

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

Analiza numeryczna belek ze zmodyfikowanymi połączeniami doczołowymi

Numerical analysis of beams with modified end-plate joints

DOI: 10.15199/33.2023.12.04

Streszczenie. Skręcane połączenia doczołowe są nieodzownym elementem każdej konstrukcji stalowej. Umożliwiają szybki i łatwy montaż elementów konstrukcji na budowie. W połączeniach doczołowych mogą wystąpić nierówności podczas spawania blachy czołowej do belki, co może uniemożliwić prawidłowe sprężenie śrub, a w efekcie doprowadzić do nierównomiernego rozkładu w nich sił. Artykuł obejmuje analizę zmodyfikowanych skręcanych połączeń doczołowych stalowych belek dwuteowych z dwuczęściowymi blachami czołowymi w porównaniu z powszechnie stosowanymi połączeniami doczołowymi z pełnymi blachami czołowymi. Przeprowadzono obliczenia analityczne oraz analizę numeryczną belek z połączeniami w przypadku dwóch schematów zamocowania belki: swobodnie podparłej oraz wspornikowej. Badanymi parametrami były: rozkład naprężeń w połączeniach, maksymalne ugięcie belek oraz sztywność obrotowa połączeń. Wyniki wykazały, że zaproponowane zmodyfikowane połączenia doczołowe charakteryzują się dużą efektywnością przenoszenia obciążeń oraz większą sztywnością obrotową w porównaniu ze standardowymi rozwiązaniami połączeń doczołowych.

Słowa kluczowe: zmodyfikowane połączenia doczołowe; połączenia skręcane; nośność połączeń; połączenia stalowych belek dwuteowych; analiza MES.

Abstract. Bolted end-plate joints are an indispensable element of any steel structure. They enable quick and easy assembly of structural elements on the construction site. In end-plate joints irregularities may occur during the welding of the end plate to the beam, which may prevent proper prestressing of the bolts and, as a result, may lead to uneven distribution of forces in the bolts. The article includes an analysis of modified bolted end-plate joints with two-part end-plates in comparison to commonly used full end-plate end-plate joints. An analytical and numerical analysis of beams with connections was carried out for two beam attachment schemes: simply supported and cantilevered. The parameters tested were stress distribution in the connections, maximum beam deflections and rotational stiffness of the connections. The results have shown that the proposed modified end-plate joints are characterized by high load transfer efficiency and greater rotational stiffness compared to standard end-plate joint solutions.

Keywords: modified end-plate connections; bolted connections; connection capacity; steel I-beam connections; FEM analysis.

Konstrukcje stalowe cieszą się dużym zainteresowaniem ze względu na lekkość oraz łatwość i szybkość montażu [1]. Ważnymi ich elementami są połączenia umożliwiające łatwy montaż na placu budowy. Połączenia pełnią bardzo ważną funkcję, ponieważ to dzięki nim są przekazywane siły wewnętrzne w konstrukcji na elementy nośne, a uszkodzenie połączenia może prowadzić nawet do destrukcji całej konstrukcji [2]. Poprawnie zaprojektowane styki montażowe decydują o odpowiednim przeniesieniu sił wewnętrznych, zapewniając przy tym bezpieczną eksploatację [3]. Są różne rodzaje połączeń: spawane, skręcane, nitowane oraz klejone, a wśród nich połączenia śrubowe, które

re mają wiele zalet, np. łatwość montażu oraz demontażu lub naprawy i wymiany uszkodzonych elementów [4]. Jednym z rodzajów połączeń skręcanych są **doczołowe połączenia śrubowe**, które charakteryzują się prostotą wykonania oraz możliwością uzyskania odpowiedniej nośności i sztywności, szczególnie w dwuteownikach spawanych lub gorącownicowych [5].

W powszechnie stosowanych połączeniach doczołowych używane są pełne blachy czołowe, przez które przechodzą śruby. W przypadku połączeń, w których styk śrubowy jest obciążony cyklicznie, należy stosować połączenie sprężone, czyli kategorii E. W takich połączeniach wymagana jest odpowiednio płaska powierzchnia styku blach czołowych, ponieważ wszelkie odkształcenia powstałe podczas procesu spawania blachy do belki mogą uniemożliwić poprawne sprężenie śrub. Po-

nadto w połączeniach doczołowych z imperfekcjami geometrycznymi blach czołowych pod wpływem obciążenia zewnętrznego może wystąpić znaczny przyrost sił w łącznikach śrubowych w stosunku do sił wstępnego sprężenia. W tym przypadku siły wstępnego sprężenia śrub sumują się z siłami od obciążeń zewnętrznych, co może prowadzić nawet do zerwania śrub [6]. W większości przypadków odkształcenia blach czołowych znacznie zmniejszają nośność sprężonych połączeń doczołowych [6 ÷ 11].

Naukowcy od wielu lat starają się znaleźć rozwiązania, które wyeliminują niekorzystne skutki odkształceń powstałych w połączeniach doczołowych blach czołowych. Zaproponowano m.in. przekładki pomiędzy blachami czołowymi lub wypełnienie polimerem szczelin pomiędzy blachami. Nie są to jednak w pełni skuteczne spo-

¹⁾ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

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

soby, a w niektórych przypadkach zastosowanie przekładek może spowodować skutek odwrotny do zamierzonego [8]. W [5, 12] przedstawiono koncepcję wykonywania doczołowych styków, w której pełne blachy czołowe zastąpiono króćcami teowymi, powstającymi dzięki przyspawaniu blach do półek belek. Omówiono i przedstawiono wstępne wyniki analizy numerycznej oraz wykazano, że to rozwiązanie jest dobrą alternatywą w przypadku styków z pełnymi blachami doczołowymi.

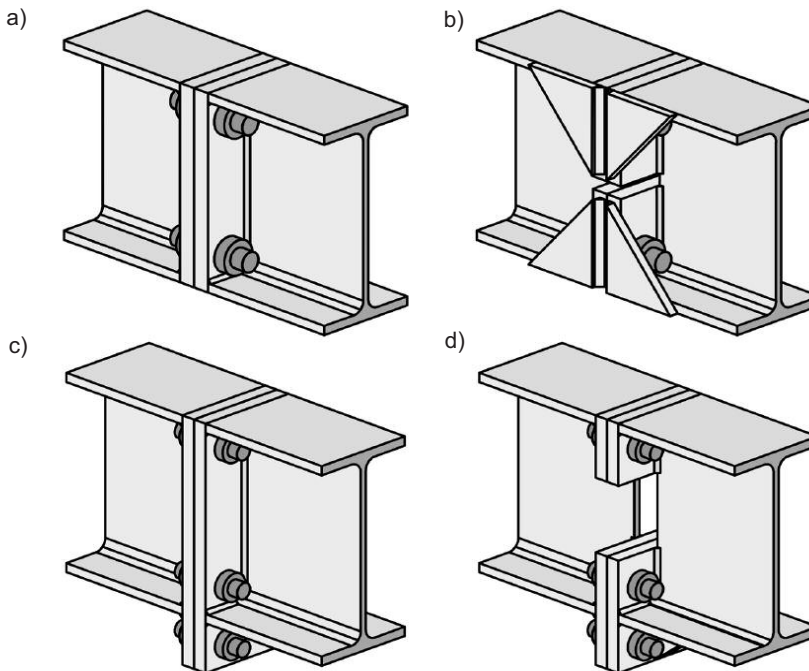
Połączenia doczołowe klasyfikujemy jako podatne, które w prętowych konstrukcjach przechyłowych wpływają na zmniejszenie ich nośności krytycznej i granicznej. Właściwości doczołowych połączeń podatnych wpływają m.in. na siły przekrojowe, nośność krytyczną, nośność graniczną i przemieszczenia konstrukcji. Na sztywność obrotową połączenia ma przede wszystkim wpływ geometria wszystkich składowych elementów węzła wraz ze śrubami oraz przyległymi elementami pasów i średnika belki [13]. Autorzy [14] przedstawili doświadczenia z przeprowadzonych analiz połączeń podatnych i wykazali, że wszystkie są odkształcalne, a ich właściwości mechaniczne wykazują znaczne rozbieżności, szczególnie w przypadku sztywności obrotowej i nośności granicznej. Rozbieżności sztywności obrotowej połączeń wynikają m.in. z imperfekcji geometrycznych blach czołowych. Wskutek podatności połączenia obciążenie przenoszone przez połączony element konstrukcyjny wpływa na nośność i stateczność konstrukcji. Charakterystykę podatności węzła można ocenić z zależności między momentem zginającym w połączeniu a jego kątem obrotu, czyli za pomocą krzywej $M-\phi$ [14].

W artykule przedstawiono analizę zmodyfikowanych połączeń doczołowych dwuteowych belek, w których zastosowano blachy czołowe składające się z dwóch części. Zaproponowane rozwiązania porównano pod względem rozkładu naprężeń oraz oszacowanej sztywności obrotowej ze standardowymi rozwiązaniami połączeń doczołowych belek z pełną blachą czołową.

Cel i zakres analizy

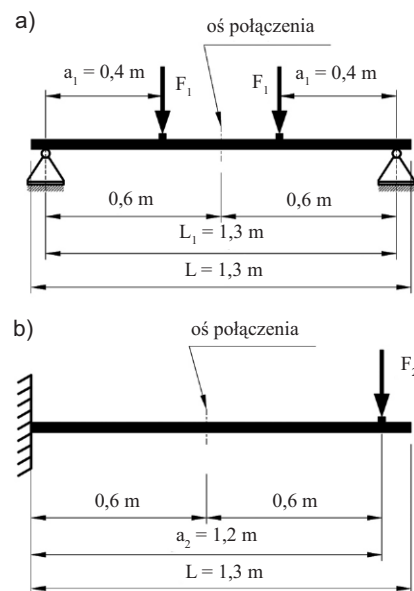
Przeprowadzono analizę numeryczną zmodyfikowanych skręcanych połączeń doczołowych stalowych belek dwuteowych i porównano je ze stalowymi połączeniami doczołowymi powszechnie stosowanymi w konstrukcjach. Celem analizy było sprawdzenie efektywności zaproponowanych rozwiązań w konstrukcjach. Schematy analizowanych połączeń doczołowych przedstawiono na rysunku 1. Poddane analizie zmodyfikowane połączenia doczołowe mają na celu wyeliminowanie pełnych blach czołowych i uniknięcie odchyłek powstających podczas procesu spawania. Do analizy przyjęto dwa jednoprzęsłowe schematy zamocowania belki (rysunek 2). W środku rozpiętości belki modelowano standardowe (rysunki 1a i c) oraz zmodyfikowane (rysunki 1b i d) połączenia doczołowe.

Analizę przeprowadzono na belkach z dwuteownika walcowanego IPE 160 ze stali S235 o długości 1,3 m. Belkę swobodnie podpartą obciążono dwiema siłami skupionymi F_1 o wartości 65 kN przyłożonymi w odległości 0,4 m



Rys. 1. Analizowane połączenia doczołowe stalowych belek dwuteowych: a) połączenie doczołowe ze śrubami wewnątrz przekroju; b) połączenie doczołowe z dwuczęściową blachą czołową z dodatkowymi blachami bocznymi oraz ze śrubami wewnątrz przekroju; c) połączenie doczołowe ze śrubami wysuniętymi poza przekrój w strefie rozciąganej; d) połączenie doczołowe z dwuczęściową blachą czołową oraz z wysuniętymi śrubami poza przekrój w strefie rozciąganej

od każdej z podpór (rysunek 2a). Natomiast belkę wspornikową obciążono jedną siłą skupioną F_2 o wartości 21,67 kN w odległości 1,2 m od utwier-



Rys. 2. Schematy statyczne zamocowania belki: a) belka swobodnie podparta; b) wspornik

Fig. 2. Static diagrams of beam attachment:

a) simply supported beam; b) cantilevered

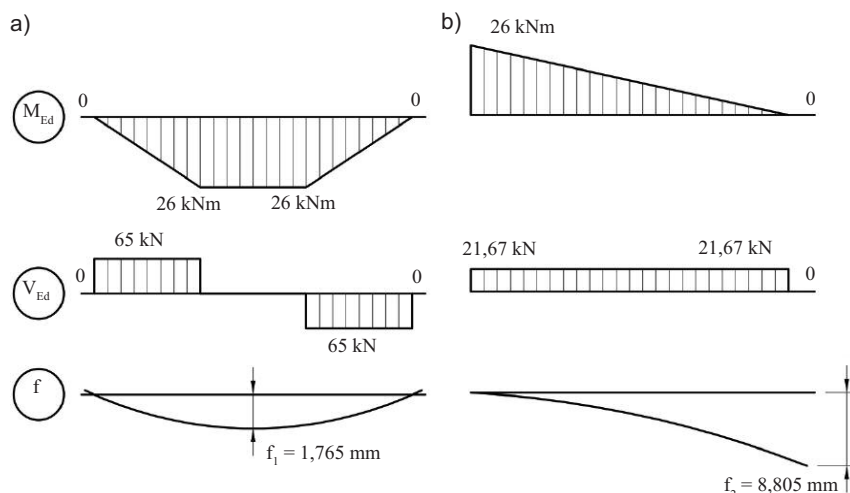
denia (rysunek 2b). W przypadku analizowanych schematów przyjęto maksymalne wartości sił, z wykorzystaniem do 90% stanu granicznego nośności przekroju belki.

Na podstawie obliczeń analitycznych określono siły wewnętrzne w przypadku przyjętych schematów zamocowania belek. Następnie sprawdzono warunki stanu granicznego nośności i użyteczności przyjętego profilu belki (tabela 1) na podstawie PN-EN 1993-1-1 [15]. Ze względu na założone warunki brzegowe w belce swobodnie podpartej oraz w celu wyznaczenia rzeczywistego ugięcia do obliczenia sztywności połączeń podatnych odczytano maksymalne ugięcie belki ciągłej bez połączenia w programie Ansys. Wykresy sił wewnętrznych oraz ugięcia belek w przypadku przyjętych schematów zamocowania przedstawiono na rysunku 3.

Tabela 1. Warunki stanu granicznego nośności i użyteczności analizowanych schematów belek

Table 1. Conditions of the ultimate and serviceability limit state for the analyzed static schemes of beams

Parametr	Schemat statyczny belki	
	swobodnie podparta	wspornikowa
Nośność przekroju na zginanie [kNm]	29,09	
Nośność przekroju na ścinanie [kN]	108,54	
SGN [%]	89,38	89,38
Dopuszczalne ugięcie [mm]	4,80	9,60
SGU [%]	36,77	92,03



Rys. 3. Wykresy momentów zginających – M_{Ed} , sił tnących – V_{Ed} oraz ugięcia – f w przypadku analizowanych schematów belek: a) belka swobodnie podparta; b) wspornik
 Fig. 3. Diagrams of bending moments – M_{Ed} , shear forces – V_{Ed} and deflections – f for the analyzed beam schemes: a) simply supported beam; b) cantilevered

Nośność na zginanie i ścinanie przekroju stalowej belki obliczono zgodnie z normą [15] za pomocą wzorów (1) i (2)

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (1)$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (2)$$

gdzie:

$M_{c,Rd}$ – nośność na zginanie;
 W_{pl} – wskaźnik wytrzymałości przy zginaniu;
 $V_{pl,Rd}$ – nośność na ścinanie;
 A_v – pole przekroju czynnego przy ścinaniu;
 f_y – wartość granicy plastyczności stali;
 γ_{M0} – współczynnik częściowy.

Dopuszczalne ugięcie belek obliczono za pomocą wzoru (3) na podstawie normy [15]

$$f_{lim} = L/250 \quad (3)$$

gdzie:

f_{lim} – dopuszczalne maksymalne ugięcie wspornika/belki;
 L – rozpiętość w przypadku belki swobodnie podpartej (w przypadku belki wspornikowej pomnożona przez 2).

W celu analizy porównawczej dobrano powszechnie stosowane dwa rodzaje połączeń doczołowych belek z pełnymi blachami czołowymi (rysunek 4). Grubość blach czołowych oraz śruby w połączeniach określono i zwymiarowano zgodnie z PN-EN 1993-1-8 [16]. Następnie połączenia zmodyfikowano tak, aby blacha czołowa składała się z dwóch części (rysunek 5). Wszystkie analizowane połączenia poddano analizie numerycznej metodą elementów skończonych

z użyciem programu Ansys Research. Ocenę pracy połączeń porównano między sobą w odniesieniu do rozkładu naprężeń, przemieszczeń oraz sztywności obrotowej.

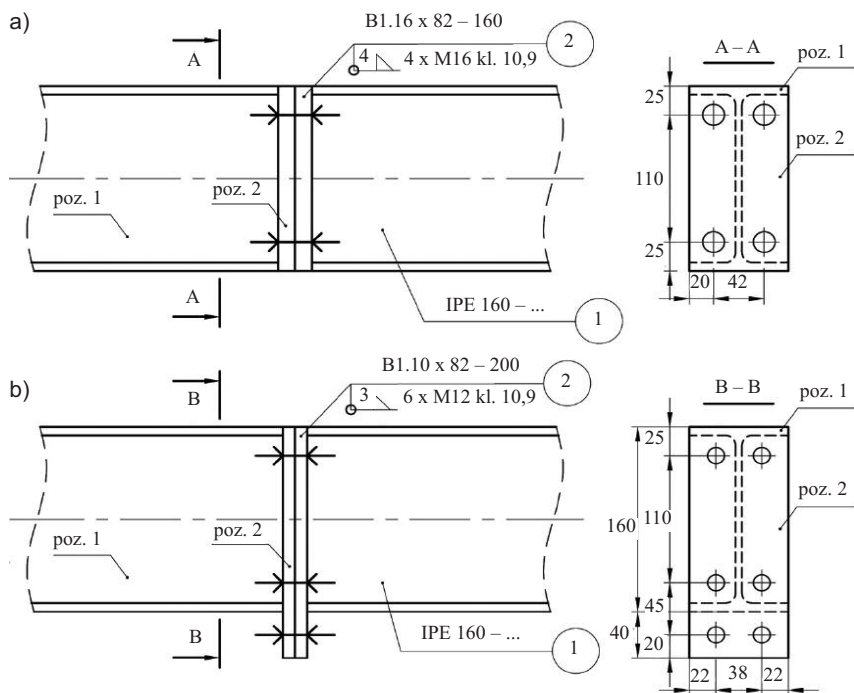
Model numeryczny

Modele numeryczne wszystkich analizowanych połączeń zostały wykonane w programie Ansys Research przez zadeklarowanie geometrii, warunków brzegowych oraz obciążeń tożsamyh z obliczeniami analitycznymi. W celu zachowania symetrii układu w belce swobodnie podpartej, do wyznaczenia sztywności obrotowej połączeń przyjęto podpory nieprzesuwne po obu stronach belki. Założono, że belki są zabezpieczone przed zwichrzeniem. Modele numeryczne wybranych analizowanych połączeń przedstawiono na rysunkach 6 i 7.

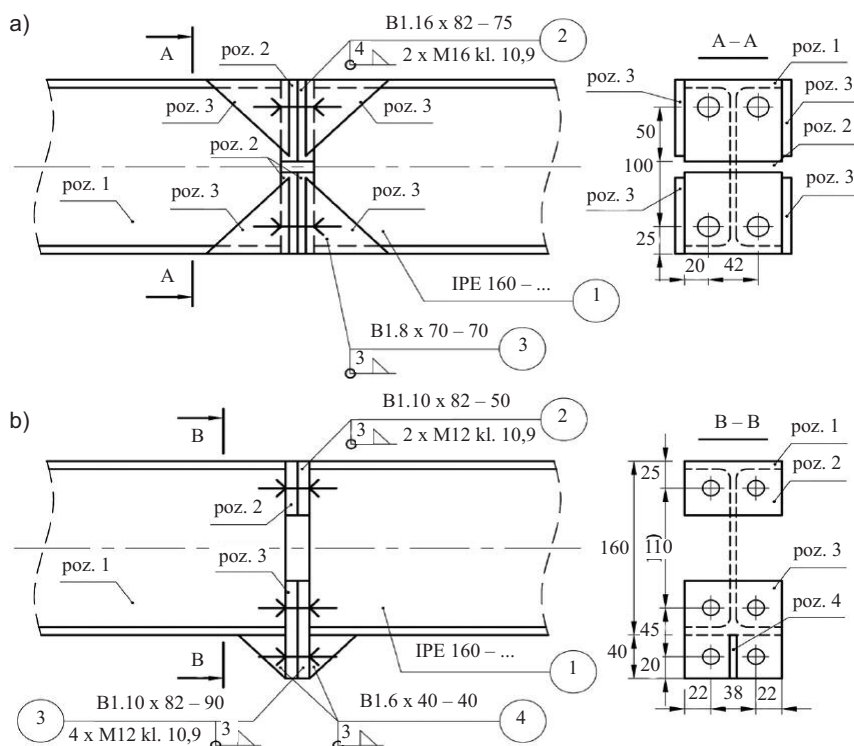
Do stalowej belki oraz elementów połączeń zastosowano elementy skończone 3D o adaptacyjnym rozmiarze siatki, lecz nie większym niż 0,005 m. Śruby w połączeniach zamodelowano zgodnie z normą VDI 2230:2014, tworząc je z trzech elementów: dwie nakrętki oraz trzpień śruby [17]. Wartości wstępne sprężenia śrub dobrano na podstawie kalkulatora momentu dokręcenia i wstępnego sprężenia [18] dla śrub klasy 10.9 zgodnie z normą VDI 2230:2014, przyjmując wartość tarcia nakrętki/śruby $\mu = 0,12$. Wyznaczono moment dokręcenia oraz obciążenie wstępne śrub przy 50% wykorzystaniu granicy ich plastyczności. Wartości przyjętego momentu dokręcenia oraz obciążenia wstępnego śrub numerycznych przedstawiono w tabeli 2. Wartość współczynnika tarcia pomiędzy elementami w modelu przyjęto $\mu = 0,2$, a właściwości materiałów, z których wykonano elementy, były zgodne z normami [15, 16] i przedstawiono je w tabeli 3. Obliczenia numeryczne wykonano w dwóch krokach czasowych: w pierwszym zadano obciążenie wstępne śrub, a w drugim obciążenia zewnętrzne.

Omówienie wyników analizy numerycznej

Analizując wyniki, wzięto pod uwagę rozkład naprężeń oraz przemieszczenia maksymalne. Rozkład naprężeń

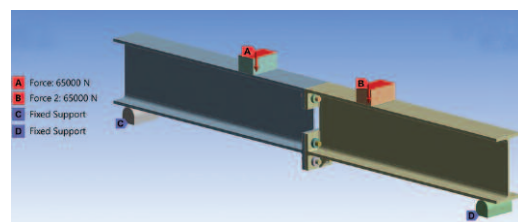


Rys. 4. Schematy konstrukcyjne powszechnie stosowanych skręcanych połączeń doczołowych stalowych belek dwuteowych: a) połączenie doczołowe ze śrubami wewnątrz przekroju; b) połączenie doczołowe z wysuniętymi śrubami poza przekrój w strefie rozciąganej



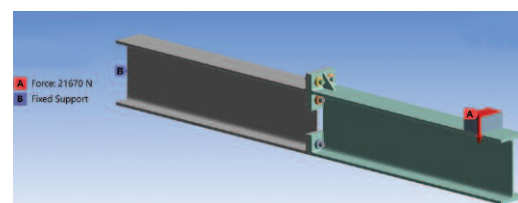
Rys. 5. Schematy opracowanych zmodyfikowanych połączeń doczołowych: a) połączenie doczołowe z dwuczęściową blachą czołową z dodatkowymi blachami bocznymi oraz ze śrubami wewnątrz przekroju; b) połączenie doczołowe z dwuczęściową blachą czołową oraz z wysuniętymi śrubami poza przekrój w strefie rozciąganej

Fig. 5. Schemes of the developed modified end-plate joints: a) end-plate joint with a two-part end-plate with additional side plates and with bolts inside the section; b) end-plate joint with a two-part end-plate and bolts protruding beyond the section in the tension zone



Rys. 6. Model numeryczny jednego z analizowanych wariantów belki swobodnie podpartej z zaznaczonymi siłami oraz podporami

Fig. 6. Numerical model of one of the analyzed variants of a simply supported beam with marked forces and supports



Rys. 7. Model numeryczny jednego z analizowanych wariantów belki wspornikowej z zaznaczoną siłą oraz utwierdzeniem

Fig. 7. Numerical model of one of the analyzed variants of the cantilever beam with marked force and restraint

Tabela 2. Wartości przyjętego maksymalnego momentu dokręcenia śrub oraz maksymalnego obciążenia wstępного śrub zamodelowane w modelach numerycznych

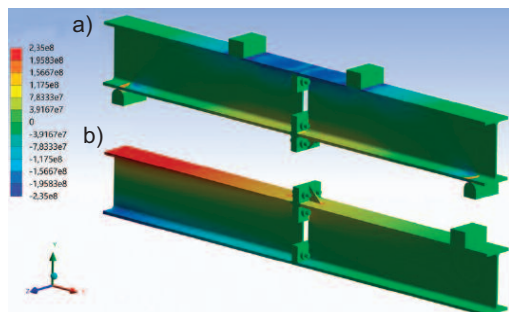
Średnica śruby	Klasa śruby	Granica plastyczności śruby [MPa]	Moment dokręcenia śruby [Nm]	Obciążenie wstępne [kN]
M12	10,9	900	69,05	35,18
M16	10,9	900	168,03	66,07

Tabela 3. Właściwości materiałów przyjęte w modelach numerycznych na podstawie norm [15, 16]

Table 3. Material properties adopted in numerical models based on standards [15, 16]

Właściwość	Wartość materiałowa	
	belka, elementy połączenia	śruby, nakrętki
Gęstość ρ [kg/m ³]	7850	7850
Współczynnik Poissona ν [-]	0,3	0,3
Moduł sprężystości E [GPa]	210	210
Granica plastyczności f_y [MPa]	235	900
Najwyższa wytrzymałość na rozciąganie f_u [MPa]	360	1000

normalnych podłużnych w przypadku jednego ze zmodyfikowanych połączeń doczołowych przedstawiono na rysunku 8, natomiast odczytane maksymalne ugięcie w tabeli 4.



Rys. 8. Rozkład naprężeń normalnych podłużnych analizowanego modelu belki z połączeniem doczołowym z dwuczęściową blachą czołową oraz z wysuniętymi śrubami poza przekrój w strefie rozciąganej: a) belka swobodnie podparta; b) belka wspornikowa
Fig. 8. Longitudinal normal stress distribution for the analyzed model of a beam with end-plate joint with a two-part end-plate and bolts protruding beyond the cross-section in the tension zone: a) simply supported beam; b) cantilevered beam

Tabela 4. Maksymalne ugięcie w belce swobodnie podpartej oraz wspornikowej w przypadku analizowanych schematów doczołowych połączeń belek, pokazanych jak na rysunku 9

Table. 4. Maximum deflection in a simply supported and cantilevered beam for the analyzed schemes of beam end-plate joint, shown in the same way as in Figure 9

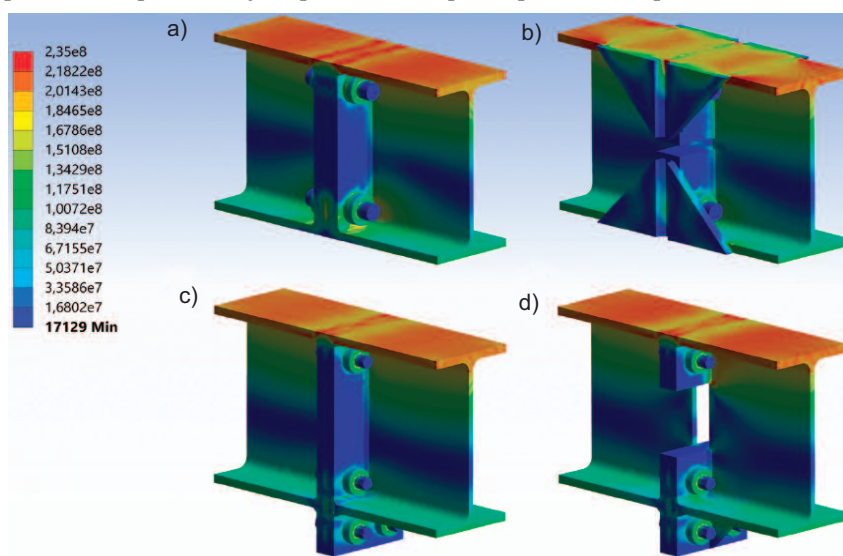
Analizowany model połączenia	Ugięcie belki swobodnie podpartej [mm]	Ugięcie belki wspornikowej [mm]
a.	1,888	9,361
b.	1,852	9,177
c.	1,834	9,121
d.	1,832	9,096

Rozkład naprężeń podłużnych w stalowej belce swobodnie podpartej (rysunek 8a) wskazuje, że przeważają w niej naprężenia ściskające w górnym pasie przekroju w środku rozpiętości na odcinku największego momentu zginającego, które nie przekraczają 235 MPa. Najmniejsze naprężenia występują poniżej osi obojętnej przekroju. Dodatkowo na odcinku maksymalnego momentu zginającego występują stałe naprężenia, co koreluje z wykresem momentów zginających z rysunku 3a. Rozkład naprężeń w belce wspornikowej (rysunek 8b) wskazuje, że w stalowej belce przeważają naprężenia rozciągające w górnym

pasie przekroju przy utwierdzeniu, czyli w miejscu największego momentu zginającego (rysunek 3b). Naprężenia w belce wspornikowej również nie przekraczają 235 MPa, co świadczy o zgodności z obliczeniami analitycznymi nośności przekroju i poprawności doboru przekroju do schematu statycznego oraz obciążeń. Rozkład naprężeń zredukowanych wszystkich analizowanych połączeń doczołowych zaprezentowano na rysunku 9. Przedstawiono go w przypadku niekorzystnego schematu, czyli belki swobodnie podpartej, ponieważ w osi połączenia występuje maksymalny moment zginający.

Analizując rozkład naprężeń w połączeniach (rysunek 9), można ocenić efektywność pracy połączeń z uwagi na dystrybucję sił wewnętrznych w łączonych belkach. W powszechnie stosowanym połączeniu doczołowym ze śrubami wewnątrz obrysu przekroju (rysunek 9a) widoczne są duże naprężenia w górnym pasie, natomiast ogółem naprężenia nie przekraczają naprężeń do-

puszczalnych w przypadku przyjętego gatunku stali. W zmodyfikowanym połączeniu doczołowym belki z blachą czołową (składającą się z dwóch części) oraz śrubami zlokalizowanymi wewnątrz obrysu przekroju i dodatkowymi blachami bocznymi (rysunek 9b) naprężenia rozkładają się równomiernie na blachy boczne i w efekcie na ich odcinku w pasie górnym widoczne są mniejsze naprężenia w porównaniu z naprężeniami w połączeniach bez blach bocznych. W połączeniu doczołowym z wysuniętymi śrubami poza przekrój w dolnym pasie (rysunek 9c) naprężenia rozkładają się równomiernie w blasze czołowej i obciążenia są efektywniej przekazywane przez łączniki niż w połączeniu ze śrubami wewnątrz przekroju, pomimo cieńszej blachy czołowej oraz mniejszej średnicy śrub. Śruby wysunięte poza przekrój są dalej oddalone od osi obojętnej, dzięki temu przenoszą mniejsze siły wynikające z momentu zginającego. Z kolei w zmodyfikowanym połączeniu doczołowym ze śrubami wysuniętymi poza przekrój (rysunek 9d) oraz dzieloną blachą czołową, naprężenia rozkładają się równie efektywnie, jak w przypadku połączenia z pełną blachą czołową

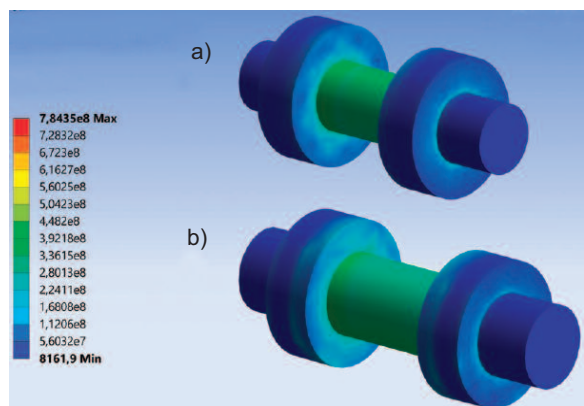


Rys. 9. Rozkład naprężeń zredukowanych w analizowanych połączeniach dla belki swobodnie podpartej [Pa]: a) połączenie doczołowe ze śrubami wewnątrz przekroju; b) połączenie doczołowe z dwuczęściową blachą czołową z dodatkowymi blachami bocznymi oraz ze śrubami wewnątrz przekroju; c) połączenie doczołowe ze śrubami wysuniętymi poza przekrój w strefie rozciąganej; d) połączenie doczołowe z dwuczęściową blachą czołową oraz z wysuniętymi śrubami poza przekrój w strefie rozciąganej

Fig. 9. Stress reduced distribution in the analyzed connections for a simply supported beam [Pa]: a) end-plate joint with bolts inside the cross-section; b) end-plate joint connection with a two-part end-plate with additional side plates and with bolts inside the cross-section; c) end-plate joint with bolts extended beyond the cross-section in the tension zone; d) end-plate joint with a two-part end-plate and bolts protruding beyond the section in the tension zone

wą. Zwiększone naprężenia występują w dolnym miejscu styku górnej blachy czołowej ze środnikiem, natomiast nie przekraczają one 235 MPa. Dzięki zastosowaniu trójkątnej blachy usztywniającej dolnej blachy czołowej z pasem belki, naprężenia są równomiernie przekazywane z blachy czołowej na pas, co dodatkowo usztywnia połączenie. Rozkład naprężeń w dodatkowej blasce trójkątnej widoczny jest na rysunku 8b.

Pomimo zwiększonych naprężeń w niektórych miejscach połączeń, naprężenia ogółem nie przekraczają 235 MPa. Analizowane połączenia pozwalają zatem efektywnie łączyć belki w zakresie granicy plastyczności stali. Wymienione naprężenia w śrubach oraz nakrętkach wynikają z naprężeń do 235 MPa przedstawionych na rysunku 9, natomiast granica plastyczności śrub wynosi 900 MPa. Rozkład naprężeń w śrubach przedstawiono na rysunku 10. Jak można zauważyć na rysunku 10, naprężenia w śrubach i nakrętkach nie przekraczają 900 MPa, co świadczy o poprawności doboru siły wstępnej sprężenia śrub oraz obliczeń analitycznych nośności śrub.



Rys. 10. Rozkład naprężeń w modelach numerycznych śrub [Pa]: a) śruba M12; b) śruba M16

Fig. 10. Stress distribution in numerical models of bolts [Pa]: a) M12 bolt; b) M16 bolt

Największe przemieszczenia w przypadku belki swobodnie podpartej odczytywano w osi połączenia, natomiast belki wspornikowej – na końcu wspornika. Przemieszczenia belek z połączeniami można określić jedynie z pomocą modelu numerycznego, ponieważ norma [16] nie podaje metody obliczania przemieszczeń belek z połączeniami. Maksymalne przemieszczenie analizowanych połączeń przedstawiono w tabeli 4.

Analizując maksymalne ugięcia belki swobodnie podpartej z rozważanymi połączeniami wykazano, że pod względem najmniejszych ugięć najlepsze są połączenia ze śrubami wysuniętymi poza przekrój w strefie rozciąganej (rysunki 9c i 9d). Połączenia te wykazują ugięcie wynoszące odpowiednio 1,834 oraz 1,832 mm. Zastosowanie dodatkowej usztywniającej blachy trójkątnej (poz. 4 na rysunku 5b) wpłynęło na znaczne zmniejszenie ugięcia, natomiast dzięki zastosowaniu dwuczściowej blachy czołowej ugięcie jest mniejsze. Nieco większe ugięcie (1,888 oraz 1,852 mm) zapewniają połączenia ze śrubami wewnątrz przekroju belki (rysunki 9a i b). Zmodyfikowane połączenie doczołowe z dwuczściową blachą czołową oraz blachami bocznymi wykazuje mniejsze ugięcie niż połączenie z pełną blachą czołową. We wszystkich wariantach połączeń ugięcie nie przekracza stanu granicznego użyteczności z warunkiem wynoszącym poniżej 39%, co wskazuje na efektywność ich pracy w przypadku pionowych przemieszczeń w dwuteowych belkach swobodnie podpartych.

Analizując maksymalne ugięcia belki wspornikowej można zauważyć, że analogicznie do ugięć belki swobodnie podpartej połączenia ze śrubami wysuniętymi poza przekrój w strefie rozciąganej (rysunki 9c i d) zapewniają najmniejsze ugięcie, wynoszące odpowiednio 9,121 oraz 9,096 mm, natomiast połączenia ze śrubami wewnątrz przekroju belki (rysunki 9a i b) – ugięcie odpowiednio 9,361 oraz 9,177 mm. Dzięki zastosowaniu dodatkowych blach, zmodyfikowane połączenia doczołowe wykazują mniejsze ugięcia, pomimo dwuczściowych blach czołowych. We wszystkich wariantach połączeń ugięcia nie przekraczają stanu granicznego użyteczności z warunkiem wynoszącym poniżej 98%, co wskazuje na efektywność ich pracy w przypadku pionowych przemieszczeń

w dwuteowych belkach zamontowanych jako wspornik.

Ponadto na podstawie wyznaczonych przemieszczeń belek bez połączenia oraz belek z połączeniami obliczono różnicę przemieszczeń, a następnie z zależności trygonometrycznych wyznaczono kąty obrotu w połączeniach wynikające z pracy połączeń. Obliczone wartości sztywności obrotowej połączeń przedstawiono w tabeli 5.

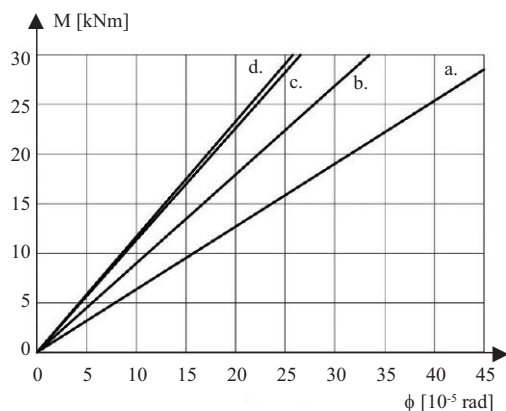
Tabela. 5. Sztywność obrotowa analizowanych połączeń doczołowych, pokazanych na rysunku 9

Table. 5. Rotational stiffness of the analyzed end-plate joint, shown in Fig. 9

Analizowany model połączenia	Sztywność obrotowa połączenia [kNm/rad]
a.	63415
b.	89655
c.	113043
d.	116418

Stwierdzono, że najszywniejsze są połączenia ze śrubami wysuniętymi poza przekrój w strefie rozciąganej, charakteryzujące się sztywnością obrotową 113043 kNm/rad w przypadku standardowego połączenia z pełną blachą czołową (rysunek 9c) oraz sztywnością 116418 kNm/rad w przypadku połączenia zmodyfikowanego z dzieloną blachą czołową oraz dodatkową blachą trójkątną (rysunek 9d). Z porównania połączeń z śrubami wewnątrz przekroju belki (rysunki 9a i b), które zapewniają sztywność obrotową odpowiednio 63415 oraz 89655 kNm/rad wynika, że zmodyfikowane połączenie dzięki blachom bocznym charakteryzuje się większą sztywnością obrotową pomimo zastosowania dwuczściowej blachy czołowej.

Analiza sztywności obrotowej dotyczyła momentów zginających w połączeniu $0 \div 30$ kNm, a wykresy zależności pomiędzy momentem zginającym w połączeniu a jego kątem obrotu (krzywe $M-\phi$) przedstawiono na rysunku 11. **Krzywa a.** wykazuje sztywność obrotową w przypadku standardowego połączenia doczołowego ze śrubami wewnątrz przekroju; **krzywa b.** – połączenia doczołowego z dwuczściową blachą czołową z dodatkowymi blachami bocznymi oraz ze śrubami wewnątrz przekroju; **krzywa c.** – standardowego do-



Rys. 11. Sztywność obrotowa analizowanych połączeń doczołowych (opis w tekście)

Fig. 11. Rotational stiffness of the analyzed end-plate joints (description in text)

czołowego połączenia z wysuniętymi śrubami poza przekrój w strefie rozciąganej oraz krzywa d. – połączenia doczołowego z dwuczęściową blachą czołową oraz z wysuniętymi śrubami poza przekrój w strefie rozciąganej. Węzeł całkowicie sztywny jest charakteryzowany przez oś rzędnych 0-M, natomiast węzeł idealnie przegubowy przez oś 0- ϕ , zatem im krzywa M- ϕ znajduje się bliżej osi 0-M, tym połączenie charakteryzuje się większą sztywnością obrotową. Jak wynika z rysunku 11, kąt obrotu połączeń obliczony numerycznie zwiększa się prostoliniowo wraz ze wzrostem momentu zginającego, natomiast z badań doświadczalnych wynika, że charakterystyka większości węzłów jest krzywoliniowa w całym zakresie badań [14].

W wyniku przeprowadzonej analizy numerycznej oceniono efektywność skręcanych połączeń doczołowych ze względu na uzyskany rozkład naprężeń oraz sztywność obrotową. W standardowych doczołowych połączeniach sprężonych z pełnymi blachami czołowymi wymagana jest odpowiednio płaska powierzchnia styku blach czołowych, ponieważ nierówności powstałe w procesie spawania blachy do belki mogą uniemożliwić prawidłowe sprężenie śrub. W zdeformowanych stykach może wystąpić nierównomierny rozkład sił w śrubach, a w efekcie ich zerwanie. Zaproponowane zmodyfikowane połączenia doczołowe belek z blachami czołowymi składającymi się z dwóch części w znacznym stopniu pozwolą wyeliminować odchyłki po-

wstające podczas procesu spawania. Zmodyfikowane połączenia (rysunek 5), przez zastosowanie blach wzmacniających, wykazały się lepszym rozkładem naprężeń oraz większą sztywnością obrotową w porównaniu z powszechnie stosowanymi połączeniami doczołowymi z pełnymi blachami czołowymi (rysunek 4). Najlepiej spośród analizowanych połączeń doczołowych wypadło połączenie ze śrubami wysuniętymi poza przekrój w strefie rozciąganej, ponieważ charakteryzowało się największą sztywnością obrotową.

Mając na uwadze to, że w wielu przypadkach elementy wystające poza przekrój mogą uniemożliwić zastosowanie w konstrukcji, jako alternatywny sposób łączenia belek należałoby zaproponować połączenie doczołowe ze śrubami wewnątrz przekroju z blachami bocznymi (rysunek 5a), które również charakteryzuje się dużą sztywnością obrotową oraz równomiernym rozkładem naprężeń. Ponadto kolejność uzyskanych wyników przemieszczeń w analizie MES wiąże się ze sztywnością obrotową połączeń, co wpływa na nośność i stateczność układu konstrukcyjnego.

Zaproponowane w artykule zmodyfikowane skręcane połączenia doczołowe belek stalowych z dwuczęściowymi blachami czołowymi mogą być interesującą alternatywą dla połączenia belek w konstrukcjach stalowych. Ponadto przeprowadzona analiza wykazała, że mogą one efektywniej pracować niż tradycyjnie stosowane połączenia doczołowe, a obecny rozwój technologii wykonywania stalowych elementów prefabrykowanych pozwala na ich zastosowanie. W dalszym etapie badań autorzy zwrócą uwagę na efektywność pracy połączeń stalowych belek dwuteowych w następstwie obciążeń dynamicznych.

Literatura

- [1] Pawłowski K. Nośność hybrydowych połączeń nitowo-śrubowych z wykorzystaniem śrub wysokiej wytrzymałości. *Materiały Budowlane*. 2023; <https://doi.org/10.15199/33.2023.05.05>.
- [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] Kozłowski A. *Konstrukcje stalowe. Przykłady obliczeń według PN-EN 1993-1*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów; 2010.
- [4] Kontoleon MJ, Kaziolas DN, Zygomalas MD, Baniotopoulos CC. Analysis of steel bolted connections by means of a nonsmooth optimization procedure. *Computers & Structures*. 2003; [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(03\)00311-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(03)00311-0).
- [5] Hołata E, Tucki P. Innowacyjne doczołowe połączenia na śruby stalowych belek dwuteowych. *Builder*. 2020; <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.8798>.

[6] Rykaluk K. *Konstrukcje metalowe. Część I*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław; 2016.

[7] Augustyn J, Łąguna J, Śliwka W. Badania sprężanych połączeń doczołowych belek dwuteowych. *Inżynieria i Budownictwo*. 1982; 293 – 296.

[8] Tkaczyk Ł. Badania wybranych doczołowych połączeń śrubowych z imperfekcjami. *Rozprawa doktorska*. Wydział Inżynierii Łądowej Politechniki Krakowskiej. Kraków; 2018.

[9] Biegus A. Nośność graniczna śrubowych styków doczołowych z imperfekcjami geometrycznymi. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*. Wrocław; 1998.

[10] Biegus A. Wytyczenie śrubowych styków doczołowych z imperfekcjami geometrycznymi. *Konstrukcje stalowe*; 2000; 41 – 44.

[11] Hołata E, Rykaluk K, Pasternak H. Wpływ jakości wykonania śrubowych połączeń sprężonych na bezpieczeństwo hal stalowych. *XIX Konferencja naukowo-techniczna, referaty, Szczecin-Międzyzdroje, 19–22 maja 1999*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej. 1999; 601 – 608.

[12] Hołata E, Tucki P. Innovative bolted end-plate connections for high web I-beams, *Modern Trends in Research on Steel, Aluminium and Composite Structures: Proceedings of the XIV International Conference On Metal Structures (ICMS 2021)*. 2021; <https://doi.org/10.1201/9781003132134-47>.

[13] Basiński W. Wyznaczenie sztywności obrotowej doczołowych połączeń podatnych w metalowych konstrukcjach prętowych na podstawie pomiaru drgań, *Rozprawa doktorska*. Wydział Budownictwa Politechniki Śląskiej. Gliwice; 2006.

[14] Bródka J, Kozłowski A. Sztywność i nośność węzłów podatnych. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej*. Białystok, Rzeszów; 1996.

[15] PN-EN 1993-1-1:2006, Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

[16] PN-EN 1993-1-8:2006, Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-8: Projektowanie węzłów.

[17] <https://mesco.com.pl/nowy-dodatek-act-bolt-assessment-inside-ansys> [Data dostępu: 14.08.2023 r.].

[18] <https://www.bossard.com/pl-pl/assembly-technology-expert/informacje-techniczne/kalkulatory-i-konwertery-online/torque-and-preload-calculator> [Data dostępu: 14.08.2023 r.].

Przyjęto do druku: 22.11.2023 r.