

Bogdan STANKIEWICZ¹

OCENA WPŁYWU SIŁY PODŁUŻNEJ W SŁUPIE NA CHARAKTERYSTYKĘ WĘZŁA RYGIEL-SŁUP NA PODSTAWIE SYMULACJI MES

Dokładność obliczeń sił wewnętrznych w prętowych układach ramowych można zwiększyć uwzględniając rzeczywistą sztywność węzłów i połączeń. W obliczeniach tradycyjnych wykonywanych bez stosowania metod komputerowych uwzględniano jedynie wartości skrajne sztywności węzłów ram: albo pełna sztywność, albo sztywność zerowa. Ta prostota i niewielka dokładność harmonizowała z możliwymi do stosowania dawniej metodami obliczeń ram. Aktualnie powszechnie stosowane programy komputerowe do obliczeń statycznych układów prętowych umożliwiają dokładniejsze uwzględnienie sztywności węzłów. Jednak warunkiem koniecznym aby takie obliczenia były rzeczywiście dokładniejsze jest znajomość charakterystyk węzłów ram. Charakterystyki te można wyznaczyć drogą obliczeniową stosując procedury normowe, lub wykonując analizę komputerową węzłów z wykorzystaniem modeli MES. Obie metody są niestety pracochłonne. Zaletą metod wykorzystujących MES jest możliwość dokładniejszego uwzględnienia wpływu czynników branych pod uwagę w tradycyjnych procedurach normowych, jak również możliwość uwzględnienia wpływu czynników pominiętych w procedurach normowych. W artykule przedstawiono analizę jednego z typów połączeń śrubowych belek ze słupami. Celem analizy było uzyskanie krzywych moment zginający – kąt obrotu. Model węzła którego częścią jest przedmiotowe połączenie utworzono wykorzystując program metody elementów skończonych ADINA. Program ADINA umożliwia uwzględnienie nieliniowości materiałowych i geometrycznych oraz modelowanie stref kontaktowych. Model utworzono w sposób umożliwiający łatwą zmianę parametrów geometrycznych i materiałowych charakteryzujących połączenie. Wykonano przykładową analizę węzła składającego się z fragmentów słupa ramy (HEB 200), belki (IPE 240) i ich śrubowego połączenia doczołowego. W połączeniu zastosowano 4 śruby M20 klasy 10.9 bez wstępnego sprężenia. Zamieszczono podstawowe wyniki obliczeń pokazujące wpływ siły osiowej w słupie na nośność i sztywność połączenia.

Słowa kluczowe: konstrukcje stalowe, połączenia śrubowe, połączenia doczołowe, metoda elementów skończonych

¹ Bogdan Stankiewicz, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, tel.: 17 865 16 32, bstank@prz.edu.pl

1. Wstęp

Na nośność i sztywność śrubowych połączeń doczołowych wpływa wiele czynników. Nie wszystkie z nich zostały uwzględnione w procedurach normowych [3]. W tabeli 1 zestawiono najważniejsze spośród tych czynników i podano informację czy uwzględniono je w przedstawionej poniżej analizie MES. Analizę prowadzono pod kątem sprawdzenia jaki jest wpływ sił osiowych w słupach układów ramowych z takimi połączeniami na parametry węzła.

Tabela 1. Zestawienie czynników nie uwzględnionych w procedurach normowych, a uwzględnionych w przedstawianej analizie MES

Table 1. Summary of factors not included in the code procedures, and included in the presented FEM analysis

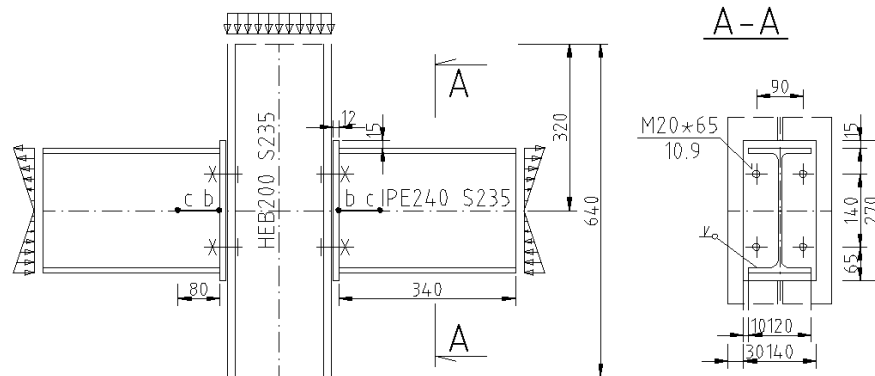
Czynnik	Czy uwzględniono w procedurach proponowanych w normie [8]	Czy uwzględniono w modelu MES
Wymiary geometryczne śrub (w tym średnica, długości trzpienia i części gwintowanej)	częściowo	TAK
Wartość sprężenia wstępnego śrub	NIE	TAK, możliwość nie użyta w prezentowanej analizie
Wielkość otworów na śruby	NIE	TAK
Zastosowanie podkładek tak/nie	NIE	TAK
Wartość momentu zginającego w słupie	NIE	częściowo
Wartość naprężeń normalnych w pasach dwuteownika wywołanych przez siłę osiową w słupie	NIE	TAK

2. Analizowany węzeł i model MES

Rozpatrywany węzeł przedstawiono na rysunku 1. Jest to fragment słupa pośredniego ramy wykonanego z dwuteownika HEB 200 i fragmentów symetrycznie rozmieszczonych belek wykonanych z dwuteownika IPE 240. Połączenie belki ze słupem to śrubowe połączenie z wpuszczoną blachą czołową. Grubość blachy czołowej wynosi 12mm, w każdym połączeniu znajdują się po 4 śruby M20 klasy 10.9. Śruby nie są sprężane. Elementy składowe są wykonane ze stali S235.

Dokładność analizy przy użyciu modelu węzła składającego się z kilku części jest zależna od dokładności z jaką stworzone zostały modele części składowych, i dokładności procedury łączenia ich w model węzła.

Procedura łączenia to uwzględnienie kontaktu pomiędzy częściami składowymi węzła w taki sposób, aby były przenoszone oddziaływania przy dociskaniu do siebie elementów, a w przypadku odsuwania pojawiała się szczelina. Modelo-



Rys. 1. Analizowany węzeł

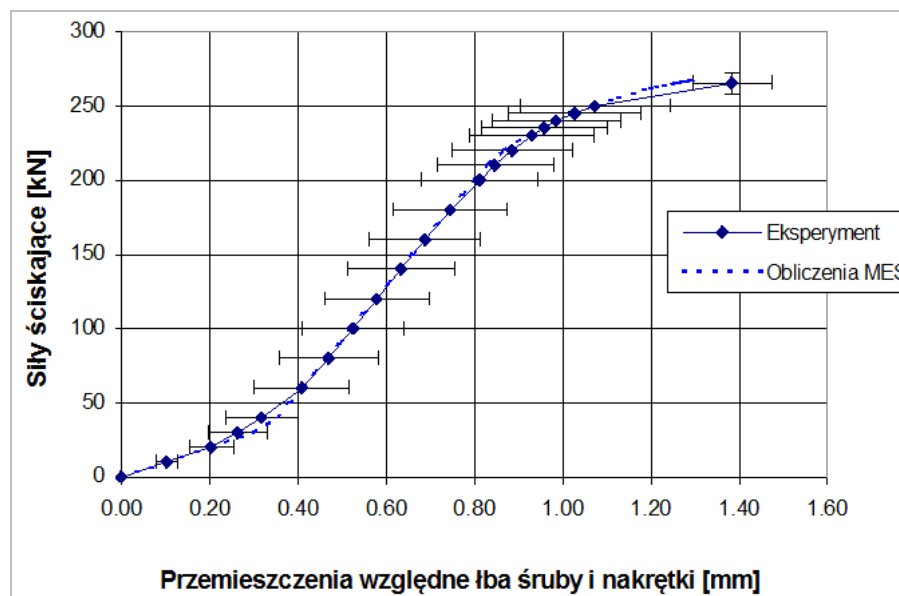
Fig. 1. Analysed joint

wanie elementów wykonanych z dwuteowników walcowanych, także zakończonych blachami czołowymi, nie sprawia problemów. Łączenie tych elementów w węzeł, modelując strefy kontaktowe, również jest rozwiązane od strony teoretycznej, choć często uzyskanie wyników utrudniają problemy numeryczne. Trudności pojawiają się przy modelowaniu śrub [5]. Proste modele śrub rozciąganych (nie uwzględniające wpływu stref kontaktu gwintu śruby z gwintem nakrętki) nie zapewniają zgodności obliczanych przemieszczeń względnych nakrętki i łba śruby z wynikami badań doświadczalnych. Niedokładność modelowania śrub obniża, czasami w bardzo istotny sposób, dokładność analizy. Ilościowy wpływ tych niedokładności jest trudny do prostego oszacowania, gdyż wpływa na to wiele czynników. Na pewno wpływ ten jest bardzo istotny gdy w węźle występują śruby nie sprężane, a dominującą formą zniszczenia jest zniszczenie śrub. Dlatego też model śruby musi zapewnić zgodność z wynikami badań śrub poddawanych obciążeniom osiowym. Tak więc podstawowa trudność stworzenia modelu dokładniejszego polega na konieczności uwzględnienia odkształceń plastycznych pojawiających się na styku gwintów śruby i nakrętki już przy niewielkim obciążeniu rozciągającym śrubę. Wynikają one z niedokładności wykonania gwintów oraz z porowatości warstwy metalu zabezpieczającej śrubę przed korozją. Zjawisko to jest tak skomplikowane i mało poznane, że utworzenie modelu MES uwzględniającego dokładnie współpracę gwintów jest w chwili obecnej niemożliwe. Jest natomiast możliwe utworzenie i stosowanie w modelach połączeń uproszczonych modeli MES śrub. W obliczeniach prezentowanych w artykule zastosowano model śruby [6] [7], w którym obszar styku gwintów zastąpiono materiałem zastępczym o parametrach dobranych tak, aby uzyskać zgodność obliczeń śruby rozciąganej osiowo z wynikami badań doświadczalnych. Celem rutynowo prowadzonych badań śrub jest zwykle określenie ich wytrzymałości przy rozciąganiu, i nie prowadzi się pomiarów przemieszczeń względnych nakrętki i łba śruby. Dokładne pomiary tych przemieszczeń są bardzo trudne. Bardzo łatwe jest natomiast badanie śrub na ściskanie i uzyskanie krzywej siła-przemieszczenie względne nakrętki

i łba. Tak uzyskaną krzywą można wykorzystać do dobrania parametrów materiału zastępczego pod kątem uzyskania zgodności krzywej doświadczalnej z symulacją MES. Ponieważ sposób przenoszenia obciążeń przez gwint śruby i nakrętki jest identyczny przy ściskaniu jak i przy rozciąganiu śruby, to utworzony model jest uniwersalny. Można go stosować również w śrubach rozciąganych. Takie badania eksperymentalne przeprowadzono dla śrub M20 klasy 10.9 produkcji firmy Friedberg. Dokładne sprawozdanie z tych badań wraz ze szczegółowym opisem tworzenia modelu śruby będzie przedstawione w monografii przygotowywanej przez autora. Charakterystyki materiału zastępującego obszar gwintu śruby i nakrętki dobrano tak, aby uzyskać zgodność przemieszczeń względnych łba śruby i nakrętki. Na rysunku 2 pokazano wyniki badań eksperymentalnych śrub na ściskanie i wyniki obliczeń ściskanego modelu MES śruby. Wyniki badań eksperymentalnych to rezultaty pomiarów przemieszczeń obciążanej nakrętki w zależności od przyłożonej siły, przedstawiono wartości średnie przemieszczeń i wielkości przedziałów ufności przy poziomie istotności $\alpha=0,1$.

Dokładniejsze informacje dotyczące modeli materiałowych podano w [7]. Ze względu na symetrię węzła i sposób przyłożenia obciążenia wystarczyło modelować 1/4 węzła.

Model komputerowy [1], [2], [4] opracowano wykorzystując program ADINA (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis, USA, www.adina.com). Użyto elementy bryłowe o 20 węzłach. Obciążenie momentem zginającym uzyskano przykładając ciągłe obciążenie powierzchniowe o wartości liniowo zmiennej w zależności od odległości od osi obojętnej belki, patrz rysunek 1.



Rys. 2. Śruba ściskana, wyniki badań eksperymentalnych i rezultaty obliczeń MES

Fig. 2. Bolt subjected to compression, results of experimental tests and results of FEM calculations

Użyte modele materiałowe:

- belki i blachy czołowe, model dwuliniowy idealnie sprężysto-plastyczny:
 - granica plastyczności:* $f_y = 23,5 \text{ kN/cm}^2$
 - moduł sprężystości podłużnej:* $E = 21000 \text{ kN/cm}^2$
 - wydłużenie przy zniszczeniu:* $\varepsilon = 15 \%$
- śruba, nakrętka, podkładki, materiał podstawowy, wieloliniowy materiał sprężysto-plastyczny:
 - moduł sprężystości podłużnej:* $E = 21000 \text{ kN/cm}^2$
 - punkty charakterystyczne:*

$\varepsilon_0 = 0$	$\sigma_0 = 0$
$\varepsilon_1 = 0,004285$	$\sigma_1 = 90 \text{ kN/cm}^2$
$\varepsilon_2 = 0,015$	$\sigma_2 = 100 \text{ kN/cm}^2$
$\varepsilon_3 = 0,040$	$\sigma_3 = 100 \text{ kN/cm}^2$
- śruba, materiał zastępujący obszar gwintu śruby i nakrętki, wieloliniowy materiał sprężysto-plastyczny:
 - moduł sprężystości podłużnej:* $E = 343,82 \text{ kN/cm}^2$
 - punkty charakterystyczne:*

$\varepsilon_0 = 0$	$\sigma_0 = 0$
$\varepsilon_1 = 0,1480985$	$\sigma_1 = 6,490 \text{ kN/cm}^2$
$\varepsilon_2 = 0,3230142$	$\sigma_2 = 45,330 \text{ kN/cm}^2$
$\varepsilon_3 = 0,4636624$	$\sigma_3 = 56,369 \text{ kN/cm}^2$
$\varepsilon_4 = 2,0000000$	$\sigma_4 = 56,369 \text{ kN/cm}^2$

3. Wyniki obliczeń

Obliczenia wykonano dla różnych wartości siły osiowej w słupie. Wzięto pod uwagę przedział wartości od zera (brak siły osiowej) do siły osiowej wywołującej naprężenia wynoszące 80% granicy plastyczności stali S235, z krokiem 10%, i dodatkowo dla 85% granicy plastyczności stali S235. W analizowanym węźle do siły osiowej w słupie dającej naprężenia 70% granicy plastyczności nie stwierdzono istotnej zmiany nośności węzła ani jego sztywności. W tym zakresie o charakterystyce węzła decyduje głównie nośność blachy czołowej i nośność śrub. Przy większej sile osiowej istotne staje się wyężenie pasa dwuteownika słupa.

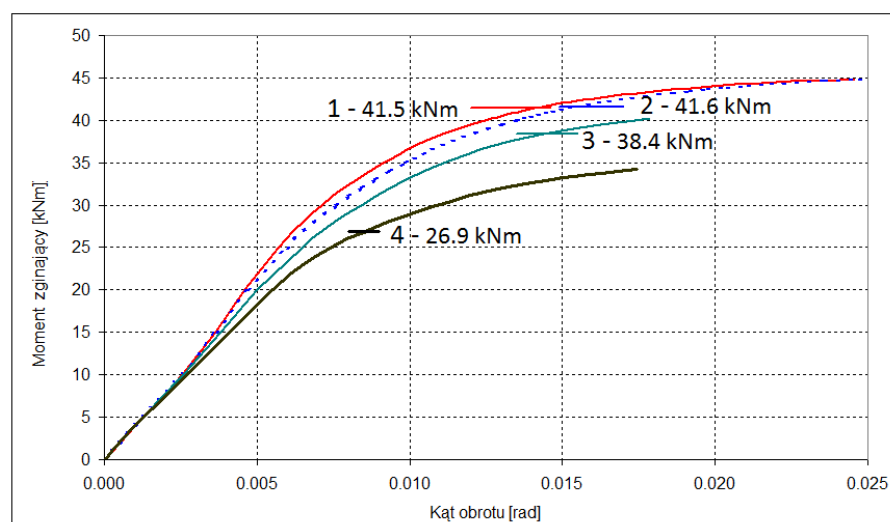
Najważniejsze wyniki analizy pokazano w tabeli 2 i na rysunku 4. Kąt obrotu podany w wynikach to bezwzględna wartość różnicy kąta obrotu osi słupa i kąta obrotu końca belki utożsamionego z obrotem odcinka b-c, rysunek 1, będącego fragmentem osi belki.

Końce wykresów odpowiadają osiągnięciu wartości 15% przez efektywną wartość zakumulowanych odkształceń plastycznych w którymkolwiek z elementów składowych węzła (belka, słup, blacha czołowa). Jako nośność obliczeniową przyjęto moment zginający w belce odpowiadający osiągnięciu wartości 5% przez efektywną wartość zakumulowanych odkształceń plastycznych w którymkolwiek z elementów składowych węzła.

Tabela 2. Najważniejsze wyniki analizy

Table 2. Main results

Wartość siły osiowej w słupie	Moment obliczeniowy z analizy MES [kNm]	Kąt obrotu odpowiadający momentowi obliczeniowemu [rad]
Brak siły osiowej	41,5	0,0141
Siła odpowiadająca naprężeniom $0,70f_y$	41,6	0,0155
Siła odpowiadająca naprężeniom $0,80f_y$	38,4	0,0128
Siła odpowiadająca naprężeniom $0,85f_y$	26,9	0,0086



Rys. 3. Krzywe moment – kąt obrotu, krzywa nr 1: brak siły osiowej w słupie, nr 2: siła osiowa w słupie $N = 0,70Af_y$, nr 3: $N = 0,80Af_y$, nr 4: $N = 0,85Af_y$

Fig. 3. Moment – rotation curves, curve 1: absence of axial force in the column, curve 2 for axial force $N = 0.70Af_y$, curve 3 for axial force $N = 0.80Af_y$, curve 4 for axial force $N = 0.85Af_y$

4. Podsumowanie i wnioski

Analiza przedstawionych wyników obliczeń pozwala na stwierdzenie, że wielkość obciążenia słupów ram siłami osiowymi może mieć istotny wpływ na nośność i sztywność węzłów z doczołowych połączenia śrubowymi. Wielkość siły osiowej w słupie ma wpływ pomijalnie mały gdy o nośności i sztywności połączenia decyduje nośność blachy czołowej lub nośność śrub. Jeżeli o charakterystyce węzła decyduje (lub przynajmniej ma istotny wpływ) wyteże-

nie pasa i środka dwuteownika słupa, to należy je uwzględnić przy projektowaniu śrubowych połączeń doczołowych w konstrukcjach ramowych. Przedstawiony w artykule model MES węzła jest modelem parametrycznym, w łatwy sposób można zmieniać jego charakterystyki. Dlatego też może on być wykorzystany bezpośrednio przy projektowaniu ram. Może również być pomocny przy ulepszaniu tradycyjnych procedur normowych.

Literatura

- [1] Bathe KJ.: Finite element procedures. Englewood Cliffs, NJ:Prentice Hall 1996.
- [2] Kleiber M., Woźniak Cz.: Nonlinear Mechanics of Structures. Polish Scientific Publishers, Warszawa, 1991.
- [3] Kozłowski A.: Kształtowanie i obliczanie węzłów ram z uwzględnieniem ich cech podatnościowych, XXVII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji Stalowych, Szczyrk 2012.
- [4] Kwaśniewski L., Giżejowski M.: Numerical modeling of joint ductility in steel and steel-concrete composite frames, Conference: „STABILITY AND DUCTILITY OF STEEL STRUCTURES”, Rio de Janeiro, Brazil, 2010.
- [5] Stankiewicz B.: Experimental tests of T-stub joints and refined finite element method computer model, 3rd European Conference on Steel Structures EUROSTEEL 2002, Coimbra 2002.
- [6] Stankiewicz B.: Komputerowy model śrubowego doczołowego połączenia konstrukcji wsporczej turbiny wiatrowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska - 2008, z. 50.
- [7] Stankiewicz B.: Parametryczna analiza podatności śrubowych styków doczołowych dwuteowych belek stalowych metodą elementów skończonych. Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, zeszyt 60 (nr 2/2013).
- [8] PN-EN 1993-1-8 Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów. PKN, 2006.

ASSESSMENT OF IMPACT OF AXIAL FORCE IN A COLUMN ON CHARACTERISTICS BEAM-TO-COLUMN JOINT USING FEM SIMULATION

Summary

Accuracy of analysis of structures consisted of beams and columns can be increased by considering a real rigidity of joints. In traditional methods of calculations, without using computers, only two extreme values of joints rigidity were considered, full rigidity or zero rigidity. Commonly used at present time computer programs for static analysis enable more accurate calculations, with considering real rigidity of joints. The necessary condition for such analysis is to know a moment vs. angle of rotation curves of joints. The characteristic of joints can be determined using code procedures, or more accurate using FEM computer calculations. Both methods are time-consuming, unfortunately. But the advantage of using FEM methods is the ability to reflect more accurately the impact of factors taken into account in the traditional code procedures, as well as the ability of taking into account the impact of factors omitted in the code procedures. The article presents an analysis of joint that is the part of a steel frame. The aim of the FEM analysis was to

obtain curves bending moment in the beam vs. angle of rotation. A computer FEM model was developed using finite element program ADINA. The model is a parametrical model, so it can be easily changed in order to consider other dimensions and materials. Nonlinear calculations of a joint consisted of a column (HEB 200), beam (IPE 240) and flush end-plate connection with four M20 10.9 bolts were carried out. The bolts are not preloaded. Results demonstrate moment –rotation curves, the significant impact of the axial forces is clearly visible.

Keywords: steel structures, bolted connections, end-plate connections, finite element method

Przesłano do redakcji: 07.06.2016 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2016 r.

DOI: 10.7862/rb.2016.44