

Innowacyjne doczołowe połączenia na śruby stalowych belek dwuteowych



dr hab. inż.
EUGENIUSZ HOTAŁA PROF. PWR
Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
ORCID: 0000-0003-2286-8436



mgr inż.
PIOTR TUCKI
Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
ORCID: 0000-0002-4073-686X

W artykule przedstawiono nową koncepcję wykonywania doczołowych styków sprężonych i niesprężonych, w których dotychczas stosowane pełne blachy doczołowe zastąpi się króćcami teowymi, powstającymi poprzez przyspawanie głównie do półek belek blach o małych wymiarach. Omówiono zalety takiego rozwiązania oraz przedstawiono wstępne wyniki analiz numerycznych belek, w których zastosowano połączenia doczołowe z pełnymi blachami oraz z króćcami teowymi.

Doczolowe połączenia śrubowe są stosowane powszechnie w stalowych konstrukcjach budowlanych z uwagi na prostotę wykonania oraz możliwość uzyskania wymaganej nośności i sztywności połączeń, szczególnie w elementach wykonanych ze spawanych lub walcowanych dwuteowników. Połączenia doczołowe mogą być sztywne lub podatne, a śruby w takich połączeniach są na ogół sprężone, a więc zgodnie z normą [1] są to połączenia kategorii E lub kategorii D, gdy śruby nie są sprężone.

W klasycznych, powszechnie stosowanych połączeniach doczołowych (fot. 1.) występują pełne blachy doczołowe z otworami, przez które przechodzą śruby. Jeśli połączenie jest kategorii E, a więc sprężone, to wyma-

gana jest bardzo dobra płaskość powierzchni blach doczołowych, gdyż zdeformowane podczas spawania blachy mogą nawet uniemożliwić prawidłowe sprężenie połączenia. Ponadto w sprężonych stykach doczołowych z imperfekcjami geometrycznymi blach doczołowych może wystąpić zjawisko znacznego przyrastania sił w śrubach w stosunku do sił uzyskanych podczas sprężenia pod wpływem zwiększającego się obciążenia zewnętrznego, a więc zachowania się styku doczołowego tak jak połączenia kategorii D [2]. W takim przypadku siły w śrubach od obciążenia zewnętrznego sumują się z siłami od sprężenia, a więc mogą dość szybko ulec zerwaniu. W skrajnych przypadkach dużych imperfekcji w postaci braku dobrego przylega-

nia blachy czołowej belki do pasa słupa lub do blachy doczołowej sąsiadującej belki nośność obliczeniowa styku może spaść nawet prawie do zera, gdyż przyłożenie do niego zewnętrznego obciążenia może od razu prowadzić do zwiększenia sił w śrubach ponad wartość sił, które zostały do nich wprowadzone podczas sprężania na montażu, a są to przecież na ogół siły równe ich nośności obliczeniowej. W połączeniach doczołowych klasy D, a więc niesprężonych, tak wyraźny efekt zmniejszenia nośności styku z imperfekcjami geometrycznymi nie występuje.

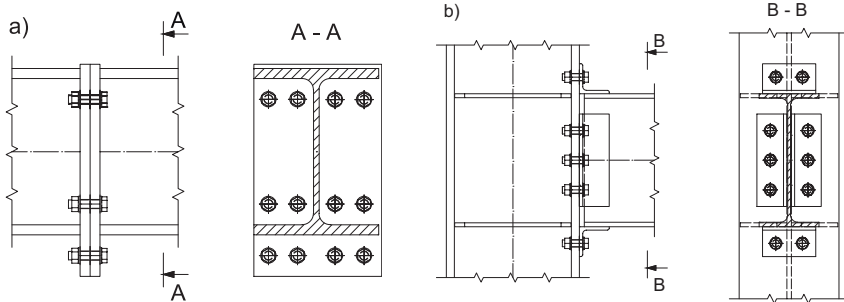
Autorzy są zdania, że w stykach doczołowych z wieloma rodzajami dużych odchyłek płaskości w blachach doczołowych nie jest wskazane sprężanie śrub z uwagi na ryzyko znacznego zmniejszenia nośności styku. W wielu przypadkach konstrukcyjnych (np. hal stalowych) jest możliwe zastosowanie zwykłego styku doczołowego kategorii D, gdyż w stykach takich konstrukcji nie występują obciążenia rozciągające wielokrotnie zmienne, a obciążenie wiatrem nie stanowi w takich stykach zagrożenia wyczerpania nośności zmęczeniowej.

Jeśli jednak doczołowy styk śrubowy będzie obciążony cyklicznie, to trzeba wykonać połączenie kategorii E i zadbać o dobrą płaskość blach czołowych, co szczególnie przy wysokich dwuteownikach spawanych i walcowanych jest niezwykle trudne w realizacji.

Od wielu lat pojawiają się różne pomysły na to, jak można podczas prac montażowych wyeliminować niekorzystne skutki imperfekcji geometrycznych blach doczołowych dwuteowych elementów konstrukcyjnych. Proponuje się stosowanie różnego rodzaju przekła-



Fot. 1. Typowe doczołowe połączenia na śruby sprężające: a) rygla ze słupem ramy hali stalowej, b) dwóch belek dwuteowych



Rys. 1. Doczołowe połączenia śrubowe dwuteowników:
a) z pełną blachą czołową, b) z króćcami teowymi z kątowników [6]

dek pomiędzy blachami doczołowymi w połączeniach sprężonych lub stosowanie ciąglego wypełnienia powstałych szczelin polimerem [3], ale nie są to jak dotąd w pełni skuteczne sposoby na wyeliminowanie wyraźnego wzrostu sił w sprężonych śrubach pod wpływem obciążenia zewnętrznego, pomimo sprężenia styku. Niekiedy zastosowanie przekładek powoduje skutek odwrotny od oczekiwanego. W większości przypadków imperfekcje geometryczne blach doczołowych wyraźnie zmniejszają nośność sprężonych połączeń doczołowych, co wykazano m.in. w pracach [2], [3], [4], [5].

Koncepcja wykonywania połączeń sprężonych kategorii E w dwuteownikach bez pełnych blach doczołowych

Stosowanie pełnych blach czołowych w połączeniach śrubowych kategorii D lub E (rys. 1a.) generuje duże odkształcenia powierzchni tych blach wskutek powstałych naprężeń spawalniczych, skutkujące wystąpieniem losowych szczelin w takim styku nawet po wykonaniu sprężenia śrub. Szczególne problemy wykonawcze z zapewnieniem płaskości blach czołowych występują w przypadku łączenia dwuteowników o dużych wysokościach, gdzie blachy mają dużą powierzchnię i masę. Tymczasem większa część tych blach nie uczestniczy w przekazywaniu sił wewnętrznych z jednego elementu dwuteowego na drugi, gdyż efektywnie wyteżone są tylko fragmenty blach wokół śrub i w miejscu spoin łączących blachy doczołowe z dwuteownikami. W analizach nośności takich styków według normy [1] wydziela się z blach doczołowych i dwuteowników zastępcze króćce teowe, które mają realny wpływ na nośność i sztywność styku, a pozostałe duże fragmenty blach są niejako „nieużyteczne”. W związku z tym powstawały wcześniej koncepcje stosowania króćców teowych z kątowników zamiast pełnych blach węzłowych (rys. 1b.). Analizy zachowania się obciążonych styków doczołowych z króćcami teowymi z kątowników zawarte są m.in. w pracach [4], [6], a nośność takich styków określona jest w normie [1].

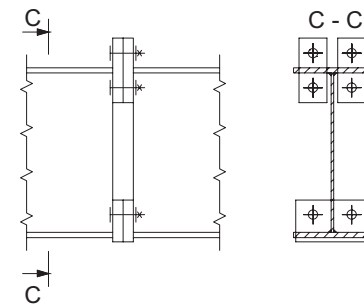
Króćce z walcowanych kątowników stwa-

rzają jednak pewne ograniczenia w zakresie ich grubości, na ogół nieprzekraczających 12 mm, a klasyczne, pełne blachy doczołowe mają często nawet 32 mm grubości. Wynika z tego, że można by stosować rozwiązania pokazane na rys. 1b. oraz w normie [1] jedynie w przypadkach, kiedy zamierzamy zastosować węzeł podatny.

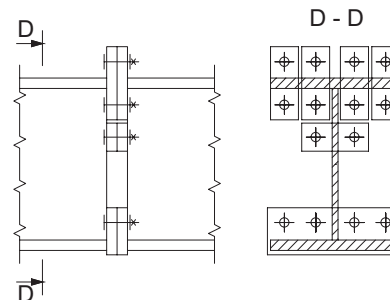
Autorzy w swoim zgłoszeniu patentowym [7] proponują stosowanie w połączeniach doczołowych dwuteowych elementów konstrukcyjnych króćców teowych wykonanych z blach o grubości wynikającej z wymaganej sztywności i nośności tych połączeń. Przykłady wykonania tych innowacyjnych połączeń pokazano na rys. 2., 3., 4., 5. i 6., a pozostałe przypadki zawarte są w [7].

Zalety proponowanych połączeń doczołowych z króćcami teowymi z blach

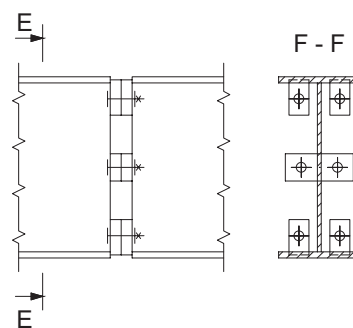
Podstawową zaletą proponowanych połączeń doczołowych dwuteowych elementów zginanych, zaprezentowanych na rys. 2–6. oraz w [7] jest wyeliminowanie pełnych blach doczołowych z takich połączeń. Pełne blachy doczołowe na ogół mają duże odchyłki od płaskości, skutkujące w połączeniach kategorii E przeciężeniem niektórych śrub i spadkiem nośności styku, co opisano na wstępie. Pełne blachy doczołowe wywołują zróżnicowanie sił w śrubach sprężonych i niesprężonych, a najbardziej wyteżone są śruby w narożu pasa rozciąganego i środka dwuteownika. W zaproponowanych rozwiązaniach (rys. 2., 3., 6.) w górnym, rozciąganym pasie belki dwuteowej zastosowano niezależne króćce teowe, spawane jedynie do rozciąganego pasa i niespawane do środka. W takim przypadku w połączeniu kategorii D we wszystkich śrubach nad pasem i pod pasem rozciąganym występują jednakowe siły wywołane zewnętrznym obciążeniem i można je w prosty sposób wyznaczyć, dzieląc siłę w pasie rozciąganym przez liczbę śrub w króćcach teowych przyspawanych do tego pasa (oczywiście trzeba też wziąć pod uwagę niekorzystny efekt dźwigni). Taki prosty sposób wyznaczania sił w śrubach obowiązuje do momen-



Rys. 2. Doczołowe połączenie śrubowe dwuteowników za pomocą 3 króćców teowych z blach



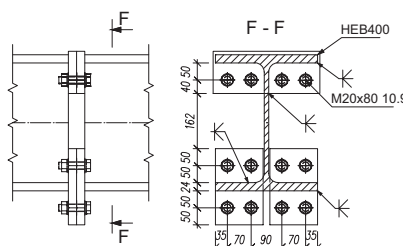
Rys. 3. Doczołowe połączenie śrubowe dwuteowników za pomocą 6 króćców teowych z blach



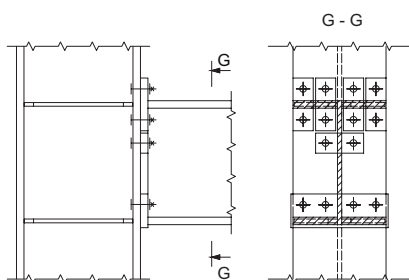
Rys. 4. Doczołowe połączenie śrubowe dwuteowników za pomocą 5 króćców teowych z blach

tu, gdy stosunkowo cienkie blachy króćców zaczynają się uplastyczniać. W przypadku odpowiednio grubych blach obowiązuje liniowy rozkład sił dla tych śrub. Dodatkowe króćce teowe, przyspawane jedynie do środka (rys. 3., 6.), mogą brać udział w przenoszeniu momentu zginającego przypadającego na środek. W ściskanym pasie dolnym jeden wspólny króciec teowy dla wszystkich śrub odpowiada za przenoszenie sił poprzecznych w styku, a dodatkowo można zastosować króćce teowe na środku (rys. 4.).

Ważną zaletą prezentowanych rozwiązań jest zmniejszenie zużycia stali na króćce teowe w stosunku do zużycia stali w przypadku pełnych blach czołowych oraz wyeliminowanie wpływu odchyłek od płaskości na nośność styków sprężonych kategorii E. Małe blachy



Rys. 5. Doczołowe połączenie śrubowe dwuteowników za pomocą 3 szerokich króćców teowych z blach, poddane analizie MES



Rys. 6. Doczołowe połączenie śrubowe belki dwuteowej z dwuteowym słupem za pomocą króćców teowych z blach

w króćcach teowych można łatwiej wykonać dokładnie niż duże blachy pełne i łatwiej jest zapewnić wzajemne przyleganie małych blach do siebie w proponowanych połączeniach. Własne, wstępne badania doświadczalne i numeryczne nie wykazują zbyt dużego wpływu braku pełnego przylegania blach w proponowanych króćcach teowych na nośność takich styków.

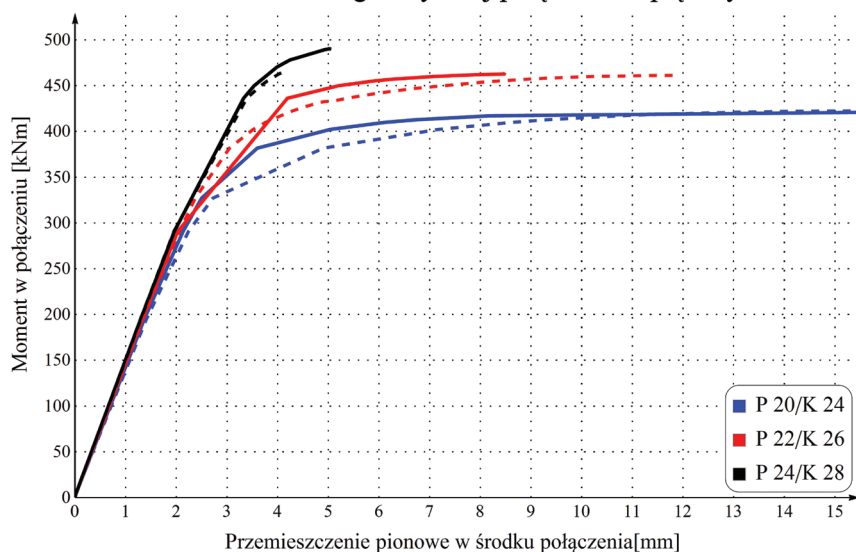
Analizy numeryczne śrubowych styków doczołowych z króćcami teowymi z blach

Analizom numerycznym poddano doczołowe styki dwuteownika HEB400 z zastosowaniem pełnych blach doczołowych o grubościach 20, 22, 24 mm, oraz analogiczne styki z króćcami teowymi według rys. 5. z zastosowaniem blach o grubościach 24, 26 i 28 mm i śrub M20, klasy 10.9. Styki doczołowe umieszczone były w środku rozpiętości belki.

Zbudowano model numeryczny MES badanych belek dwuteowych, przyjęto schemat statyczny belki swobodnie podpartej o rozpiętości 2 m, z warunkami brzegowymi nałożonymi na dolną krawędź profilu. Na końcach kształtownika HEB 400 przyłożono moment zginający w postaci ciśnienia. Wszystkie przypadki były wprowadzone z symetrią podłużną, którą zapewniono przez odpowiednie warunki brzegowe. Rozstaw śrub i odległość od pasów zostały przyjęte na podstawie połączenia użytego w prowadzonych aktualnie badaniach laboratoryjnych i pokazanego na rys. 5.

W modelu numerycznym zastosowano siatkę strukturalną i elementy skończone C3D8R. Wprowadzono kontakt pomiędzy powierzch-

Ścieżki równowagi statycznej połączeń niesprężonych



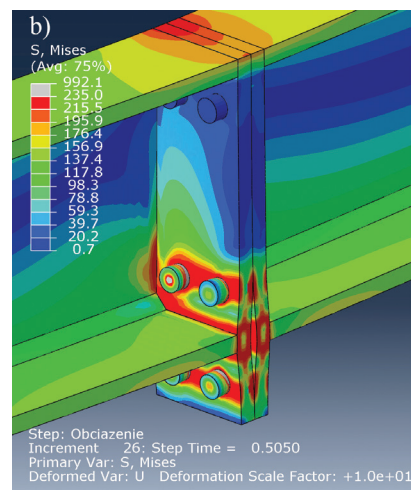
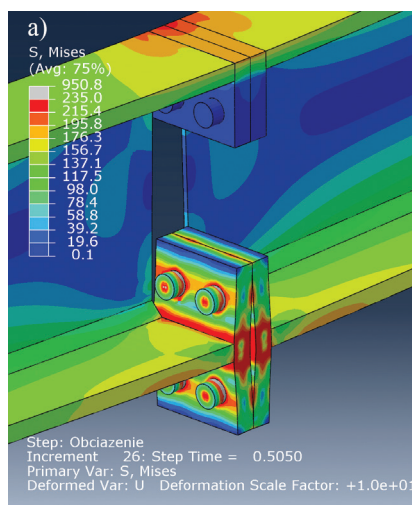
Rys. 7. Ścieżki równowagi statycznej połączeń niesprężonych wg rys. 5.: linie ciągłe połączenie z króćcami, linie przerywane – połączenie z blachą pełną

niami: blacha czołowa–blacha czołowa. Dla tych powierzchni wybrano metodę dyskretyzacji kontaktu *small sliding surface to surface*. Zachowanie styczne kontaktu ustawiono jako *penalty friction* ze współczynnikiem tarcia 0.3. Zachowanie normalne kontaktu ustawiono jako *hard contact* [8]. Łeb z podkładką oraz nakrętka z podkładką zostały wprowadzone jako cylindry o powierzchni przekroju równoważnej szcześciokątnej nakrętki. Powierzchnie kontaktu: blacha czołowa–kształtownik, podkładka–blacha czołowa powiązane ze sobą na stałe, używając więzów typu tie.

Wybrane wyniki analiz numerycznych belki dwuteowej HEB400 z niesprężonym połączeniem doczołowym kategorii D [1] na śruby M20-10.9, wykonanym z blachą pełną i z króćcami teowymi (rys. 5.), zaprezentowano na rys. 7. Styki z blachą pełną oznaczono literą P i liczbą oznaczającą gru-

bość tej blachy. Styki z króćcami teowymi oznaczono literą K i liczbą oznaczającą grubość blachy króćca. Przedstawiono wyniki ugięcia belki w środku rozpiętości, a więc w miejscu styku doczołowego. Ugięcia te odzwierciedlają sztywność konkretnego styku. Tak więc prawie równoważną sztywność styku z blachą pełną o grubości 24 mm (P24) uzyskano przy zastosowaniu na króćce teowe blach o grubości 28 mm (K28). W innych analizowanych przypadkach (rys. 7.) potwierdza się zasada, że aby uzyskać porównywalną sztywność styku doczołowego z króćcami teowymi, trzeba zastosować nieco większą grubość blachy niż w przypadku zastosowania blachy pełnej.

Stan naprężeń zastępczych w blachach połączeń K28 i P24 dla tego samego obciążenia styku przedstawiono na rys. 8. Widać też rozwarcie blach styków w tym stanie obciążenia.



Rys. 8. Naprężenia zastępcze Hubera-von Misesa w blasze połączenia doczołowego od momentu 436 kNm (skala deformacji x10): a) połączenie K28, b) połączenie P24e

Podsumowanie

Zaproponowane rozwiązania śrubowych styków doczołowych dwuteowych belek stalowych, w których zastosowano króćce teowe, spawane głównie do pasów dwuteownika, są dobrą alternatywą dla styków z pełnymi blachami doczołowymi. Rozwiązania te pozwalają na łatwiejsze uzyskanie i kontrolę wymaganej płaskości małych blach króćców, co jest niezwykle trudne do osiągnięcia w przypadku pełnych blach czołowych. Śruby w proponowanych króćcach teowych w strefach rozciąganego pasa belki dwuteowej są obciążone jednakowo, gdyż spawane są tylko do tego pasa, czego nie uzyskuje się w przypadku pełnej blachy doczołowej, spawanej do pasów i do środka belki.

Wyniki wstępnych badań doświadczalnych i numerycznych proponowanych styków doczołowych wskazują, że są to racjonalne rozwiązania konstrukcyjne, zapewniające prosty schemat statyczny połączenia, prostotę wykonania oraz wymaganą nośność i sztywność. Prowadzone aktualnie przez autorów badania doświadczalne oraz numeryczne proponowanych styków doczołowych powinny odpowiedzieć na najważniejsze pytania i rozwiązać ewentualne wątpliwości, które towarzyszą nowym rozwiązaniom konstrukcyjnym.

Obliczenia numeryczne wykonano przy użyciu zasobów udostępnionych przez Wrocławskie Centrum Sieciowo-Superkomputerowe (<http://wcss.pl>), grant obliczeniowy Nr 81.

Literatura

- [1] PN-EN 1993-1-8: 2006, Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów.
- [2] Rykaluk K., Konstrukcje metalowe, Część I. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2016.
- [3] Tkaczyk Ł., 2018, Badania wybranych doczołowych połączeń śrubowych z imperfekcjami. Rozprawa doktorska, Wydział Inżynierii Ładowej Politechniki Krakowskiej.
- [4] Biegus A., Nośność graniczna śrubowych styków doczołowych z imperfekcjami geometrycznymi. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- [5] Hotała E., Rykaluk K., Pasternak H., 1999, Wpływ jakości wykonania śrubowych połączeń sprężonych na bezpieczeństwo hal stalowych. XIX Konferencja naukowo-techniczna, referaty, Szczecin-Międzyzdroje, 19-22 maja 1999. T. 2. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, s. 601-608.
- [6] Bródka J., Kozłowski A., Sztywność i nośność węzłów podatnych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1996.
- [7] Hotała E., Tucki P., Węzeł połączeniowy dwuteowników. Zgłoszenie patentowe nr P431459 z 14.10.2019. 19 s.
- [8] Krolo P., Davor Grandic and Mladen Bulic, 2016, The Guidelines for Modelling the Preloading Bolts in the Structural Connection Using Finite Element Methods, J. Computational Engineering, DOI: 10.1155/2016/4724312.

DOI: 10.5604/01.3001.0013.8798

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Hotała Eugeniusz, Tucki Piotr, 2020, Innowacyjne doczołowe połączenia na śruby stalowych belek dwuteowych, „Builder” 04 (273). DOI: 10.5604/01.3001.0013.8798

Streszczenie: W połączeniach doczołowych dwuteowych elementów prętowych, w których śruby są sprężone, są powszechnie stosowane pełne blachy doczołowe. Naprężenia

spawalnicze w tych blachach są przyczyną ich dużych deformacji w postaci braku płaskości ich powierzchni, co skutkuje najczęściej znacznym obniżeniem nośności i sztywności takiego styku. Poszukiwanie sposobu wyeliminowania niekorzystnych skutków braku płaskości pełnych blach doczołowych w stykach sprężonych nie dało jak dotąd oczekiwanego rezultatu. W artykule przedstawiono nową koncepcję wykonywania doczołowych styków sprężonych i niesprężonych, w których dotychczas stosowane pełne blachy doczołowe zastąpi się króćcami teowymi, powstającymi poprzez przyspawanie głównie do pótek belek blach o małych wymiarach. Omówiono zalety takiego rozwiązania oraz przedstawiono wstępne wyniki analiz numerycznych belek, w których zastosowano połączenia doczołowe z pełnymi blachami oraz z króćcami teowymi. Wyniki wstępnych badań doświadczalnych oraz numerycznych wskazują na to, że styki doczołowe z proponowanymi króćcami teowymi są dobrym rozwiązaniem problemów występujących w przypadkach stosowania pełnych blach doczołowych. Zaprezentowane innowacyjne rozwiązanie jest przedmiotem zgłoszenia patentowego o numerze P.431459.

Słowa kluczowe: połączenie doczołowe na śruby, nośność połączenia, sztywność połączenia, badania doświadczalne, analiza MES
Abstract: Solid end plates are commonly used in the butt joints of I-beam members in which the bolts are preloaded. Welding stresses in these plates are the cause of their large in-plane deformations in the form of lack of flatness of their surface, which usually results in a significant reduction in the resistance and stiffness of such a splice.

The search for a manner to eliminate the adverse effects of the lack of flatness of solid end plates in preloaded joints has so far failed to produce the expected result. The article presents a new concept of executing the both preloaded and ordinary butt joints, in which the hitherto used end plates will be replaced with T- stub joints, formed by small size plates welded to the flanges of beams mainly. The advantages of this solution are discussed and the preliminary results of numerical analyses of beams, in which butt joints with solid plates versus T-stubs are presented. The results of preliminary experimental and numerical tests indicate that butt joints with the proposed T-joints constitute a good solution to problems occurring in cases of using solid end plates. The presented innovative solution is the subject of a patent application no. P. 431459.

Keywords: butt bolted joint, resistance of the joint, stiffness of the joint, experimental tests, FEM analysis