

## **Nośność węzłów kratownicowych typu N z rur prostokątnych o połączeniach w formie klucz-zamek**

**Jerzy K. Szlendak<sup>1</sup>, Piotr L. Oponowicz<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, e-mail: szlendak@stal-projekt.com.pl*

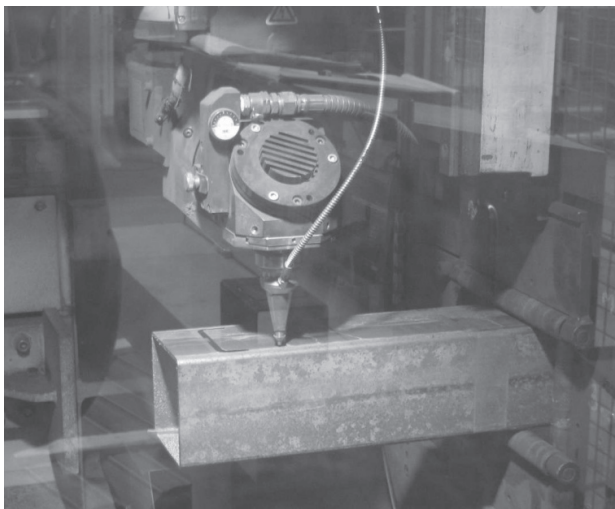
<sup>2</sup> *Katedra Konstrukcji Budowlanych, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka, e-mail: oponowicz@aioni.pl*

**Streszczenie:** W referacie zamieszczono wyniki sześciu badań doświadczalnych nośności węzłów kratownicowych typu N z kształtowników RHS, wykonanymi w technologii bezspoinowej, w formie klucz-zamek. Przedstawiono wykresy siła – przemieszczenie, oddzielnie dla słupków i krzyżulców, dla węzłów o różnej, reprezentatywnej dla nich geometrii. Porównano wyniki badań eksperymentalnych z wynikami uzyskanymi numerycznie. Sformułowano wstępne wnioski dotyczące przydatności opracowanego modelu numerycznego.

**Słowa kluczowe:** Kształtowniki zamknięte, węzły kratownicowe typu N, połączenia bezspoinowe typu plug & play, forma klucz-zamek

### **1. Wprowadzenie**

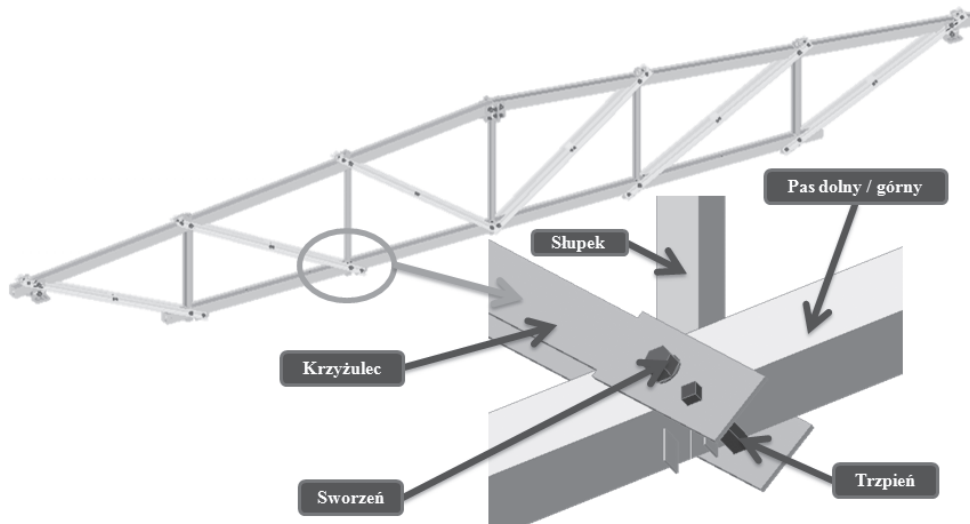
Nowoczesna technologia cięcia metali za pomocą lasera przemysłowego 3D, rysunek 1, umożliwia łatwe wycinanie w elementach stalowych, tu kształtownikach zamkniętych RHS, otworów o dowolnych, często bardzo złożonych kształtach, z dużą dokładnością.



Rys. 1. Wycinanie części zamka (do osadzenia słupka) w pasie kratownicy za pomocą lasera 3D.

Było to inspiracją projektu rozwojowego [1], w którym zbadano zachowanie bezspoinowych połączeń klucz-zamek, gdzie siły byłyby przenoszone jedynie przez docisk i ścinanie stykających się z sobą elementów klucza (skratowanie) i zamka (otwór w pasie kratownicy). W tym celu w pasie kratownicy wykonuje się „zamek” (gniazdo), które umożliwia włożenie do niego „klucza” słupka. Podwójny krzyżulec, obejmujący pas, jest

zamocowany do pasa za pomocą sworznia, włożonego przez wykonany w ściankach bocznych pasa i prętach krzyżulca otwór. Schemat kratownicy i węzła N pokazano na rysunku 2. Pas i słupki wykonano z kształtowników RHS, a jako krzyżulec zastosowano płaskowniki obustronnie obejmujące pas, ze spinającą je w środku długości przewiązką z ceownika. Z uwagi na znaczne siły w rozciągającym krzyżulcu, które szybko prowadzą do owalizacji otworu w kształtowniku RHS pasa, dodatkowo wprowadzono trzpień usztywniający. Trzpień ten w znacznym stopniu ogranicza owalizację otworu w ściankach bocznych pasa, gdyż obciążenie ze ścianek otworu przenosi on na docisk do ścianki pasa, o dużo większej powierzchni docisku. Połączenie tego typu eliminuje konieczność użycia spoin w węźle. W publikacjach autorów [2 i 3] podano wyniki badań doświadczalnych i oszacowanie teoretyczne nośności węzłów kratownicowych typu T z kształtowników RHS, wykonanymi w technologii bezspoinowej, w formie klucz-zamek [2], oraz porównano nośność teoretyczną, obliczoną przy użyciu opracowanego modelu linii załomów z badaniami eksperymentalnymi [3].



Rys. 2. Schemat wyselekcjonowanego węzła typu N z kratownicy bezspoinowej.

Konstrukcje wykonane w technologii nie wymagającej spawania z powodzeniem mogą być wykorzystywane w budownictwie np. dla MSP, na obiekty produkcyjne, magazynowe, wiaty itp. Łatwość przewiezienia tego typu konstrukcji w częściach oraz możliwość wykonania niezwiązanego trwale z gruntem posadowienie pozwala na wznoszenie hali tego typu jako stałej lub tymczasowej. Z uwagi na brak połączeń na stałe poszczególnych elementów między sobą można budynek zdemontować i ponownie wznieść w innym miejscu.

## 2. Modelowanie numeryczne i badania doświadczalne węzłów

### 2.1. Zakres badań

Osiem węzłów kratownicowych typu N w skali naturalnej, poddano badaniom niszczącym. Z tych badań wyselekcjonowano sześć węzłów (WTLN2-WTLN7), dla tych stworzono modele numeryczne. W Tabeli 1 zamieszczono geometrię węzłów próbnych i własności mechaniczne stali.

Zastosowano oznaczenia:

$b_0, h_0, t_0$  – szerokość, wysokość i grubość ścianki kształtownika pasa

$b_n, h_n, t_n$  – szerokość, wysokość i grubość ścianki kształtownika słupka

$f_{yo}$  – granica plastyczności pasa

$\beta = b_n/b_0, \eta = h_n/b_0$  – bezwymiarowa szerokość, wysokość kształtownika słupka

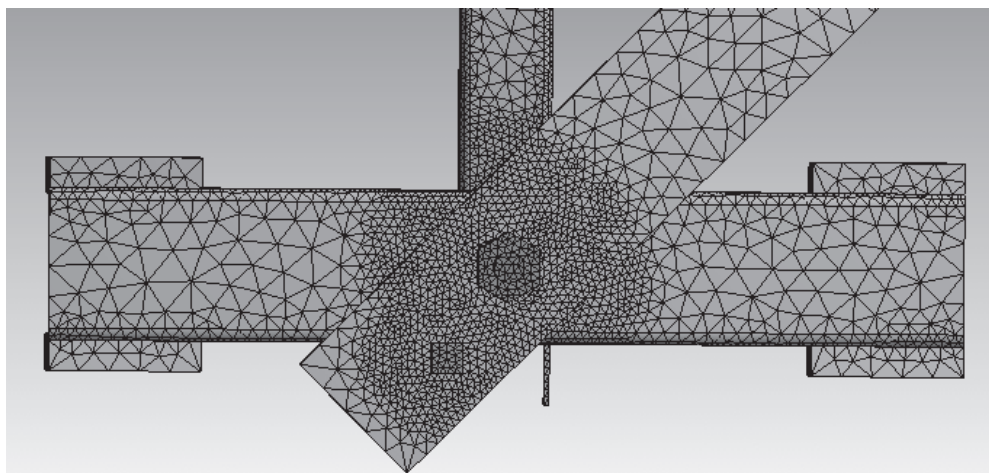
$\lambda_0 = b_0/t_0$  – smukłość ścianki kształtownika pasa

Tabela 1. Właściwości geometryczne i mechaniczne przebadanych próbek

| Nr próbki | Wymiary geometryczne   |                           |  |  | Granica<br>plastyczn<br>ości | parametry |        |                        |
|-----------|------------------------|---------------------------|--|--|------------------------------|-----------|--------|------------------------|
|           | Pas<br>boxho<br><br>mm | Słupek<br>bnxhn<br><br>mm | Grubość<br>ścianki<br>pasa<br>t0<br>mm | Grubość<br>ścianki<br>słupka<br>tn<br>mm | pas<br>fy0<br>MPa            | $\beta$   | $\eta$ | $\lambda_0 =$<br>b0/t0 |
| WTLN2     | 100x100                | 60x60                     | 4.0                                    | 3.0                                      | 334                          | 0.60      | 0.60   | 25.0                   |
| WTLN3     | 100x100                | 40x40                     | 5.0                                    | 3.0                                      | 335                          | 0.40      | 0.40   | 20.0                   |
| WTLN4     | 100x100                | 80x80                     | 3.0                                    | 3.0                                      | 335                          | 0.80      | 0.80   | 33.3                   |
| WTLN5     | 100x100                | 60x60                     | 3.0                                    | 3.0                                      | 335                          | 0.60      | 0.60   | 33.3                   |
| WTLN6     | 100x100                | 40x40                     | 3.0                                    | 3.0                                      | 335                          | 0.40      | 0.40   | 33.3                   |
| WTLN7     | 100x100                | 60x60                     | 5.0                                    | 3.0                                      | 335                          | 0.60      | 0.60   | 20.0                   |

## 2.2. Model numeryczny

W modelu numerycznym odwzorowano sposób obciążeń zastosowanych podczas badań eksperymentalnych. Zastosowano rozmiar siatki o oczkach 20mm - w strefach drugorzędnych, a w miejscach potencjalnych maksymalnych deformacji zagęszczono siatki do 5mm. W modelu użyto elementów skończonych typu "tetrahedrons" z węzłami pośrednimi. Nie uwzględniono luzów offsetowych (0,3mm) oraz niedokładności przy produkcji profili stalowych, między innymi szwu na rurach.



Rys. 3. Model obliczeniowy węzła – zastosowana siatka

Do obliczeń, korzystając z symetrii, zamodelowano połowę węzła. W modelu obliczeniowym wykonanym w programie ANSYS, przyjęto następujące założenia:

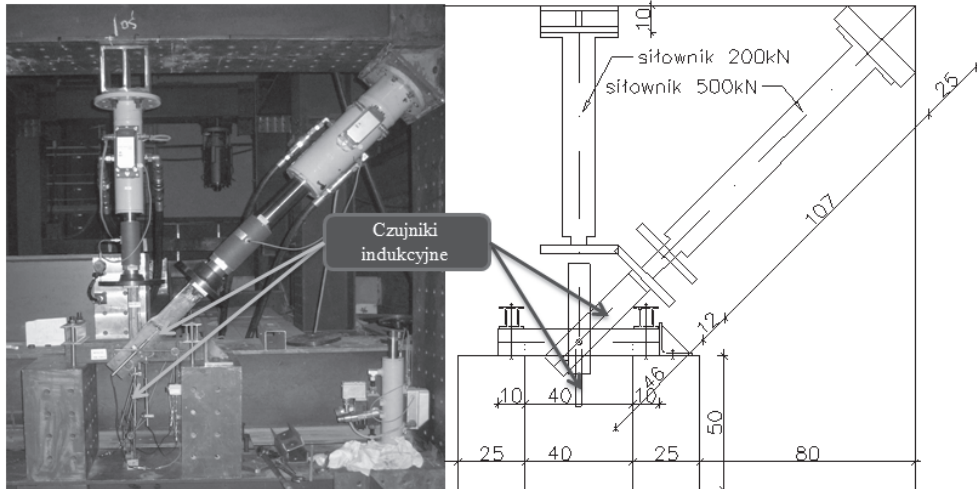
- oparcie słupka na półkach pasa został zamodelowany jako kontakt jednokierunkowy występuje tylko siła docisku (brak rozciągania), dodatkowo w niektórych węzłach zastosowano offset o wielkości 0,05mm w celu uwzględnienia niedoskonałości wykonania próbek
- kontakt między krzyżulcem a pasem zamodelowano jako kontakt jednokierunkowy występuje jedynie siła docisku (brak rozciągania)
- kontakt między śrubą (sworzniem) a pasem zamodelowano jako kontakt jednokierunkowy występuje jedynie siła docisku (brak rozciągania)
- kontakt między śrubą (sworzniem) a krzyżulcem zamodelowano jako kontakt jednokierunkowy występuje jedynie siła docisku (brak rozciągania)
- kontakt pomiędzy półką dolną pasa a trzpieniem został zamodelowany kontakt tarciovy ze współczynnikiem 0,3

- kontakt pomiędzy krzyżulcem a nakrętką został zamodelowany jako kontakt tarcowy ze współczynnikiem 0,3
- kontakt pomiędzy krzyżulcem a trzpieniem został zamodelowany jako kontakt tarcowy ze współczynnikiem 0,3

Przyjęty model obliczeniowy w znacznym stopniu odzwierciedla realną pracę węzła, przy racjonalnym czasie obliczeń numerycznych.

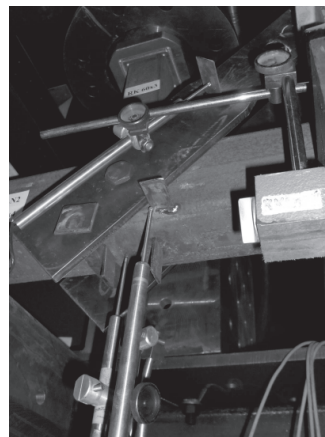
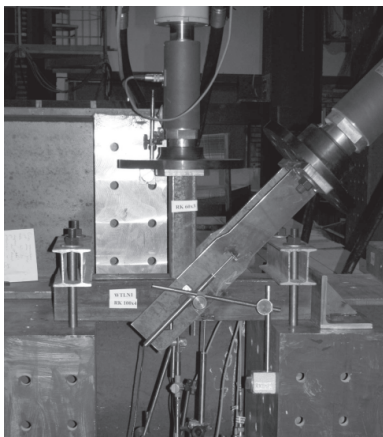
### 2.3. Badania eksperymentalne

Badania zostały wykonane na Politechnice Białostockiej w latach 2009-2012 w ramach grantu PR/WBiIS/1/09/NCBR, na zaprojektowanym do tego celu stanowisku badawczym, rysunek 4.



Rys. 4. Stanowisko badawcze: widok i schemat

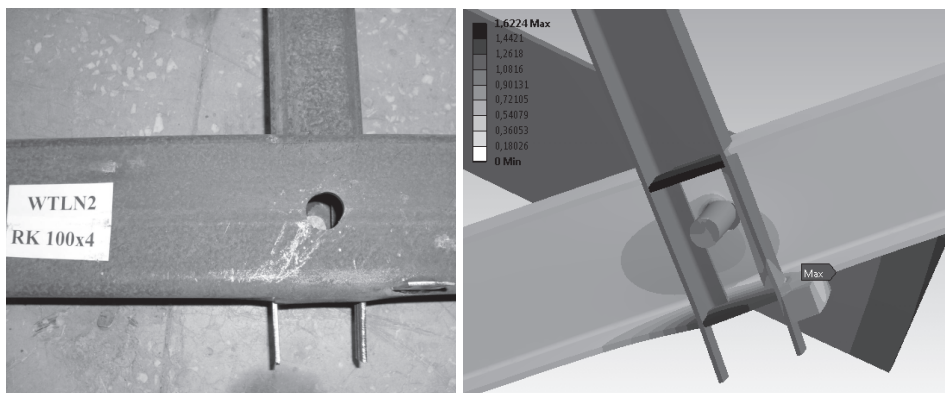
Badany węzeł poddano programowi obciążania i odciążania za pomocą dwóch siłowników sterowanych komputerowo. Przez pierwsze dwa kroki obciążenia siła wzrastała. Kolejnym krokiem jest odciążenie do wartości pierwszego kroku. Każdy kolejny krok obciążenia to wzrost obciążenia, a następnie odciążenie do wartości pierwszego kroku.



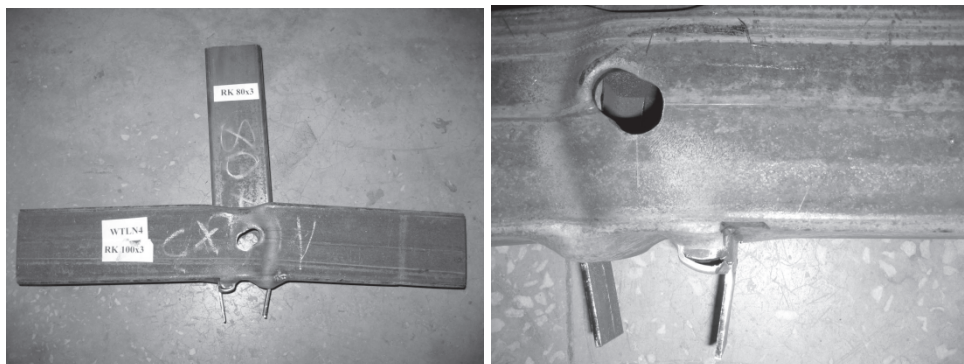
Rys. 5 i 6. Węzeł WTLN2 ( $\beta = 0,6$ ,  $\lambda_0 = 25$ ) podczas badań.

Węzeł został tak zaprojektowany aby zniszczenie następowało poprzez osiągnięcie nośności półki (górnej / dolnej) rury pasa lub w miejscu łączenia krzyżulca z pasem.

Krzyżulec był tak skonstruowany aby nie był przedwcześnie zniszczony (z blachy o grubości 10mm).



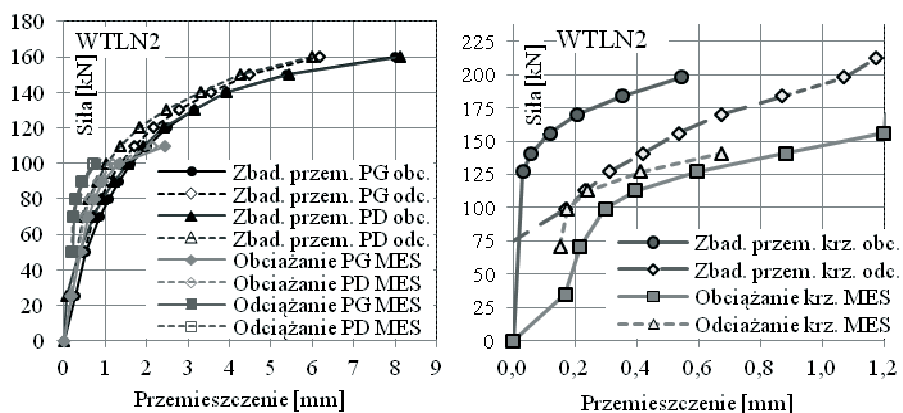
Rys. 7 i 8 Węzeł WTLN2 ( $\beta = 0,6$ ,  $\lambda_0 = 25$ ) po badaniu; Model numeryczny - przemieszczenia



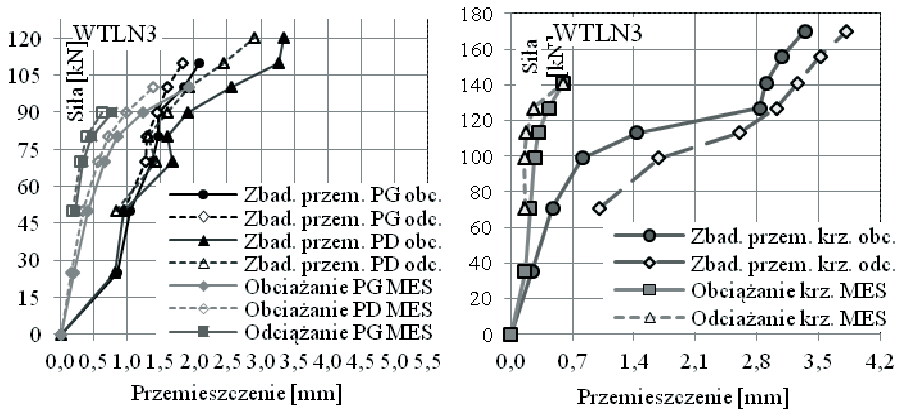
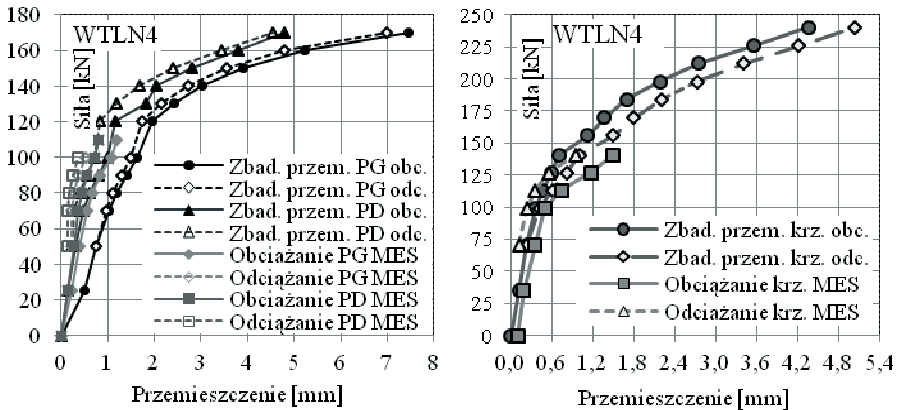
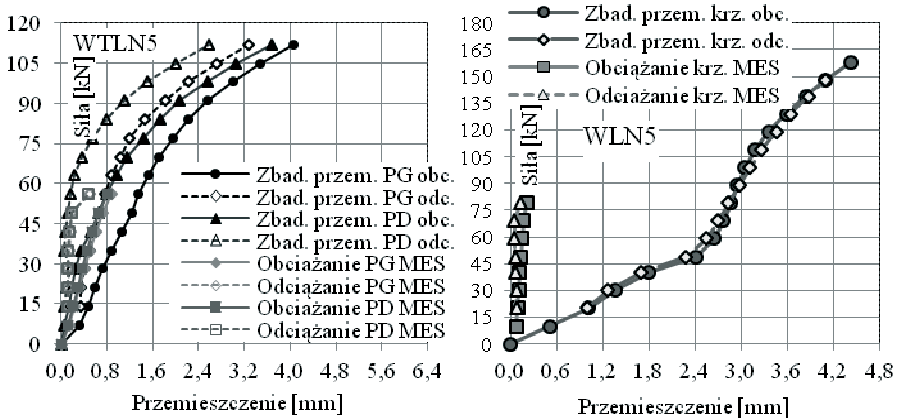
Rys. 9 i 10. Węzeł WTLN4 ( $\beta = 0,8$ ,  $\lambda_0 = 33,3$ ) po badaniu: widok i detale

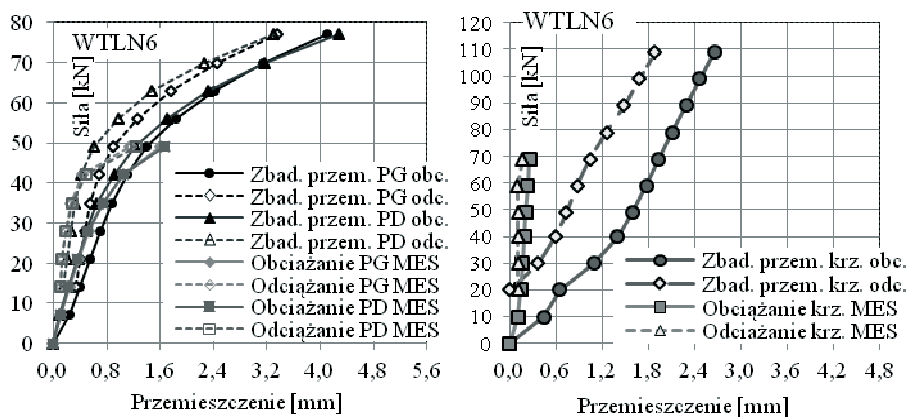
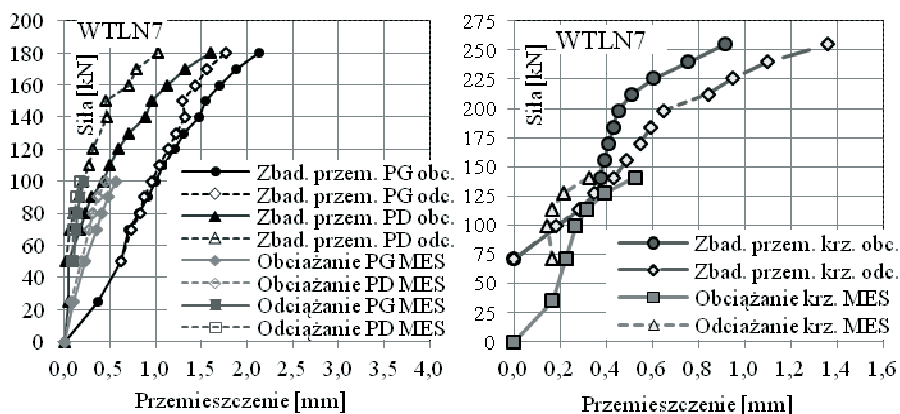
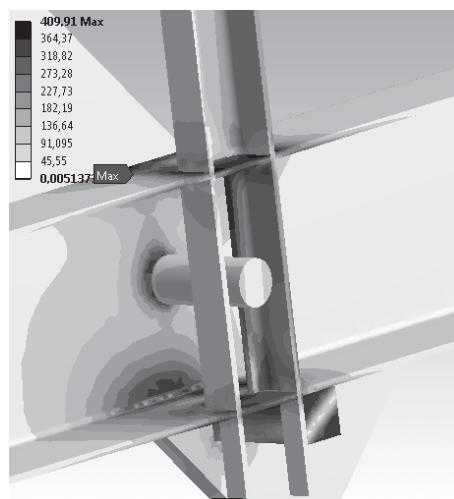
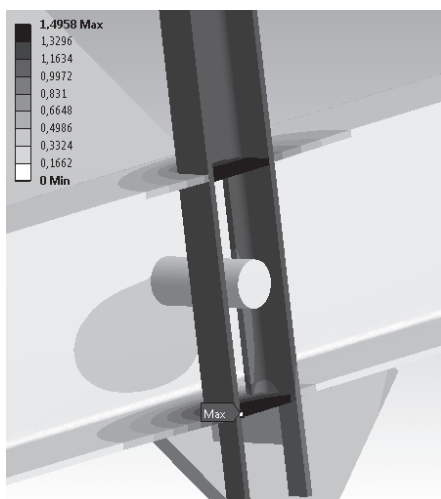
### 3. Porównanie wyników numerycznych i eksperymentalnych

Użyte skróty na wykresach: PD - pas dolny; PG- pas górny;



Rys. 11 i 12. Wykresy siła - przemieszczenie węzła WTLN2 ( $\beta = 0,6$ ) odpowiednio: słupek, krzyżulec

Rys. 13 i 14. Wykresy siła - przemieszczenie węzła WTLN 3 ( $\beta = 0,4$ ) odpowiednio: słup, krzyżulecRys. 15 i 16. Wykresy siła - przemieszczenie węzła WTLN 4 ( $\beta = 0,8$ ) odpowiednio: słup, krzyżulecRys. 17 i 18. Wykresy siła - przemieszczenie węzła WTLN 5 ( $\beta = 0,6$ ) odpowiednio: słup, krzyżulec

Rys. 19 i 20. Wykresy siła - przemieszczenie węzła WTLN 6 ( $\beta = 0,4$ ) odpowiednio: słupka, krzyżulecRys. 21 i 22. Wykresy siła - przemieszczenie węzła WTLN 7 ( $\beta = 0,6$ ) odpowiednio: słupka, krzyżulecRys. 23 i 24. Odpowiednio deformacje i naprężenia dla węzła WTLN 6 ( $\beta = 0,4$ )

#### 4. Wnioski

- Możliwa jest całkowita eliminacja spawania w węźle w formie "klucz-zamek"
- Nośności słupka w węzłach RHS typu N jest zbliżona do nośności węzłów kratownicowych RHS typu T;
- Analiza numeryczna potwierdziła swoją przydatność do opisu zachowania się tego typu połączeń. Rozbieżności otrzymanych wyników numerycznych, w stosunku do tych uzyskanych z badań doświadczalnych, w głównej mierze wynikają z początkowych poślizgów powstałych z powodu: luzów wstępnych, niedokładności wykonania próbek oraz zastosowania offsetów w próbkach;
- Zaproponowany model numeryczny może być stosowany do szacowania nośności węzła i krzywych siła - przemieszczenie (szacowania sztywności) takich węzłów. Jednak z uwagi na imperfekcje realnych konstrukcji w porównaniu do modelu numerycznego, zaleca się wprowadzenie współczynnika  $\square M5=1,25$ ;
- Z uwagi na możliwą automatyzację procesów produkcyjnych elementów, łatwość ich przewozu i scalania, wytwarzanie konstrukcji tego typu może być bardziej ekonomiczne niż porównywalnych konstrukcji spawanych.

#### Literatura

- 1 Szlendak J.K. Kratownice i ramownice stalowe o węzłach kształtowanych laserowo w formie klucz-zamek nie wymagających spawania. Grant NCBR N R04 0008 06, Politechnika Białostocka, 2009-2012
- 2 Szlendak J.K., P.L. Oponowicz P.L. Behaviour of one and double side non-welded T RHS compression truss joints, 7th International Conference on Steel & Aluminium Structures, Kuching, Sarawak, Malaysia, 13th –15th July 2011.
- 3 Szlendak J.K., P.L. Oponowicz P.L. Experimental tests and numerical models of one and double side non-welded T RHS truss joints, 11th International Conference "Modern Building Materials, Structures and Technique, Vilnius, 16-17 May 2013.

### Resistance of truss N shape joints made with steel RHS in plug & play connections

Jerzy K. Szlendak<sup>1</sup>, Piotr L. Oponowicz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Civil & Environmental Engineering, Bialystok University of Technology, Bialystok, Poland, e-mail: szlendak@stal-projekt.com.pl

<sup>2</sup> Department of Civil & Environmental Engineering, Bialystok University of Technology, Bialystok, Poland, e-mail: oponowicz@aioni.pl

**Abstract:** Research on resistance of truss N shape RHS joints is presented. Experimental evidence of such joint behaviour tested in natural scale is described. Geometry and material properties of the tested six connections are given. For each specimen axial-deflection curves are presented. The comparison between numerical models by ANSYS software and experimental results is shown. Finally, some important conclusions are given.

**Keywords:** Steel truss N shape RHS joints, non-welded plug & play connections, numerical estimation of resistance by ANSYS software, tests of six joints in natural scale