

## **Weryfikacja efektu dźwigni w rozciągającym połączeniu doczołowym sprężonym śrubami**

**Krzysztof Ostrowski<sup>1</sup>, Jan Łaguna, Aleksander Kozłowski<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*MTA Engineering Sp.zo.o. e-mail: krzysztof.ostrowski@mta-online.net*

<sup>1</sup>*Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa i Inżynierii, Politechnika Rzeszowska, e-mail: kozlowsk@prz.edu.pl*

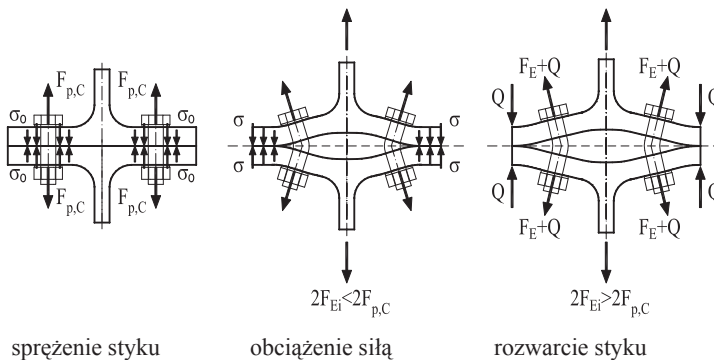
**Streszczenie:** Doczołowe połączenia śrubowe są często stosowane w konstrukcjach stalowych, w stykach rozciąganych, jak i obciążonych momentami zginającymi. Wskutek odkształceń blach czołowych dochodzi do powstania tzw. efektu dźwigni, czyli zwiększenia sił w śrubach. Norma PN-EN 1993-1-8 nie rozróżnia połączeń doczołowych sprężanych śrubami o wysokiej wytrzymałości, które są najczęściej stosowane, od połączeń niesprężonych. Celem artykułu jest przedstawienie porównania stosowanych wcześniej modeli analitycznych i normowych określania współczynnika efektu dźwigni, z wynikami badań doświadczalnych oraz analizy MES. Wyniki analizy wskazują, że zachowanie się połączeń sprężanych jest odmienne od niesprężonych i powinno być analizowane przy zastosowaniu innych modeli obliczeniowych.

**Słowa kluczowe:** połączenia doczołowe sprężane, króćce teowe, efekt dźwigni

### **1. Wprowadzenie**

Doczołowe połączenia sprężane śrubami o wysokiej wytrzymałości są często stosowane w konstrukcjach stalowych ze względu na łatwość montażu. Połączenia te przenoszą siły rozciągające równoległe do trzpieni śrub, kosztem zmniejszania naprężeń docisku w styku blach czołowych, wywołanego wstępnym napięciem śrub. Taki schemat przekazywania sił wewnętrznych w połączeniu ma miejsce, gdy blachy czołowe połączenia są dostatecznie grube (sztywne), a obciążenie nie przekracza wartości siły wstępnego sprężenia. W miarę wzrostu obciążenia, gdy jednokierunkowo zginane blachy czołowe nie mają dostatecznej grubości i odkształcają się, strefy docisku blach ulegają zmniejszeniu. Wzajemny docisk blach czołowych wzrasta w pobliżu swobodnych brzegów blach. Siły wewnętrzne w styku wynikające z tego docisku zwane siłami efektu dźwigni powodują dodatkowe rozciąganie, a odkształcenia blach zginanie trzpieni śrub.

Efekt dźwigni w połączeniach niesprężanych wywołuje dodatkowe zwiększenie sił w śrubach przy każdym obciążeniu, jeśli blachy czołowe nie są dostatecznie grube. W połączeniach sprężanych zjawisko jest bardziej skomplikowane i ma charakter nieliniowy. Efekt dźwigni występuje przede wszystkim w rozciąganych króćcach teowych i krzyżowych, w których blachy czołowe są zginane w jednym kierunku, a ich nośność plastyczna na zginanie jest mniejsza od nośności śrub na rozciąganie. Schematy powstawania efektu dźwigni w sprężonym króćcu teowym pokazano na rys.1.



Rys.1 Schematy powstawania efektu dźwigni

Wstępne napięcie trzpieni śrub siłami  $F_{p,C}$  wywołuje naprężenia docisku  $\sigma_0$  w styku blach czołowych. Pod wpływem siły rozciągającej  $F_E < F_{p,C}$  blachy odkształcają się, naprężenia docisku w styku maleją, a przyrosty sił w trzpieniach śrub są nieznaczne. Gdy obciążenie przekracza siły wstępnego sprężenia  $F_E > F_{p,C}$  naprężenia docisku w styku występują jedynie w pobliżu swobodnych brzegów blach. Ich wypadkowe  $Q$  nazywane siłami efektu dźwigni powiększają siły w śrubach do wartości  $F_E + Q$ . Efekt dźwigni przyspiesza rozwieranie się styku sprężonego i jego zniszczenie.

## 2. Analityczne modele obliczeniowe

Historia wprowadzania do budowlanych konstrukcji stalowych doczołowych połączeń sprężanych śrubami o wysokiej wytrzymałości ma dopiero 50 lat. Najbardziej intensywnie prowadzono prace w latach 1960-1980 w Stanach Zjednoczonych, Europie i Japonii. Obejmowały one kalibrowanie właściwości śrub o wysokiej wytrzymałości do sprężania, badania złączy jednośrubowych, rozciąganych króćców teowych i teowo krzyżowych oraz połączeń zginanych belek i belek ze słupami. Badania eksperymentalne efektu dźwigni prowadzone były od 1960r. na próbkach złączy teowych i teowo krzyżowych. Stosowane metody obliczeń [1], [2], [4], [5], [7] opierają się głównie na wynikach badań [3], [6] oraz [8] i [9]. Obecnie badania eksperymentalne są zwykle wspomagane analizą komputerową, która umożliwia bardziej wnikliwe rozpoznanie właściwości i szerszą interpretację wyników np. [10].

Wzór empiryczny oparty na wynikach badań [3] podany w przepisach AISC [5] pozwala na obliczenie stosunku siły efektu dźwigni do siły obciążającej śrubę  $Q/F_E$  w rozciągającym króćcu teowym, zależnie od parametrów geometrycznych złącza i klasy wytrzymałości śrub:

$$\frac{Q}{F_E} = \frac{100md^2 - k_1 l_{eff} t_p^2}{k_2 nd^2 + 21 l_{eff} t_p^2} \quad (1)$$

gdzie:

$l_{eff}$  - długość efektywna blachy czołowej,

$d$  - średnica śruby,

$t_p$  - grubość blachy czołowej,

$m, n$  odległości osi śruby od brzegu podparcia i brzegu swobodnego wg rys.2,

$k_1 = 14$ ;  $k_2 = 62$  dla śrub kl.10.9

$k_1 = 18$ ;  $k_2 = 70$  dla śrub kl.8.8.

Pewną modyfikacją tego wzoru była propozycja, którą opublikowali Fisher i Struik [4]. Na podstawie dalszych badań doszli oni do wniosku, że blacha czołowa jest zginana na długości  $m$  zmniejszonej o połowę średnicy śruby, (patrz rys.2). Efekt dźwigni wynosi wtedy:

$$\frac{Q}{F_E} = \frac{\delta \alpha}{(1 + \delta \alpha) n} \quad (2)$$

gdzie:

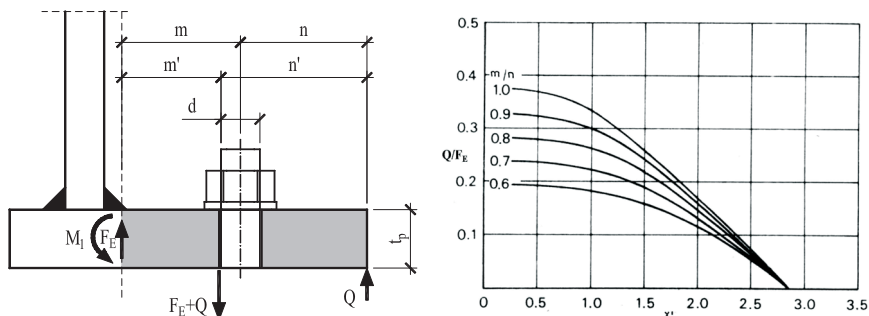
$\delta$ - stosunek pola przekroju blachy czołowej netto do pola przekroju brutto,  
 $\alpha$ - stosunek momentu zginającego blachę na osi śrub do momentu na licu środnika  
 $m, n$  - jak we wzorze (1).

Metoda zaproponowana przez Agerskova [6] i [7] wykorzystuje warunki równowagi i wyniki analizy komputerowej 2750 modeli połączeń. Wartość  $Q/F_E$  odczytuje się zależnie od parametru  $\gamma$  i stosunku  $m/n$  z wykresu na rys.2.

$$\gamma = \frac{l_{eff} t_p^2 f_y}{m d^2 f_{yb}} \quad (3)$$

gdzie:

$f_y, f_{yb}$  – granica plastyczności stali blachy, śruby, pozostałe oznaczenia jak we wzorze (1).



Rys. 2. Schemat oddziaływań w krócu teowym i wykres zależności  $Q/F_E$  wg Agerskova [7]

Grandström [8] złożył model zginania blachy, tak jak Fisher i Struik [4], do lica trzpienia śruby i ustalił z warunków równowagi w stanie granicznym nośności blachy czołowej na zginanie i nośności śrub na rozciąganie, wartość minimalną grubości blachy czołowej  $t_{p,min}$  przy której efekt dźwigni zanika (4). Wpływ efektu dźwigni określił on wzorem (5) analizując własne wyniki badań oraz metody obliczeń [4], [5], [7]. W PN-90/B-03200 [2] wykorzystano wyniki badań [9] oraz wzór (5).

$$t_{p,min} = 2 \sqrt{\frac{m' F_{t,Rd}}{l_{eff} f_y}} \quad (4)$$

$$\frac{Q}{F_E} = 1,67 \left( 1 - \frac{t_p}{t_{p,min}} \right) \quad (5)$$

gdzie:

$F_{t,Rd}$  - nośność obliczeniowa śruby na rozciąganie, pozostałe oznaczenia jak we wzorze (1) i na rys. 2

Metoda składnikowa obliczeń doczołowych połączeń śrubowych podana w PN-EN 1993-1-8 [1] nie przewiduje bezpośredniego, jawnego obliczania wpływu efektu dźwigni na siły w śrubach. Nośność obliczeniową połączenia  $F_{t,Rd}$  rozpatruje ona dla 3 modeli stanu granicznego, z których interesują nas model 1 zniszczenia blachy - wzór (6) i model 2 jednoczesnego osiągnięcia nośności blachy i śrub, wzór (7). W modelu 3 - zniszczenia śrub przed uplastycznieniem blachy czołowej, efekt dźwigni nie występuje.

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m} \quad (6)$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + \Sigma nF_{t,Rd}}{m+n} \quad (7)$$

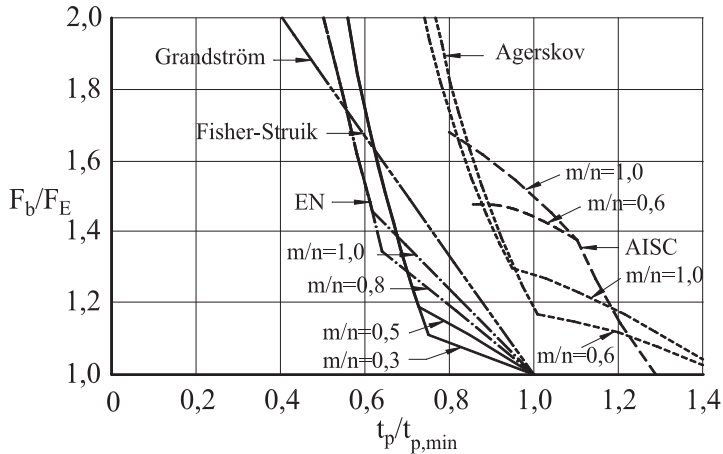
Wpływ efektu dźwigni można wyznaczyć z wzoru:

$$\frac{Q}{F_E} = \frac{\Sigma F_{t,Rd}}{F_{T,Rd}} - 1 \quad (8)$$

gdzie:

$M_{pl,Rd}$  - moment plastyczny blachy czołowej, oznaczenia pozostałe jak we wzorach (1) i (4) przy czym  $n \leq 1,25m$ .

Porównanie wyników omówionych wyżej metod obliczeń zależnie od  $t_p/t_{p,min}$  i  $m/n$  pokazano na rys. 3.



Rys. 3 Porównanie metod obliczeń na wykresie zależności  $F_b/F_E$  od  $t_p/t_{p,min}$  (gdzie  $F_b = F_E + Q$ )

Jak widać z tego rysunku wyniki metody składnikowej według EN [1] są zbliżone do metody Fishera i Struika [4] oraz Grandströma [8]. Metody Agerskova [7] i AISC [5] są bardziej zachowawcze.

### 3. Opis metody badawczej

#### 3.1. Badania doświadczalne

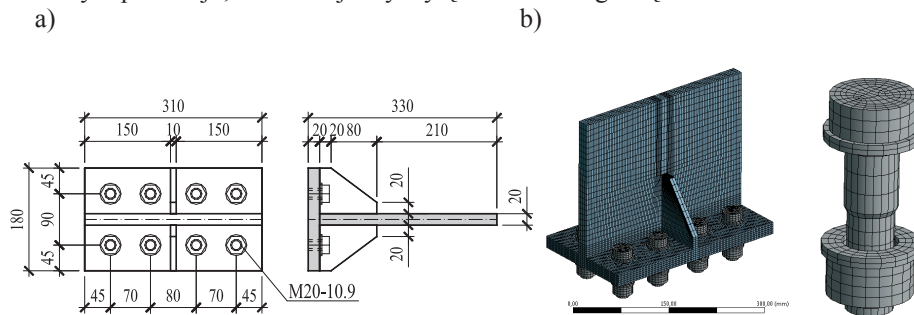
Badanie eksperymentalne rozkładu sił wewnętrznych w sprężonym połączeniu doczołowym jest zadaniem trudnym ze względu na brak możliwości pomiaru rozkładu sił wewnętrznych przed rozwarciem styku blach. Trudności oceny wyników potęgują wpływy odchyłek wykonawczych i naprężeń własnych.

Badania doświadczalne króćców teowych i krzyżowych wykonywane były od lat 60-tych ubiegłego wieku i nadal są wykonywane. Jednak w niewielu z tych badań dokonywano pełnych pomiarów sił w śrubach w trakcie sprężania i kolejnych etapach obciążeń. Do analizy przyjęto dobrze udokumentowane badania doświadczalne próbki typu 6A, wykonane w COBPKM Mostostal [9]. Wymiary badanej próbki pokazano na rys. 4.

#### 3.2. Modelowanie MES

Modelowanie metodą elementów skończonych połączeń i węzłów konstrukcji stalowych stało się obecnie rutynową działalnością badawczą. Modele MES, dobrze

ukształtowane i skalibrowane, zastępują drogie i pracochłonne badania doświadczalne. Specyfika metody MES pozwala na możliwości wychwycenia sposobu zachowania się składników węzła, co nie zawsze jest możliwe do zaobserwowania w warunkach laboratoryjnych. Przykładem takim jest możliwość odczytania wartości rozwarcia styku w dowolnym przekroju, dla każdej fazy wyteżenia badanego węzła.

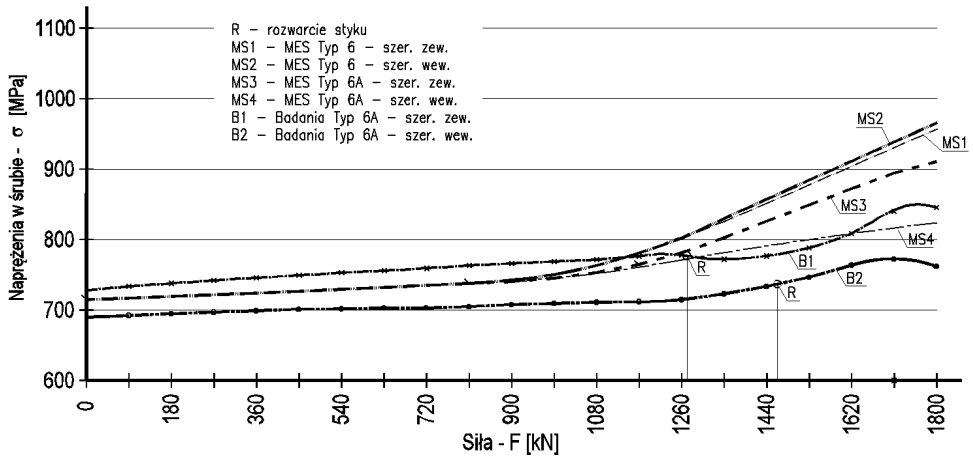


Rys. 4. Analizowane próbki: a) wymiary badanego króćca typ 6A, b) widok siatkowania próbki 6A oraz model śruby.

Analizę wykonano dla pokazanego na rys. 4 połączenia 6A, jak również dla modelu pozbawionego żeber (typ 6). Obliczenia wykonano programem ANSYS. W analizie MES przyjęto bilinearny sprężysto-plastyczny model materiałowy. Do budowy modelu numerycznego użyto ośmiowęzłowych sześciennych elementów skończonych. Dla blach czołowych przyjęto sześć warstw elementów skończonych. W strefach koncentracji naprężeń zastosowano dogęszczenie siatki. Do zbudowania modelu śruby zastosowano również elementy sześciennie ośmiowęzłowe. Podkładki zamodelowano jako elementy oddzielnie, natomiast łeb śruby oraz trzpień zostały połączone z nakrętką. Sprężenie śruby przyłożono na boczną powierzchnię trzpienia. Właściwości wytrzymałościowe materiałów blach przyjęto jak w badaniach eksperymentalnych:  $f_y=238$  MPa;  $f_u=392$  MPa, dla śrub M20 klasy 10.9:  $f_{yb}=983$  MPa,  $f_{ub}=1121$  MPa,  $E_b=216,0$  GPa. Współczynnik tarcia przyjęto jak dla powierzchni w stanie naturalnym o wartości  $\mu=0.2$ . Połączenie typ 6A zbudowane zostało z 150 366 węzłów i 119 759 elementów. Dla połączenia typ 6 wartości te wynoszą odpowiednio: 141 456 węzłów, 113 315 elementów. Analizowane połączenia zostały obciążone siłą rozciągającą o wartości  $F_E=1800$  kN. Siła została przyłożona w 22 krokach. Dwa pierwsze kroki program przydzielił na etap sprężenia, w pozostałych 20 przyłożone zostało obciążenie w równym podziale na każdy krok. Siły w śrubach odczytano w sposób analogiczny jak miało to miejsce w badaniach, czyli jako średnią z trzech odczytów na obwodzie trzpienia śruby. Siły odczytano w krokach odpowiadających obliczonej w drugim modelu zniszczenia według [1] nośności połączenia. Wartości reakcji Q wyznaczono z sumy reakcyjnej węzłów znajdujących się na powierzchni kontaktowej płyt czołowych obszaru ćwiartki zawierającej wewnętrzny oraz zewnętrzny szereg śrub.

#### 4. Wyniki analizy

Podstawowym celem badań była weryfikacja wyników MES przez badania doświadczalne. Jako wyznacznik poprawności modelu MES przyjęto porównanie naprężeń w śrubach, otrzymanych podczas badań i z modelu MES. Wykresy zależności naprężeń w śrubach od wielkości obciążenia pokazano na rys.5.



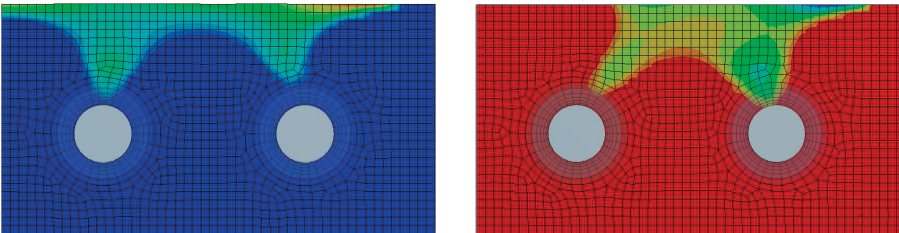
Rys. 5 Zależność naprężeń w śrubach od wielkości obciążenia: a) z badań [9], b) z analizy MES.

Z porównania wyniku pewna niezgodność wyników, choć rozbieżność nie przekracza 9%. Stwierdzone różnice mogą wynikać, z jednej strony z niedoskonałości pomiarowych podczas badań, z drugiej ze specyfiki modelu MES. Na rys. 5 oznaczono dodatkowo stany w których następuje rozwarście styku. Różnice naprężeń w śrubach w szeregu wewnętrznym i zewnętrznym są konsekwencją zmiennej sztywności płyty czołowej która powoduje mimośrodową alokację wektora wypadkowego siły spowodowanej efektem dźwigni.

Na podstawie otrzymanych z analizy MES rozkładów siły reakcji na powierzchni styku blach (rys. 6) obliczono realną wartość siły efektu dźwigni w zewnętrznych i wewnętrznych śrubach styku 6A. Podobną analizę wykonano dla styku typu 6.

Na podstawie rozkładu sił reakcji odczytanych z wykresu (rys. 6) ustalono współczynnik  $Q/F_E$  który wynosi odpowiednio:

- połączenie typ 6:
  - szereg zewnętrzny  $Q/F_E = 0,465$
  - szereg wewnętrzny  $Q/F_E = 0,481$
- połączenie typ 6A:
  - szereg zewnętrzny  $Q/F_E = 0,436$
  - szereg wewnętrzny  $Q/F_E = 0,178$



Rys. 6. Rozkład sił reakcji efektu dźwigni połączeń typu 6 oraz 6A.

W celu porównania wyników badań doświadczalnych z analizą MES i poprzednio proponowanymi modelami analitycznymi, obliczono wartość współczynnika  $Q/F_E$  przy założeniu charakterystyk materiałowych z badań doświadczalnych i wartości współczynników częściowych  $\gamma_1 = \gamma_2 = 1,0$ . Wyniki analizy zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie wartości  $Q/F_E$  otrzymanych z analizy z wynikami badań doświadczalnych

	Próbka	AISC (1)	Fisher (2)	Agerskov rys. 2	Grandström (5)	PN-EN 1993-1-8 (8)	MES
6	Śruby wew.	0,54	0,25	0,28	0,41	0,533	0,465
	Śruby zew.	0,54	0,25	0,28	0,41	0,548	0,481
6A	Śruby wew.	0,23	-	-	-	0,116	0,178
	Śruby zew.	0,23	-	-	-	0,533	0,436

## 5. Wnioski i podsumowanie

Przedstawione wyniki wskazują na dużą rozbieżność wyników modeli analitycznych. Wartość współczynnika  $Q/F_E$  wynosi od 0,25 do 0,548. Otrzymana z modelu normy [1] wartość współczynnika  $Q/F_E$  w połączeniu typu 6A jest równa 0,533 dla szeregu zewnętrznego oraz 0,116 dla szeregu wewnętrznego i jest zbliżona do otrzymanych z analizy MES. Znaczna rozbieżność współczynnika  $Q/F_E$  pomiędzy szeregami wewnętrznymi i zewnętrznymi potwierdza zasadność modeli analitycznych stosowanych w normie [1].

Porównanie wyników modelu MES i z badań doświadczalnych wskazuje, że utworzony model dość dobrze odwzorowuje realną pracę węzła. Porównanie wyników otrzymanych dla śrub zewnętrznych i wewnętrznych wskazuje, że po wprowadzeniu żeber usztywniających blacha czołowa jest zginana dwukierunkowo, co ogranicza lub nawet wyklucza oddziaływanie efektu dźwigni. Wzrost sztywności blachy czołowej spowodowany dodatkowym podparciem powoduje również zwiększenie udziału śrub w niej osadzonych w przenoszeniu zewnętrznego obciążenia.

Modele numeryczne, aby mogły być wykorzystane w analizie połączeń stalowych, muszą być dostosowane w taki sposób, aby uwzględniały imperfekcje geometryczne oraz zmiany charakterystyk mechanicznych materiału. Stal pod wpływem obróbki cieplnej w czasie spawania elementów konstrukcyjnych ulega utwardzeniu. Powodem tego jest proces rekryształacji ziaren materiału. Dlatego model numeryczny powinien uwzględniać zwiększoną wytrzymałość spoiwa, jak i obszaru do niego przyległego. Wyższa granica plastyczności tego obszaru wpływa na końcowe wyniki analizy, czego efektem mogą być rozbieżności z badaniami laboratoryjnymi.

Rozpoznanie zachowania się elementów składowych węzłów będących skutkiem oddziaływania efektu dźwigni będzie podstawą od dalszych analiz. Znajdzie to zastosowanie w prognozowaniu zdolności węzłów do obrotu. Rozwarcie styku jest jednym ze składników odkształcenia węzła pod wpływem zadanego obciążenia. Dokładne poznanie zachodzących procesów jest więc konieczne w celu poprawnego zdefiniowania ilościowej oceny odkształcenia węzła, mającej wpływ na globalną analizę konstrukcji.

## Literatura

- 1 PN-EN 1993-1-8 Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów. PKN, 2006.
- 2 PN-90/B-03200 Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- 3 Nair R. Birkemoe P. Munse W. High strength bolts subject to tension and prying. Journal of the Structural Division ASCE, Vol 100, No ST2, February 1974, s.351-372.
- 4 Fisher J.W. Struik J.H. Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints. John Wiley. 1974.
- 5 AISC Manual of Steel Construction. NY.1974.
- 6 Agerskov H. High - strength bolted connections subject to prying. Journal of the Structural Division ASCE, Vol 102, No ST1, January 1976, s.161-175.
- 7 Agerskov H. Analysis of bolted connections subject to prying. Journal of the Structural Division ASCE. Vol 103, No ST11, November 1977, s.2145-2163.
- 8 Granström A. The strength of bolted end-plate connections. Stalbyggnadsinstitutet Report 15:13, February 1979.

- 9 Śliwka W. Badania doczołowych styków sprężanych śrubami o wysokiej wytrzymałości poddanych obciążeniu rozciągającemu wzdłuż osi śrub. Praca badawcza 07.1/13.3.5.N COBPKM "Mostostal", 1979.
- 10 Coelho A. Characterization of the Ductility of Bolted End Plate Beam to Column Steel Connections. PhD thesis. Universidade de Coimbra. July 2004.

## **Verification of prying effect in prestressed end-plate connection**

**Krzysztof Ostrowski<sup>1</sup>, Jan Łaguna, Aleksander Kozłowski<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*MTA Engineering Ltd. e-mail:krzysztof.ostrowski@mta-online.net*

<sup>2</sup>*Department of Building Structures, Faculty of Civil and Environmental Eng., Rzeszów University of Technology, e-mail:kozłowski@prz.edu.pl*

**Abstract:** End-plate connections are very often used in steelwork, as tension and bending connections. As a result of deflection of end plate, additional forces, known as prying forces arise and consequently increase stresses in bolts. Eurocode 1993-1-8 do not distinguish end-plate connections prestressed by high strength bolts from non-prestressed. The aim of the paper is to perform the comparison of previous analytical models and code regulations for coefficient of prying forces to the experimental tests and modelling by finite element method. Results of the analysis show that the behaviour of prestressed connection is essentially different with comparison to non-prestressed.

**Keywords:** prestressed end-plate connections, T-stubs, prying effect forces.