

Modelowanie numeryczne MES kompozytowej belki stalowo-OSB

FEM numerical modeling of a steel-OSB composite beam

dr hab. inż. Anna Derlatka, prof. PCz (ORCID: 0000-0002-6509-2706), dr hab. inż., Marlena Rajczyk, prof. PCz (ORCID: 0000-0002-4893-0931), Politechnika Częstochowska

DOI: 10.5604/01.3001.0054.6377

Streszczenie: W pracy przedstawiono model numeryczny belki zespolonej stalowo-OSB. Belka została zbudowana z cienkościennych blach stalowych usztywnionych za pomocą płyt OSB. Oceniono wrażliwość modelu numerycznego na rodzaj elementów skończonych oraz ich rozmiar. Stwierdzono, że najbardziej korzystnym rozwiązaniem jest zastosowanie modelu zbudowanego z 27-węzłowych elementów skończonych o średnim rozmiarze oczka siatki wynoszącym 10 mm. Po walidacji modelu z wynikami badań eksperymentalnych oceniono, że opracowany model numeryczny belki zespolonej może być wykorzystany do gromadzenia danych służących do predykcji nośności belki za pomocą technik uczenia maszynowego.

Słowa kluczowe: belka kompozytowa, stal, płyty OSB, MES.

Abstract: The paper presents a numerical model of a steel-OSB composite beam. The beam was made of thin-walled steel sheets stiffened with OSB. FEM numerical calculations were performed using the ADINA System. The sensitivity of the numerical model to the type of finite elements and their size was assessed. It was found that the most advantageous solution is the use of the model built of 27-node finite elements with an average mesh size of 10 mm. After validation of the model with the results of experimental research, it was assessed that the developed numerical model of the composite beam can be used to collect data for predicting the load-bearing capacity of the beam using machine learning techniques.

Keywords: composite beam, steel, OSB boards, MES.

1. Wprowadzenie

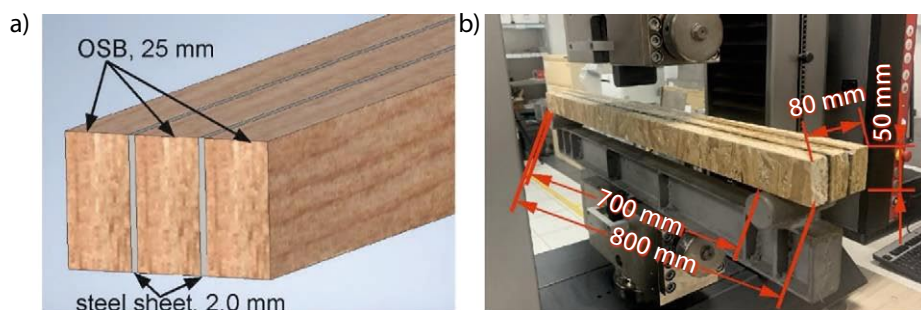
Projektanci konstrukcji cienkościennych doceniają ich wysoką nośność, mimo niewielkiej masy. Jednak zdolność do utraty stateczności jest uznawana za ich największą wadę [1]. Dlatego ciągle są prowadzone badania mające na celu ograniczenie tego zjawiska [2, 3]. Mimo że konstrukcje kompozytowe łączące drewno ze stalą lub aluminium to stosunkowo nowe koncepcje, coraz częściej są one doceniane przez inżynierów [4–6].

W niniejszej pracy zaproponowano kompozytową belkę stalowo-OSB, zbudowaną z cienkościennych blach wykonanych ze stali oraz płyt OSB. Komponenty belki połączone za pomocą kleju polimerowego. Dzięki temu uzyskano prostokątny przekrój poprzeczny. Zadaniem blach stalowych było przeniesienie obciążenia, a zadaniem płyt OSB zabezpieczenie cienkich blachy przed utratą ich stateczności.

2. Cel i zakres pracy

Głównym celem tych badań było numeryczne określenie nośności

Rys. 1. Kształt belki referencyjnej:
a) koncepcja, b) w trakcie badań



na zginanie innowacyjnej belki zespolonej stal-OSB. Zakres prac obejmował opracowanie modelu numerycznego takiej belki, analizę wrażliwości i walidację modelu.

Walidację opracowanego modelu numerycznego wykonano w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych belki referencyjnej przedstawione w [7]. Belka referencyjna (rys. 1) składała się z pięciu warstw: 2 blach stalowych o grubości 2 mm i 3 OSB o grubości 25 mm. Blachy oraz OSB łączono naprzemiennie za pomocą kleju polimerowego.

Do zbudowania belki referencyjnej zastosowano gatunek stali S355 [8,9]. Jej właściwości zbadano eksperymentalnie a szczegółowe wyniki zamieszczono w pracy [7]. Średnie wartości uzyskanych eksperymentalnie właściwości stali oraz średnie wartości danych materiałowych OSB, określone przez producenta przedstawiono w tabeli 1. Belkę poddano próbie trójpunktowego zginania.

Tabela 1. Właściwości materiałów

| Właściwość | Wartość właściwości | |
|--|---------------------|------|
| | Stal | OSB |
| Moduł Younga, GPa | 210 | 3 |
| Wytrzymałość na rozciąganie R_{eT} , MPa | 370 | 9 |
| Współczynnik Poissona | 0,30 | 0,23 |
| Gęstość, kg/m ³ | 7850 | 630 |
| Minimalne wydłużenie A5,% | 28,8 | 16 |

3. Model numeryczny

Obliczenia numeryczne wykonano za pomocą programu ADINA System [10]. Zarys modelu numerycznego belki stal-OSB przedstawiono na rysunku 2. Kolor czerwony odpowiada elementom skończonym płyt OSB a kolor zielony odzwierciedla blachy stalowe. Warunki brzegowe zapewniają możliwość trójpunktowego zginania belki swobodnie podpartej. Siłę przyłożono do górnej powierzchni stalowego obciążnika znajdującego się w środku rozpiętości przęsła. Zastosowano analizę nieliniową, uwzględniającą duże przemieszczenia i odkształcenia. Elementy zostały opisane dwuliniowym materiałem sprężysto-plastycznym [10].

Wykorzystano wyłącznie elementy skończone typu 3D-solid. Elementy blach i płyt OSB połączono za pomocą wspólnych węzłów. Podpory oraz obciążnik połączono z belką za pomocą oddziaływania „mesh glueing”, które prowadzi do płynnego przejścia przemieszczeń pomiędzy powierzchniami, pomimo połączenia różnych siatek elementów skończonych.

W celu przeprowadzenia analizy wrażliwości zbudowano trzy modele numeryczne belki różniące się liczbą węzłów w elementach skończonych: 8-, 20- i 27-węzłowe. Zestawienie wykorzystanych elementów przedstawiono w tabeli 2.

Dodatkowo dla modelu z 27-węzłowymi elementami skończonymi zweryfikowano wpływ wielkości oczka siatki na wyniki. Belka została zdyskretyzowana za pomocą pięciu różnych siatek (rys. 3), które charakteryzowały się różną liczbą elementów na wysokości i długości belki.

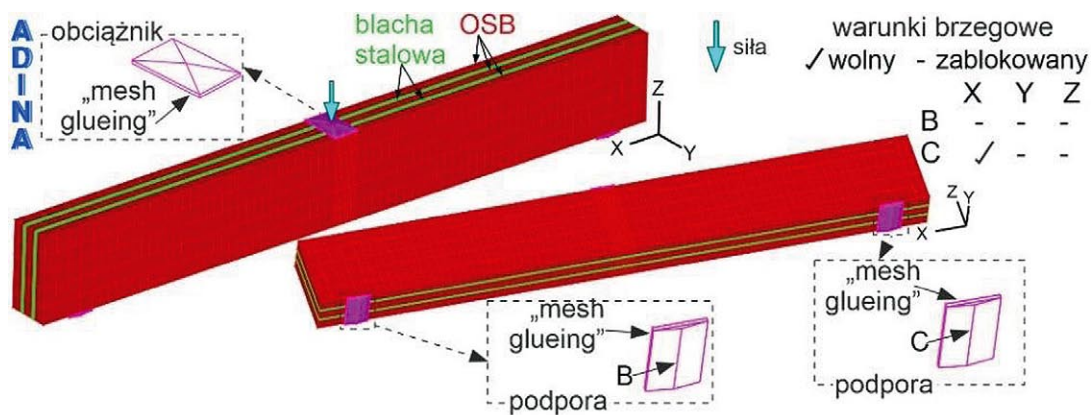
Tabela 2. Liczba elementów skończonych i węzłów użytych do analizy wrażliwości

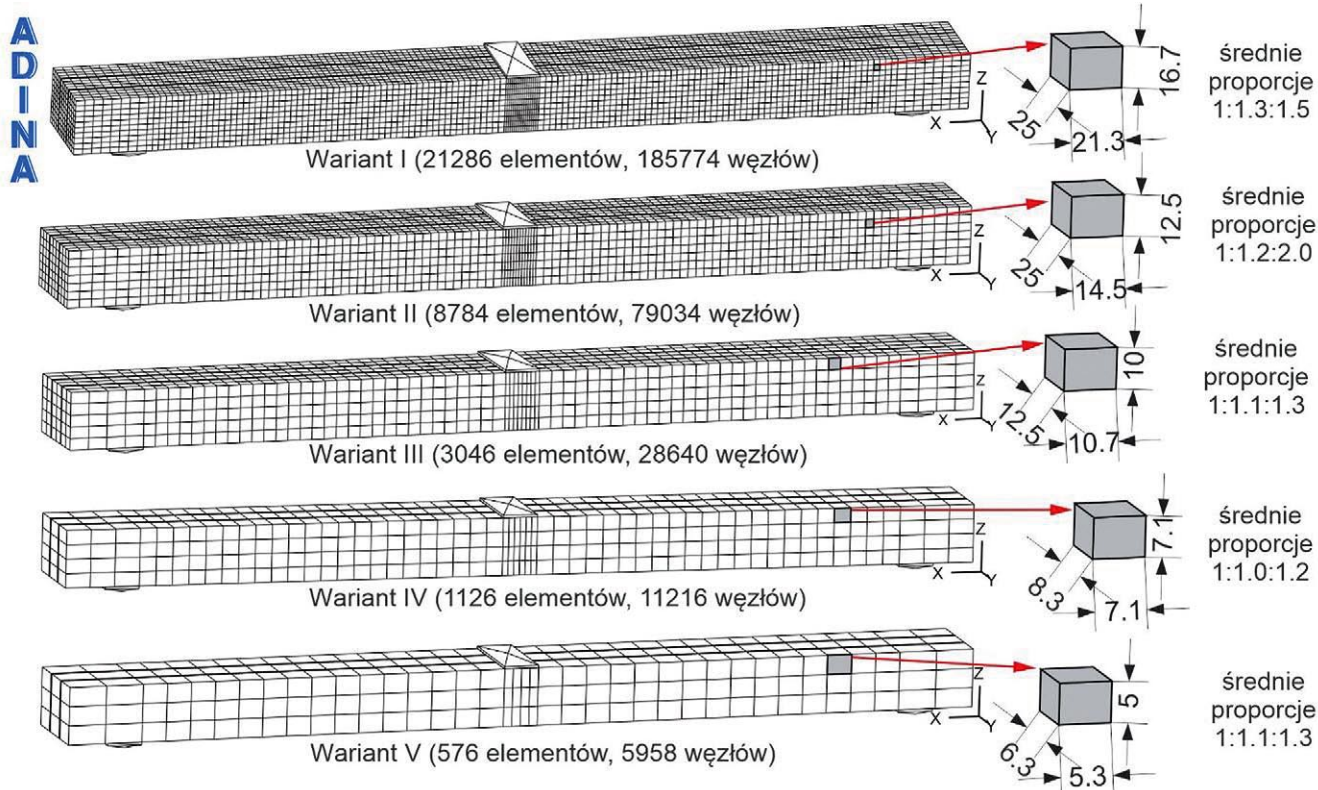
| Grupa elementów | Liczba elementów | Rodzaj elementów | | |
|-----------------------------|------------------|------------------|------------|------------|
| | | 8-węzłowe | 20-węzłowe | 27-węzłowe |
| Nr 1. (blachy stalowe) | 760 | 1848 | 6136 | 10098 |
| Nr 2. (OSB) | 2280 | 4158 | 14499 | 25245 |
| Nr 3. (podpory i obciążnik) | 6 | 29 | 29 | 29 |
| Suma | 3046 | 4187 | 15452 | 28640 |

4. Ocena wrażliwości modelu numerycznego

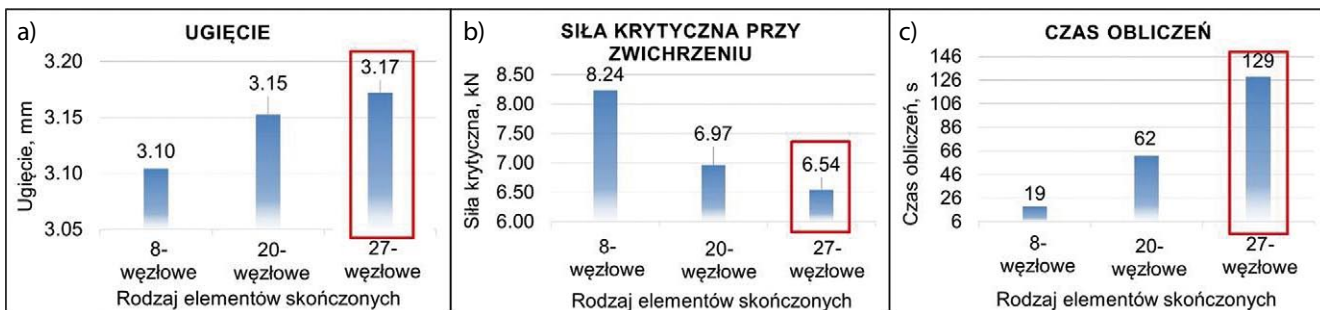
Wykresy przedstawiające zmianę ugięcia, wartości siły krytycznej przy zwichrzeniu oraz czasu obliczeń w zależności od przyjętych elementów skończonych 8-, 20- i 27-węzłowych przedstawiono na rysunku 4. Przeprowadzona analiza wskazuje, że prezentowany model numeryczny belki zespolonej jest istotnie wrażliwy na rodzaj zastosowanych elementów.

Co prawda różnice ugięć są znikome, ponieważ wartość ugięcia modelu zbudowanego z 20-węzłowych elementów skończonych jest jedynie o 2% większa niż modelu zbudowanego z 8-węzłowych elementów skończonych. Jednocześnie wartość ugięcia modelu zbudowanego z 20-węzłowych elementów jest tylko o 1% mniejsza niż modelu z 27-węzłowymi elementami. Zdecydowanie większą wrażliwość modelu zaobserwowano, analizując siłę krytyczną przy zwichrzeniu. Wartość siły krytycznej przy zwichrzeniu modelu zbudowanego z 20-węzłowych elementów skończonych jest o 18% mniejsza niż modelu zbudowanego z 8-węzłowych elementów i o 7% większa niż modelu zbudowanego z 27-węzłowych elementów. Jednocześnie czas obliczeń modelu z 8-węzłowymi elementami wynosi jedynie 19 s, z 20-węzłowymi elementami 62 s, a 27-węzłowymi elementami 129 s. Czas obliczeń dla modelu z 27-węzłowych elementów jest 100% większy niż czas obliczeń dla modelu zbudowanego z 20-węzłowych elementów,

Rys. 2. Model numeryczny belki zespolonej stalowo-OSB



Rys. 3. Warianty siatek uwzględnione w analizie wrażliwości, mm



Rys. 4. Wpływ rodzaju elementów skończonych na: a) ugięcie, mm, b) siłę krytyczną przy zwężeniu, kN, c) czas obliczeń, s

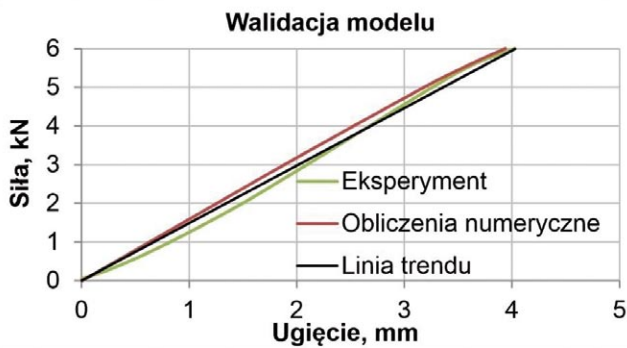
ale ze względu na dużą wrażliwość modelu na wartość siły krytycznej przy zwężeniu, do dalszej analizy przyjęto model z 27-węzłowymi elementami, co na rysunku 4 oznaczono kolorem czerwonym.

Zestawienie wyników służących ocenie wrażliwości modelu na zmianę gęstości siatki przedstawiono na rysunku 5.

Wyznaczone ugięcia odpowiadały obciążeniu 5 kN. W związku z tym wartości ugięć były związane jedynie ze sztywnością belki. Na wynik przemieszczeń nie wpłynęła wartość maksymalnego obciążenia w zakresie sprężystym. Analizując wartości ugięć (rys. 5a), uznano, że model w małym stopniu wykazuje wrażliwość na gęstość siatki. Wartości ugięć, a tym



Rys. 5. Wpływ liczby elementów skończonych przy zastosowaniu 27-węzłowych elementów 3D-solid na: a) ugięcie, mm, b) siłę krytyczną przy zwężeniu, kN, c) czas obliczeń, s



Rys. 6. Porównanie wyników ze zginania belki referencyjnej

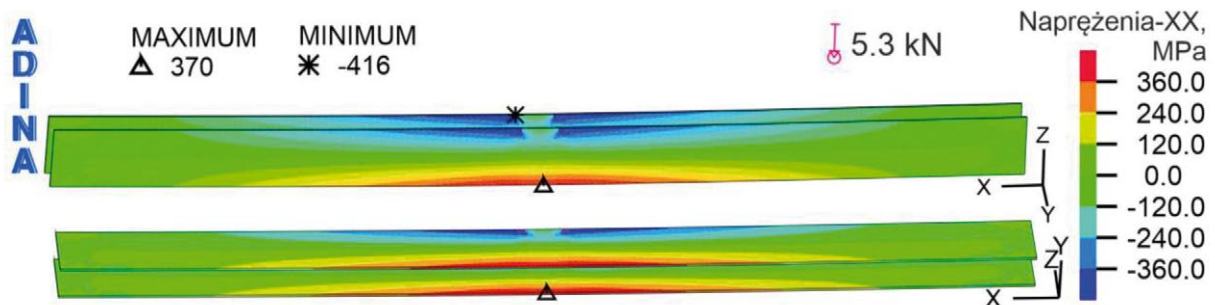
samym sztywność są ustabilizowane przy użyciu 3046 elementów skończonych. Wyniki dla tego wariantu oznaczono kolorem czerwonym.

Biorąc pod uwagę ocenę siły krytycznej przy zwichrzeniu (rys. 5b), model wykazuje znacznie większą wrażliwość na gęstość siatki. Wartości siły krytycznej wydają się być

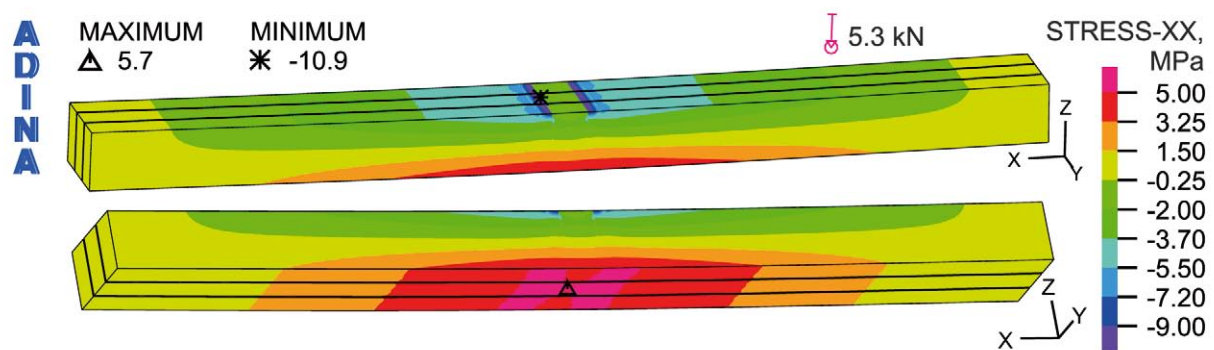
ustabilizowane przy wykorzystaniu przynajmniej 8784 elementów skończonych. Czas obliczeń takiego modelu wynosi 466 s (rys. 5c). Czas obliczeń modelu zbudowanego z 3046 elementów jest prawie trzykrotnie krótszy, ponieważ jest równy 129 s. Jednocześnie wartość siły krytycznej jest na akceptowalnym poziomie. Dodatkowo sztywność belki, która jest decydującym kryterium przy ocenie nośności belki, jest stabilna przy zastosowaniu 3046 elementów. W związku z tym model numeryczny zbudowany z 3046 elementów uznano za optymalny. Zastosowano w nim 5 elementów na wysokości belki i 76 elementy na jej długości o średniej proporcji elementów równej 1:1.1:1.3. Model ten poddano walidacji.

5. Walidacja modelu numerycznego

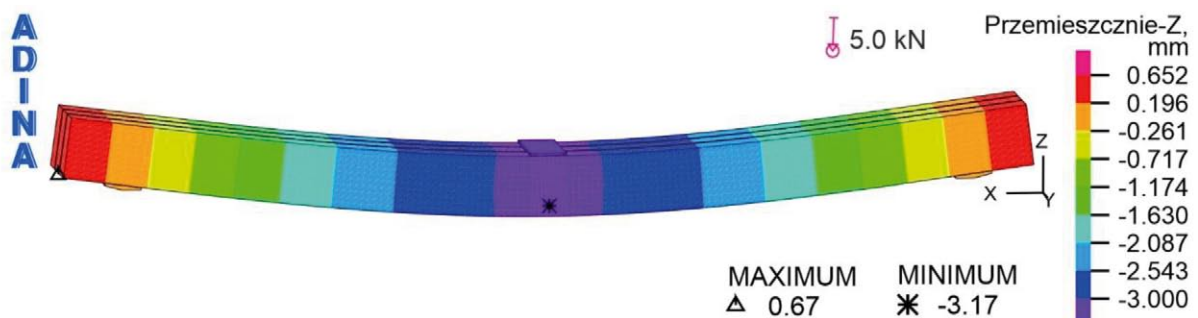
Model numeryczny belki zespolonej stal-OSB został poddany walidacji na podstawie porównania zależności przemieszczenie



Rys. 7. Rozkład naprężeń kierunkowych względem osi X w stalowych blachach, MPa



Rys. 8. Rozkład naprężeń kierunkowych wzdłuż osi X w płytach OSB, MPa



Rys. 9. Rozkład przemieszczenia wzdłuż osi Z, mm

– siła. Zestawienie krzywych z próby trójpunktowego zginania referencyjnej belki zespolonej stal-OSB przedstawiono na rysunku 6. Kolorem zielonym oznaczono krzywą będącą rezultatem badań doświadczalnych, z uwzględnieniem sztywności maszyny wraz z przyrządem do zginania odpowiadającej 4,504 kN/mm. Dodatkowo dla tej krzywej wyznaczono linię trendu (kolor czarny). Krzywą wykreśloną na podstawie obliczeń numerycznych oznaczono kolorem czerwonym.

Analizując kształt zielonej krzywej pochodzącej z doświadczenia, wyraźnie widać, że nawet w zakresie sprężystym nie można wyróżnić odcinka prostoliniowego. Przyczyniają się do tego dopuszczalne tolerancje grubości blach oraz płyt OSB oraz niedokładności występujące podczas wykonania belki kompozytowej stal-OSB. Jednocześnie oba te aspekty wpływają na to, że krzywa pochodząca z obliczeń numerycznych (kolor czerwony) charakteryzuje się większą sztywnością niż zielona krzywa z eksperymentu. W modelu numerycznym założono nominalną grubość komponentów, z których zbudowano belkę kompozytową. Pomimo tego zgodność wyników doświadczalnych oraz numerycznych uznano za właściwą, a szczegóły rozkładu przemieszczeń względem osi Z przedstawiono na rysunku 9.

W pracy [7] oceniono, że belka referencyjna przeniosła obciążenie w zakresie sprężystym równie 5,76 kN. Wartość tę wyznaczano jedynie na podstawie wykresu z doświadczenia. Jednakże, na podstawie naprężeń kierunkowych X (rys. 7) wyznaczonych numerycznie oceniono, że maksymalne naprężenie rozciągające w blachach stalowych o wartości odpowiadającej granicy plastyczności materiału blach (czyli 370 MPa) występuje przy obciążeniu 5,3 kN (odpowiadający moment zginający 1,06 kNm). Ekstremum naprężenia rozciągającego jest zlokalizowane w środku rozpiętości belki, na dolnej powierzchni blach. Jednocześnie na rysunku 7 można zaobserwować ekstremum naprężeń ściskających wynoszące 416 MPa. Występuje ono na górnej powierzchni blach na krawędzi styku pomiędzy blachą a obciążnikiem. Połączenie elementów skończonych belki z obciążnikiem za pomocą opcji „glue meshing” przyczynia się do lokalnej koncentracji naprężeń w obszarze połączenia. Dlatego do oceny nośności blach uwzględniano jedynie naprężenia rozciągające występujące w blachach.

Rozkład naprężeń w płytach OSB w kroku obliczeniowym odpowiadającym obciążeniu 5,3 kN przedstawiono na rysunku 8. Ekstremum naprężeń rozciągających jest zlokalizowane na dolnej powierzchni płyt OSB i wynosi 5,7 MPa. Wartość ta jest mniejsza niż przyjęta w modelu numerycznym granica plastyczności OSB równa 9 MPa. Podobnie jak w blachach, w OSB koncentracja naprężeń ściskających występuje na górnej powierzchni płyt. Wartość ekstremum wynosi 10,9 MPa, co jest większe niż założona granica plastyczności. Z tym, że jest to tylko lokalna koncentracja naprężeń będąca wynikiem połączenia elementów skończonych belki i obciążnika. Z rysunków 7 i 8 wynika,

że naprężenia rozciągające w blachach są czynnikiem decydującym o wartości obciążenia belki działającego w zakresie sprężystym.

6. Podsumowanie

Oceniono, że model numeryczny jest istotnie wrażliwy na zmianę rodzaju elementów skończonych jak również na zmianę rozmiaru oczka siatki. Stwierdzono, że najbardziej korzystnym rozwiązaniem jest zastosowanie modelu zbudowanego z 27-węzłowych elementów skończonych, mimo, że wymagają one najdłuższego czasu obliczeń. Natomiast biorąc pod uwagę rozmiar oczka siatki, uznano, że siatka o średnim rozmiarze wynoszącym 10 mm jest najbardziej korzystnym rozwiązaniem. Na ten wybór wpłynęła ustabilizowana wartość ugięć, akceptowalna wartość siły krytycznej przy zwichrzeniu oraz znacznie krótszy czas obliczeń niż w przypadku siatek o mniejszych oczkach.

Oszacowana numerycznie nośność belki zespolonej na zginanie wyniosła 1,06 kNm (odpowiadające obciążenie 5,3 kN), a naprężenia rozciągające w blachach są czynnikiem decydującym o wartości obciążenia belki działającego w zakresie sprężystym. Po walidacji modelu z wynikami badań eksperymentalnych oceniono, że opracowany model numeryczny belki zespolonej może być wykorzystany do gromadzenia danych służących do predykcji nośności belki za pomocą technik uczenia maszynowego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rzeszut K., Folta W., Garstecki A., Reliability of engineering methods of assessment the critical buckling load of steel beams, [w:] AIP Conference Proceedings 2018, 150003-1–150003-7
- [2] Lacki P., Derlatka A., Winowiecka J., Analysis of the composite I-beam reinforced with PU foam with the addition of chopped glass fiber, *Composite Structures* 218, 2019, str. 60–70, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.03.036>
- [3] Lacki P., Derlatka A., Influence of PU foam reinforcement of I-beam on buckling resistance, *Composite Structures* 202, 2018, str. 201–209, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.050>
- [4] Chybiński M., Polus Ł., Experimental and numerical investigations of aluminium-timber composite beams with bolted connections, *Structures* 34, 2021, str. 1942–1960, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.111>
- [5] Jończyk D., A Comparative Numerical Analysis of Glued Laminated Timber Beams Reinforced with Bars Made of Various Materials. *Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym* 10(1)2021, str. 151–159, <https://doi.org/10.17512/bozpe.2021.1.16>
- [6] S. H. M. Sani M., Muftah F., Osman A. R., A Review and Development of Cold-formed Steel Channel Columns with Oriented Strand Board Sections, *Materials Today: Proceedings* 17, 2019, str. 1078–1085, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.519>
- [7] Derlatka A., Lacki P., Więckowski W., Kasza P., Pomada M., Experimental tests of bonded steel-OSB composite beam. *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej* 28(1)2022, <https://doi.org/10.17512/znb.2022.1.01>
- [8] PN-EN 10025-2:2019-11: Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych – Część 2: Warunki techniczne dostawy stali konstrukcyjnych niestopowych
- [9] PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [10] ADINA System Online Manuals. ADINA R&D, Inc. 2020