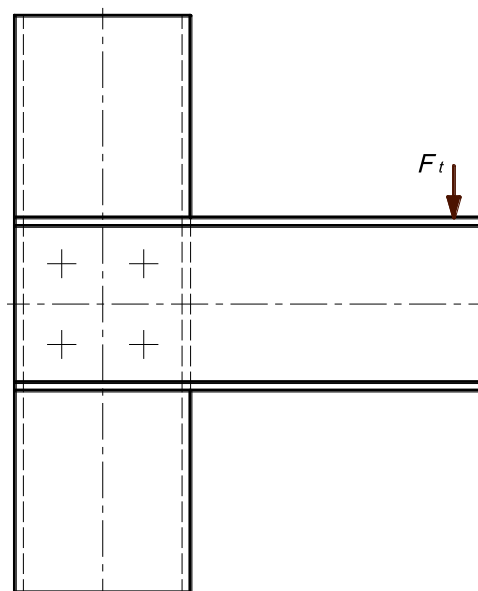
- połączenia proste (jednocięte i wielocięte),
- połączenia złożone (belkowo-słupowe).

W pracy podjęto temat modelowania zakładkowych połączeń śrubowych z wykorzystaniem systemu MES Midas NFX 2014. Celem pracy jest ocena przydatności wbudowanego w tym systemie uproszczonego modelu

śruby do analizy stanu naprężenia tego typu połączeń. Wyniki obliczeń porównano z wynikami obliczeń według norm [1, 2].

### 2. Opis badanego połączenia zakładkowego

Przedmiotem badań jest złożone połączenie zakładkowe pokazane na rys. 1, które zostało zaprojektowane jako połączenie cierne kategorii B. Utworzono je z belki wspornikowej mocowanej do słupa za pomocą 4 śrub M20 w klasie własności mechanicznych 10.9. Elementy łączone wykonano ze stalowych ceowników 300E. Układ obciążono zewnętrzną siłą  $F_t = 48$  kN. Obliczenia wykonano dla połączenia nienapiętego wstępnie oraz dla połączenia napiętego wstępnie siłą  $F_m = 171,5$  kN wyznaczoną z wzoru (1).



Rys. 1. Połączenie zakładkowe belki ze słupem

Łączniki zamodelowano jako hybrydowe elementy zbudowane z:

- odkształcalnego trzpienia w postaci belki,
- nieodkształcalnego łba śruby i nieodkształcalnej nakrętki.

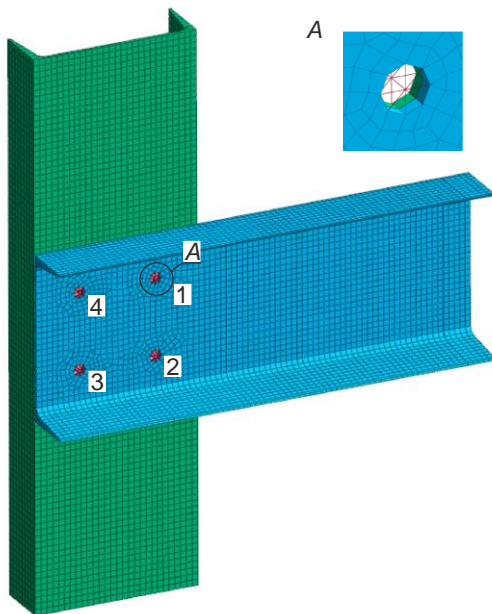
Do modelowania strefy styku między belką wspornikową a słupem zastosowano standardowe elementy kontaktowe dostępne w systemie Midas NFX 2014. Parametry elementów kontaktowych zebrano w tab. 1. W zestawieniu przyjęto następujące oznaczenia:

- współczynnik sztywności kontaktowej normalnej –  $k_n$ ,
- współczynnik sztywności kontaktowej stycznej –  $k_t$ ,
- współczynnik tarcia statycznego –  $\mu$ .

Model MES połączenia pokazano na rys. 2.

Tabela 1. Parametry elementów kontaktowych

Parametr	Wartość
$k_n$	1,0
$k_t$	0,1
$\mu$	0,4



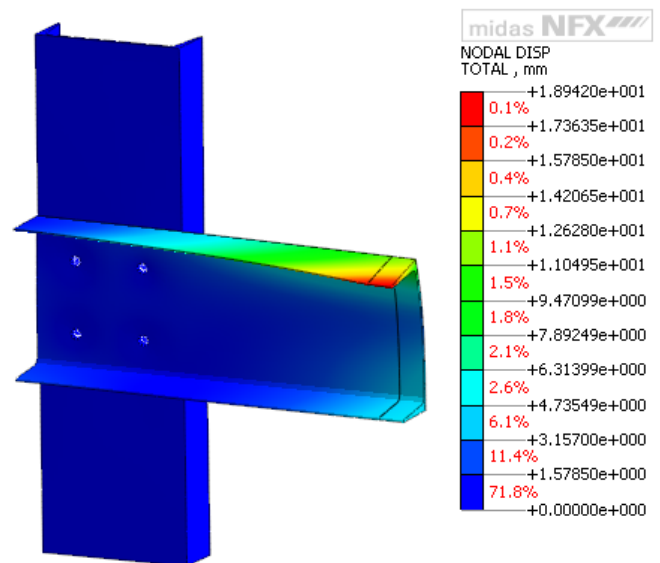
Rys. 2. Model MES połączenia zakładkowego belki ze słupem

### 3. Wyniki obliczeń

Dla analizowanego układu najbardziej wyťažonymi łącznikami są łączniki oznaczone numerami 1 i 2 (rys. 2). W dalszej części pracy rozpatrzony zostanie tylko łącznik nr 1. Maksymalna wartość siły roboczej w śrubie nr 1 wyznaczona na podstawie wzorów podanych w normie [2] wynosi 81,6 kN [4]. Taka wartość siły spełnia warunek nośności śruby na docisk [2]. Wartość tej siły według modelu MES jest równa 68,9 kN. Jest więc niższa o niecałe 16% w stosunku do wartości dla modelu teoretycznego. Różnicę w wartościach siły należy tłumaczyć tym, że w obliczeniach teoretycznych przyjęto, że połączenie zakładkowe jest połączeniem „sztywnym”, natomiast w obliczeniach MES uwzględniono podatność między elementami łączonymi. Zwiększając sztywność połączenia kontaktowego w modelu MES poprzez zmianę współczynników sztywności  $k_n$  do wartości 1,45 oraz  $k_t$  do wartości 0,145 otrzymuje się siłę w śrubie nr 1 równą 81,9 kN.

Wykonując obliczenia w systemie MES można między innymi uzyskać mapy naprężeń i odkształceń dla danego układu. Na rys. 3 przedstawiono przykładowy rozkład wartości przemieszczeń wypadkowych w modelu MES

badanego połączenia napiętego wstępnie i obciążonego zewnętrznie.



Rys. 3. Wartości przemieszczeń wypadkowych w modelu MES połączenia zakładkowego belki ze słupem napiętego wstępnie i obciążonego zewnętrznie

### 4. Podsumowanie

Analizując wyniki prac wysunięto następujące wnioski:

- 1) W przypadku, gdy badania MES zakładkowych połączeń śrubowych są prowadzone pod kątem zbadania wybranych wielkości – np. w celu wyznaczenia sił działających na śruby i łączone elementy – proponuje się stosować uproszczone modele śrub i połączeń. W ten sposób znacznie zwiększa się efektywność modelowania i skraca czas obliczeń numerycznych.
- 2) Zastosowanie wzorów teoretycznych (normatywnych) na siły robocze w śrubach może prowadzić do uzyskania wyników niezgodnych z rzeczywistością.

### Literatura

- [1] PN-EN 1993-1-1: Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, 2006.
- [2] PN-EN 1993-1-8: Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych, Część 1-8: Projektowanie węzłów, 2006.
- [3] Biegus A., Obliczanie nośności śrub według PN-EN 1993-1-8, Inżynieria i Budownictwo, Vol. 64, Nr 3, s. 113–118, 2008.
- [4] Kozłowski A., Pisarek Z., Wierzbicki S., Projektowanie zakładkowych połączeń śrubowych według PN-EN 1993-1-1 i PN-EN 1993-1-8, Inżynieria i Budownictwo, Vol. 64, Nr 9, s. 496–500, 2008.
- [5] Alibrahemy M., Durif S., Bressolette P., Bouchaïr A. Finite element analysis of cover plate joint under ultimate loading, Procedia Engineering, Vol. 156, pp. 16–23, 2016.
- [6] Ju S.-H., Fan C.-Y., Wu G. H., Three-dimensional finite elements of steel bolted connections, Engineering Structures, Vol. 26, No. 3, pp. 403–413, 2004.
- [7] Salih E. L., Gardner L., Nethercot D. A., Numerical study of stainless steel gusset plate connections, Engineering Structures, Vol. 49, pp. 448–464, 2013.
- [8] Grzejda R., FE-modelling of bolts in bolted joints for the assembly condition, XIII Konferencja Naukowo-Techniczna Techniki Komputerowe w Inżynierii, Licheń Stary 2014.
- [9] Grzejda R., Numeryczne badanie wpływu obciążenia zewnętrznego na siły w śrubach w połączeniu wielośrubowym, Mechanik, Vol. 88, Nr 12, s. 964–966, 2015.
- [10] Može P., Beg D., A complete study of bearing stress in single bolt connections, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 95, pp. 126–140, 2014.