

Wioleta BARCEWICZ\*  
Politechnika Warszawska

## PROGRAM BADAŃ PODATNYCH WĘZŁÓW ZESPOLONYCH

**Streszczenie.** W referacie omówiono zagadnienia związane z podatnymi węzłami zespolonymi stalowo – betonowymi w śrubowym połączeniu na blachę czołową. Innowacją jest zastosowanie cienkich blach czołowych, pozwalających na uzyskanie większej odkształcalności węzła. Zaproponowano program badań doświadczalnych w celu obserwacji zachowania się węzła i jego poszczególnych składników pod obciążeniem oraz ustalenia głównych źródeł deformacji i formy zniszczenia. Wyznaczone doświadczalnie podstawowe charakterystyki węzłów zostaną porównane z wartościami obliczonymi na podstawie metody składnikowej zawartej w normach EC3 i EC4. Planuje się opracowanie udoskonalonego algorytmu obliczania nośności, sztywności i zdolności do obrotu węzłów zespolonych.

## THE SEMI-RIGID COMPOSITE JOINTS TEST PROGRAM

**Summary.** The questions connected with semi-rigid composite steel-concrete joints with endplate connections are presented in this paper. A novelty is usage of thin endplates, permitting to obtain a better deformability of the joints. An experimental test program is proposed, which aims to observe the behaviour of the joints and their components subject to loading, and determine main sources of deformation and failure modes. Basic characteristics of the joints appointed experimentally will be compared with the calculated values based on component method, closed to EC3 and EC4. Creation of an improved algorithm to calculate moment resistance, initial stiffness and rotation capacity of the composite joints is planned.

### 1. Wstęp

Węzły zespolone stalowo – betonowe stosowane są w ustrojach nośnych, w których zakłada się współpracę ramy stalowej ze stropami żelbetowymi. Uwzględnienie zespolenia w węzłach pozwala na bardziej elastyczne i ekonomiczne kształtowanie konstrukcji. Do niedawna wykorzystywano tylko zespolenie stalowych belek ze stropem żelbetowym, nie uwzględniając zespolonego oddziaływania w połączeniach. W niniejszej pracy

\* Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Marian Gizejowski

rozpatrywane są węzły zdolne do przeniesienia momentów zginających, co jest swego rodzaju innowacją, z uwagi na to, że dotychczas, na ogół, połączenia między elementami w ramach stalowych budynków szkieletowych były traktowane jako przegubowe, głównie z powodu braku informacji na temat alternatywnych metod projektowania.

Rozpatruje się dwuetapowe kształtowanie węzłów konstrukcji zespolonej. I etap to faza montażu, a etap II to faza eksploatacji. W I etapie rozpatruje się proste węzły stalowe, zdolne do przeniesienia reakcji od rygla pod obciążeniem montażowym. Węzeł etapu II otrzymuje się po zabrojeniu strefy węzłowej i zabetonowaniu stropu. Połączenia zespolone typu „belka – słup”, ze względu na ujemny moment węzłowy, kształtowane są w taki sposób, aby odpowiednio zakotwione zbrojenie w górnej strefie płyt stropowych, współpracujące z rozciąganą częścią węzłów stalowych, przyczyniło się do zwiększenia ich wytrzymałości i sztywności [1].

W dalszej części niniejszej pracy analizowane będą podporowe węzły w połączeniach z zastosowaniem blachy czołowej. Jest to typ węzłów szczególnie zalecanych do konstrukcji zespolonych, gdyż w fazie montażu ma dostateczną sztywność dla zapewnienia przeniesienia obciążeń montażowych bez konieczności dodatkowego podparcia belki, w fazie zespolenia zaś zapewnia dobre przenoszenie sił ściskających na słup [9].

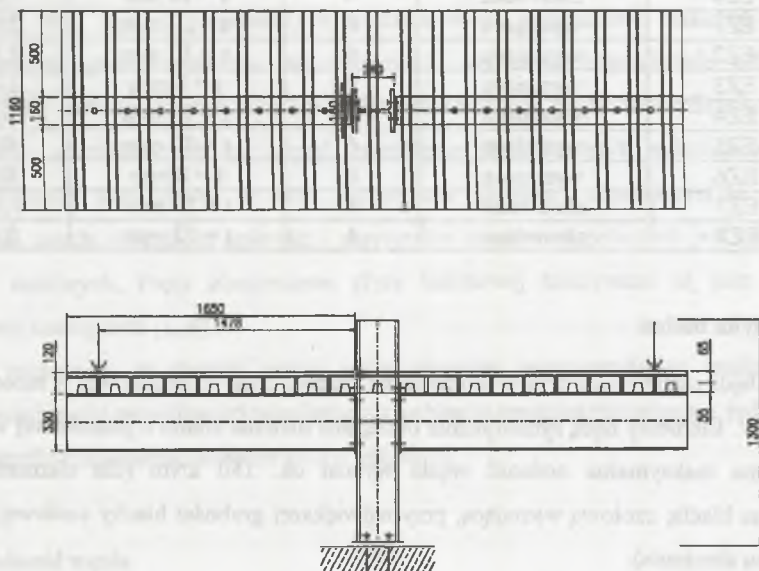
## 2. Badania doświadczalne

W obliczeniach konstrukcji ramowych podstawową charakterystyką węzłów jest zależność momentu w węźle od przyrostu kąta obrotu węzła (krzywa  $M-\phi$ ). Najbardziej obiektywną metodą uzyskania charakterystyk węzłów są ich badania doświadczalne [7].

Zaproponowano program badań pozwalający na: obserwację zachowania się węzłów i poszczególnych ich składników pod obciążeniem w celu ustalenia głównych źródeł deformacji oraz formy zniszczenia, określenie głównych parametrów węzłów: sztywności początkowej, nośności granicznej i osiągalnej zdolności do obrotu oraz wyznaczenie zależności  $M-\phi$  [8]. Zagadnieniem poddanym szczególnej analizie będzie wpływ zastosowania cienkich blach czołowych na nośność i odkształcalność węzłów stalowych i zespolonych. Problematyka ta została wstępnie podjęta w najnowszych badaniach Alana R. Kempa z University of the Witwatersrand w Johannesburgu, RPA [6].

## 2.1. Opis elementów próbnych i stanowiska badawczego

Planuje się badanie elementów próbnych o układzie krzyżowym (dwustronnym), w skład których wchodzi słup stalowy oraz rygiel zespolony z płytą stropową betonowaną na blachach fałdowych [2]. Widok stanowiska badawczego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Dwustronny układ do badań węzłów zespolonych w połączeniu na blachę czołową  
Fig. 1. Arrangement of double sided joint test with endplate connection

Stałymi parametrami elementów są: przekrój słupa (HEB 240), przekrój belki (IPE 330), blacha fałdowa (T 55x188 o gr. 1,0 mm), grubość płyty stropowej (120 mm), śruby (M20 kl. 10.9) oraz zapewniające zespolenie łączniki ścinane (sworznie główkowe  $\varnothing$  19 mm) spawane do belek. Natomiast do parametrów zmiennych należą:

- wysokość blachy czołowej,
- grubość blachy czołowej,
- liczba śrub mocujących w zależności od wysokości blachy czołowej,
- procent zbrojenia podłużnego, potrzebnego w fazie zespolenia do uzyskania wzrostu sztywności i nośności węzła zespolonego.

Przewidziano zbadanie 12 elementów próbnych (4 stalowych ES1+ES4 oraz 8 elementów zespolonych EZ1+EZ8). Zestawienie parametrów próbek przedstawiono w tablicy 1.



Tablica 1

## Zestawienie elementów próbnych

Lp.	Nazwa próbki	Parametry zmienne			
		Rodzaj blachy czołowej	Liczba śrub	Grubość blachy czołowej	Stopień zbrojenia
1	ES1	wystająca	6	t = 12 mm	brak
2	ES2	wystająca	6	t = 10 mm	brak
3	ES3	wystająca	6	t = 8 mm	brak
4	ES4	zlicowana	4	t = 12 mm	brak
5	EZ1	wystająca	6	t = 12 mm	1,15 %
6	EZ2	wystająca	6	t = 10 mm	1,15 %
7	EZ3	wystająca	6	t = 8 mm	1,15 %
8	EZ4	wystająca	6	t = 12 mm	0,6 %
9	EZ5	wystająca	6	t = 10 mm	0,6 %
10	EZ6	wystająca	6	t = 8 mm	0,6 %
11	EZ7	zlicowana	4	t = 12 mm	1,15 %
12	EZ8	zlicowana	4	t = 12 mm	0,6 %

## 2.2. Metodyka badań

Badania będą realizowane przy wykorzystaniu zespołu prasy czterosiłowej w laboratorium IKB WIL PW. Elementy będą symetrycznie obciążane dwiema siłami o jednakowej wartości. Przewidywana maksymalna nośność węzła wynosi ok. 180 kNm (dla elementu EZ1: połączenie na blachę czołową wystającą, przy największej grubości blachy czołowej, liczbie śrub i stopniu zbrojenia).

Przyjęto program obciążenia, który umożliwi symulację warunków obciążenia zbliżonych do rzeczywistych (z cyklicznym obciążaniem i odciążaniem). Spełnienie założenia statycznej zmienności obciążeń powinno być osiągnięte w wyniku zachowania stałej i dostatecznie wolnej szybkości zmian obciążenia [4].

W trakcie badań wykonane będą następujące pomiary:

- pomiary przemieszczeń za pomocą czujników indukcyjnych,
- pomiary kątów obrotu węzłów za pomocą odpowiednio rozstawionych zestawów czujników indukcyjnych,
- pomiary naprężeń za pomocą tensometrów elektrooporowych umieszczonych na węzłach stalowych i prętach zbrojeniowych.

Ponadto wykonane będą badania cech stali użytych na elementy próbne:

- wytrzymałość na rozciąganie  $f_u$ ,
- granica plastyczności  $f_y$ ,
- wydłużalność A5.

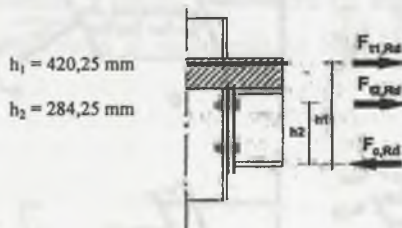
### 3. Model analityczny

Model analityczny omawianego wyżej typu węzła będzie się opierał na metodzie składnikowej zawartej w normach EC3 i EC4. Metoda ta jest algorytmem pozwalającym na wyznaczenie podstawowych cech podatnościowych węzłów stalowych i zespolonych: nośności obliczeniowej i sztywności początkowej. W metodzie składnikowej węzeł jest traktowany jako zestaw pojedynczych, podstawowych składników. Składnik może być poddany rozciąganiu, ściskaniu lub ścinaniu i wykazuje odpowiednie odkształcenia. Zastosowanie metody składnikowej można podzielić na trzy etapy: identyfikacja wszystkich składników oddziałujących na węzeł, określenie charakterystyk składników, złożenie poszczególnych składników w celu otrzymania globalnej charakterystyki węzła [5]. Generalna zasada obliczania nośności i sztywności węzłów zespolonych jest taka sama jak węzłów stalowych. Pręty zbrojeniowe płyty betonowej traktowane są jako dodatkowy najwyższy szereg śrub [1, 9].

Dla przykładu, w dalszej części pracy zostanie przeprowadzona analiza nośności i sztywności węzła zespolonego w połączeniu na blachę czołową zlicowaną, z jednym rzędem śrub w strefie rozciąganej (element EZ7 – tablica 1).

#### 3.1. Nośność węzła

Do obliczenia nośności przyjęto układ sił w węźle wg rys. 2.



Rys. 2. Rozkład sił wewnętrznych w węźle  
Fig. 2. The distribution of internal forces in a joint

Nośność węzła oblicza się ze wzoru (1):

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r F_{r,Rd} \quad (1)$$

gdzie:

$F_{r,Rd}$  – efektywna nośność r-tego szeregu śrub (włączając pręty zbrojeniowe),

$h_r$  – odległość od środka ściskanej półki belki do r-tego szeregu śrub (rys. 2).

Efektywna nośność poszczególnych szeregów śrub jest najmniejszą z wartości nośności składników ( $F_{L,R}$ ). W tabelicy 2 przedstawiono zestawienie składników dwustronnego węzła z blachą czołową zlicowaną wraz z obliczonymi wartościami ich nośności.

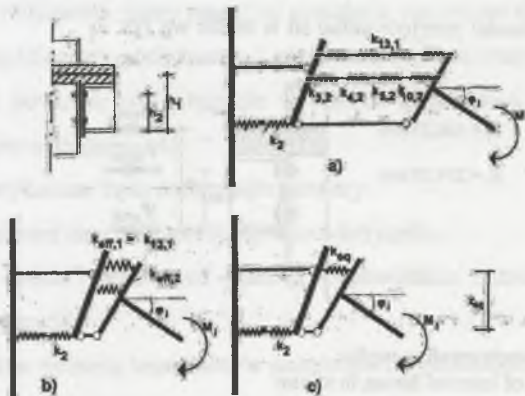
Tabela 2

Zestawienie nośności składników węzła

Strefa węzła	Składniki	Oznaczenie nośności składnika	Obliczona wartość
rozciągana	blacha czołowa na zginanie (wg EC3)	$F_{t,p,R}$	212,6 kN = $F_{L,R}$
	półka słupa na zginanie (wg EC3)	$F_{t,fc,R}$	319,5 kN
	środek słupa na rozciąganie (wg EC3)	$F_{t,wc,R}$	342,6 kN
	środek belki na rozciąganie (wg EC3)	$F_{t,wb,R}$	297,3 kN
	pręty zbrojeniowe na rozciąganie (wg EC4)	$F_{tr,s,R}$	191,6 kN
ściskana	półka i środek belki na ściskanie (wg EC3)	$F_{c,fb,R}$	526,1 kN
	środek słupa na ściskanie (wg EC3)	$F_{c,wc,R}$	506,8 kN

Wartość efektywnej nośności  $F_{t1,Rd} = F_{tr,s,R} = 191,6$  kN, natomiast  $F_{t2,Rd} = F_{L,R} = 212,6$  kN.

Po podstawieniu do wzoru (1) nośność obliczeniowa rozpatrywanego węzła zespolonego  $M_{j,Rd} = 141$  kNm. Spełnione są również warunki nieprzekroczenia nośności poszczególnych składników strefy ściskanej przez wartość nośności strefy rozciąganej  $F_{tr,R} = F_{tr,s,R} + F_{L,R}$ .



Rys. 3. Model sprężynowy dwustronnego węzła w połączeniu na blachę czołową z dwoma rozciąganymi szeregami śrub (włączając pręty zbrojeniowe)

Fig. 3. Spring model for a double sided end plated joint with two bolt rows in tension (including reinforcement)



### 3.2. Sztywność węzła

Sztywność początkową węzła określono w oparciu o model sprężynowy (rys.3). Wykaz składników uwzględnianych w obliczeniach analizowanego węzła zamieszczono w tabelicy 3.

Tabela 3

Składniki węzła zespolonego z blachą czołową do obliczania sztywności

Lokalizacja składników	Składniki $k_i$	obliczona wartość $k_i$	wartość $k_{eff}$	wartość $k_{eq}$
1 szereg (zbrojenie)	podłużne pręty zbrojeniowe na rozciąganie $k_{13}$ wg EC4 (po uwzględnieniu współczynnika redukcyjnego $k_r$ opisującego wpływ poślizgu płyty względem belki na sztywność węzła)	0,93 mm	0,93 mm	3,14 mm
2 szereg (śruby)	środek słupa na rozciąganie $k_3$ wg EC3	4,95 mm	2,33 mm	
	pasy słupa na zginanie $k_4$ wg EC3	48,75 mm		
	blacha czołowa na zginanie $k_5$ wg EC3	12,80 mm		
	śruby na rozciąganie $k_{10}$ wg EC3	7,92 mm		

Sztywność analizowanego węzła oblicza się ze wzoru (2)[1]:

$$S_{j,ini} = E_a z_{eq}^2 k_{eq} \quad (2)$$

gdzie:

$E_a$  – moduł sprężystości stali konstrukcyjnej,

$k_{eq}$  – równoważny współczynnik sztywności [3],

$z_{eq}$  – zastępcze ramię sił wewnętrznych w złączu [3],

$k_{eff,r}$  – efektywny współczynnik sztywności w r-tym szeregu [3].

Po podstawieniu wartości z tabelicy 3 do wzoru (2) otrzymuje się wartość sztywności początkowej węzła zespolonego w połączeniu na blachę czołową zlicowaną o wartości  $S_{j,ini} = 72 \text{ kNm/mrad}$ .

## 4. Podsumowanie

Rezultaty przeprowadzonych badań i analizy parametrycznej posłużą do opracowania zaawansowanego modelu obliczeniowego, uwzględniającego zmienność parametrów połączenia stalowego oraz stopień zbrojenia płyty stropowej. Na nośność i odkształcalność węzłów zespolonych z cienkimi blachami czołowymi mają wpływ: wzmocnienie stali i oddziaływanie w płaszczyźnie blachy czołowej (membrane action). Zaplanowane badania pozwolą na sformułowanie zaleceń i uwzględnienie tych zjawisk w praktyce.

## LITERATURA

1. Anderson D.: Composite Steel-Concrete Joints in Braced Frames for Buildings. COST C1, Brussels, Luxembourg 1996.
2. Brown N.D., Anderson D.: Structural properties of composite major axis end plate connections. *Journal of Constructional Steel Research* 57 (2001), 327-349.
3. Eurocode 3 revised Annex J, CENT/TC250/SC3, 1997.
4. Giżejowski M.: Modele obliczeniowe stalowych ram płaskich z węzłami podatnymi. Rozprawa habilitacyjna, Politechnika Warszawska, 2001.
5. Giżejowski M., Barcewicz W., Żółtowski W.: On modeling of steel-concrete composite joints. International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, Budapest Hungary, September 2002.
6. Kemp A.R., Nethercot D.A.: Required and available rotations in continuous composite beams with semi-rigid connections. *Journal of Constructional Steel Research* 57 (2001), 357-400.
7. Kozłowski A.: Analiza parametryczna nośności i sztywności pewnego typu węzła zespolonego. Konferencja Naukowa "Zagadnienia stanów granicznych konstrukcji stalowych", Kraków, kwiecień 2003, 155 – 162.
8. Kozłowski A.: Kształtowanie szkieletów stalowych i zespolonych o węzłach półsztywnych. Rozprawa habilitacyjna, Politechnika Warszawska, 2000.
9. Kozłowski A.: Projektowanie węzłów podatnych konstrukcji zespolonych według EC4. VII Konferencja Naukowa "Połączenia i węzły w konstrukcjach metalowych", Olsztyn – Łańsk, październik 2003, 41 – 52.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Antoni Biegus