

mgr inż. Przemysław Palacz^{1*)}
 ORCID: 0000-0002-2040-3494
 dr hab. inż. Maciej Major, prof. PCz¹⁾
 ORCID: 0000-0001-5114-7932

Wstępna analiza numeryczna sztywności niestandardowych połączeń montażowych stalowych belek dwuteowych

Preliminary numerical analysis of the stiffness of non-standard assembly connections of steel I-beams

DOI: 10.15199/33.2024.04.01

Streszczenie. Połączenia są nieodzownym elementem każdej konstrukcji stalowej, ponieważ umożliwiają łatwy i szybki montaż prefabrykowanych elementów konstrukcji na budowie. Artykuł obejmuje wstępną analizę niestandardowych połączeń stalowych belek dwuteowych w porównaniu z powszechnie stosowanymi w budowlanych konstrukcjach stalowych, a także badanie dwóch schematów zamocowania belki wspornikowej oraz swobodnie podpartej metodą elementów skończonych. Badanymi parametrami były naprężenia, odkształcenia oraz początkowa sztywność obrotowa połączeń. Wyniki wykazały, że dwa z czterech zaproponowanych niestandardowych połączeń charakteryzowały się dużą efektywnością przenoszenia obciążeń oraz większą sztywnością obrotową w porównaniu z połączeniami standardowymi.

Słowa kluczowe: połączenia konstrukcji stalowych; połączenia skręcane; łączenie stalowych belek dwuteowych; nośność połączeń; analiza MES.

Abstract. Connections are an indispensable element of every steel structure because they enable easy and quick assembly of prefabricated structural elements on the construction site. The article covers the initial analysis of non-standard connections of steel I-beams in relation to commonly used connections in steel building structures. An analysis of beams with connections was carried out and a finite element test was performed for two beam mounting schemes: cantilevered and simply supported. The parameters tested were stresses, strains and initial rotational stiffness of the connections. The results showed that two of the four proposed non-standard connections were characterized by high load transfer efficiency and greater rotational stiffness compared to standard connections.

Keywords: connections of steel structures; bolted connections; connecting steel I-beams; load-bearing capacity of connections; FEM analysis.

Poszczególne elementy w każdej konstrukcji stalowej wymagają połączenia. W tym celu stosuje się kilka rodzajów połączeń: spawane; skręcane; nitowane i klejone [1]. Łatwe połączenie elementów konstrukcji podczas montażu na miejscu budowy umożliwiają łączniki śrubowe [2]. Połączenia śrubowe mają wiele zalet, np. łatwy i szybki montaż lub demontaż konstrukcji, a przy tym umożliwiają naprawę i wymianę uszkodzonych elementów [1]. Połączenia w konstrukcjach stalowych pełnią bardzo ważną rolę, ponieważ uszkodzenie połączenia powoduje nie tylko redystrybucję sił wewnętrznych, ale również może prowadzić do awarii konstrukcji [3]. Odpowiednio zaprojektowane połączenia

przenoszą obciążenia z poszczególnych elementów konstrukcji na elementy nośne, zapewniając przy tym bezpieczną jej eksploatację [4].

Wielu badaczy podejmuje się analizy różnych rozwiązań konstrukcyjnych połączeń pracujących w różnych warunkach. Zhihua Chen i inni w artykule [5] zaproponowali innowacyjny modułowy projekt połączenia w konstrukcjach stalowych z pośrednim urządzeniem wtykowym i systemem śrub belka-belka jako odpowiednio połączeniami poziomymi i pionowymi. Projekt połączenia ma na celu zapewnienie łatwego montażu, eliminując spawanie na miejscu budowy. Autorzy przeprowadzili dwa statyczne testy obciążenia jednoosiowego i cztery testy obciążenia cyklicznego na połączeniu w kształcie litery T, aby zbadać jego zdolność przenoszenia obciążeń. Wyniki pokazały, że ze względu na dwuczęściową konstrukcję łączącą

między kolumnami górnymi i dolnymi powstają szczeliny, które wpływają na odkształcenia i rozkład naprężeń w złączu, a jakość spoin w złączach jest niewystarczająca do zapewnienia bezpieczeństwa. Z kolei Yanxia Zhang i inni w artykule [6] zaproponowali nowatorskie połączenie słup-słup za pomocą śrub samogwintujących, również eliminujących spawanie na miejscu budowy. Autorzy przeprowadzili badania eksperymentalne oraz badania metodą elementów skończonych, a także zaproponowali wzory do obliczania nośności nowego typu połączenia zgodnie z teorią linii załomów. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że zaproponowane połączenie na śruby samogwintujące jest w stanie efektywnie łączyć elementy, jednocześnie redukując koszty realizacji. Jianfen Li i inni w swojej pracy [7] przedstawili nowatorską formę prefabrykowanych połączeń stalowych

¹⁾ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

^{*)} Adres do korespondencji: przemyslaw.palacz@pcz.pl

belek w kształcie litery H ze stalowymi rurami wypełnionymi betonem. Zbadali oni zachowanie nowatorskich połączeń belek ze słupami za pomocą cyklicznych testów obciążeniowych. Wyniki badań wykazały, że zaproponowane połączenia belek ze słupami charakteryzowały się dużą wytrzymałością na zginanie. Ponadto stwierdzono, że grubość i granica plastyczności stalowej rury słupa ma duży wpływ na nośność połączenia na zginanie oraz odkształcenia.

Wyniki eksperymentalne i numeryczne pokazują, że na wytrzymałość zmęczeniową połączeń może wpływać wiele czynników, takich jak siła wstępnego sprężenia śruby, rozmiar otworu i rozmieszczenie śrub [8]. Na ich nośność ma również wpływ stan połączenia i warunki atmosferyczne, które np. mogą sprzyjać korozji. Shidong Nie i inni w artykule [9] przedstawili eksperymentalne badania nośności połączeń śrubowych wykonanych ze stali o dużej wytrzymałości, którą poddano korozji. Wykonali początkowo próby korozyjne dziesięciu próbek poddanych przyspieszonej korozji, po czym zbadali właściwości mechaniczne tych połączeń o różnych stopniach korozji za pomocą statycznych prób rozciągania. Na tej podstawie sformułowali matematyczną zależność między szybkością utraty masy a czasem korozji oraz przeanalizowali zależności matematyczne między szybkością utraty masy a wskaźnikami mechanicznymi, w tym współczynnikiem poślizgu, sprężeniem wstępnym śruby, obciążeniem poślizgowym lub obciążeniem niszczącym. Ostatecznie stwierdzili, że środowisko korozji ma istotny wpływ na obciążenie poślizgowe, współczynnik poślizgu oraz napięcie wstępne śrub połączeń skręcanych. Z kolei Chao Jiang i inni w artykule [10] zaprezentowali badania parametryczne zachowania zmęczeniowego ścinanych połączeń ciernych i zaproponowali procedurę przewidywania trwałości zmęczeniowej stalowych połączeń ciernych metodą elementów skończonych, a także zweryfikowali ją wynikami badań zmęczeniowych. Stwierdzili, że na zachowanie zmęczeniowe połączeń z jedną płaszczyzną ścinania duży wpływ ma liczba śrub, gatunek stali i proces wykonywania otworów, podczas gdy na za-

chowanie zmęczeniowe połączeń z dwiema płaszczyznami ścinania duży wpływ ma sprężenie wstępne śrub, współczynnik poślizgu, grubość płyty głównej, gatunek stali i proces wykonywania otworów. Ci sami autorzy w artykule [11] przebadali wpływ korozji na właściwości zmęczeniowe śrubowych połączeń ciernych i wykazali m.in., że trwałość zmęczeniowa tych połączeń może być znacznie zmniejszona przez korozję. W przypadku, gdy wskaźnik ubytku masy połączeń przekracza 7,8%, wytrzymałość zmęczeniowa jest mniejsza niż 100 MPa, co nie spełnia wymagań Eurokodu 3.

Połączenia śrubowe są powszechnie stosowane w konstrukcjach stalowych, a nośność połączeń śrubowych zmniejsza się w podwyższonej temperaturze [12]. Wielu autorów w swoich pracach poddało analizie połączenia śrubowe w warunkach podwyższonej temperatury [13, 14, 15]. Weiyong Wang i inni w [13] wykazali, że w podwyższonej temperaturze obciążenie poślizgowe zmniejsza się szybciej niż obciążenie niszczące, a temperatura krytyczna od zniszczenia kruchego do zniszczenia ciągliwego wynosi ok. 500°C. Zhihao Chen i inni w artykule [14] przedstawili badania ogniowe połączeń doczołowych ze stali o dużej wytrzymałości. Zbadali właściwości mechaniczne w temperaturze otoczenia oraz ognioodporność połączeń doczołowych z blachą czołową o różnej grubości i wykazali, że grubość blachy czołowej ma duży wpływ na zwiększenie sztywności połączenia w temperaturze otoczenia, natomiast temperatura krytyczna i odporność na ogień nie uległy znacznej poprawie przy zastosowaniu grubszej blachy czołowej. Z kolei autorzy w artykule [15] omówili badania nośności śrub klasy 8.8 w warunkach pożaru naturalnego. Wykazali oni, że zachowanie się śrub nie jest odwracalne po podgrzaniu do 500°C i utrata nośności może wynieść 40%, a plastyczność śrub wyraźnie wzrasta, gdy temperatura szczytowa cyklu wynosi 800°C.

Poddane analizie połączenia klasyfikujemy jako podatne, które w konstrukcjach wpływają na zmniejszenie ich nośności granicznej. Na sztywność obrotową połączenia ma wpływ przede

wszystkim geometria elementów węzła wraz ze śrubami oraz przyległymi elementami łączonych belek [16]. Autorzy w publikacji [17] przedstawili analizę z przeprowadzonych badań połączeń doczołowych i wykazali, że wszystkie są odkształcalne, a ich sztywność obrotowa oraz nośność graniczna mają różną wartość. Autorzy wykazali, że na różnicę w sztywności obrotowej wpływają m.in. odkształcenia blach czołowych. Podatność połączeń ma natomiast wpływ na nośność oraz stateczność konstrukcji. Podatność węzła można ocenić z zależności pomiędzy momentem zginającym występującym w połączeniu a kątem obrotu tego połączenia, czyli za pomocą krzywej $M-\phi$ [17].

W tym artykule przedstawimy wstępną analizę niestandardowych połączeń dwuteowych belek stalowych w porównaniu z połączeniami powszechnie stosowanymi. Analiza zaproponowanych niestandardowych styków montażowych ma na celu wypracowanie sposobu ograniczenia liczby łączników śrubowych w taki sposób, aby można było uzyskać korzyści wynikające z szybszej realizacji procesu montażu, który docelowo ma być realizowany przez ramię robota. Rozwój technologiczny i coraz większe wymagania dotyczące nowych technologii determinują poszukiwanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych, w tym połączeń, które będą możliwe do realizacji za pomocą ramion robotów. Obecnie nie oferujemy rozwiązań, które mają zastąpić te, w przypadku których wymagana jest praca rąk ludzkich.

Proces wznoszenia konstrukcji można podzielić na fazę realizacji oraz fazę eksploatacji. W fazie realizacji konstrukcja zostaje złożona i uzyskuje nośność montażową, natomiast w fazie eksploatacji musi zapewniać bezpieczeństwo wynikające z projektowanej nośności. Rozdzielając te etapy, proces wznoszenia obiektów mógłby być realizowany przez różne urządzenia, a więc w pierwszej fazie elementy konstrukcji montowane byłyby przez skręcenie, a w drugim przez spawanie, uzyskując pełną projektowaną nośność i dużą sztywność. W związku z tym zaproponowane w artykule nowe rozwiązania technologiczne stanowią wstęp do dyskusji, dzięki której w przyszłości będą

mogły być wprowadzone do budownictwa, wykorzystującego w procesie montażu dedykowane roboty. Analizowane połączenia porównano na podstawie rozkładu naprężeń oraz początkowej sztywności obrotowej.

Cel i zakres pracy

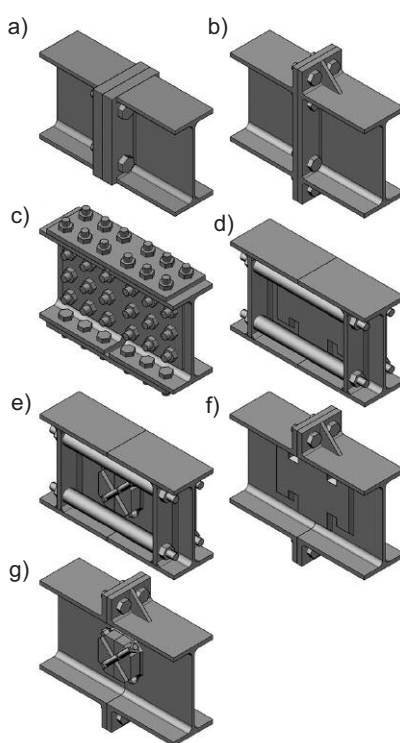
Celem pracy było sprawdzenie niestandardowych połączeń stalowych belek dwuteowych pod kątem efektywności zastosowania w konstrukcjach. Oceniono ich początkową sztywność obrotową w porównaniu ze standardowymi stykami montażowymi powszechnie stosowanymi, z wykorzystaniem dedykowanych połączeń rozwiązań technologicznych, co w następstwie wypracowania odpowiedniego standardu połączeń będzie zwiększało efektywność procesu montażu konstrukcji lub też samej jej pracy. Schematy analizowanych połączeń belek dwuteowych przedstawiono na rysunku 1.

W celu wykonania analizy numerycznej połączeń przyjęto do rozważań dwa jednoprzęsłowe schematy statyczne obejmujące belkę wspornikową (rysunek 2a) i belkę swobodnie podpartą (rysunek 2b), w przypadku których w środku ich rozpiętości wprowadzono tradycyjne połączenia skręcane, doczołowe i zakładkowe (rysunki 1a, b, c) i opracowane niestandardowe połączenia zmodyfikowane (rysunki 1d, e, f, g).

Wykonano analizę belek o długości 1,3 m, wykonanych z walcowanego na gorąco dwuteowego profilu IPE160 ze stali S235. Belkę wspornikową obciążono jedną siłą skupioną F_1 o wartości 21,67 kN, którą przyłożono w odległości 1,2 m od jej utwierdzenia (rysunek 2a), natomiast belkę swobodnie podpartą obciążono dwiema siłami F_2 o wartości 65 kN każdą, które przyłożono w odległościach 0,4 m od każdej z podpór belki (rysunek 2b). Deklarowane wartości sił przyjęto jako dopuszczalne w przyjętych schematach przy wykorzystaniu do 95% stanu granicznego nośności oraz użyteczności przekroju belki.

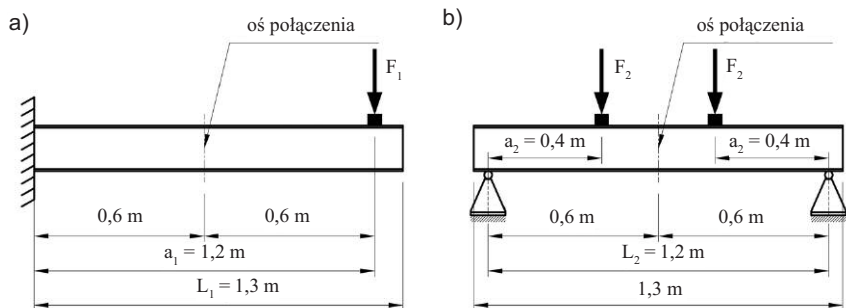
Na podstawie obliczeń analitycznych uzyskano maksymalne siły wewnętrzne oraz sprawdzono warunki stanu granicznego nośności i użyteczności w przypadku przekroju belek przyjętego

na podstawie PN-EN 1993-1-1 [18]. Maksymalne ugięcia rozpatrywanych belek z uwagi na przyjęte warunki brze-



Rys. 1. Analizowane połączenia stalowych belek dwuteowych: a) doczołowe; b) doczołowe ze śrubami wysuniętymi poza przekrój; c) zakładkowe; d) częściowo spawane ze śrubami wewnątrz przekroju; e) ze śrubą krzyżową na środku oraz śrubami wewnątrz przekroju; f) częściowo spawane ze śrubami wysuniętymi poza przekrój; g) ze śrubą krzyżową na środku oraz śrubami wysuniętymi poza przekrój

Fig. 1. Analyzed connections of steel I-beams: a) end-plate joint; b) end-plate joints with bolts extended beyond the cross-section; c) overlapping; d) partially welded with bolts inside the cross-section; f) with a cross-bolt on the web and bolts inside the cross-section; f) partially welded with bolts extending beyond the cross-section; g) with a cross bolt on the web and bolts extended beyond the cross-section

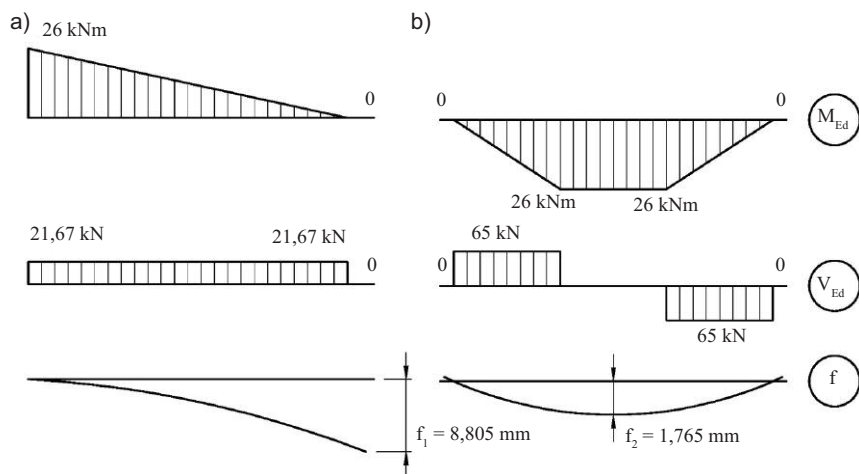


Rys. 2. Schematy statyczne zamocowania belki: a) wspornik; b) belka swobodnie podparta
Fig. 2. Static diagrams of beam attachment: a) cantilever; b) simply supported beam

gowe odczytano w programie Ansys (model opisano w dalszej części artykułu). Wykresy sił wewnętrznych oraz ugięć belki referencyjnej ciągłej bez połączenia przedstawiono na rysunku 3.

Warunki stanu granicznego nośności na zginanie i ścinanie oraz dopuszczalne ugięcia przyjętej belki obliczono zgodnie z normą [18]. Wykorzystanie przekroju w stanie granicznym nośności zarówno belki wspornikowej, jak i swobodnie podpartej w przypadku przyjętych schematów statycznych i obciążeń wyniosło 89,38%. Dopuszczalne ugięcie elementów stropu przyjęto jako równe $L/250$, a belek drugorzędnych zgodnie z normą [18]. Warunek stanu granicznego użyteczności w przypadku belki wspornikowej wyniósł 92,03%, natomiast belki swobodnie podpartej 36,77%. Ponadto zwymiarowano standardowe połączenia belek (rysunek 1a, b, c) zgodnie z normą [19]. Warunki nośności połączeń przedstawiono w tabeli 1.

Wstępną ocenę pracy powszechnie stosowanych stalowych połączeń konstrukcyjno-budowlanych, w przypadku przyjętych schematów statycznych belek dwuteowych, wykonano, porównując ich przemieszczenia pionowe z przemieszczeniami uzyskanymi w następstwie oddziaływania tego samego rodzaju obciążeń na belkę referencyjną, zamodelowaną jako ciągły profil IPE 160 ze stali S235. Następnie badaniom numerycznym poddano opracowane zmodyfikowane połączenia przeznaczone do stalowych belek dwuteowych. Schematy konstrukcyjne połączeń powszechnie stosowanych przedstawiono na rysunku 4, natomiast schematy zmodyfikowanych połączeń na rysunku 5. Analizę numeryczną



Rys. 3. Wykresy momentów zginających – M_{Ed} , sił tnących – V_{Ed} oraz ugięć – f w przypadku analizowanych schematów belek: a) wspornikowej; b) swobodnie podpartej

Fig. 3. Diagrams of bending moments – M_{Ed} , shear forces – V_{Ed} and deflections – f for the analyzed beam attachment: a) cantilever; b) simply supported

Tabela 1. Warunki stanu granicznego nośności analizowanych standardowych połączeń belek, przedstawionych na rysunku 1a, b, c

Table 1. Ultimate limit state conditions of the analyzed standard beam connections, shown in Fig. 1a, b, c

Typ połączenia	Warunek nośności w przypadku belki wspornikowej [%]	Warunek nośności w przypadku belki swobodnie podpartej [%]
a) doczołowe	47,90	95,70
b) doczołowe z śrubami wysuniętymi poza przekrój	49,00	98,00
c) zakładkowe	46,64	93,28

wszystkich połączeń konstrukcyjno-budowlanych dla dwuteowych belek stalowych wykonano metodą elementów skończonych przy użyciu programu Ansys Research 2021 (model opisano w dalszej części artykułu). Uzyskane wyniki dla rozpatrywanych rodzajów połączeń porównano między sobą w odniesieniu do wartości naprężeń, przemieszczeń oraz początkowej sztywności obrotowej.

W połączeniu częściowo spawanym ze śrubami wewnątrz przekroju (rysunek 5a) styk montażowy jest realizowany przez wzajemny docisk przekrojów dwuteowników oraz spawaną blachę po obu stronach środka, np. przez spawanie laserowe, co ma na celu spójzycjonowanie montowanych elementów i zapewnienie łączenia w fazie realizacji. Kształt blachy przyjęto ze względu na zwiększenie długości spoiny. Następnie połączenie jest sprężone za pomocą śrub przechodzących przez żeberka i tuleje pomiędzy nimi, zapewniając dzięki temu no-

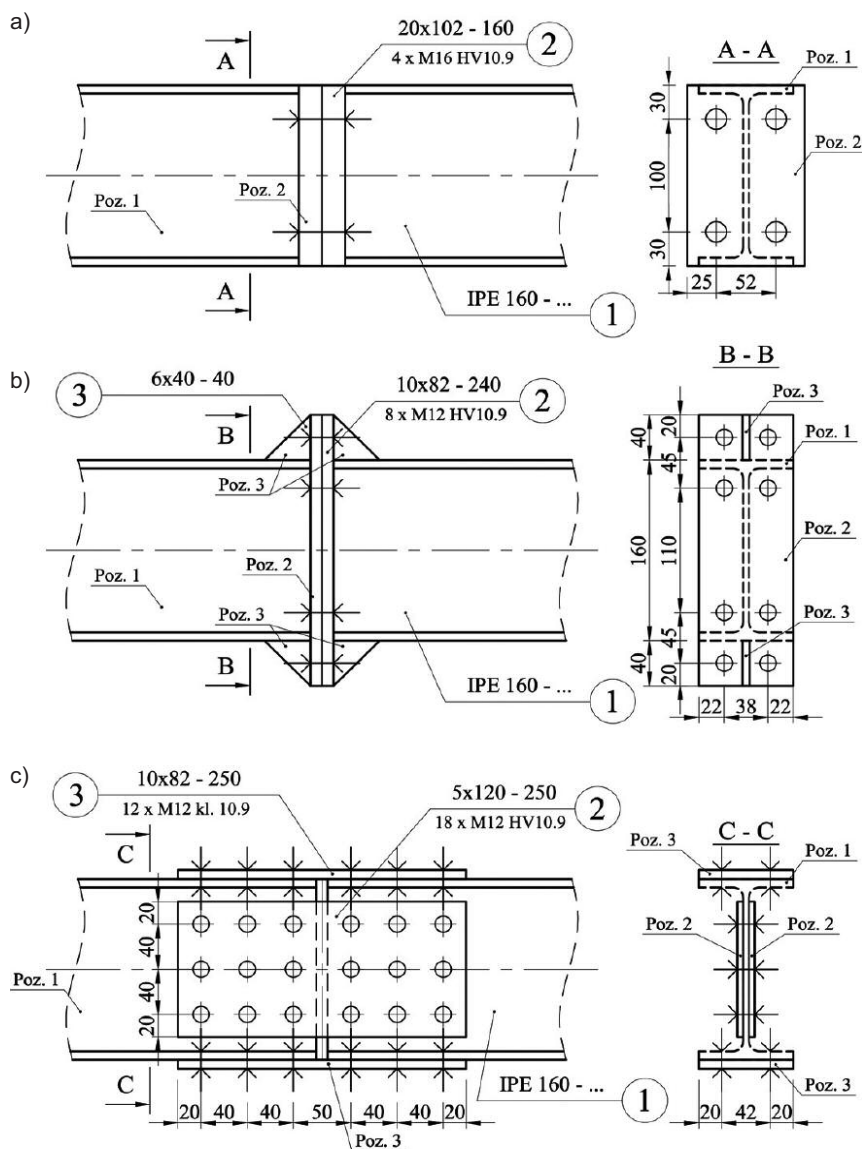
śność w fazie eksploatacji. Z kolei w połączeniu ze śrubą krzyżową na środku (rysunek 5b) styk montażowy jest realizowany przez wzajemny docisk przekrojów dwuteowników oraz przez skręcony łącznik krzyżowy w celu spójzycjonowania montowanych elementów i zapewnienia łączenia w fazie realizacji. Następnie połączenie jest sprężone za pomocą śrub przechodzących przez żeberka i tuleje pomiędzy nimi analogicznie do pierwszego. W połączeniach częściowo spawanych (rysunek 5c) oraz ze śrubą krzyżową (rysunek 5d) łączenie montażowe jest realizowane analogicznie do poprzednich połączeń (rysunki 5 a i b), natomiast nośność eksploatacyjną uzyskuje się przez sprężenie śrub wysuniętych poza przekrój łączonych belek. Zaprezentowane opracowanie stanowią wstęp do analizy złożonych styków montażowych. Docelowo poszczególne rozwiązania w fazie realizacji i eksploatacji będzie można zastąpić alternatywnymi inno-

wacyjnymi rozwiązaniami umożliwiającymi montaż konstrukcji przez dedykowane maszyny, tj. bez użycia rąk ludzkich.

Model numeryczny

Modele numeryczne wszystkich połączeń wykonane zostały w programie Ansys Research 2021 przez zadeklarowanie geometrii, warunków brzegowych oraz obciążeń tożsamy z obliczeniami analitycznymi. W celu zachowania symetrii układu w belce swobodnie podpartej do wyznaczenia sztywności obrotowej połączeń przyjęto podpory nieprzesuwne po obu stronach belki. W obu przypadkach przyjęto, że belki są zabezpieczone przed zwichrzeniem przez zablokowanie możliwości przesuwu pasów w kierunku poziomym. Przykładowe modele numeryczne jednego z analizowanych połączeń przedstawiono na rysunkach 6 oraz 7.

Do profili stalowych oraz elementów połączeń zastosowano elementy skończone 3D typu SOLID o adaptacyjnym rozmiarze siatki, lecz nie większej niż 0,005 m. Śruby w połączeniach zamodelowano z trzech elementów: dwie nakrętki oraz trzpień (rysunek 8). Pomiedzy nakrętkami a prętem zastosowano kontakt typu BONDED. Wartości sił wstępnego sprężenia w śrubach przyjęto zgodnie z normą [20], przyjmując wartości nominalnych wymaganych sił sprężenia $F_{p,c}$. W przypadku śrub M12 kl. 10.9 przyjęto siłę sprężenia 59 kN, natomiast w przypadku śrub M16 kl. 10.9 siłę sprężenia 110 kN. Na powierzchniach styków kontakty pomiędzy elementami połączeń przyjęto jako tarcio-we, natomiast wartość współczynnika tarcia pomiędzy elementami przyjęto $\mu = 0,2$. Liniowo-sprężyste właściwości belki oraz elementów połączenia ze stali gatunku S235 zostały przyjęte na podstawie normy [18], natomiast w przypadku śrub klasy 10.9 przyjęto je na podstawie normy [19]. Ze względu na wstępną analizę porównawczą różnych rodzajów połączeń montażowych przyjęto rodzaj statycznej analizy liniowej. Obliczenia numeryczne wykonane zostały w dwóch krokach czasowych: krok pierwszy obejmował zadanie siły wstępnego sprężenia śrub, natomiast w drugim kroku dodano obciążenia zewnętrzne.



Rys. 4. Schematy konstrukcyjne powszechnie stosowanych połączeń stalowych belek dwuteowych [mm]: a) doczołowe; b) doczołowe ze śrubami wysuniętymi poza przekrój; c) zakładkowe

Fig. 4. Construction diagrams of commonly used connections for steel I-beams [mm]: a) end-plate joint; b) end-plate joints with bolts extended beyond the cross-section; c) overlapping

Omówienie wyników

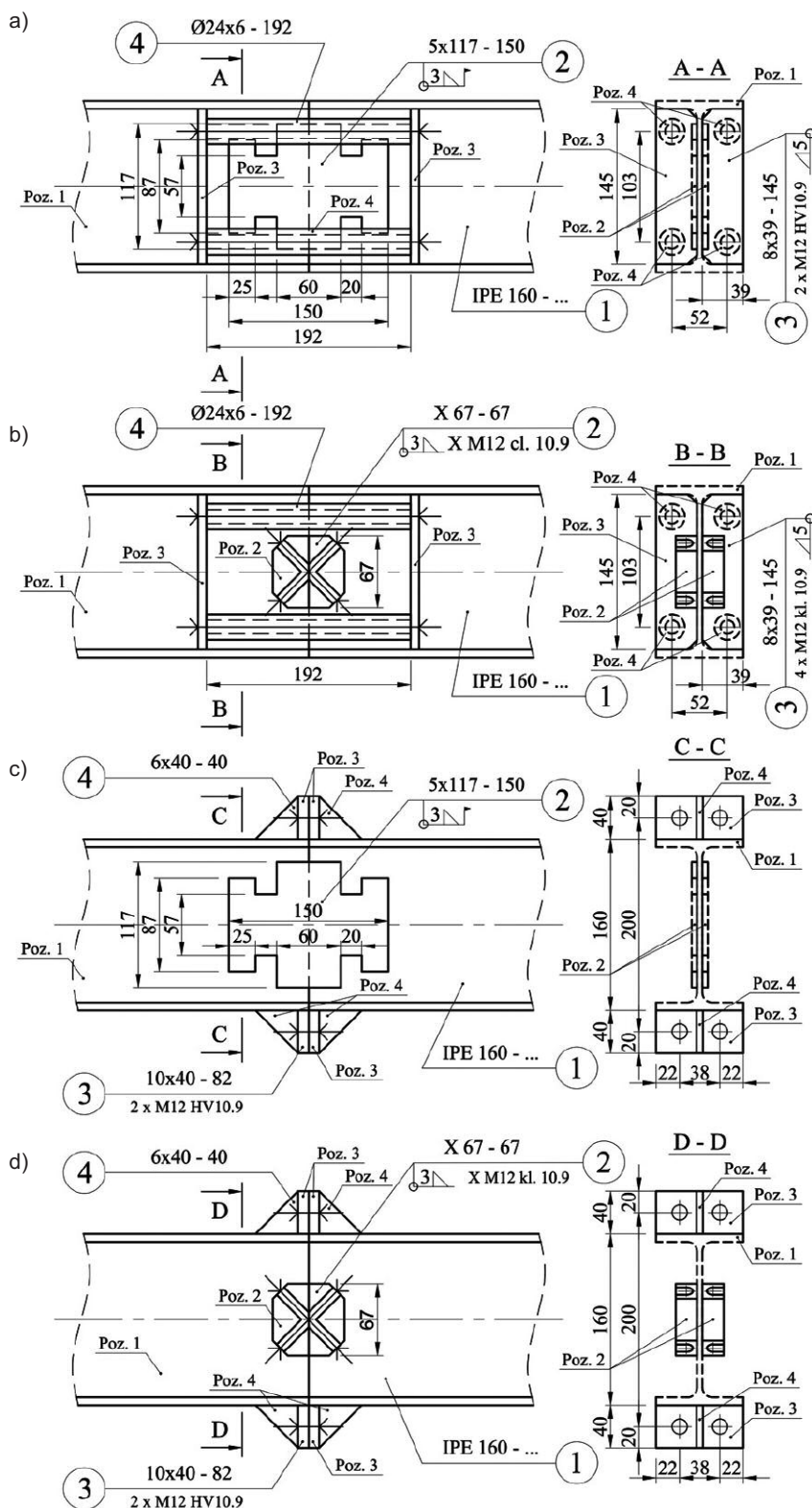
W analizowanych modelach wzięto pod uwagę naprężenia oraz przemieszczenia. Rozkład podłużnych naprężeń normalnych (wzdłuż osi X) w przypadku jednego z wariantów połączeń przedstawiono na rysunku 9.

Rozkład naprężeń normalnych podłużnych (wzdłuż osi X) we wsporniku (rysunek 9a) pokazuje, że w stalowej belce przeważają naprężenia rozciągające w górnym pasie przekroju przy utwierdzeniu, czyli w miejscu największego momentu zginającego (naprężenia nie przekraczają 235 MPa). Ponad-

to rozkład naprężeń w belce swobodnie podpartej (rysunek 9b) pokazuje, że w stalowej belce przeważają również naprężenia ściskające w górnym pasie przekroju w środku rozpiętości belki, czyli w miejscu największego momentu zginającego. Naprężenia te również nie przekraczają 235 MPa, co świadczy o zgodności z obliczeniami analitycznymi nośności przekroju. Zestawienie rozkładu naprężeń zredukowanych we wszystkich analizowanych połączeniach przedstawiono na rysunku 10. Zestawienie to dotyczy niekorzystnego schematu, czyli belki swobodnie pod-

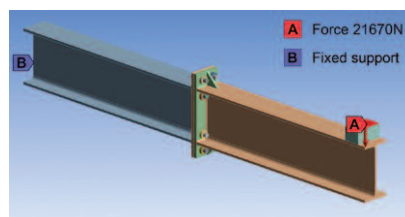
partej, ponieważ w osi połączenia występuje maksymalny moment zginający.

Analizując rozkład naprężeń w połączeniach (rysunek 10), można ocenić efektywność pracy połączeń. W połączeniu doczołowym (rysunek 10a) wyraźnie widoczne są naprężenia w blaszce czołowej przy śrubach w strefie rozciąganej, natomiast ogółem naprężenia nie przekraczają dopuszczalnych. W połączeniu doczołowym ze śrubami wysuniętymi poza przekrój (rysunek 10b) siły są znacznie efektywniej przekazywane przez łączniki oraz blachę czołową niż w połączeniu ze śrubami wewnątrz przekroju, pomimo cieńszej blachy czołowej oraz mniejszej średnicy śrub. W połączeniu zakładkowym (rysunek 10c) naprężenia równomiernie rozkładają się w nakładkach zarówno w pasach, jak i w środku. W połączeniach zmodyfikowanych ze śrubami zlokalizowanymi wewnątrz przekroju (rysunek 10d oraz 10e) zwiększone naprężenia występują na styku żeber z tulejami w strefie rozciąganej, natomiast dzięki zastosowaniu nakładki spawanej do środka (rysunek 10d) można było zmniejszyć grubość żeber oraz średnicę śrub. Śruba krzyżowa (rysunek 10e) znajduje się głównie w osi obojętnej przekroju, przez co przenosi mniejsze siły, skutkując większymi naprężeniami w żeberkach oraz tulei w strefie rozciąganej względem połączenia z nakładką spawaną do środka (rysunek 10d). W połączeniach zmodyfikowanych ze śrubami zlokalizowanymi na zewnątrz przekroju (rysunek 10f oraz 10g), łączniki śrubowe wysunięte poza przekrój efektywnie przenoszą siły, natomiast nakładka spawana do środka (rysunek 10f) efektywnie przenosi siły ze środka. W strefie rozciąganej, na styku nakładki ze środkiem, pojawiają się zwiększone naprężenia. Śruba krzyżowa (rysunek 10g) analogicznie do połączenia (rysunek 10e) przenosi mniejsze siły, dlatego też występują większe naprężenia w łącznikach czołowych. Pomimo zwiększonych naprężeń w niektórych miejscach w stykach połączeń nie przekraczają one 235 MPa. Przedstawione połączenia pozwalają zatem efektywnie łączyć belki w zakresie granicy plastyczności stali. Należy zwrócić uwagę na duże naprężenia w sa-



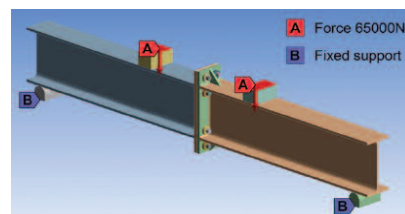
Rys. 5. Schematy opracowanych połączeń zmodyfikowanych [mm]: a) częściowo spawane ze śrubami wewnątrz przekroju; b) ze śrubą krzyżową na środniku oraz śrubami wewnątrz przekroju; c) częściowo spawane ze śrubami wysuniętymi poza przekrój; d) ze śrubą krzyżową na środniku oraz śrubami wysuniętymi poza przekrój

Fig. 5. Diagrams of the developed modified connections [mm]: a) partially welded with bolts inside the cross-section; b) with a cross-bolt on the web and bolts inside the cross-section; c) partially welded with bolts extending beyond the cross-section; d) with a cross bolt on the web and bolts extended beyond the cross-section



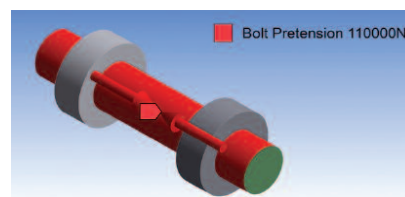
Rys. 6. Model numeryczny jednego z analizowanych wariantów belki wspornikowej z zaznaczonymi siłami oraz warunkami brzegowymi

Fig. 6. Numerical model of one of the analyzed variants of the cantilever beam with the marked force and boundary conditions



Rys. 7. Model numeryczny jednego z analizowanych wariantów belki swobodnie podpartej z zaznaczonymi siłami oraz warunkami brzegowymi

Fig. 7. Numerical model of one of the analyzed variants of a simply supported beam with marked forces and boundary conditions

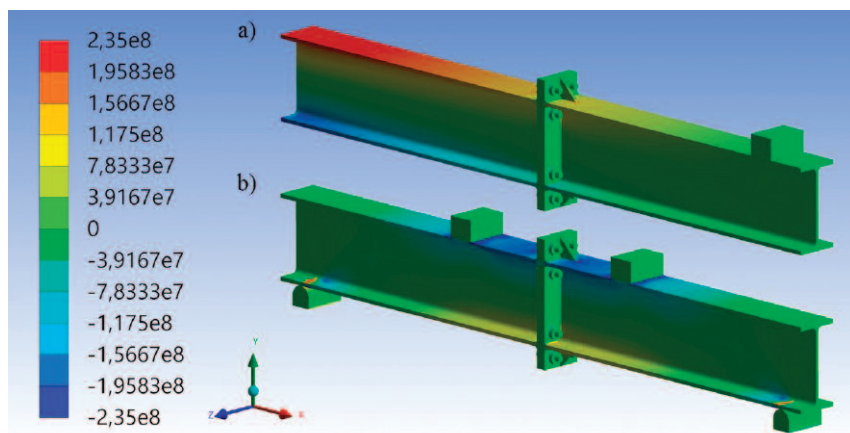


Rys. 8. Model numeryczny śruby ze wskazaną siłą wstępnego sprężenia

Fig. 8. Numerical model of the bolt with the indicated pre-tension force

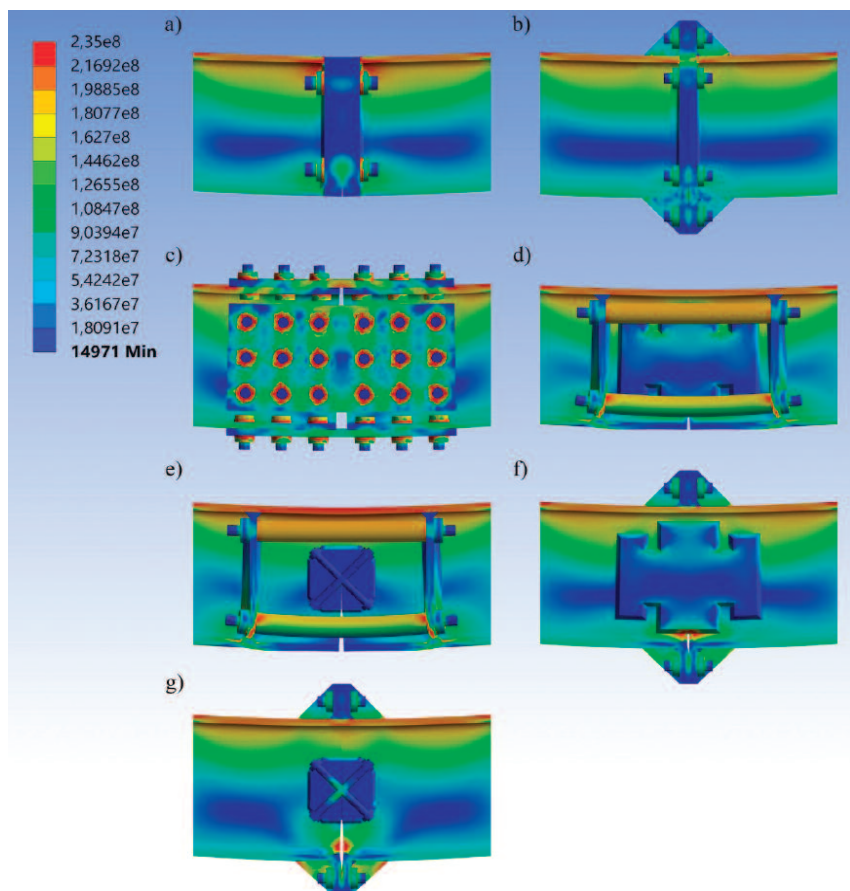
mych śrubach, ponieważ są one wykonane z materiału o innej granicy plastyczności, która wynosi 900 MPa, natomiast mapy naprężeń na rysunku 10 obejmują zakres do 235 MPa. Rozkład naprężeń w śrubach przedstawiono na rysunku 11. Nie przekraczają one 700 MPa, co świadczy o zgodności z obliczeniami analitycznymi nośności śrub.

Z rysunku 12a wynika, że największe przemieszczenie występuje na końcu przęsła dla wspornika, natomiast z rysunku 12b, że na środku przęsła w miejscu połączenia. Przemieszczenie belki łączonej można ocenić jedynie za pomocą modelu numerycznego, ponieważ norma [17] nie określa metody obliczania przemieszczeń belek z połączeniami. Zbiorcze zestawienie maksymalnych przemieszczeń w przypadku



Rys. 9. Rozkład naprężeń normalnych podłużnych w przypadku analizowanego modelu połączenia doczołowego ze śrubami wysuniętymi poza przekrój (Pa): a) belka wspornikowa; b) belka swobodnie podparta

Fig. 9. Distribution of normal longitudinal stresses for the analyzed model of a end-plate connection with bolts extended beyond the cross-section (Pa): a) cantilever beam; b) simply supported beam



Rys. 10. Rozkład naprężeń w analizowanych połączeniach w przypadku belki swobodnie podpartej [Pa], zgodnie z rysunkiem 1. Deformacje pokazane w 35-krotnym powiększeniu – opis w artykule

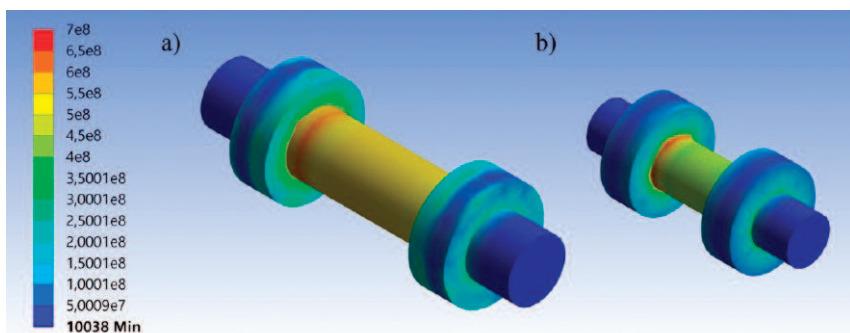
Fig. 10. Stress distribution in the analyzed connections for a simply supported beam [Pa], as shown in Fig. 1. Deformations shown at 35x magnification – description in text

wszystkich analizowanych połączeń przedstawiono w tabeli 2. Analizując maksymalne ugięcia belki wspornikowej przedstawione w tabeli 2, można za-

uważać, że połączeniem zapewniającym najmniejsze przemieszczenie pionowe jest połączenie doczołowe ze śrubami wysuniętymi poza przekrój (rysunek 10b), ponieważ wynosi ono 9,079 mm, czyli najbliższej maksymalnego ugięcia belki wspornikowej bez połączenia, które jest równe 8,835 mm. Kolejnymi porównywalnymi połączeniami są połączenia: częściowo spawane ze śrubami wewnątrz przekroju (rysunek 10d) z przemieszczeniem pionowym 9,114 mm; zakładkowe (rysunek 10c) z przemieszczeniem wynoszącym 9,126 mm; doczołowe ze śrubami wewnątrz przekroju (rysunek 10a) z przemieszczeniem wynoszącym 9,140 mm oraz połączenie częściowo spawane ze śrubami wysuniętymi poza przekrój (rysunek 10f) z przemieszczeniem 9,198 mm. Ze względu na przekroczone dopuszczalne ugięcia najgorzej wypadły połączenia ze śrubami krzyżowymi (rysunki 10e oraz 10g) z przemieszczeniami wynoszącymi odpowiednio 9,760 i 9,912 mm.

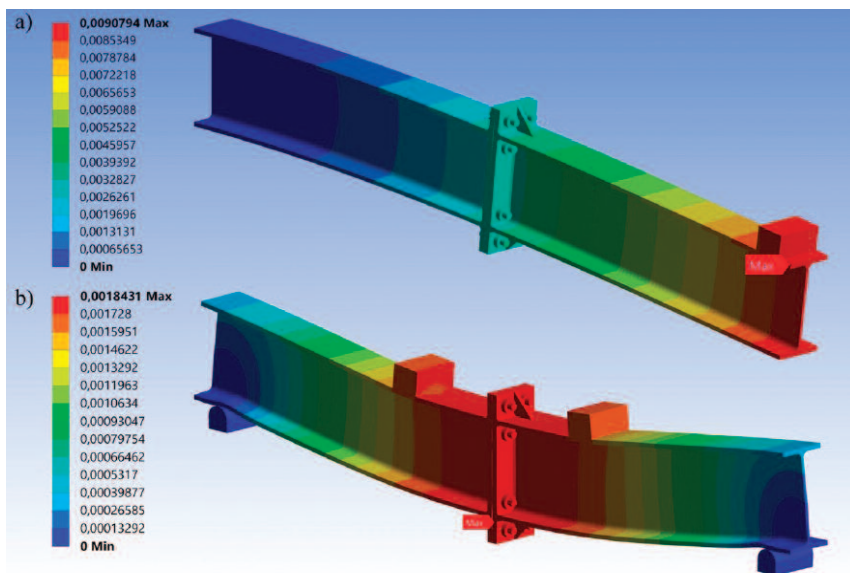
Analizując maksymalne ugięcia belki swobodnie podpartej z analizowanymi połączeniami wykazano, że najmniejsze ugięcia zapewniają połączenia częściowo spawane ze śrubami wysuniętymi poza przekrój (rysunek 10f) oraz połączenie doczołowe ze śrubami wysuniętymi poza przekrój (rysunek 10b). Połączenia te zapewniają ugięcia wynoszące odpowiednio 1,840 mm oraz 1,843 mm, które są najbliższe maksymalnego ugięcia belki swobodnie podpartej bez połączenia z ugięciem równym 1,765 mm. Nieco słabiej wypadają połączenia doczołowe (rysunek 10a) oraz połączenie częściowo spawane ze śrubami wewnątrz przekroju (rysunek 10d) z ugięciami wynoszącymi odpowiednio 1,893 mm oraz 1,962 mm. Najgorzej wypadającymi połączeniami pod względem przemieszczeń pionowych są połączenia ze śrubami krzyżowymi (rysunek 10e oraz 10g) oraz połączenie zakładkowe (rysunek 10c) z przemieszczeniami wynoszącymi odpowiednio 2,045, 2,077 mm oraz 2,032 mm. Pomimo uzyskania większych przemieszczeń, wszystkie połączenia spełniają warunek dopuszczalnego ugięcia w przypadku belki swobodnie podpartej. Wskazuje to na efektywność ich pracy w zakresie przemieszczeń pionowych w analizowanych schematach statycznych stalowych belek dwuteowych.

Wskazuje to na efektywność ich pracy w zakresie przemieszczeń pionowych w analizowanych schematach statycznych stalowych belek dwuteowych.



Rys. 11. Rozkład naprężeń zredukowanych w modelach numerycznych śrub [Pa]: a) śruba M16; b) śruba M12

Fig. 11. Distribution of reduced stresses in numerical models of bolts [Pa]: a) M16 bolt; b) M12 bolt



Rys. 12. Mapy przemieszczeń w przypadku analizowanego modelu połączenia doczołowego ze śrubami wysuniętymi poza przekrój, deformacje pokazane w 35-krotnym powiększeniu [m]: a) belka wspornikowa; b) belka swobodnie podparta

Fig. 12. Displacement maps for the analyzed model of the end-plate joint with bolts extended beyond the cross-section, deformations shown at 35x magnification [m]: a) cantilever beam; b) simply supported beam

Tabela 2. Maksymalne ugięcie w belce wspornikowej oraz swobodnie podpartej w przypadku analizowanych schematów połączenia belek, pokazanych na rysunku 1

Table 2. Maximum deflection in a cantilevered beam and a simply supported beam for the analyzed schemes of beam connections, shown in the same way as in Fig. 1

Analizowany model połączenia	Ugięcie belki	
	wspornikowej [mm]	swobodnie podpartej [mm]
a.	9,140	1,893
b.	9,079	1,843
c.	9,126	2,032
d.	9,114	1,962
e.	9,760	2,045
f.	9,198	1,840
g.	9,912	2,077

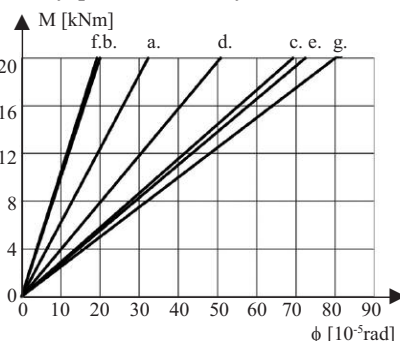
Ponadto na podstawie odczytanych przemieszczeń obliczono ich różnicę w przypadku belek bez połączenia oraz z połączeniami, a następnie z zależności trygonometrycznych wyznaczono kąty obrotu w połączeniach, wynikające z pracy samych połączeń. Przeprowadzono też analizę początkowej sztywności obrotowej w przypadku momentów zginających w zakresie liniowo-sprężystym 0 – 19 kNm, czyli ok. 2/3 $M_{pl,Rd}$ nośności belki na zgięcie. Ugięcia odczytywano również dla pośrednich wartości momentów zginających ze skokiem co 3 kNm. Obliczone wartości początkowej sztywności obrotowej połączeń przedstawiono na rysunku 13.



Rys. 13. Początkowa sztywność obrotowa połączeń, zgodnie z rysunkiem 1

Fig. 13. Graph of the initial rotational stiffness of the connections, as shown in Fig. 1

Analizując obliczoną początkową sztywność obrotową połączeń, stwierdzono, że najszywniejsze są połączenie częściowo spawane ze śrubami wysuniętymi poza przekrój (rysunek 10f) oraz standardowe połączenie doczołowe ze śrubami wysuniętymi poza przekrój (rysunek 10b). Połączenia te zapewniają początkową sztywność obrotową wynoszącą odpowiednio 104000 oraz 100000 kNm/rad. Mniejszą sztywnością obrotową charakteryzuje się połączenie doczołowe (rysunek 10a) oraz częściowo spawane ze śrubami wewnątrz przekroju (rysunek 10d) ze sztywnością połączeń wynoszącą odpowiednio 60937 oraz 39594 kNm/rad. Najmniej sztywnymi okazały się połączenia ze śrubami krzyżowymi (rysunek 10g oraz 10e) oraz połączenie zakładkowe (rysunek 10c) ze sztywnością wynoszącą odpowiednio 25000, 27857 oraz 29213 kNm/rad. Wykresy zależności pomiędzy momentem zginającym w połączeniu a jego kątem obrotu, czyli $M-\phi$ przedstawiono na rysunku 14. Węzeł całkowicie sztywny jest charakteryzowany przez oś rzędnych 0-M, nato-



Rys. 14. Wykres początkowej sztywności obrotowej analizowanych połączeń, pokazanych zgodnie z rysunkiem 1

Fig. 14. Graph of the initial rotational stiffness of the analyzed joints, as shown in Fig. 1

miast węzeł idealnie przegubowy przez oś 0- ϕ , a zatem im prosta M- ϕ znajduje się bliżej osi 0-M, tym połączenie charakteryzuje się większą sztywnością obrotową. Jak wynika z rysunku 14, kąt obrotu połączeń obliczony numerycznie zwiększa się prostoliniowo w zależności od momentu zginającego, natomiast z badań doświadczalnych wynika, że charakterystyka większości węzłów jest krzywoliniowa w całym zakresie badań [17]. Wiąże się to z przyjętą w pracy analizą liniowo-sprężystą. Mając na uwadze ocenę podatności połączeń, w wyniku przeprowadzonej analizy numerycznej można porównać ze sobą połączenia i ocenić je pod względem początkowej sztywności obrotowej.

Wnioski

W wyniku przeprowadzonej wstępnej analizy numerycznej oceniono efektywność połączeń belek pod kątem naprężeń oraz przemieszczeń. Najlepiej spośród analizowanych wypadło połączenie częściowo spawane ze śrubami wysuniętymi poza przekrój (rysunek 1f) oraz połączenie doczołowe ze śrubami wysuniętymi poza przekrój (rysunek 1b). Połączenia te charakteryzują się naprężeniami nieprzekraczającymi dopuszczalnych naprężeń w przypadku przyjętej stali S235 oraz największą początkową sztywnością obrotową. Należy jednak zwrócić uwagę, że w połączeniu doczołowym sprężonym z pełną blachą czołową (rysunek 1b), wymagana jest odpowiednia płaskość powierzchni blach doczołowych, ponieważ nierówności powstałe podczas spawania blachy do belki mogą uniemożliwić prawidłowe sprężenie śrub. Ponadto w zdeformowanych stykach może wystąpić nierównomierny rozkład sił w śrubach i doprowadzić do ich zerwania. Dodatkowo te połączenia zawierają elementy wystające poza przekrój, co w wielu przypadkach jest niemożliwe do zastosowania w konstrukcji. Innym interesującym połączeniem jest połączenie częściowo spawane ze śrubami wewnątrz przekroju (rysunek 1d), które również pozwala na efektywne łączenie belek, jednocześnie będąc połączeniem zamkniętym w obrysie łączonego przekroju. Najstabszymi wariantami okazały się połączenia

ze śrubami krzyżowymi (rysunki 1e oraz 1g), w których zostały przekroczone dopuszczalne ugięcia belki wspornikowej. Należy jednak zwrócić uwagę, że duża sztywność nie zawsze jest pożądana. Rodzaj przyjętego połączenia zależy zatem od rodzaju konstrukcji.

Wyniki uzyskane z przeprowadzonej analizy numerycznej dotyczącej zmodyfikowanych połączeń stalowych belek dwuteowych wykazały, że mogą być one ciekawą alternatywą dla zastosowania w połączeniach belek konstrukcji stalowej. Ponadto analiza wykazała, że istnieją alternatywne do tradycyjnych rozwiązania konstrukcyjne, które efektywnie będą przenosiły obciążenia wynikające z pracy konstrukcji. W dalszym etapie badań autorzy zwrócą uwagę na efektywność opracowanych połączeń stalowych belek dwuteowych w następstwie obciążeń dynamicznych i usprawnią technologicznie zaproponowane rozwiązania.

Literatura

- [1] Kontoleon MJ, Kaziolas DN, Zygomalas MD, Baniotopoulos CC. Analysis of steel bolted connections by means of a nonsmooth optimization procedure, *Computers & Structures*. 2003; ISSN 0045-7949, [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(03\)00311-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(03)00311-0).
- [2] Palacz P, Major I. Strengthening the existing connection of steel beams with a column, *MATEC Web Conference*. 2020; <https://doi.org/10.1051/mateconf/202031300032>.
- [3] Chen P, Gao F, Wan J. Experimental and numerical study of the tensile behavior of high-strength steel T-stub, *Progress in Steel Building Structures*. 2022; 24 (5): 40–50, 112. (in Chinese).
- [4] Kozłowski A. Konstrukcje stalowe, Przykłady obliczeń według PN-EN 1993-1, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2010. (in polish).
- [5] Zhihua Chen, Jiadi Liu, Yujie Yu, Chenhua Zhou, Rengjing Yan, Experimental study of an innovative modular steel building connection, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 139, 2017, Pages 69-82, ISSN 0143-974X, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.09.008>.
- [6] Yanxia Zhang, Zheng Yang, Yanglong Li, Xiaotian Cheng, Zhenwen Huang, Experimental and theoretical investigation of self-tapping bolt core tube flange column connection of prefabricated steel structure, *Engineering Structures*, Volume 278, 2023, 115482, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115482>.
- [7] Jianfen Li, Ben Mou, Zian Wang, Cyclic behavior of column-to-column connections in novel prefabricated H-shaped steel beam to CFST column joint, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 200, 2023, 107657, ISSN 0143-974X, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107657>.
- [8] Puthli R, Fleischer O. Investigations on bolted connections for high strength steel members, *Journal of Constructional Steel Research*. 2001; ISSN 0143-974X, [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(00\)00017-1](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(00)00017-1).
- [9] Shidong Nie, Hui Wang, Bo Yang, Zhenhang Cheng, Xiyu Ye, Zhenye Chen, Corrosion-induced mechanical properties of shear bolted connections in high strength weathering steel. *Thin-Walled Structures*. 2023; ISSN 0263-8231, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111013>.
- [10] Chao Jiang, Wen Xiong, C. S. Cai, Xiaoyi Zhou, Yichen Zhu, Yanjie Zhu, Parametric study on fatigue behavior of steel friction connections in shear, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 207, 2023, 107951, ISSN 0143-974X, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.107951>.
- [11] Chao Jiang, Wen Xiong, C. S. Cai, Xiaoyi Zhou, Yanjie Zhu, Corrosion effects on the fatigue performance of high-strength bolted friction connections, *International Journal of Fatigue*, Volume 168, 2023, 107392, ISSN 0142-1123, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107392>.
- [12] Lu Yonggui, You Yang, Zhang Wenchao, Song Jie, Wang Peijun, A Design Method for Thread-Fixed One-Side Bolted T-stub Connections at High Temperatures, *Progress in Steel Building Structures*, 23 (9), pp. 54 – 60, 2021. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.09.007.
- [13] Weiyong Wang, Haojie Fang, Linbo Zhang, Experimental and numerical studies on the behavior of high strength steel shear connections at elevated temperatures, *Fire Safety Journal*, Volume 139, 2023, 103820, ISSN 0379-7112, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103820>.
- [14] Zhihao Chen, Weiyong Wang, Zhiruoyu Wang, Experimental study on high-strength Q460 steel extended end-plate connections at elevated temperatures, *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 200, 2023, 107686, ISSN 0143-974X, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107686>.
- [15] Hanus F, Zilli G, Fransse J-M. Behaviour of Grade 8.8 bolts under natural fire conditions – Tests and model, *Journal of Constructional Steel Research*. 2011; ISSN 0143-974X, <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.03.012>.
- [16] Basiński W. Wyznaczenie sztywności obrotowej doczołowych połączeń podatnych w metalowych konstrukcjach prętowych na podstawie pomiaru drgań, *Rozprawa doktorska*. Wydział Budownictwa Politechniki Śląskiej. Gliwice. 2006.
- [17] Bródka J, Kozłowski A. Sztywność i nośność węzłów podatnych. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej*. Białystok, Rzeszów. 1996.
- [18] PN-EN 1993-1-1. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. 2006.
- [19] PN-EN 1993-1-8. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-8: Projektowanie węzłów. 2006.
- [20] PN-EN 1090-2. Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych – Część 2: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych. 2018.

Przyjęto do druku: 27.03.2024 r.