

## **STRESZCZENIE.**

### **Stany graniczne nośności wielośrubowych styków doczołowych dźwigarów spawanych**

Celem pracy jest zbadanie rozkładu sił wewnętrznych w stanie granicznym nośności, w zginanych wielośrubowych stykach doczołowych dźwigarów spawanych oraz zweryfikowanie zasad ich projektowania metodą składnikową. Jej przedmiotem są doczołowe styki belek o przekroju dwuteowym z wieloma szeregami śrub i liczbą śrub w szeregach przy pasie rozciągającym nie mniejszą od dwóch, z blachą czołową wystającą lub wpuszczoną, o modelu zniszczenia 1, 2 i 3 według EN 1993-1-8. Zakres pracy obejmuje:

- przegląd i analizę dotychczasowych wyników badań eksperymentalnych i numerycznych, metod projektowania oraz zakresu stosowania doczołowych połączeń śrubowych w praktyce,
- badania eksperymentalne własne 4 styków doczołowych dźwigarów spawanych o wysokości przekroju dwuteowego 1500 mm i 1000 mm, z sześcioma i jedenastoma szeregami śrub M20 kl.10.9 HV, z liczbą śrub w szeregach przylegających do pasa rozciąganego 2, 4 i 6,
- walidację modeli MES tych styków na podstawie wyników badań eksperymentalnych własnych,
- analizę parametryczną 55 styków (przy użyciu zwalidowanych własnych modeli MES) uwzględniającą zróżnicowanie pod względem: modeli zniszczenia (grubości i klasy wytrzymałości stali blach czołowych), wystającej i wpuszczonej blachy czołowej, liczby szeregów śrub, podparcia blachy czołowej żebrami, oraz wstępnego sprężenia.

Za pomocą analizy MES wyznaczono, w stanach granicznych nośności styków, nie tylko wartości sił w śrubach, ale również wartości efektywne sił rozciągających, przenoszone przez poszczególne króćce. Uzyskano więc możliwość bezpośredniego porównywania wartości sił wyznaczonych w analizie MES z tymi, które uzyskano w wyniku obliczeń metodą składnikową. Na podstawie obliczeń stwierdzono, że ocena stanu granicznego nośności wielośrubowych styków doczołowych o modelu zniszczenia 1, przeprowadzona metodą składnikową wg EN 1993-1-8, zapewnia ich bezpieczeństwo. Metoda ta nie zapewnia jednak wymaganej rezerwy bezpieczeństwa styków o modelach zniszczenia 2 i 3, z liczbą wewnętrznych szeregów śrub większą niż 2. W wyniku przeprowadzonych analiz ustalono, że nośność graniczna połączeń zginanych o modelu zniszczenia 2 lub 3 jest zdeterminowana osiągnięciem stanu granicznego na rozciąganie tylko jednego króćca śrubowego - najbardziej sztywnego i/lub położonego najdalej od pasa ściskanego. Rozkład sił między szeregami śrub i między śrubami w szeregach, w stanie granicznym nośności styku, nie jest proporcjonalny do nośności na rozciąganie wyodrębnionych króćców. Osiągnięcie stanu granicznego nośności w takich

stykach, jednocześnie w wielu szeregach śrub, jak to przyjęto w metodzie składnikowej, nie jest możliwe. Nie są również właściwe kryteria i sposób redukcji tych nośności wg prEN 1993-1-8/B.1.2.2(9).

W wyniku własnych analiz zaproponowano dwie metody obliczeń dotyczące zakresu, w którym metoda składnikowa nie zapewnia wymaganego bezpieczeństwa.

Pierwsza propozycja - metoda MCM (Modified Component Method) polega na zastosowaniu wyznaczonych empirycznie współczynników redukujących nośność obliczeniową króćców w szeregach 1÷3, wyznaczoną wg EN 1993-1-8, oraz redukcji liniowej sił w szeregach dalszych.

Druga propozycja - metoda SRM (Stiffness and Rotation Method) polega na przyjęciu wartości sił w rozpatrywanych króćcach, zależnie od sztywności i odległości od osi pasa ściskanego, w odniesieniu do nośności obliczeniowej króćca krytycznego wyznaczonej wg EN 1993-1-8.

W stykach z liczbą śrub, w szeregach przy pasie rozciągającym, większą od dwóch, przyjęto model obliczeniowy złożony z podstawowego styku belki z dwoma śrubami w każdym szeregu (z pominięciem pozostałych śrub) i z wyodrębnionych, wcześniej pominiętych, króćców pasa rozciąganego.

Na zakończenie rozprawy przedstawiono wnioski z przeprowadzonych analiz własnych, podano zalecenia projektowe oraz sformułowano propozycje dotyczące dalszych badań.

## SUMMARY

### **Ultimate limit states of multi bolts end-plate splices of the welded I girders.**

The aim of the dissertation is to investigate the distribution of internal forces in the ultimate limit state in multi bolt end-plate splices of the welded I girders and to verify the principles of their design using the component method. The subject of the dissertation are end-plate beam splices with multiple bolt rows and multiple bolts per row (number of bolts in rows near the tension flange not lesser than 2), with flush and extended end-plates, with a failure mode defined according to EN 1993-1-8, as 1, 2 and 3. The scope of the dissertation includes:

- review and analysis of existing results of experimental and numerical research, design methods and the scope of application of end-plate splices in practice,
- experimental tests of 4 extended end-plate welded girder splices with the height of the I-section 1500 and 1000 mm, with M20, class 10.9 HV bolts, with 11 and 6 bolt rows, with the number of bolts in rows adjacent to the tension chord equal to 2, 4 and 6,
- validation of FEM models of these splices based on the results of the own experimental research,
- parametric analysis using validated FEM models – 55 splices were investigated with the following variable parameters: failure modes (thickness and steel grade of end-plates), flush or extended end-plates, number of bolt rows, additional ribs supporting end-plates, and pretension of bolts.

Using FEM analysis, both the bolt forces and the effective tensile forces transmitted by T-stubs in the ultimate limit state of the splices were determined. Thus, it was possible to directly compare the values of forces obtained in FEM analysis with the results of the component method. As a result of own calculations, it was found, that the evaluation of the ultimate limit state of multi-bolt splices with failure mode 1 using component method according to EN 1993-1-8 ensures their safety. However, this method does not provide required safety margin for splices with failure modes 2 and 3 with number of internal bolt rows greater than 2. It was found that the ultimate load bearing capacity of splices with failure mode 2 or 3 is determined by reaching the tensile ultimate limit state of only one T-stub - the one that is the stiffest and/or farthest from the compression flange. In the ultimate limit state, the distribution of forces between the bolt rows and between bolts in each row is not proportional to the tensile capacity of each T-stub. Therefore, in such joints it is not possible to reach the ultimate limit state simultaneously in many bolt rows, as it is assumed

in the component method. Moreover, the criteria and methods for reducing the ultimate load capacity of bolt rows proposed in prEN 1993-1-8 / B.1.2.2 (9) are also not appropriate.

For the extent to which the component method does not provide the required safety margin, two own calculation methods have been proposed.

In the first method – MCM (Modified Component Method), a reduction of the load bearing capacity of T-stubs (determined according to EN 1993-1-8) in bolt rows 1 ÷ 3 and a linear reduction of forces in subsequent bolt rows is proposed. This reduction is carried out using empirically determined reduction coefficients.

In the second proposal – SRM (Stiffness and Rotation Method) the force values of the considered T-stubs, that depends on the stiffness and distance from the compression chord, is related to the design load capacity of the critical T-stub determined according to EN 1993-1-8. In joints with the number of bolts in rows adjacent to the tension chord greater than 2, the adopted calculation model consists of primary end-plate splice with only two bolts in every row (without other bolts) and separately considered, previously omitted, tension chord T-stubs.

At the end of the dissertation the conclusions of the own analyses were presented, design recommendations were given, and proposals for further research were formulated.