

Dariusz LEŃ¹
Lucjan ŚLĘCZKA²

BADANIA NOŚNOŚCI, SZTYWNOŚCI I EFEKTU DŹWIGNI W ŚRUBOWYCH POŁĄCZENIACH KOŁNIERZOWYCH

W pracy przedstawiono metodykę i uzyskane rezultaty badań osiowo rozciąganych połączeń kołnierzowych rur okrągłych. Zbadano ogółem osiemnaście elementów próbnych. Wszystkie były poddane oddziaływaniom statycznym. Podczas badania wyznaczano zarówno nośność, jak i sztywność połączeń oraz mierzono siły w śrubach w całym zakresie obciążenia węzła. Czynnikiem zmiennymi była liczba śrub w styku, grubość blachy czołowej oraz klasy właściwości mechanicznych śrub. Głównym celem przeprowadzonej analizy eksperymentalnej było zebranie materiału do weryfikacji procedur określania właściwości strukturalnych połączeń kołnierzowych metodą składnikową.

Słowa kluczowe: konstrukcje stalowe, połączenia śrubowe, kształtowniki zamknięte okrągłe, badania doświadczalne, nośność, sztywność, efekt dźwigni

1. Wstęp

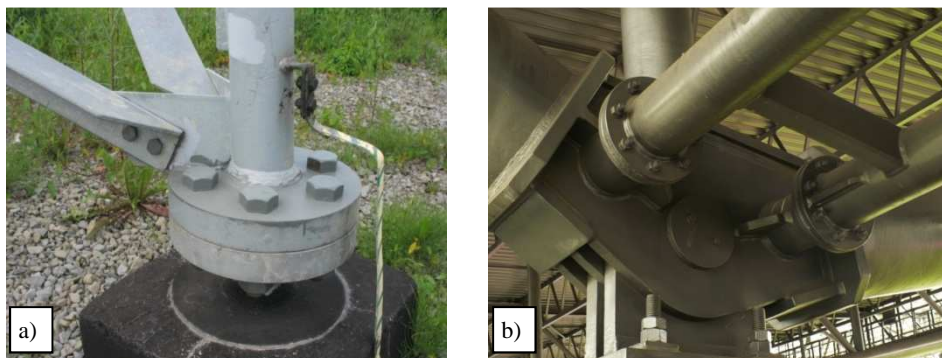
Śrubowe połączenia doczołowe i kołnierzowe są często stosowanymi węzłami montażowymi konstrukcji prętowych wykonanych z kształtowników okrągłych, takich jak kształtowniki rurowe czy pręty lite pełne. Spotyka się je wszędzie tam, gdzie używane są takie kształtowniki, a więc w wieżach kratowych, masztach, kratownicach dachowych i wielu innych konstrukcjach wsporczych. Zapewniają stosunkowo estetyczny wygląd konstrukcji oraz umożliwiają szybki jej montaż [1-2], [4-5]. Przykłady takich połączeń pokazano na rys. 1.

Połączenia tego typu są wykonywane w dwu odmianach – jako doczołowe, przy zastosowaniu blachy pełnej (talerzowej) oraz jako kołnierzowe, przy użyciu blachy pierścieniowej, z centralnie wyciętym otworem do mocowania kształtownika. Rozwiązania z blachą kołnierzową stały się w ostatnim czasie bardziej popularne, ponieważ otwór w kołnierzu ułatwia wykonanie spoin mocujących

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Dariusz Leń, Instytut Politechniczny, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. Stanisława Pigionia w Krośnie, dariusz.len@pwsz.krosno.pl

² Lucjan Ślęczka, Politechnika Rzeszowska, slęczka@prz.edu.pl

kształtownik z blachą kołnierza, a ponadto takie rozwiązanie wpływa korzystnie na łatwość cynkowania ogniowego całego elementu.



Rys. 1. Styki montażowe kształtowników okrągłych; a) w wieży kratowej; b) w konstrukcji kratowej trybun stadionu

Fig. 1. Assembly joints for circular hollow sections; a) in the lattice tower; b) in the truss structure of the stadium stand

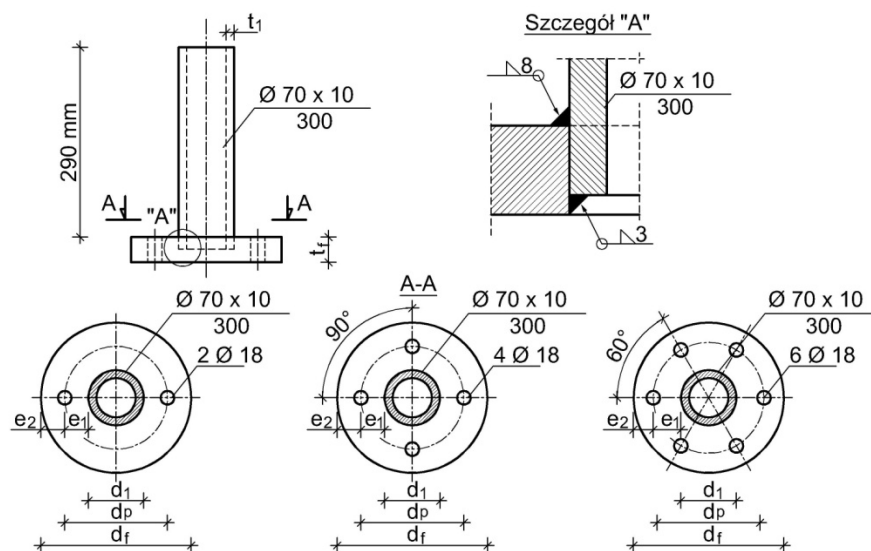
Współcześnie stosowane metody obliczeniowe określania nośności połączeń kołnierzowych są zróżnicowane – niektóre z nich uwzględniają nośność plastyczną, inne oparte są na nośności sprężystej [7], zarówno jeśli chodzi o zginanie blachy kołnierza, jak i wyznaczanie siły w pojedynczej śrubie (z uwzględnieniem efektu dźwigni). Większość z nich wyraźnie jednak odbiega od podejścia tzw. składnikowego, przyjętego przy opisie nośności węzłów kształtowników dwuteowych. Metoda składnikowa stała się podstawą oceny właściwości strukturalnych połączeń we współczesnych normach projektowania [8]. Jej zaletą jest możliwość określenia całego zakresu właściwości strukturalnych połączeń (nośności, sztywności i ciągliwości) oraz uwzględnianie zakresu sprężysto-plastycznego zachowania węzłów.

Próbę opisu jednego ze składników występującego w połączeniach kołnierzowych podjęto w [6]. Dalsze prace w tym kierunku wymagają jednak weryfikacji i walidacji budowanych modeli, stąd decyzja o przeprowadzeniu własnych badań doświadczalnych pewnej klasy połączeń kołnierzowych.

2. Plan, cel i zakres badań

Głównym celem przeprowadzonych badań było uzyskanie danych związanych z jakościową i ilościową oceną nośności, sztywności i występujących form zniszczenia połączeń kołnierzowych poddanych oddziaływaniom statycznym oraz eksperymentalne zbadanie zjawiska efektu dźwigni zachodzącego na skutek giętych deformacji blachy kołnierza.

Plan badań obejmował osiemnaście elementów próbnych, składających się z dwu identycznych części, skręconych śrubami. Każda pojedyncza część wykonana była z odcinka rury okrągłej $\phi 70 \times 10$ połączonej spoinami pachwinowymi z blachą kołnierza. Schemat jednej części elementu próbnego oraz detale jej wykonania pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Jedna część składowa elementu badawczego (połączenie kołnierzowe) – opis w tekście
Fig. 2. One part of the specimen (flange connection) - description in the text

Szesnaście elementów próbnych było połączeniami kołnierzowymi (tzn. blacha miała otwór do wprowadzenia w nią rury, por. rys. 2.). Oznaczono je symbolem BK. Dwa elementy próbne były zaś doczołowe, z blachą pełną (oznaczono je symbolem BT, por. tabela 1.). Badano elementy próbne z dwiema, czterema oraz sześcioma śrubami, różnicując dodatkowo grubość blachy kołnierza t_f i klasę właściwości mechanicznych śrub (tabela 1. i rys. 2.). Zakres zmienności czynników dobrano tak, aby możliwe było wystąpienie różnych form zniszczenia połączenia tj. zerwania śrub, uplastycznienia kołnierza przy jego zginaniu oraz interakcji rozciągania śrub i zginania blachy kołnierza. Elementy badawcze wykonano ze stali konstrukcyjnej gatunku S235.

Podczas wytwarzania dolne i górne powierzchnie blach kołnierzowych zostały poddane obróbce mechanicznej w celu usunięcia deformacji blach kołnierza (wygięć) wywołanych spawaniem. Obróbka taka spowodowała uzyskanie płaskości blach, dokładnego ich przylegania w styku i prostokątności powierzchni blachy względem osi rury. Z uwagi na tę obróbkę rzeczywiste grubości kołnierza przedstawione w tabeli 1 mają niestandardowe wartości.

Podczas badań do łączenia ze sobą dwu części elementu próbnego wykorzystano śruby M16, zgodne z normą [9], kl. 5.8 i kl. 8.8, gwintowane na całej długości trzpienia. Długość śrub wynosiła 85 mm lub 120 mm, w zależności od sumarycznej grubości skleszczenia.

Połączenia badano jako niesprężone, z uwagi na możliwość obserwacji efektu dźwigni w całym zakresie wyężenia śruby. W celu uzyskania wzajemnego równomiernego docisku kołnierzy w fazie wstępnej, dokręcanie śrub kontrolowano kluczem dynamometrycznym, stosując niewielki moment dokręcenia, o wartości 40 Nm. Wywoływało to powstanie siły wstępnego napięcia w śrubach na poziomie 10 kN.

Tabela 1. Geometria badanych połączeń

Table 1. Geometry of the investigated joints

Lp.	Oznaczenie	Wymiary blachy kołnierzowej			Śruby M16		Grubość kołnierza t_f [mm]
		e_1 [mm]	e_2 [mm]	d_f [mm]	Liczba	Klasa właściwości mech.	
1	BK 10.2.1	30	30	190	2	5.8	7,6
2	BK 10.2.2	30	30	190	2	8.8	7,6
3	BK 10.4.1	30	30	190	4	5.8	7,6
4	BK 10.4.2	30	30	190	4	8.8	7,6
5	BK 15.4.1	30	30	190	4	5.8	15
6	BK 15.4.2	30	30	190	4	8.8	15
7	BK 20.4.1	30	30	190	4	5.8	20
8	BK 20.4.2	30	30	190	4	5.8	20
9	BK 10.6.1	35	25	190	6	5.8	7,1
10	BK 10.6.2	35	25	190	6	8.8	7,6
11	BK 15.6.1	35	25	190	6	5.8	13,2/13,4
12	BK 15.6.2	35	25	190	6	8.8	13,2
13	BK 25.6.1	35	25	190	6	5.8	20,8/20,7
14	BK 25.6.2	35	25	190	6	8.8	22,8/23,1
15	BK 15.6.3	45	25	210	6	5.8	13,0/13,6
16	BK 15.6.4	45	25	210	6	8.8	13,7/13,4
17	BT 10.6.1	35	25	190	6	5.8	8,6/8,5
18	BT 25.6.1	35	25	190	6	5.8	23,2/23,0

3. Metodyka badań

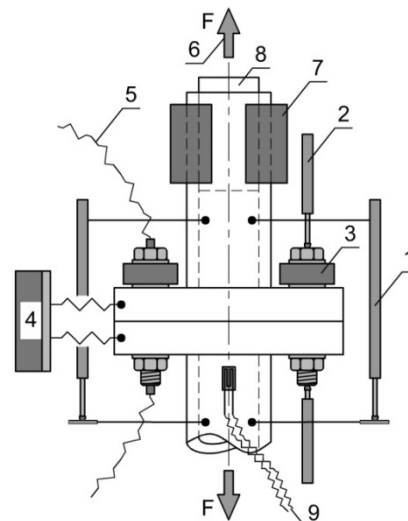
Badania przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej INSTRON 1200 kN – J1D w Laboratorium Badania Konstrukcji Wydziału Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej.

Osprzęt pomiarowy rejestrujący zachowanie połączenia stanowiły, rys. 3.:

- dwa indukcyjne czujniki przemieszczeń mierzące wzajemne przemieszczenie części górnej i dolnej elementu badawczego (1), mocowane na bazie pomiarowej ok. 150 mm,
- dwa indukcyjne czujniki przemieszczeń mierzące wydłużenie śruby (2),

- czujniki CL20 do pomiaru siły w śrubach (3), umieszczone pod łbami śrub, w liczbie od dwu do czterech w jednym elemencie badawczym,
- ekstensometr optyczny (4), mierzący rozwarście pomiędzy dolnym a górnym kołnierzem,
- siłomierz wbudowany w maszynę wytrzymałościową (6),
- tensometry oporowe naklejone w pobliżu kołnierzy (9), stosowane tylko w wybranych elementach badawczych,
- ultradźwiękowe urządzenie do pomiaru siły w śrubie (5), wykorzystywane tylko w niektórych elementach.

Mocowanie elementów badawczych w maszynie wytrzymałościowej realizowano przy użyciu szczęk zaciskowych (7), dostosowanych do mocowania prętów okrągłych o maksymalnej średnicy do 70 mm. Ze względu na możliwość poprzecznego miażdżenia mocowanych rur zastosowano trzpienie stalowe (8) umieszczone wewnątrz kształtownika rurowego na długości nieco przekraczającej wysokość szczęk. Schemat mocowania elementu próbnego i osprzętu pomiarowego przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat mocowania elementu badawczego i osprzętu pomiarowy (opis w tekście)

Fig. 3. Fixing scheme for the specimens and measuring instruments (description in the text)

Obciążenie przykładano przy kontroli przemieszczenia. Prędkość przyrostu przemieszczenia szczęk maszyny wytrzymałościowej wynosiła 0,2 mm/min.

Badania doświadczalne elementów próbnych poprzedzono badaniami parametrów mechanicznych stali i śrub. W przypadku blach użytych na kołnierze badania cech materiałowych przeprowadzono badając dwie grupy próbek – wyciętych zgodnie i poprzecznie do kierunku walcowania blachy.

4. Wyniki badań

Badania wstępne pozwoliły wyznaczyć cechy mechaniczne stali oraz śrub. Uzyskane na podstawie statycznej próby rozciągania cechy stali przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Charakterystyki materiałowe blach kołnierzy

Table 2. Material parameters of flange plates

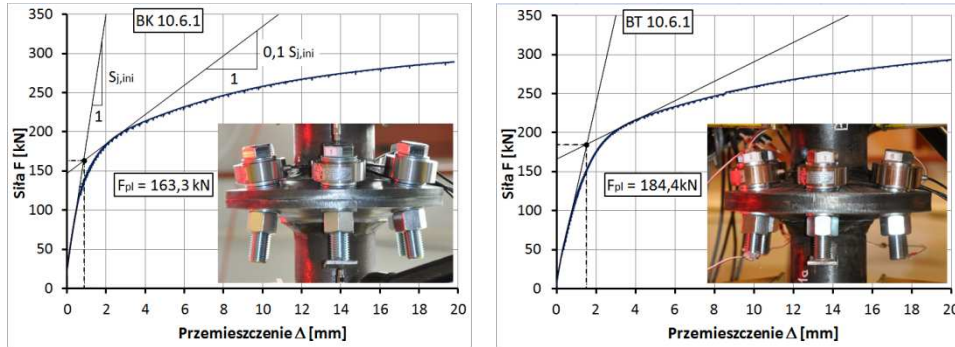
Symbol	BL 10.1	BL 10.2	BL 15.1	BL 15.2	BL 20.1	BL 20.2	BL 25.1	BL 25.2	BL 25.3	BL 25.4
R_e [N/mm ²]	280	250	300	300	305	285	390	390	280	260
R_m [N/mm ²]	411	385	431	429	431	422	527	546	412	409
Pierwsza liczba w symbolu blachy podaje jej grubość nominalną, a kolejna kierunek wycięcia próbki (1(3)- zgodnie z kierunkiem walcowania, 2(4)- poprzecznie do kierunku walcowania)										

Średnia nośność śrub M-16 klasy 5.8 na rozciąganie wynosiła 101,2 kN, zaś w przypadku śrub kl. 8.8 była równa 143,2 kN.

Podstawowym opisem zachowania połączeń, rejestrowanym podczas badań, była statyczna ścieżka równowagi we współrzędnych siła F obciążająca złącze i przemieszczenie Δ rejestrowane za pomocą czujników (1). Zarejestrowane zależności $F-\Delta$ dla wybranych elementów próbnych przedstawiono na rys. 4-6. Podane tam wartości Δ są średnią pomierzoną przez oba czujniki.

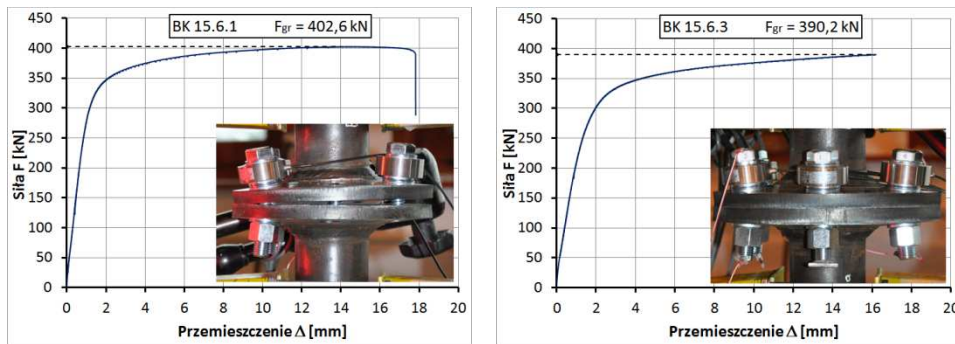
W trakcie badań zaobserwowano cztery typy zniszczenia połączeń. Trzy z nich odpowiadały modelom opisanym w [8] dla przypadku króćca teowego i były to odpowiednio: uplastycznienie blachy kołnierza (model 1), uplastycznienie blachy kołnierza z zerwaniem śrub (model 2) i zerwanie śrub (model 3). Czwarta forma zniszczenia polegała na uplastycznieniu ścianki rury z niewielką deformacją samego styku lub bez wyraźnej jego deformacji (model 4).

Nośność połączeń wyznaczano jako plastyczną N_{pl} (w przypadku występowania modelu 1 zniszczenia) oraz graniczną N_{gr} (modeli 2 i 3). Nośności granicznej odpowiadała największa wartość obciążenia elementu próbnego. Nośność plastyczną wyznaczano w sposób umowny [3], szukając rzędnej punktu przecięcia dwu linii prostych – stycznej do początkowej części wykresu $F-\Delta$ otrzymanego z badań (opisującej sztywność początkową połączenia $S_{j,ini}$) oraz drugiej, stycznej do nieliniowej części wykresu $F-\Delta$, o nachyleniu 0,1 $S_{j,ini}$, rys. 4.



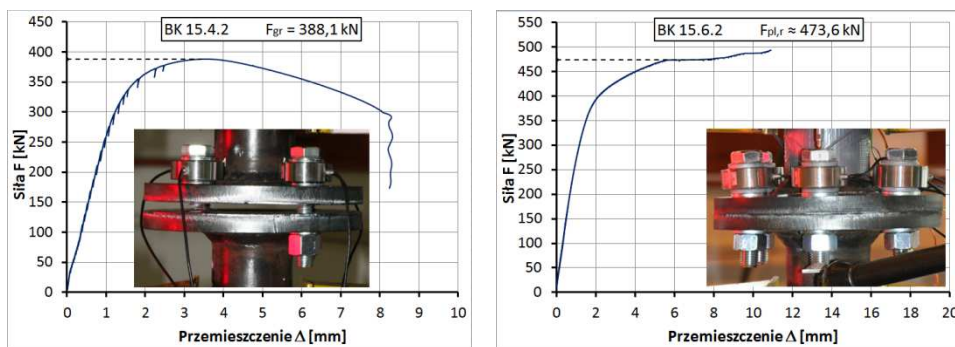
Rys. 4. Statyczna ścieżka równowagi i nośność plastyczna elementu BK 10.6.1 i BT 10.6.1

Fig. 4. Force-displacement curve and plastic resistance of the element BK 10.6.1 and BT 10.6.1



Rys. 5. Statyczna ścieżka równowagi i nośność graniczna elementu BK 15.6.1 i BK 15.6.3

Fig. 5. Force-displacement curve and ultimate load of element BK 15.6.1 i BK 15.6.3



Rys. 6. Statyczna ścieżka równowagi i nośność graniczna elementu BK 15.4.2 i BK 15.6.2

Fig. 6. Force-displacement curve and ultimate load of element BK 15.4.2 i BK 15.6.2

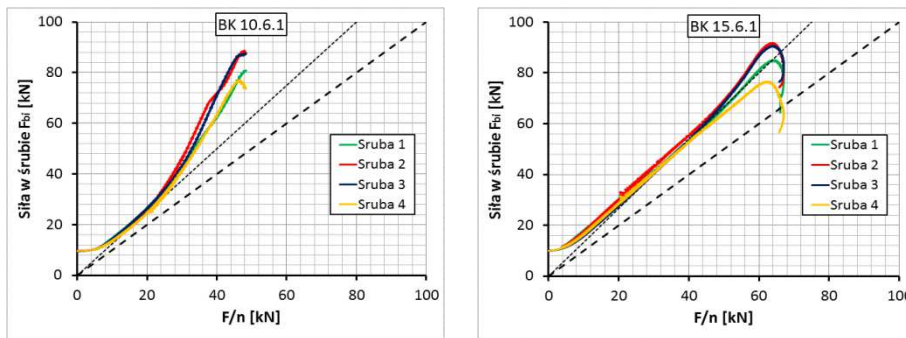
Bezpośrednio mierzone wartości sił w śrubach posłużyły do określenia wpływu efektu dźwigni. Wartość współczynnika efektu dźwigni β wyznaczono z zależności:

$$\beta = \frac{F_{bi}}{F/n} \quad (1)$$

gdzie: F_{bi} jest wartością siły zmierzonej bezpośrednio w śrubie, F jest siłą obciążającą połączenie, n zaś liczbą śrub w danym styku.

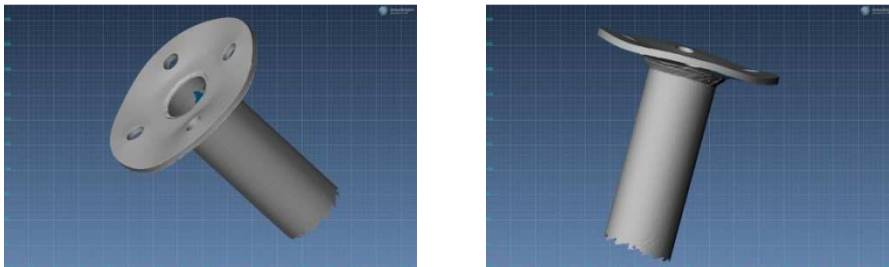
Wyznaczony podczas badań współczynnik efektu dźwigni β zmieniał swoją wartość przy zmianie poziomu obciążenia połączenia. Zmianę siły w śrubie F_{bi} w zależności od proporcji F/n (por. oznaczenia wyżej) pokazano na rys. 7. Intensywność narastania współczynnika efektu dźwigni pokazuje odchylenie wykresu od linii prostej zaznaczonej jako przerywana.

Wyznaczony tak zakres zmienności współczynnika efektu dźwigni, nośność graniczną lub plastyczną połączeń, sztywność początkową oraz zaobserwowane podczas badań formy zniszczenia zebrano w tabeli 3. Brak wyników dla elemen-



Rys. 7. Zmiana siły w śrubach F_{bi} w zależności od obciążenia zewnętrznego dla połączeń z blachami o nominalnej grubości 10 mm i 15 mm

Fig. 7. Change of bolts force F_{bi} depend on external loading for joints with nominal end plate thicknesses equal to 10 mm and 15 mm



Rys. 8. Obraz zniszczonej próbki BK 10.4.1 zdigitalizowany za pomocą skanera 3D

Fig. 8. Image of destroyed specimen BK 10.4.1 digitized by 3D scanner

tu badawczego BK 15.4.1 jest efektem przypadkowego zniszczenia tego elementu badawczego podczas badań.

Zniszczenie badanych połączeń stowarzyszone było z powstaniem znacznych deformacji giętych blach kołnierзовych. Powstające wygięcia kołnierzy wskazują w których miejscach można rozpatrywać przebieg linii załomów plastycznych, wykorzystywanych podczas analitycznej oceny nośności plastycznej blachy kołnierza przy zginaniu. Kształt i zasięg powstałych deformacji dokumentowano za pomocą skanowania geometrii wygiętych kołnierzy za pomocą urządzenia smart SCAN. Trójwymiarowy obraz jednego ze zniszczonych elementów próbných, utrwalony za pomocą digitalizacji skanerem laserowym, pokazano na rys. 8.

Tabela 3. Wyniki badań doświadczalnych

Table 3. Results of experimental testing

Lp.	Symbol	Nośność [kN]	Sztywność [kN/mm]	Charakter zniszczenia	Współczynnik efektu dźwigni β
1.	BK 10.2.1	88,3	67,7	model 1	1,53÷1,64
2.	BK 10.2.2	88,9	70,4	model 1	1,44÷1,79
3.	BK 10.4.1	179,4	154,4	model 1	1,35÷1,64
4.	BK 10.4.2	192,2	150,4	model 1	1,20÷1,73
5.	BK 15.4.1	-	-	-	-
6.	BK 15.4.2	388,1	305,7	model 3	1,0
7.	BK 20.4.1	393,7	356,0	model 3	1,0
8.	BK 20.4.2	395,6	386,6	model 3	1,0
9.	BK 10.6.1	163,3	163,5	model 1	1,30÷1,78
10.	BK 10.6.2	188,9	135,3	model 1	1,55÷1,84
11.	BK 15.6.1	402,6	296,0	model 2	1,33÷1,41
12.	BK 15.6.2	473,6	281,0	model 4	1,18÷1,66
13.	BK 25.6.1	483,2	444,3	model 4	1,0
14.	BK 25.6.2	486,0	480,5	model 4	1,0
15.	BK 15.6.3	390,2	201,8	model 2	1,45÷1,51
16.	BK 15.6.4	485,2	189,3	model 4	1,39÷1,73
17.	BT 10.6.1	184,4	112,2	model 1	1,89÷2,02
18.	BT 25.6.1	490,0	582,0	model 4	1,0

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania pokazały, że charakterystyki strukturalne połączeń doczołowych (z blachą pełną) są inne niż geometrycznie podobnych połączeń z blachą kołnierзовą (por. rys. 4.). Współczynniki efektu dźwigni obliczone na podstawie bezpośrednich pomiarów siły w śrubie mają w przypadku połączeń kołnierзовych wartości w zakresie 1,2÷1,8. Są to wartości zauważalnie mniejsze, niż przyjmowane w konserwatywnym podejściu obliczeniowym [6].

Zaobserwowane formy zniszczenia mają jakościowo podobny charakter do utraty nośności króćca teowego – jednej z podstawowych części w metodzie składnikowej. Wyniki uzyskane z przeprowadzonych badań wskazują na zależ-

ność między modelem zniszczenia, osiągniętą nośnością oraz wartością współczynnika efektu dźwigni a parametrami geometrycznymi połączenia.

Praca przedstawia wyniki badań naukowych dofinansowanych z dotacji MNiSW na utrzymanie potencjału badawczego oraz z dotacji zadań służących rozwojowi młodych naukowców oraz uczestników studiów doktoranckich.

Literatura

- [1] Agerskov H., Bjembak-Hansen J.: Bolted connections in round bar steel structures, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 111, No. 4, pp. 840-856, April 1985.
- [2] Bródka J., Broniewicz M.: *Konstrukcje stalowe z rur*, Arkady, 2001.
- [3] ECCS Technical Committee 1: Recommended testing procedure for assessing the behaviour of steel elements under cyclic loads. European Convention for Constructional Steelwork, Brussels, 1986.
- [4] Kato B., Hirose R.: Bolted tension flanges joining circular hollow section members, *Journal of Constructional Steel Research* 5 (1985) 79-101.
- [5] Kim Y. J., Madugula M.K.S.: Behavior of bolted circular flange connections subject to tensile loading, *International Journal of Steel Structures*, vol. 10, No 1, pp. 65-71, 2010.
- [6] Leń D., Ślęczka L.: Efekt dźwigni w śrubowych połączeniach kołnierзовych kształtowników zamkniętych okrągłych. [w:] *Konstrukcje betonowe i metalowe*, (red.) Elżbieta Piotrowska, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Bydgoszcz, 2015, s. 223-230.
- [7] Leń D., Ślęczka L.: Modele obliczeniowe śrubowych połączeń kołnierзовych okrągłych prętów rozciąganych osiowo, *Inżynieria i Budownictwo*, nr 2, 2015, s. 91-93.
- [8] PN-EN 1993-1-8 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych - Część 1-8: Projektowanie węzłów, PKN, Warszawa 2006.
- [9] PN-EN ISO 4017 Śruby z gwintem na całej długości z łbem sześciokątnym – Klasy dokładności A i B.

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF RESISTANCE, STIFFNESS AND PRYING EFFECT IN BOLTED FLANGE JOINTS

Summary

The paper presents methodology and results of experimental testing of axially tensioned flange joints. A total of eighteen specimens were investigated. All items were subjected to static load. During the tests, both the resistance and the initial stiffness of the joints were determined and the force in the bolts was measured throughout the whole load range. Variable parameters were the number of bolts in joint, the thickness of the end plate and the grade of the bolts. The main purpose of the study was to collect data for verification of procedures for determining the structural properties of flange joints using the component method.

Keywords: steel structures, bolted connections, hollow circular sections, experimental research, resistance, stiffness, prying effect

Przesłano do redakcji: 22.05.2017 r.

Przyjęto do druku: 01.09.2017 r.