

Belki zespolone aluminiowo-drewniane łączone za pomocą wkrętów lub śrub – podsumowanie i wnioski z badań własnych

Aluminium-timber composite beams with screwed or bolted connections
– summary and conclusions from own research

dr inż. Marcin Chybiński (ORCID: 0000-0003-2539-7764), dr inż. Łukasz Polus (ORCID: 0000-0002-1005-9239), Politechnika Poznańska

DOI 10.5604/01.3001.0053.6983

Streszczenie: Artykuł przedstawia przegląd badań własnych dotyczących belek zespolonych aluminiowo-drewnianych oraz ich połączeń. Zespolenie aluminiowych dwuteowych belek z płytami z drewna klejonego warstwowo z fornirów ma wiele zalet. W badaniach zaobserwowano wzrost nośności oraz sztywności belek aluminiowych oraz ich niewrażliwość na zwichrzenie po zespoleniu z drewnianymi płytami. Jako łączniki ścinane wykorzystano wkręty z łbem sześciokątnym oraz śruby. Zaproponowano wykorzystanie pierścieni zębatych jako elementów wzmacniających połączenia ścinane i oceniono skuteczność tego rozwiązania.

Słowa kluczowe: belki zespolone aluminiowo-drewniane, drewno klejone warstwowo z fornirów (LVL), śruby, wkręty z łbem sześciokątnym, pierścienie zębate.

Abstract: This paper presents a review of the author's own tests conducted on aluminium-timber composite beams and their connections. Significant benefits were gained by joining aluminium beams and laminated veneer lumber slabs. It provided for the increase of the load-bearing capacity and stiffness, and eliminated the problem of lateral-torsional buckling of aluminium beams. The composite action was assured by the use of bolts or hexagon head wood screws as shear connectors. The use of toothed plate connectors as reinforcement in aluminium-timber connections was suggested and evaluated.

Keywords: aluminium-timber composite beams, laminated veneer lumber (LVL), bolts, hexagon head wood screws, toothed plate connectors.

1. Wprowadzenie

W 2017 roku na XI Konferencji Naukowej Konstrukcje Zespolone zespół prof. Macieja Szumigały przedstawił ideę zespolenia aluminiowych dwuteowych belek z płytami z drewna klejonego warstwowo z fornirów [1, 2]. Od tego czasu przeprowadzono badania laboratoryjne 5 belek zespolonych aluminiowo-drewnianych łączonych za pomocą wkrętów z łbem sześciokątnym [3, 4] oraz 3 belek zespolonych łączonych za pomocą śrub [5]. Badaniom poddano również 58 połączeń dwuczętowych elementów zespolonych aluminiowo-drewnianych o różnej konfiguracji. Przebadano m.in. 10 połączeń elementów łączonych ze sobą wkrętami z łbem sześciokątnym oraz 12 połączeń wzmocnionych dodatkowo pierścieniami zębatymi [3, 6], a także 20 połączeń łączonych śrubami oraz 16 połączeń również wzmocnionych dodatkowo pierścieniami zębatymi [5, 7]. Ponadto przeprowadzono 24 badania wkrętów, które pozwoliły określić ich nośność na wyciąganie [8]. W artykule przedstawiono podsumowanie dotychczasowych badań oraz omówiono problemy, które wciąż wymagają rozwiązania.

W analizowanych belkach zespolonych wykorzystano płyty z drewna klejonego warstwowo z fornirów (ang. *laminated veneer lumber* – LVL), którego technologia produkcji pozwala na zagospodarowanie drewna mniej wartościowego, pochodzącego na przykład z drzew o średnicach mniejszych niż są one wymagane do produkcji drewna litego [9]. Drewno klejone warstwowo z fornirów powstaje w wyniku skrawania obwodowego kłód, a następnie sklejanie warstwowo fornirów klejem na bazie żywic fenolowo-formaldehydowych. Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie, rozciąganie oraz zginanie drewna klejonego warstwowo z fornirów opisane w pracy [10] wskazują, że materiał ten ma lepsze parametry wytrzymałościowe niż drewno lite. Na przykład wartość średniej wytrzymałości na zginanie drewna klejonego warstwowo z fornirów wyniosła 66,1 MPa. Uzyskanie tak dobrych parametrów wytrzymałościowych możliwe jest dzięki zastosowaniu procesu produkcyjnego, który pozwala na zmniejszenie wpływu wad drewna, takich jak skręt włókien, sęki czy pęknięcia.

Dźwigary analizowanych belek zespolonych wykonano z dwuteowników wyciskanych ze stopu aluminium

Rys. 1. Wkręty z łbem sześciokątnym oraz śruby jako łączniki ścinane w belkach zespolonych aluminiowo-drewnianych [3–5]

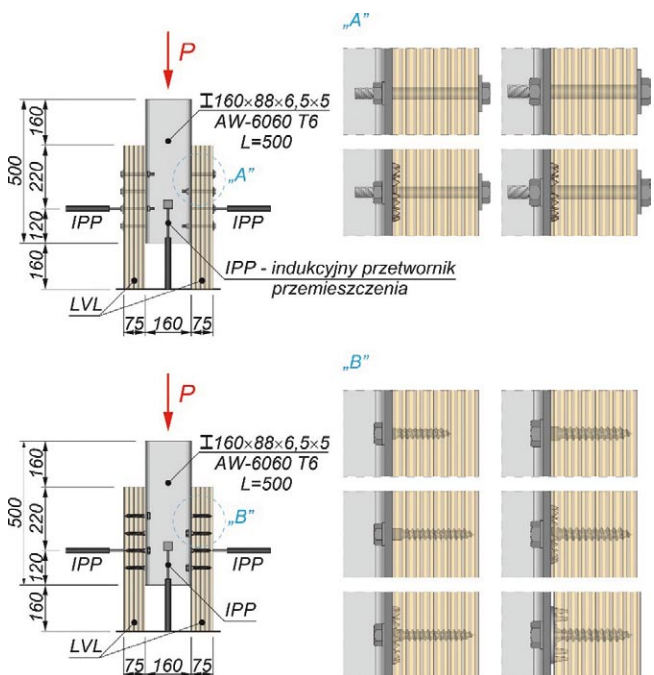
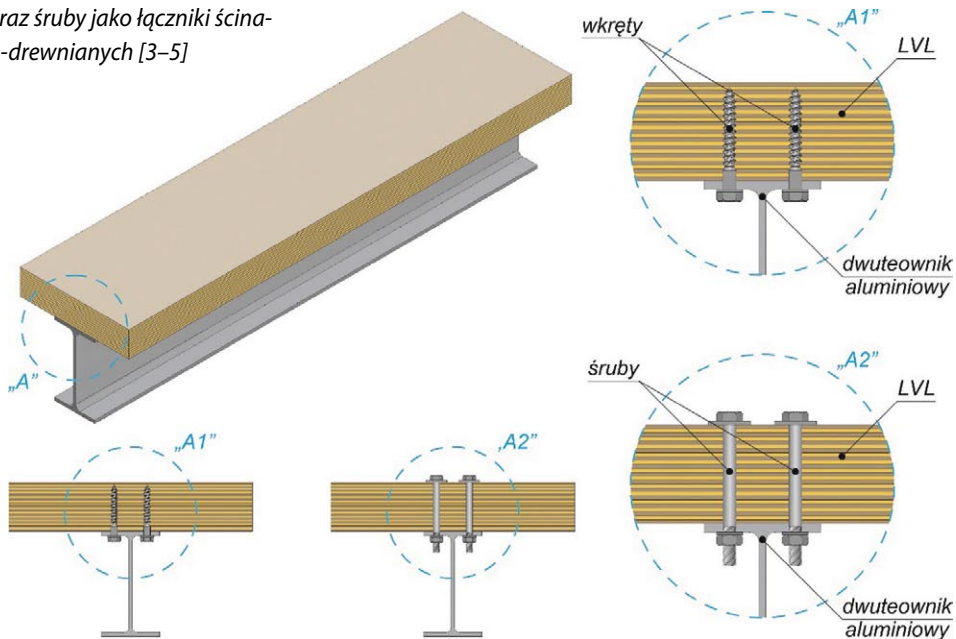
AW-6060 T6. Uzyskana w badaniach opisanych w pracy [11] granica plastyczności tego stopu (186,7 MPa) jest tylko nieznacznie mniejsza od granicy plastyczności stali S235. Istotną zaletą belek wykonanych z aluminium jest ich odporność na korozję, a stosowany do ich produkcji proces wyciskania pozwala na uzyskanie dowolnego przekroju [12, 13].

Do zespolenia płyt z drewna klejonego warstwowo z fornirow z aluminiowymi dwuteowymi belkami wykorzystano zarówno wkręty z łbem sześciokątnym, jak i śruby (rys. 1). Belki zespolone aluminiowo-drewniane mogą mieć zastosowanie np. w stropach nowych oraz istniejących budynków, kładkach dla pieszych, konstrukcjach narażonych na działanie środowisk o zróżnicowanej agresywności korozyjnej. Belki te charakteryzują się mniejszą wysokością w porównaniu do belek złożonych w całości z drewna, ponieważ stopy aluminium mają większą wytrzymałość oraz moduł Younga niż drewno.

2. Nośność, sztywność oraz ciągliwość połączeń ścinanych

W celu oceny modułów sztywności, nośności oraz ciągliwości połączeń, które mogą być stosowane w aluminiowo-drewnianych belkach zespolonych, przeprowadzono badania na ścinanie na 58 elementach dwuciętych [3, 5–7]. Każdy z elementów składał się z dwóch płyt z drewna klejonego z fornirow oraz z dwuteowej belki aluminiowej. Analizowano dwa rodzaje łączników ścinanych – śruby oraz wkręty z łbem sześciokątnym (rys. 2). Zaproponowano użycie pierścieni zębatych jako elementów wzmacniających połączenia ścinane. W ramach badań połączeń ścinanych, w których wykorzystano śruby, oceniono wpływ średnicy śruby (M10, M12) oraz jej klasy (5.8, 8.8), a także wzmocnienia za pomocą pierścieni zębatych (C2-50/M10G – Bulldog, C2-50/M12G – Bulldog). W badaniach połączeń ścinanych, w których zastosowano wkręty z łbem sześciokątnym, oceniono wpływ średnicy wkręta (10 mm, 12 mm) oraz jego długości (60 mm, 80 mm), a także wzmocnienia za pomocą pierścieni zębatych (C2-50/M10G – Bulldog, C2-50/M12G – Bulldog, C11-50/M12 – Geka).

Średnią nośność połączeń (na 1 łącznik) otrzymaną w badaniach laboratoryjnych przedstawiono na rysunku 3,



Rys. 2. Dwucięte elementy aluminiowo-drewniane z różnymi wariantami łączników [3, 5–7]

a moduł sztywności $k_{0,6}$ połączenia (na 1 łącznik) – na rysunku 4. Wartość modułu sztywności $k_{0,6}$ dla 1 łącznika obliczono jako stosunek siły odpowiadającej 60% nośności połączenia (na 1 łącznik) do wartości poślizgu występującego przy tej sile. Słupki błędów odnoszą się do wartości maksymalnych i minimalnych uzyskanych w danej próbie. Należy zwrócić uwagę, że większą zmienność wyników otrzymano w przypadku oceny sztywności niż nośności połączeń ścinanych. W opisie badanych połączeń przyjęto następujące kolejno oznaczenia: W – wkręt, Ś – śruba; a następnie 10 lub 12 – średnica łącznika w mm; 60, 80,

Rys. 3. Nośność połączenia ścinanego (na 1 łącznik) [3, 5–7]

125 lub 135 – długość łącznika w mm; 5.8 lub 8.8 – klasa łącznika oraz B lub G – połączenie wzmocnione pierścieniami zębatymi typu Bulldog (B) lub Geka (G).

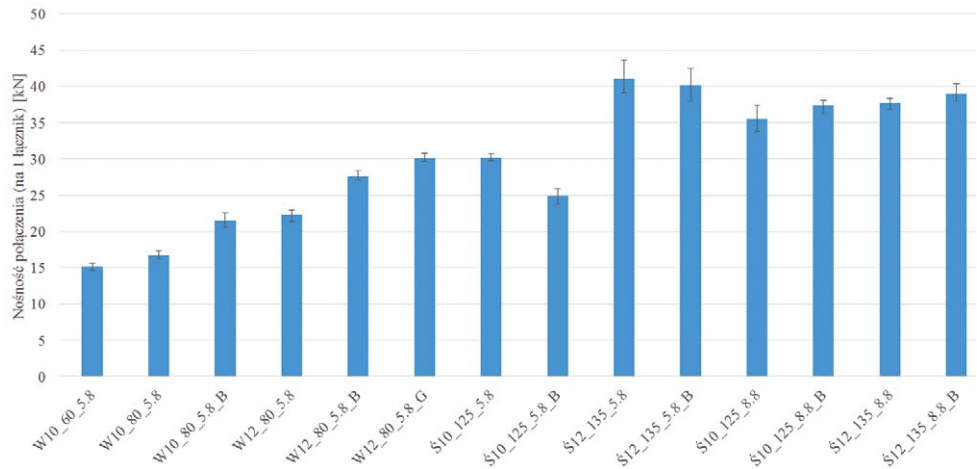
Na podstawie rysunku 3 można zauważyć, że nośność połączenia ze śrubami o średnicy 10 mm oraz klasy 5.8 (30,2 kN) była 1,8 razy większa niż nośność połączenia z wkrętami o tej samej średnicy i klasie (16,7 kN). W przypadku połączeń z wkrętami zaobserwowano wzrost nośności o 23,8–35,0% po zastosowaniu pierścieni zębatych jako wzmocnienia, ale nie odnotowano wyraźnego wzrostu modułu sztywności $k_{0,6}$. W przypadku połączeń ze śrubami klasy 8.8 po zastosowaniu pierścieni zębatych jako wzmocnienia odnotowano wzrost nośności o 3,2–5,4%, a w przypadku połączeń ze śrubami klasy 5.8 spadek nośności o 2,5% (M12) oraz 21,3% (M10) po zastosowaniu pierścieni zębatych jako wzmocnienia. W przypadku połączeń ze śrubami po zastosowaniu pierścieni zębatych jako wzmocnienia zaobserwowano wzrost modułu sztywności $k_{0,6}$ o 20,6–187,5%. Wszystkie z analizowanych połączeń były ciągliwe, ponieważ ich zdolność do poślizgu była większa od 6 mm i tym samym spełniała kryterium podane w normie [14].

Mechanizmy zniszczenia połączeń związane były z powstaniem dwóch przegubów plastycznych w łączniku, niszczeniem drewna w okolicy łącznika (tj. miążdzeniem włókien drewna w wyniku docisku łączników) oraz owalizacją otworu w pasie belki aluminiowej. W przypadku połączeń wzmocnianych pierścieniami zębatymi dochodziło do owalizacji otworu w pierścieniu zębatym, a także przerwania pierścienia (połączenia na wkręty) i wygięcia jego zębów (połączenia na śruby) (rys. 5).

3. Nośność wkrętów na wyciąganie

Badania elementów dwuciętych z wkrętami potwierdziły, że nośność połączenia ścinanego zależy od wytrzymałości

Rys. 4. Moduł sztywności $k_{0,6}$ połączenia ścinanego (na 1 łącznik) [3, 5–7]

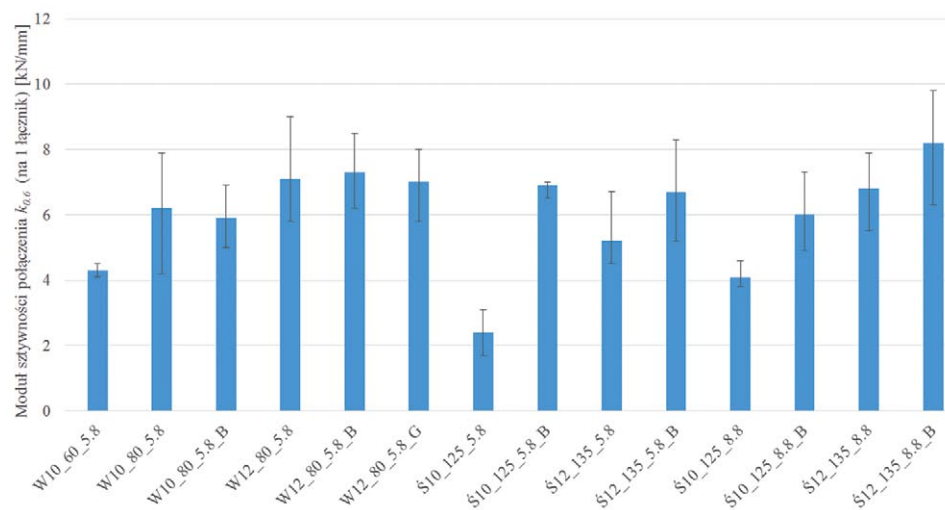


drewna, średnicy wkręta, granicy plastyczności materiału wkręta, długości zakotwienia wkręta, ale również od jego nośności na wyciąganie. W celu określenia udziału nośności wkręta na wyciąganie w nośności połączenia na ścinanie opracowano specjalne stanowisko pozwalające na przeprowadzenie badania na wyciąganie (ang. *pull-out*). Na podstawie 24 przeprowadzonych badań określono nośność na wyciąganie analizowanych wkrętów z łbem sześciokątnym [8]. Zaobserwowano, że typ drewna klejonego warstwowo z fornirow (R lub X), jak i średnica otworu pilotażowego (8 mm) nie miały znaczenia na nośność wkrętów na wyciąganie.

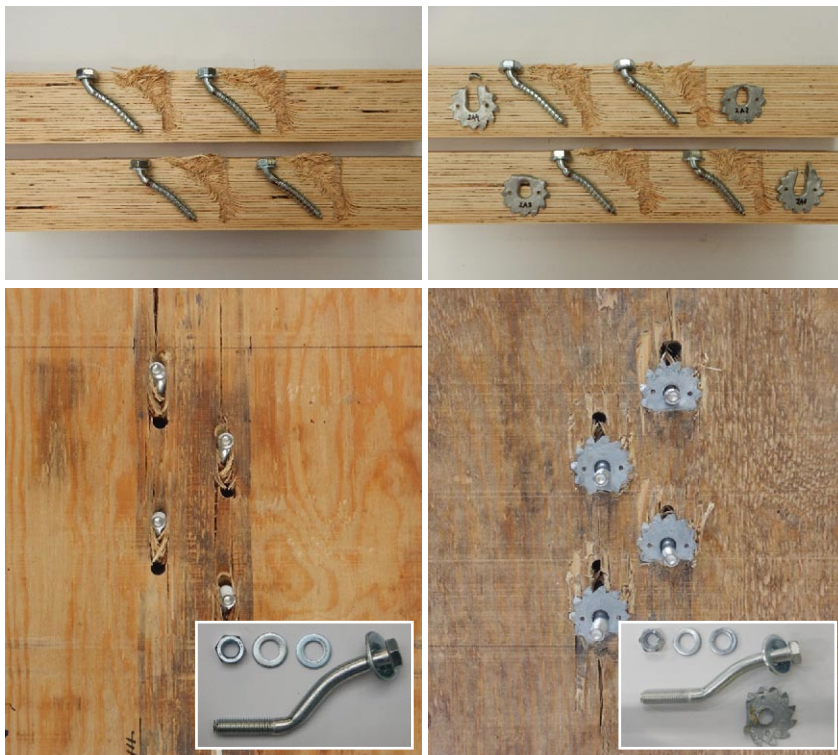
4. Zachowanie belek zespolonych aluminiowo-drewnianych

W celu oceny nośności i sztywności belek zespolonych aluminiowo-drewnianych przeprowadzono badania laboratoryjne na 8 belkach zespolonych z wykorzystaniem czteropunktowego zginania. Jako łączniki ścinane wykorzystano w 5 z nich wkręty z łbem sześciokątnym, a w pozostałych śruby (rys. 6).

Oceniono wpływ liczby łączników na zachowanie belek aluminiowo-drewnianych. W analizowanych belkach za-



Rys. 5. Mechanizmy zniszczenia badanych połączeń z wkrętami oraz śrubami [6, 7]



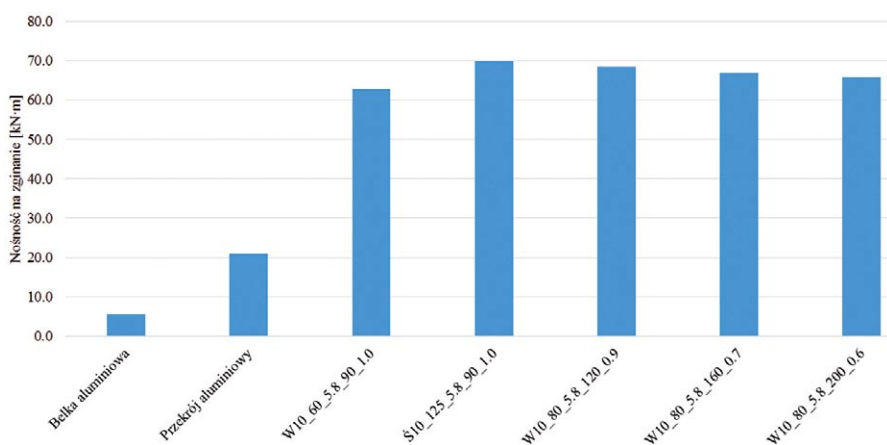
stosowano łączniki podatne, dlatego niemożliwe było zupełne wyeliminowanie poślizgu. Przyjęto, że stopień zespolenia wynosi 1,0, gdy dodanie kolejnych łączników nie zwiększa już nośności na zginanie belki zespolonej. W czasie badań mierzono zarówno ugięcie, jak i poślizg między połączonymi częściami. W każdej z badanych belek zaobserwowano zniszczenie w środku rozpiętości belki (w strefie czystego zginania, między siłami). Mechanizm zniszczenia związany był z miażdżeniem się włókien górnego ściskanego fornirowanej płyty oraz z pękaniem dolnych fornirowanych w strefie rozciąganej. Nośność belki aluminiowej znacząco wzrosła po zespoleniu z płytą drewnianą (3, 4 razy, porównując nośność na zginanie przekroju samej belki aluminiowej z nośnością na zginanie przekroju belki zespolonej łączonej na śruby – rysunek 7). Po zespoleniu belki z płytą oba elementy pracowały jako jeden element zespolony, a belka aluminiowa przestała być wrażliwa na zwichrzenie. Dzięki zastosowaniu ciągliwych łączników uzyskano znaczącą nośność również w belkach o mniejszej liczbie łączników i o częściowym zespoleniu. Zestawienie uzyskanych wyników przedstawiono na rysunku 7. W opisie badanych belek zespolonych przyjęto następujące kolejno oznaczenia: W – wkręt, Ś – śruba; a następnie 10 lub 12 – średnica łącznika w mm; 60, 80 – długość łącznika w mm; 5.8 – klasa łącznika; 90, 120 160 lub 200 – rozstaw łączników w mm oraz 1.0, 0.9, 0.7 lub 0.6 – stopień zespolenia.



Rys. 6. Belka zespolona aluminiowo-drewniana ze śrubami podczas badań [5]

5. Podsumowanie

W ciągu ostatnich kilku lat wykonano szereg badań dotyczących belek zespolonych aluminiowo-drewnianych oraz ich połączeń. Udowodniono, że dzięki współpracy belki aluminiowej z płytą drewnianą można osiągnąć znaczący wzrost nośności (ponad trzykrotny, porównując nośność na zginanie przekroju samej belki aluminiowej z nośnością



Rys. 7. Nośność na zginanie przed i po zespoleniu [3–5]

na zginanie przekroju belki zespolonej). Zaproponowano śruby oraz wkręty jako łączniki ścinane w belkach zespolonych aluminiowo-drewnianych i oceniono nośność, sztywność oraz ciągliwość połączeń z tymi łącznikami. Oceniono, że nośność połączeń z wkrętami można zwiększyć po zastosowaniu pierścieni zębatych jako elementów wzmacniających. Natomiast w przypadku połączeń na śruby z dodatkowymi pierścieniami zębatymi zaobserwowano korzystny wpływ tego rozwiązania na sztywność tych połączeń.

Pomimo wykonania wielu badań dotyczących belek zespolonych aluminiowo-drewnianych wciąż wiele problemów pozostaje do rozwiązania. Po pierwsze, analizowane połączenia mają stosunkowo mały moduł sztywności $k_{0,6r}$ a zatem wykazują podatność. W przypadku podatnych połączeń istotne może się okazać uwzględnienie w modelach teoretycznych poślizgu występującego między górnym pasem belki a dolną płaszczyzną płyty [15, 16]. Po drugie, aluminium ma inny współczynnik rozszerzalności termicznej niż drewno [17], dlatego zastosowanie belek zespolonych może być ograniczone do obiektów o małych wahaniami temperatury. Kolejnym problemem jest mała nośność ogniowa belek zespolonych aluminiowo-drewnianych wynikająca z faktu szybkiej degradacji granicy plastyczności stopu aluminium w warunkach pożarowych. Rozwiązanie mogą stanowić płyty ogniochronne lub sufity podwieszane. Ponadto aluminiowe belki mogą być częściowo lub w całości obudowane płytami z drewna klejonego warstwowo w celu podniesienia ich nośności ogniowej [18]. Rozwiązanie to jest analogiczne do częściowo lub w pełni obetonowanych belek oraz słupów w konstrukcjach stalowo-betonowych [19]. Innym sposobem rozwiązania problemu niskiej nośności ogniowej dźwigarów aluminiowych jest wykorzystanie do ich zabezpieczenia pożarowego innowacyjnego kompozytu hybrydowego o działaniu chłodząco-izolującym [20]. Belki zespolone aluminiowo-drewniane mogą w przyszłości wymagać wzmocnień. Nie jest jednak możliwe wzmocnienie za pomocą blach spawanych do dźwigara, jak ma to miejsce w przypadku belek stalowo-betonowych [21], ponieważ w wyniku spawania degradacji uległaby granica plastyczności stopu aluminium w strefach wpływu ciepła [11, 22]. Płyty z drewna klejonego z fornirów, jak i belki aluminiowe mogą być natomiast skutecznie wzmocniane za pomocą tkanin zbrojonych włóknem węglowym [23, 24], dlatego warto rozważyć ten rodzaj wzmocnienia w przypadku belek zespolonych aluminiowo-drewnianych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Szumigala M., Chybiński M., Polus Ł., Analiza studialna belek zespolonych aluminiowo-drewnianych, [w:] XI Konferencja Naukowa Konstrukcje Zespolone, Billiński T., Korentz J. (red.), Zielona Góra, Uniwersytet Zielonogórski, 2017, str. 71–72

- [2] Szumigala M., Chybiński M., Polus Ł., Preliminary Analysis of the Aluminium-Timber Composite Beams, Civil and Environmental Engineering Reports 27(4)/2017, str. 131–141, doi: 10.1515/ceer-2017-0056
- [3] Chybiński M., Polus Ł., Theoretical, experimental and numerical study of aluminium-timber composite beams with screwed connections, Construction and Building Materials 226/2019, str. 317–330, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.101
- [4] Chybiński M., Polus Ł., Structural Behaviour of Aluminium-Timber Composite Beams with Partial Shear Connections, Applied Science 13/2023, 1603, doi: 10.3390/app13031603
- [5] Chybiński M., Polus Ł., Experimental and numerical investigations of aluminium-timber composite beams with bolted connections, Structures 34/2021, str. 1942–1960, doi: 10.1016/j.istruc.2021.08.111
- [6] Chybiński M., Polus Ł., Mechanical Behaviour of Aluminium-Timber Composite Connections with Screws and Toothed Plates, Materials 15/2022, str. 68, doi: 10.3390/ma15010068
- [7] Chybiński M., Polus Ł., Experimental Study of Aluminium-Timber Composite Bolted Connections Strengthened with Toothed Plates, Materials 15/2022, str. 5271, doi: 10.3390/ma15155271
- [8] Chybiński M., Polus Ł., Withdrawal strength of hexagon head wood screws in laminated veneer lumber, European Journal of Wood and Wood Products 80(3)/2022, str. 541–553, doi: 10.1007/s00107-022-01797-4
- [9] Chybiński M., Polus Ł., Szymkuć W., Zastosowanie drewna klejonego warstwowo z fornirów LVL w budownictwie, Przegląd Budowlany 5-6/2021, str. 44–50
- [10] Chybiński M., Polus Ł., Experimental and numerical investigations of laminated veneer lumber panels, Archives of Civil Engineering 67(3)/2021, str. 351–372, doi: 10.24425/ace.2021.138060
- [11] Chybiński M., Polus Ł., Ratajczak M., Sielicki P.W., The Evaluation of the Fracture Surface in the AW-6060 T6 Aluminium Alloy under a Wide Range of Loads, Metals 9/2019, str. 324, doi: 10.3390/met9030324
- [12] Gwóźdź M., Problemy projektowe współczesnych konstrukcji aluminiowych, Czasopismo Techniczne, nr Z4-A/2007, str. 281–286
- [13] Siwowski T., FEM modelling and analysis of a certain aluminium bridge deck panel, Archives of Civil Engineering 55(3)/2009, str. 347–365
- [14] PN-EN 1994-1-1, Eurokod 4: Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [15] Kuczma M., Kuczma B., Partially connected composite beams, Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics 6/2006, str. 233–234, doi: 10.1002/pamm.200610097
- [16] Leskelä M. V., Shear connections in composite flexural members of steel and concrete. In European Convention for Constructional Steelwork; Technical Committee 11, Composite Structures, No 138: Mem Martins, Portugal, 2017
- [17] Marcinowski J., Naprężenia w warstwowej konstrukcji zespolonej z materiałów o różnej rozszerzalności termicznej, Materiały Budowlane 4/2018, str. 107–109
- [18] Riola-Parada F., Timber-steel hybrid beams for multi-storey buildings. PhD thesis. TU Wien, 2016
- [19] Szmigiera E., Influence of concrete and fibre concrete on the load-carrying capacity and deformability of composite steel-concrete columns, Journal of Civil Engineering and Management 13(1)/2007, str. 55–61
- [20] Sodal K., Technologia kompozytu hybrydowego o właściwościach chłodząco-izolujących, rozprawa doktorska, Politechnika Łódzka, 2022
- [21] Szewczyk P., Szumigala M., Optimal Design of Steel-Concrete Composite Beams Strengthened under Load, Materials 14/2021, str. 4715, doi: 10.3390/ma14164715
- [22] Okura I., Application of aluminium alloys to bridges and joining technologies, Welding International 17(10)/2003, str. 781–785, doi: 10.1533/weli.17.10.781.22037
- [23] Bakalarz M., Kossakowski P., Strengthening of Full-Scale Laminated Veneer Lumber Beams with CFRP Sheets, Materials 15/2022, str. 6526, doi: 10.3390/ma15196526
- [24] Chen Y., Feng R., Xu J., Flexural behaviour of CFRP strengthened concrete filled aluminium alloy CHS tubes, Construction and Building Materials 142/2017, str. 295–319, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.040