

Numeryczne badanie wpływu obciążenia zewnętrznego na siły w śrubach w połączeniu wielośrubowym

Numerical investigation on the effect of externally exerted loads on particular bolts forces in the multi-bolted flange joint

RAFAŁ GRZEJDA*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.609

Przedstawiono modelowanie i obliczenia połączenia wielośrubowego charakteryzującego się niesymetrycznym rozmieszczeniem śrub. Zaprezentowano fragment badań dotyczących rozwoju metod modelowania tego typu połączeń. Zbadano wpływ sposobu modelowania pojedynczego złącza śrubowego na siły robocze w śrubach podczas zewnętrznego obciążenia połączenia wielośrubowego. Przedstawiono analizę obciążenia połączenia wielośrubowego na przykładzie wybranego modelu utworzonego w konwencji metody elementów skończonych (MES).

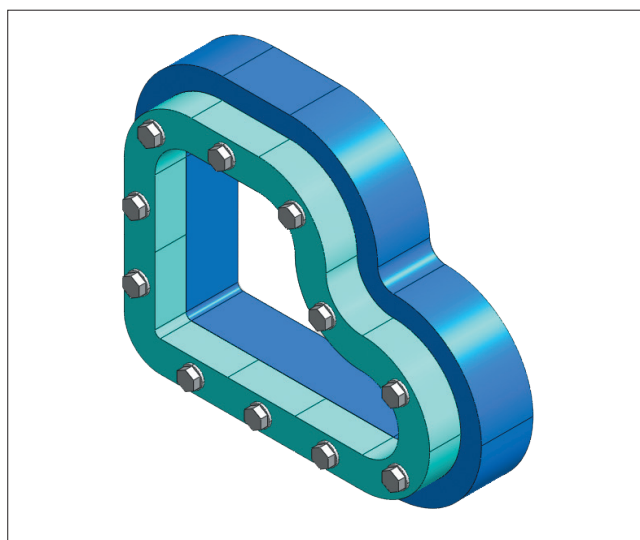
SŁOWA KLUCZOWE: połączenie wielośrubowe, modelowanie MES, napięcie wstępne, analiza obciążenia

The paper deals with modelling and calculations of a multi-bolted joint noted for irregular arrangement of bolts. A fraction of research work on development of the methods of modelling these type of joints is presented. The effect of the method selected to model a single bolted joint on actual forces in the bolts during external loading of the multi-bolted flanged joint is examined. Analysis of the load charged on multi-bolted flange joint for a selected model created by means of the finite element method (FEM) is performed.
KEYWORDS: multi-bolted joint, FE-modelling, preload, load analysis

W przypadku łączenia pary elementów konstrukcji bardzo często wykorzystuje się połączenia wielośrubowe. Są one typowe dla struktur, w których przed rozpoczęciem ich eksploatacji wprowadza się napięcie wstępne śrub [3, 6, 17, 31]. Siły w śrubach są przykładane według przyjętej kolejności napinania [9, 12, 16] oraz założonego sposobu napinania [1, 32]. W związku z tym na koniec procesu napinania połączenia siły w poszczególnych śrubach nie są równe. Siły te zmieniają się również pod wpływem obciążeń zewnętrznych działających na połączenie podczas jego eksploatacji. Wykazano to na przykładzie połączeń jednośrubowych [4, 14, 26, 28, 37] oraz prostych typowych połączeń wielośrubowych [7, 19, 23, 25]. Aby rozszerzyć i uogólnić tę tematykę, potrzebne jest prowadzenie podobnych analiz i badań dla dowolnych połączeń wielośrubowych.

Obecnie najwygodniejszą metodą stosowaną w różnorodnych analizach złożonych konstrukcji jest metoda elementów skończonych [2]. Modelowanie systemu mechanicznego z użyciem tej metody wymaga znalezienia kompromisu między przyjętym poziomem uproszczeń a wymaganą dokładnością prowadzonych obliczeń. Dotyczy to zwłaszcza modelowania systemów złożonych z wielu kontaktujących się ze sobą elementów. Przykładem takiego systemu jest połączenie wielośrubowe (rys. 1).

We wcześniejszych pracach [9, 10] przedstawiono modelowanie i wyniki teoretycznych analiz obciążenia wybranych niesymetrycznych połączeń wielośrubowych, w których element kołnierzowy jest mocowany do nieodkształcalnej ostoi za pomocą zbioru śrub. Główną zaletą przedstawionego sposobu modelowania jest potraktowanie połączenia wielośrubowego jako układu złożonego z trzech podukładów:



Rys. 1. Przykład kołnierzowego połączenia wielośrubowego

- zbioru śrub,
- kołnierzowego elementu łączonego,
- warstwy stykowej znajdującej się pomiędzy elementem łączonym a ostoją.

Dzięki takiemu podejściu każdy podukład może być modelowany i rozwijany oddzielnie.

W niniejszej pracy przedstawiono kontynuację badań nad opisanym modelem, a jej celem jest rozwój modelowania podukładu śrub jako części układu wielośrubowego. Rozważania ograniczono do badania wpływu uproszczeń w modelu pojedynczego złącza śrubowego [11] na siły w śrubach w połączeniu obciążonym zewnętrzną siłą eksploatacyjną. Wszystkie analizy przeprowadzono w programie Midas NFX 2014 [20] służącym do obliczania układów liniowych i nieliniowych, obciążonych siłami statycznymi lub dynamicznymi.

Podstawy analizy

Jednym z ważnych zagadnień w przypadku połączenia śrubowego jest analiza obciążenia śrub tworzących to połączenie. Biorąc pod uwagę zależności wynikające z wykresu przeciwsobnego połączenia śrubowego, wartość obciążenia roboczego w śrubach F_s można wyznaczyć ze wzoru [13]:

$$F_s = F_m + F_e \cdot \frac{e_p}{e_p + e_s} \quad (1)$$

gdzie: F_m – napięcie wstępne, F_e – obciążenie zewnętrzne, e_s – podatność śruby, e_p – podatność kołnierza.

Gdy śruby potraktuje się jako elementy liniowe, ich podatność można wyznaczyć w prosty sposób, np. podany w normie VDI 2230 [8]. Z kolei podatność elementów łączonych coraz częściej wyznacza się za pomocą MES, przy czym na ogół stosuje się następujące modele:

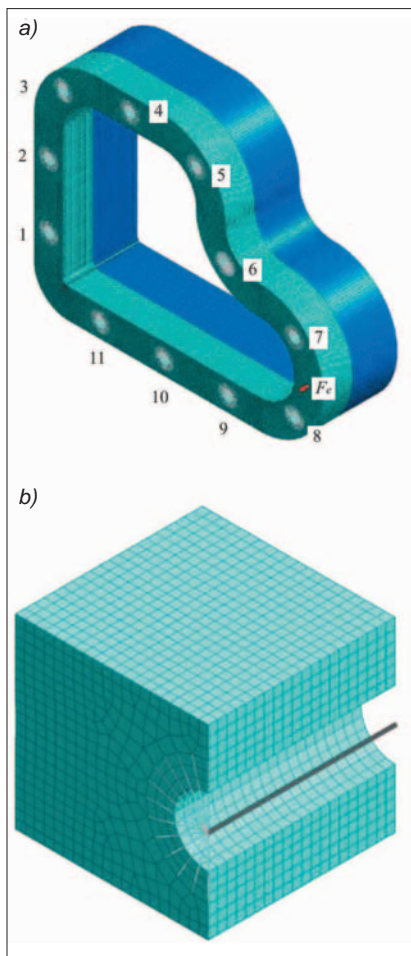
* Dr inż. Rafał Grzejda (rafal.grzejda@zut.edu.pl) – Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie

- bez udziału śruby, z oddziaływaniem siłowym napiecia wstępnego [5, 35],
- płaskie [33, 34],
- ze śrubą modelowaną za pomocą elementu typu GAP [18],
- ze śrubą, w której trzpień śruby modeluje się jako element belkowy, natomiast jej łeb – jako element odkształcalny lub sztywny [15, 21, 22],
- przestrzenne [24, 27, 36].

Aby ocenić przydatność modeli śrub opisywanych w literaturze do modelowania zbioru śrub w połączeniu wielośrubowym, wykonano obliczenia dla modelu, w którym trzpień śruby modeluje się jako element belkowy, a łeb śruby – za pomocą sztywnych elementów skończonych.

Model obliczeniowy

Przedmiotem badań było połączenie wielośrubowe przedstawione na rys. 1. Założono, że analizowany układ stanowi kołnierz o grubości $h = 30$ mm, mocowany do nieodkształcalnej ostoi za pomocą 11 śrub M10 ($j = 11$). Przyjęto, że kołnierz jest ze stali o module Younga $E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa, a ostoja – z materiału o module Younga $E = 2,1 \cdot 10^8$ MPa, a więc można ją uznać za bryłę sztywną. Strefę styku między kołnierzem a ostoją zamodelowano za pomocą standardowych elementów kontaktowych łączących powierzchnię do powierzchni (typu *general contact* [20]). Wartość napiecia wstępnego $F_m = 17,2$ kN określono według normy PN-EN 1591-1 [29], a pole powierzchni oddziaływania napiecia wstępnego $A_m = 69,75\pi$ mm² – według normy PN-EN ISO 7091 [30]. Napięte wstępnie połączenie obciążono siłą F_e przyłożoną w połowie łuku między śrubami o numerach 7 i 8 (rys. 2a), zmieniającą się skokowo od 10 do 100 kN. Model śruby pokazano na rys. 2b. Jak widać, trzpień śruby zastąpiono stalową belką połączoną z elementami typu *rigid body* [20], modelującymi łeb śruby.



◀ Rys. 2. Obliczeniowy model połączenia wielośrubowego: a) model MES połączenia, w tym przyjęta numeracja śrub, b) model śruby

Analiza sił roboczych w śrubach

Ze wzorów podanych w normie VDI 2230 [8] obliczono podatność śruby e_s jako sumę podatności poszczególnych fragmentów tej śruby $e_{s,i}$:

$$e_s = \sum_i e_{s,i} \quad (2)$$

Podatność kołnierza $e_{p,j}$ określono natomiast na podstawie zależności [11]:

$$e_{p,j} = \frac{\delta_{\Sigma,j}}{F_m} \quad (3)$$

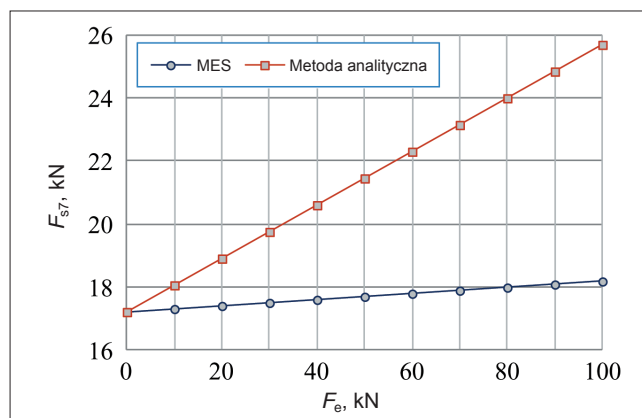
gdzie: $\delta_{\Sigma,j}$ – średnie przemieszczenie węzłów znajdujących się w polu A_m na kierunku działania siły F_m .

Wartości podatności śruby oraz wydzielonych części kołnierza dla poszczególnych połączeń jednośrubowych, określone na podstawie obliczeń MES, zestawiono w tabl. I. Po ich podstawieniu do wzoru (1) można obliczyć siły robocze w śrubach. Wartości tych sił F_m , wyznaczone analitycznie dla $F_e = 100$ kN oraz analogiczne wartości wyznaczone bezpośrednio z modelu MES podano w tabl. II.

Na rys. 3 pokazano przykładowe przebiegi zmian wartości siły roboczej w śrubie o numerze 7, pod wpływem obciążenia zewnętrznego F_e , otrzymane dwiema różnymi metodami.

Z porównania odpowiednich wartości zestawionych w tabl. II oraz pokazanych na rys. 3 wynika, że siły robocze w śrubach wyznaczone według wzoru (1) mogą być zawyżone nawet o 50% w stosunku do wartości wyznaczonych w modelu MES.

W pracy [10] wykazano, że największe przyrosty wartości sił roboczych w stosunku do wartości ich napiecia wstępnego występują w śrubach znajdujących się najbliżej miejsca przyłożenia obciążenia zewnętrznego. Potwierdziły to wyniki otrzymane dla analizowanego modelu MES – największe wartości sił roboczych uzyskano dla śrub o numerach 7 i 8. Nie znajduje to natomiast potwierdzenia w wynikach analitycznych. Jest to związane z nieregularnym i niesymetrycznym kształtem kołnierza oraz przyjętym sposobem wyznaczania jego podatności. W modelu MES – po jego



Rys. 3. Przebiegi wartości sił w śrubie nr 7 pod wpływem siły F_e

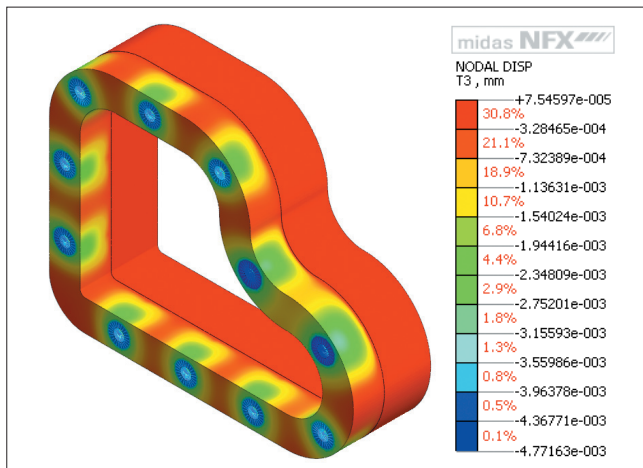
TABLICA I. Wartości podatności elementów połączenia wielośrubowego, mm/MN

e_s	$e_{p,1}$	$e_{p,2}$	$e_{p,3}$	$e_{p,4}$	$e_{p,5}$	$e_{p,6}$	$e_{p,7}$	$e_{p,8}$	$e_{p,9}$	$e_{p,10}$	$e_{p,11}$
2,91	0,236	0,233	0,230	0,235	0,230	0,270	0,270	0,231	0,233	0,232	0,233

TABLICA II. Wartości sił roboczych w śrubach w połączeniu obciążonym siłą $F_e = 100$ kN wyznaczone: ze wzoru (1) – F_s , metodą elementów skończonych – F_{sMES}

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
F_s , kN	24,70	24,62	24,53	24,66	24,53	25,69	25,70	24,55	24,62	24,58	24,62
F_{sMES} , kN	17,20	17,20	17,20	17,20	17,20	17,18	18,17	17,76	17,19	17,20	17,20

napięciu wstępnym – największe przemieszczenia otrzymano dla połączeń jednośrubowych związanych ze śrubami o numerach 6 i 7 (rys. 4), również wartości sił roboczych wyznaczone ze wzoru (1) osiągają największe wartości w tych połączeniach.



Rys. 4. Wartości przemieszczeń w modelu MES napiętego połączenia wielośrubowego na kierunku normalnym do powierzchni styku łączonych elementów

Podsumowanie

W przypadku gdy badania MES połączeń wielośrubowych są prowadzone pod kątem zbadania wybranych, ściśle określonych wielkości – np. w celu wyznaczenia sztywności złącza albo sił działających na śrubę i łączone elementy – proponuje się stosować uproszczone modele śrub i połączeń wielośrubowych. W ten sposób znacznie zwiększa się efektywność modelowania i wyraźnie skraca czas obliczeń. Zastosowanie tradycyjnych wzorów (analitycznych) na siły robocze w śrubach może prowadzić do uzyskania wyników niezgodnych z rzeczywistością. Wzorów tych nie powinno się stosować zwłaszcza w przypadku niesymetrycznych połączeń wielośrubowych.

LITERATURA

- Abid M., Khan Y.M. "The effect of bolt tightening methods and sequence on the performance of gasketed bolted flange joint assembly". *Structural Engineering and Mechanics*. Vol. 46, No. 6 (2013): pp. 843+852.
- Adams V., Askenazi A. "Building better products with Finite Element Analysis". Santa Fe: OnWord Press, 1999.
- Bai R., Chan S.-L., Hao J.-P. "Improved design of extended end-plate connection allowing for prying effects". *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 113 (2015): pp. 13+27.
- Bois C. et al. "An analytical model for the strength prediction of hybrid (bolted/bonded) composite joints". *Composite Structures*. Vol. 97 (2013): pp. 252+260.
- Caliskan M. "Evaluation of bonded and bolted repair techniques with finite element method". *Materials & Design*. Vol. 27, No. 10 (2006): pp. 811+820.
- Crocchio D., De Agostinis M., Vincenzi N. "Failure analysis of bolted joints: Effect of friction coefficients in torque-preloading relationship". *Engineering Failure Analysis*. Vol. 18, No. 1 (2011): pp. 364+373.
- Ekh J., Schön J. "Load transfer in multirow, single shear, composite-to-aluminium lap joints". *Composites Science and Technology*. Vol. 66, No. 7-8 (2006): pp. 875+885.
- Grudziński P. "Determination of joint diagrams for a foundation bolted joint with the bolt anchored in a polymer plastic. Part 1: Joint diagram for the assembly state". *Archives of Mechanical Technology and Automation*. Vol. 32, No. 3 (2012): pp. 35+47.
- Grzejda R. "Determination of bolt forces for the assembly condition of a bolted flange connection". *Archives of Mechanical Technology and Automation*. Vol. 33, No. 2 (2013): pp. 3+12.
- Grzejda R. "Determination of bolt forces for the operational state of a bolted flange connection". *Advances in Manufacturing Science and Technology*. Vol. 37, No. 3 (2013): pp. 73+83.
- Grzejda R. "Modelowanie MES śrub w połączeniach śrubowych na etapie napinania wstępnego". *Mechanik*. R. 87, nr 8-9 (2014): s. 672+675.
- He Z., Wang Q. "The study of bolt up sequence influence of the bolted assembly structure contact stiffness". *Proc. of the 2015 International Conference on Intelligent Systems Research and Mechatronics Engineering*. Atlantis Press, Zhengzhou, China, 2015: pp. 1627+1630.
- Juvinall R.C., Marshek K.M. "Fundamentals of machine component design". Hoboken: John Wiley & Sons, 2006.
- Kelly G. "Load transfer in hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints". *Composite Structures*. Vol. 69, No. 1 (2005): pp. 35+43.
- Kim J., Yoon J.-C., Kang B.-S. "Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints". *Applied Mathematical Modelling*. Vol. 31, No. 5 (2007): pp. 895+911.
- Kumakura S., Saito K. "Tightening sequence for bolted flange joint assembly". *Analysis of bolted joints, Proc. of the 2003 ASME Pressure Vessels and Piping Conference*. ASME, Cleveland, USA, 2003: pp. 9+16.
- Latour M., Piluso V., Rizzano G. "Experimental analysis of innovative dissipative bolted double split tee beam-to-column connections". *Steel Construction*. Vol. 4, No. 2 (2011): pp. 53+64.
- Matachowski F. "Projektowanie śrubowych połączeń kołnierzowych w świetle normy Eurocode 3". *Mechanik*. R. 81, nr 2 (2008): s. 119+121.
- Mathan G., Siva Prasad N. "Studies on gasketed flange joints under bending with anisotropic Hill plasticity model for gasket". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Vol. 88, No. 11-12 (2011): pp. 495+500.
- Midas NFX Analysis Manual, 2014.
- Montgomery J. "Methods for modeling bolts in the bolted joint". *Proc. of the ANSYS 2002 User's Conference*. Pittsburgh, USA, 2002.
- Montgomery J. "Modeling multi-bolted systems". *Proc. of the ANSYS 2006 User's Conference*. Pittsburgh, USA, 2006.
- Murali Krishna M., Shunmugam M.S., Siva Prasad N. "A study on the sealing performance of bolted flange joints with gaskets using finite element analysis". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Vol. 84, No. 6 (2007): pp. 349+357.
- Nagata S. et al. "Finite element stress analysis for leak tests of pipe flange connections subject to internal pressure and bending moment". *Computer technology and bolted joints, Proc. of the ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Division Conference*. ASME, Baltimore, USA, 2011.
- Nagata S., Matsumoto M., Sawa T. "Bolt load changes due to internal pressure in gasketed flange connections". *Analysis of bolted joints, Proc. of the 2003 ASME Pressure Vessels and Piping Conference*. ASME, Cleveland, USA, 2003: pp. 47+52.
- Nechache A., Bouzid A.-H. "Creep analysis of bolted flange joints". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Vol. 84, No. 3 (2007): pp. 185+194.
- Olmedo Á., Santiuste C. "On the prediction of bolted single-lap composite joints". *Composite Structures*. Vol. 94, No. 6 (2012): pp. 2110+2117.
- Oskouei R.H., Chakherlou T.N. "Reduction in clamping force due to applied longitudinal load to aerospace structural bolted plates". *Aerospace Science and Technology*. Vol. 13, No. 6 (2009): pp. 325+330.
- PN-EN 1591-1: 2014-04. Kołnierze i ich połączenia. Zasady projektowania połączeń kołnierzowych okrągłych z uszczelką. Część 1: Obliczanie.
- PN-EN ISO 7091: 2003. Podkładki okrągłe. Szereg normalny. Klasa dokładności C.
- Piaseczny L. "A simplification of machinery seating on an example of marine diesel engines". *TEKA Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Vol. 6 (2006): pp. 109+116.
- Takaki T., Fukuoka T. "Methodical guideline for bolt-up operation of pipe flange connections (A case using sheet gasket and spiral wound gasket)". *Analysis of bolted joints, Proc. of the 2003 ASME Pressure Vessels and Piping Conference*. ASME, Cleveland, USA, 2003: pp. 23+30.
- Tenma K. et al. "Evaluation of sealing performance and FEM calculations in bolted flange connections with ring joint gasket subjected to internal pressure". *Computer technology and bolted joints, Proc. of the ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Division Conference*. ASME, Baltimore, USA, 2011.
- Terada S., Nishihara T., Suzuki T. "Comparison on mechanical behavior of bolted flanges per old and new Section VIII Division 2". *Computer technology and bolted joints, Proc. of the ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Division Conference*. ASME, Baltimore, USA, 2011.
- Tirovic M., Voller G.P. "Interface pressure distributions and thermal contact resistance of a bolted joint". *Proceedings The Royal Society A - Mathematical, Physical & Engineering Sciences*. Vol. 461, Iss. 2060 (2005): pp. 2339+2354.
- Wang Y.Q., Zong L., Shi Y.J. "Bending behavior and design model of bolted flange-plate connection". *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 84 (2013): pp. 1+16.
- Williams J.G. et al. "Analysis of externally loaded bolted joints: Analytical, computational and experimental study". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Vol. 86, No. 7 (2009): pp. 420+427. ■