

# Belki zespolone stalowo-drewniane – przegląd rozwiązań

## Steel-timber composite beams – review of solutions

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

DOI: 10.5604/01.3001.0054.6378

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono przegląd rozwiązań dotyczących belek zespolonych stalowo-drewnianych. Omówiono aktualne kierunki badań nad belkami zespolonymi ze stalowymi dźwigarami oraz drewnianymi płytami. Zachowanie belek zespolonych stalowo-drewnianych zostało opisane, biorąc pod uwagę znane z literatury badania. Połączenie stalowych dźwigarów z drewnianymi płytami zapewniło wzrost nośności oraz sztywności dźwigarów.

**Słowa kluczowe:** belki zespolone stalowo-drewniane, drewno klejone krzyżowo (CLT), drewno klejone warstwowo z fornirów (LVL), śruby, wkręty z łbem sześciokątnym.

**Abstract:** This paper presents a review of steel-timber composite beams. Current trends in research on composite beams with steel girders and timber slabs were discussed. The structural behaviour of steel-timber composite beams was described based on investigations presented in the literature. The connection of steel girders with timber slabs provided for the increase of the load-bearing capacity and stiffness.

**Keywords:** steel-timber composite beams, cross-laminated timber (CLT), laminated veneer lumber (LVL), bolts, hexagon head wood screws.

### 1. Wprowadzenie

Drewno od lat stosowane jest m.in. na konstrukcje domów, mostów [1–3], kładek dla pieszych [4, 5], wież widokowych [6], obiektów użyteczności publicznej [7] czy kościołów [8]. Postęp w obróbce oraz technologii drewna doprowadził do pojawienia się w ostatnim czasie nowych wyrobów drewnianych i sprawił, że drewno stało się materiałem konkurencyjnym dla stali oraz betonu [9]. W konstrukcjach drewnianych wykorzystuje się elementy stalowe, najczęściej w postaci łączników czy blach. Elementy stalowe wykorzystywane są również do wzmacniania belek drewnianych. O nośności zginanych belek drewnianych najczęściej decyduje strefa rozciągana przekroju i występujące w niej wady drewna [10, 11], dlatego problematykę analizy zbrojenia tej strefy podejmowali prof. Ryszard Ganowicz oraz dr Ryszard Plenzler [12]. Badania dotyczące oceny skuteczności wzmacniania belek drewnianych za pomocą elementów stalowych prowadził również prof. Jerzy Jasieńko [13–15] oceniając, że nośność wzmocnionych belek drewnianych była większa nawet o 100% od nośności niewzmocnionych belek drewnianych, a wklejenie w strefę rozciąganą prętów stalowych pozwoliło uzyskać ugięcia nawet o 60% mniejsze od ugięć belek niewzmocnionych. Możliwość współpracy elementów stalowych oraz drewnianych można wykorzystać jeszcze w inny sposób. Belkę stalową można zespolić z płytą drewnianą, zwiększając dzięki temu nośność i sztywność belki. Dzięki zespoleniu można bardziej wydajnie wykorzystać zalety obu materiałów [16].

Redukcji ulegnie ciężar własny oraz koszt konstrukcji. Belki zespolone stalowo-drewniane mogą znaleźć swoje zastosowanie np. w stropach budynków czy w kładkach dla pieszych.

#### 1.1. Korzyści wynikające z zastosowania belek zespolonych stalowo-drewnianych

Główną korzyścią wynikającą z zespolenia belki stalowej z płytą drewnianą jest wzrost nośności i sztywności belki. W porównaniu do belek zespolonych stalowo-betonowych belki zespolone stalowo-drewniane charakteryzują się [17]:

- mniejszym ciężarem własnym płyty wykonanej z drewna klejonego warstwowo z fornirów lub drewna klejonego krzyżowo niż płyta żelbetowa, co prowadzi do mniejszego ciężaru własnego konstrukcji oraz tańszego i łatwiejszego montażu,
- krótszym czasem montażu, ponieważ nie ma potrzeby czekania na stwardnienie mieszanki betonowej,
- mniejszymi siłami, które mogłyby powstać w przypadku oddziaływań sejsmicznych [18].

Zaletą tego rozwiązania jest również fakt, że stal ma zbliżony do drewna współczynnik rozszerzalności termicznej, co ogranicza możliwość wystąpienia uszkodzeń w obszarze połączeń. Kolejną zaletą jest możliwość zastosowania w belkach stalowo-drewnianych łączników rozbiernalnych, które czynią możliwym wymianę uszkodzonego elementu (np. płyty drewnianej w kładce), jak również umożliwiają rozebranie konstrukcji na końcu okresu jej eksploatacji i recykling materiałów. W sytuacji gdyby zaistniała konieczność

wzmocnienia belek zespolonych stalowo-drewnianych, możliwe będzie zastosowanie w tym celu materiałów kompozytowych [19–23].

### 1.2. Problemy wymagające rozwiązań

Jednym z podstawowych problemów jest brak normy do projektowania belek zespolonych stalowo-drewnianych, dlatego ostatnie badania dotyczą określania nośności belek oraz oceniają możliwość zastosowania istniejących modeli teoretycznych do jej wyznaczania. Istotny problem badawczy stanowi zapewnienie pełnego zespolenia pomiędzy płytą drewnianą a belką stalową. Połączenia ścinane mają istotny wpływ na zachowanie belek zespolonych stalowo-drewnianych. Kolejnym problemem jest podatność stali na korozję. Poza zabezpieczeniem stalowych dźwigarów przed korozją systemami powłokowymi istnieje możliwość wykonania dźwigara ze stali nierdzewnej. Niska nośność ogniowa niezabezpieczonej belki zespolonej stalowo-drewnianej stanowi kolejny problem. Nośność ogniową można jednak poprawić, stosując zabezpieczenia ogniochronne dźwigarów stalowych [24]. Możliwe jest również wykorzystanie stali nierdzewnej, w której degradacja granicy plastyczności w wysokich temperaturach postępuje wolniej niż w przypadku stali niestopowej [25]. Ostatnią możliwością jest obudowanie częściowe lub całościowe przekroju płytami z drewna [26], które dzięki swojej masywności ulegają powolnemu zwęglaniu.

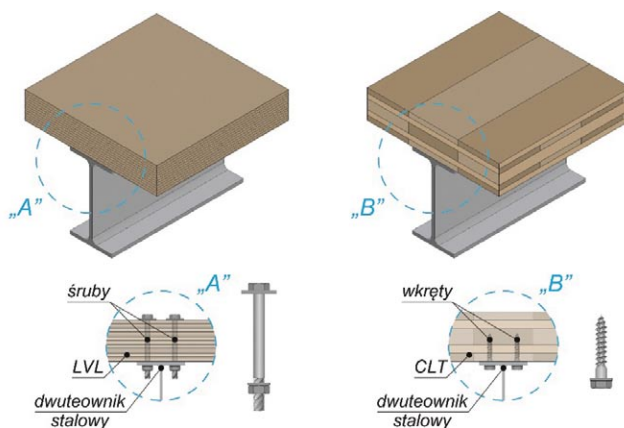
## 2. Rozwiązania belek zespolonych stalowo-drewnianych

### 2.1. Płyty belek zespolonych stalowo-drewnianych

W dotychczas badanych belkach zespolonych stalowo-drewnianych wykorzystywano płyty wykonane z drewna klejonego warstwowo z fornirow (ang. *Laminated Veneer Lumber*, LVL) [27, 28], drewna klejonego krzyżowo (ang. *Cross-Laminated Timber*, CLT) [29] lub płyty wiórowej (ang. *particle board*) [30] (rys. 1). Drewno klejone warstwowo z fornirow składa się ze sklejonych ze sobą fornirow o grubości 3–4 mm [31]. Natomiast drewno klejone krzyżowo otrzymuje się w wyniku krzyżowego sklejenia desek w kolejnych warstwach przekroju elementu płytowego [32].

### 2.2. Dźwigary belek zespolonych stalowo-drewnianych

Dźwigary belek zespolonych stalowo-drewnianych mogą być zarówno belkami gorąco walcowanymi [33], jak i cienkościennymi [34], a także spawanymi [35] (rys. 2). W dotąd przeprowadzonych badaniach dźwigary wykonane były ze stali niestopowej. Mogą być również wykonane ze stali nierdzewnej oraz stali wysokiej wytrzymałości. Zaletą wykonana dźwigara ze stali nierdzewnej jest nie tylko brak konieczności zabezpieczania go przed korozją, ale również większa nośność ogniowa, ponieważ degradacja granicy plastyczności w wysokich temperaturach (560–740°C)

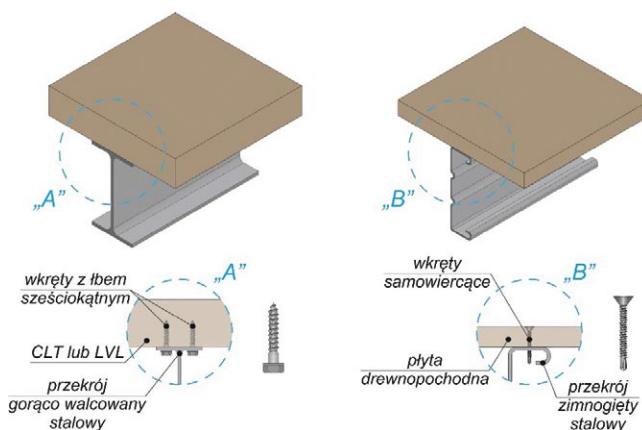


**Rys. 1.** Belka zespolona stalowo-drewniana z dwuteowym dźwigarem stalowym oraz płytą wykonaną z: a) LVL [27, 28], b) CLT [29]

w stali nierdzewnej jest dużo mniejsza niż w przypadku stali niestopowej [25]. W przypadku stali wysokiej wytrzymałości najbardziej efektywne jest jej zastosowanie na elementy rozciągane, w których nie ma potrzeby uwzględniania wpływu niestateczności. W sytuacji gdy belki zespolone są swobodnie podparte, zastosowanie stali wysokiej wytrzymałości na dźwigary może być szczególnie korzystne, ponieważ płyta zabezpiecza dźwigary przed zwichrzeniem, a oś obciążająca może znajdować się w płycie powodując, że dźwigary będą jedynie rozciągane. Częstym ograniczeniem stosowania belek wykonanych ze stali wysokiej wytrzymałości są ich nadmierne ugięcia przy dużych rozpiętościach. Zespolenie dźwigarów ze stali wysokiej wytrzymałości z płytą drewnianą prowadzi do większej sztywności belki i zmniejszenia jej ugięcia.

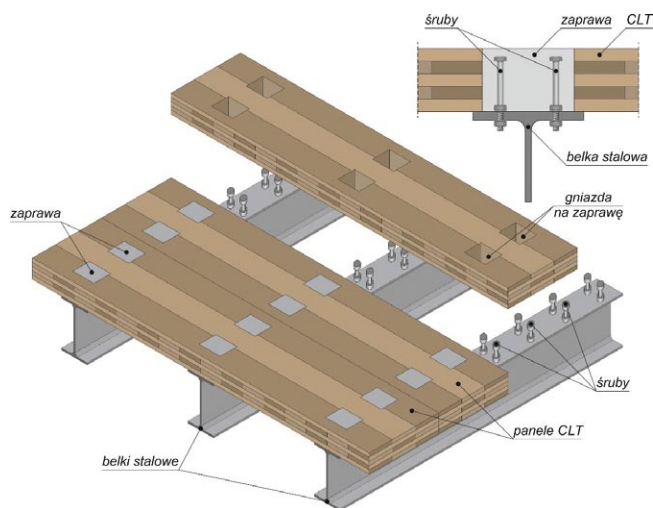
### 2.3. Połączenia ścinane belek zespolonych stalowo-drewnianych

Ostatnie badania udowodniły, że współpraca belki stalowej z płytą drewnianą może być zapewniona m.in. dzięki wkrętom oraz śrubom. Dodatkowo zastosowanie kleju epoksydowego razem z łącznikami mechanicznymi pomiędzy płytą



**Rys. 2.** Belka zespolona stalowo-drewniana z dźwigarem: a) gorąco walcowanym [33], b) cienkościennym [34]

drewnianą a belką stalową poprawia współpracę elementów i ogranicza ich poślizg do minimum [27]. Zespół badawczy z Trento zaproponował 20 rozwiązań połączeń, które można wykorzystać do połączenia płyty drewnianej z belką stalową [36, 37]. W jednym z zaproponowanych rozwiązań do górnego pasa dźwigara przyspawano kątowniki. Dzięki temu, że grubość półek kątowników była cieńsza od grubości pasa dźwigara, możliwe było zastosowanie wkrętów samowiercących do zespolenia z płytą drewnianą. Połączenie ścinane może być również realizowane za pomocą śrub zatopionych w zaprawie (rys. 3) [38].



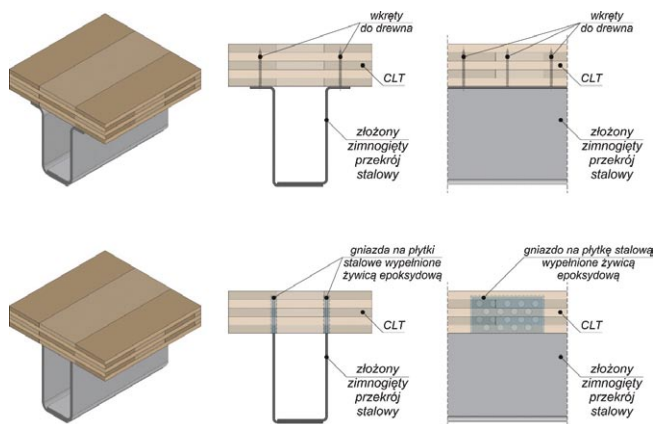
**Rys. 3.** Połączenie ścinane złożone ze śrub zatopionych w zaprawie [38]

W pracy [39] zaproponowano zastosowanie stalowych rur w płycie drewnianej łączonej ze stalowym dźwigarem za pomocą śrub. Łeb śruby z podkładką dociskane są nie do drewna, ale do rury stalowej osadzonej wcześniej w płycie drewnianej wykonanej z LVL. Dzięki temu można ograniczyć możliwość niszczenia drewna podczas dokręcania śrub oraz uzyskać większą siłę sprężenia.

W przypadku gdy dźwigar stalowy wykonany jest ze złożonego przekroju zimnogiętego w kształcie litery U połączenie z płytą wykonaną z drewna klejonego krzyżowo (CLT) mogą stanowić specjalnie ukształtowane w profilu zimnogiętym perforowane płytki stalowe osadzone w gniazdach płyty i zatopione w żywicy epoksydowej [40] (rys. 4).

#### 2.4. Najważniejsze wnioski z dotychczasowych badań

W ostatnim czasie wiele ośrodków naukowych podjęło tematy badawcze dotyczące konstrukcji zespolonych stalowo-drewnianych. W Londynie zespół prof. Gardnera zajmował się belkami zespolonymi z dźwigarami wykonanymi z belek cienkościennych połączonymi z płytą wiórową za pomocą wkrętów samowiercących [30, 34]. Po zespoleniu belki cienkościennej z płytą wiórową uzyskano wzrost jej nośności na zginanie o 140%, a sztywności o 40%. Zaproponowano metodę do obliczania nośności belek zespolonych stalowo-drewnianych z cienkościennymi dźwigarami, bazując



**Rys. 4.** Połączenia ścinane w postaci wkrętów lub stalowych płytek zatopionych w żywicy epoksydowej w gniazdach wykonanych w płycie CLT dla belek zespolonych stalowo-drewnianych z dźwigarem stalowym o przekroju zimnogiętym [40]

na metodzie obliczania nośności na zginanie przekroju częściowo zespolonego według Eurokodu 4 [41]. Kluczowe w zaproponowanej metodzie jest uwzględnienie niestateczności miejscowej w nośności na zginanie pręta cienkościennego w punkcie A (dla zerowego stopnia zespolenia) dla krzywej nośności na zginanie–stopień zespolenia. W Luksemburgu zespół prof. Odenbreita przeprowadził analizy numeryczne, które pozwoliły na porównanie nośności na zginanie 8 belek stalowo-drewnianych o różnym stopniu zespolenia z nośnością 8 belek hybrydowych stalowo-drewnianych o zerowym stopniu zespolenia [39]. Dźwigary analizowanych belek zespolonych miały przekrój IPE, a płyta wykona była z drewna klejonego warstwowo z fornirów (LVL). W przypadku pełnego zespolenia zaobserwowano wzrost nośności o 48–67%. Zespół prof. Heinisuo z Tampere wykonał analizy teoretyczne zachowania belek stalowo-drewnianych w zakresie sprężystym, wykorzystując homogenizację płyty z drewna klejonego krzyżowo (CLT) [42]. Najwięcej badań zarówno eksperymentalnych, jak i numerycznych dotyczących konstrukcji zespolonych stalowo-drewnianych wykonał zespół prof. Bradforda z Sydney. Oceniono nośność, sztywność oraz formę niszczenia belek zespolonych stalowo-drewnianych, a także ich połączeń. Zniszczenie badanych belek było związane z powstaniem przegubów plastycznych w łącznikach mechanicznych oraz pękaniem płyty drewnianej w strefie rozciąganej [27]. Opracowano wzory do wyznaczania modułu sztywności oraz nośności połączenia ścinanego z wkrętami [28].

### 3. Podsumowanie

Dzięki pojawieniu się nowych drewnianych wyrobów płytowych, takich jak drewno klejone warstwowo z fornirów czy drewno klejone krzyżowo, drewno pozostaje nadal atrakcyjnym i konkurencyjnym w stosunku do betonu oraz stali materiałem konstrukcyjnym. Znajduje też nowe zastosowania jak opisywane w niniejszym artykule belki zespolone



stalowo-drewniane. Obecnie nie istnieją normy do projektowania konstrukcji zespolonych stalowo-drewnianych, co ogranicza możliwość ich stosowania. Kilka znanych ośrodków badawczych prowadzi aktualnie badania tego rodzaju konstrukcji. Udowodniono, że zespolenie stalowych dźwigarów z drewnianymi płytami zapewnia wzrost nośności oraz sztywności dźwigarów stalowych.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Biliszczuk J., Bień J., Maliszewicz P., Mosty z drewna klejonego, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1988
- [2] Furtak K., Mosty drewniane, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2002
- [3] Zobel H., Thakaa A., Mosty drewniane, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2007
- [4] Radomski W., Największe osiągnięcia budownictwa mostowego w ostatnich latach, Część 1. Kryterium rozpiętości przęsła, *Builder* 5/2020, str. 36–43
- [5] Howis J., Wysokowski A., Konstruowanie kładek dla pieszych z drewna klejonego zgodnie z eurokodami, *Materiały Budowlane* 7/2009, str. 40–43
- [6] Czernik S., Forma strukturalna współczesnych wież i platform obserwacyjnych na przykładzie realizacji wieży widokowej w Krynicy Zdroju, *Przegląd Budowlany* 4/2019, str. 28–31
- [7] Kotwica E. I., Nożyński W., Konstrukcje Drewniane – Przykłady Obliczeń, Stowarzyszenie Producentów Płyt Drewnopochodnych w Polsce, Szczecin, 2015
- [8] Eckert W., Nowogońska B., Stan techniczny drewnianego szkieletowego kościoła w Radzikowie – skutki zmian konstrukcyjnych, *Przegląd budowlany* 12/2008, str. 36–39
- [9] Flaga K., Advances in materials applied in civil engineering, *Journal of Materials Processing Technology* 106(1–3)2000, str. 173–183, doi: 10.1016/S0924-0136(00)00611-7
- [10] Nowak T., Analiza pracy statycznej zginanych belek drewnianych wzmocnionych przy użyciu CFRP, praca doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław, 2007
- [11] Rajczyk M., Stachecki B., Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych wzmocnienia belek z drewna klejonego zbrojeniem w postaci prętów, *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo* 17(167)/2011, str. 186–195
- [12] Ganowicz R., Plenzler R., Zbrojone stalą belki drewniane – badania i realizacja obiektu prototypowego [w]: *Symposium Badania nad zastosowaniem drewna i materiałów drewnopochodnych we współczesnych konstrukcjach budowlanych*, Szczecin, 1978
- [13] Jasięńko J., Naprawa i wzmocnianie zginanych belek drewnianych, *Materiały budowlane* 5/2000, str. 19–23
- [14] Jasięńko J., Opracowanie metod wzmocniania konstrukcji drewnianych przy zastosowaniu żywic syntetycznych, Etap I, Raport Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1988
- [15] Jasięńko J., Opracowanie metod wzmocniania konstrukcji drewnianych przy zastosowaniu żywic syntetycznych, Etap II, Raport Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1989
- [16] Szewczyk P., Szumigała M., Optimal Design of Steel-Concrete Composite Beams Strengthened under Load, *Materials* 14/2021, str. 4715, doi: 10.3390/ma14164715
- [17] Chybiński M., Polus Ł., Szumigała M., Zastosowanie elementów drewnianych w belkach zespolonych, *Inżynieria i Budownictwo* 5–6/2021, str. 247–249
- [18] Stiemi S., Tesfamariam S., Schneider J., Popovski M., Karacabeyli E., Development of steel-wood hybrid systems for buildings under dynamic loads, [w]: *Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas (STESSA)*, Santiago, Chile, 9–11 January, 2012
- [19] Kula K., Socha T., Denisiewicz A.: Weakened Zones in Wood – Based Composite Beams and Their Strengthening by CFRP: Experimental, Theoretical, and Numerical Analysis, *Engineering Transactions* 67(4)/2019, str. 461–474, doi: 10.24423/EngTrans.874.20190712
- [20] Halicka A., Ślósarz S., Strengthening of timber beams with pretensioned CFRP strips, *Structures*, 34/2021, str. 2912–2921, doi: 10.1016/j.istruc.2021.09.055
- [21] Biliński T., Socha T., Numerical analysis of deflections of multi-layered beams, *Civil and Environmental Engineering Reports* 15(4)/2014, str. 33–42, doi: 10.1515/ceer-2014-0033
- [22] Wdowiak-Postulak A., Świt G., Behavior of Glulam Beams Strengthened in bending with BFRP Fabrics, *Civil and Environmental Engineering Reports* 31(2)/2021, str. 1–14, doi: 10.2478/ceer-2021-0016
- [23] Jankowiak I., Materiały kompozytowe w budownictwie mostowym, *Inżynier Budownictwa* 2012
- [24] Mróz K., Hager I., Korniejenko K., Material solutions for passive fire protection of buildings and structures and their performances testing, *Procedia Engineering* 151/2016, str. 284–291, doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.388
- [25] Chybiński M., Polus Ł., Bending resistance of metal-concrete composite beams in a natural fire, *Civil and Environmental Engineering Reports* 28(4)/2018, str. 149–162
- [26] Riola-Parada F., Timber-steel hybrid beams for multi-storey buildings, PhD thesis, TU Wien, 2016
- [27] Hassanieh A., Valipour H. R., Bradford M. A., Experimental and numerical study of steel-timber composite (STC) beams, *Journal of Constructional Steel Research* 122/2016, str. 367–378, doi: 10.1016/j.jcsr.2016.04.005
- [28] Hassanieh A., Valipour H. R., Bradford M. A., Experimental and analytical behaviour of steel-timber composite connections, *Construction and Building Materials* 118/2016, str. 63–75, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.052
- [29] Hassanieh A., Valipour H. R., Bradford M. A., Composite connections between CLT slab and steel beam: Experiments and empirical models, *Journal of Constructional Steel Research* 138/2017, str. 823–836, doi: 10.1016/j.jcsr.2017.09.002
- [30] Kyvelou P., Gardner L., Nethercot D. A., Design of Composite Cold-Formed Steel Flooring Systems, *Structures* 12/2017, str. 242–252, doi: 10.1016/j.istruc.2017.09.006
- [31] Komorowski M., *Podręcznik projektowania i budowania w systemie STEICO. Podstawy. Fizyka budowli. Zalecenia wykonawcze*, Forestor Communication, Warszawa, 2020
- [32] Porteous J., Kermani A., *Structural Timber Design to Eurocode 5*. Wiley-Blackwell, Chichester, 2013
- [33] Hassanieh A., Valipour H. R., Bradford M. A., Sandhaas C., Modelling of steel-timber composite connections: Validation of finite element model and parametric study, *Engineering Structures*, 138/2017, str. 35–49, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.02.016
- [34] Kyvelou P., Gardner L., Nethercot D.A., Finite element modelling of composite cold-formed steel flooring systems, *Engineering Structures* 158/2018, str. 28–42, doi: 10.1016/j.engstruct.2017.12.024
- [35] Liu R., Liu J., Wu Z., Chen L., Wang J., A Study on the Influence of Bolt Arrangement Parameters on the Bending Behavior of Timber-Steel Composite (TSC) Beams, *Buildings* 12/2022, 2013, doi: 10.3390/buildings12112013
- [36] Loss C., Piazza M., Zandonini R., Connections for steel-timber hybrid prefabricated buildings. Part I: experimental tests. *Construction and Building Materials* 122/2016, str. 781–795, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.001
- [37] Loss C., Piazza M., Zandonini R., Connections for steel-timber hybrid prefabricated buildings. Part II: innovative modular structures, *Construction and Building Materials* 122/2016, str. 796–808, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.002
- [38] Ataei A., Chiniforush A. A., Bradford M. A., Valipour H. R., Ngo T. D., Behaviour of embedded bolted shear connectors in steel-timber composite beams subjected to cyclic loading, *Journal of Building Engineering* 54/2022, 104581, doi: 10.1016/j.jobe.2022.104581
- [39] Romero A., Yang J., Hanus F., Odenbreit C., Numerical Investigation of Steel-LVL Timber Composite Beams, *ce/papers* 5/2022, str. 21–30, doi.org/10.1002/cepa.1694
- [40] Loss C., Davison B., Innovative composite steel-timber floors with prefabricated modular components, *Engineering Structures* 132/2017, str. 695–713, doi: 10.1016/j.engstruct.2016.11.062
- [41] PN-EN 1994-1-1:2008 Eurokod 4: Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków
- [42] Aspila A., Heinisuo M., Mela K., Malaska M., Pajunen S., Elastic design of steel-timber composite beams, *Wood Material Science & Engineering* 17(4)/2022, str. 243–252, doi: 10.1080/17480272.2022.2093128