

dr inż. Bartosz Kawecki^{1)*}

ORCID: 0000-0001-8134-5956

dr inż. Michał Pieńko¹⁾

ORCID: 0000-0002-9653-8539

dr hab. inż. Tomasz Lipecki, prof. PL¹⁾

ORCID: 0000-0002-2867-773X

Badania eksperymentalne spalania belek z kompozytu drewno-CFRP w skali rzeczywistej

Experimental tests on combustion of wood-CFRP composite beams in a full scale

DOI: 10.15199/33.2023.07.06

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki porównawcze miejscowego spalania 24 belek w skali rzeczywistej, obciążonych statycznie, wykonanych z kompozytu drewno-CFRP oraz drewna klejonego. Wyteżenie próbek wynosiło 90%, w klasie drewna klejonego GL24h. Mierzone były czas spalania do momentu zniszczenia belki, przyrost ugięcia i temperatura elementu. Podsumowując otrzymane wyniki, zauważalny jest trend pozwalający stwierdzić, że taśmy CFRP stosowane wewnątrz przekroju mogą zwiększać odporność ogniową belek, jednak muszą być chronione przez drewno w czasie oddziaływania ognia.

Słowa kluczowe: belki kompozytowe drewno-CFRP; belki z drewna klejonego; miejscowe działanie ognia; spalanie przy obciążeniu statycznym.

Abstract. The paper presents comparative results of the local combustion of 24 full scale beams, statically loaded, made of wood-CFRP composite and glue laminated timber. An effort of the samples was 90%, in the class of glue laminated timber GL24h. The combustion time until beams' failure, deflection increment and element temperature were measured. Summarising the gathered results, a trend allowing to conclude that CFRP tapes used inside the cross-section can increase the fire resistance of the beams is noticeable, but they must be protected by the wood during fire exposure.

Keywords: wood-CFRP composite beams; glue laminated timber beams; local fire exposure; combustion under static load.

W znaczenie nośnych elementów konstrukcyjnych materiałami FRP prowadzi do znacznego zwiększenia ich sztywności i nośności. Różne technologie są stale badane i rozwijane. Aktualnie, oprócz autorów zagranicznych, tematem tym zajmuje się stosunkowo szerokie grono polskich naukowców, jak np. Nowak [1], Sobczak-Piąstka i in. [2], Bakalarz i Kossakowski [3], Halicka i Ślósarz [4], czy Kawecki – autor artykułu [5–9]. Wszystkie badania prowadzone są jednak w warunkach laboratoryjnych i nie uwzględniają warunków podwyższonej temperatury. Materiały FRP charakteryzują się niską temperaturą szklenia matrycy epoksydowej. W związku z tym badania odporności wzmocnionych elementów nośnych w warunkach wysokiej temperatury wydają się kluczowe z punktu widzenia bezpieczeństwa konstrukcji. Pomimo postępu technologicznego badania ogniowe elementów o rozmiarach rzeczywistych przy obciążeniu statycznym nadal stanowią duże wyzwanie dla badaczy, o czym świadczy niewielka liczba publikacji naukowych na ten temat. Prowadzenie badań w pełnej skali w laboratorium jest problematyczne i kosztowne. Powodem jest konieczność zabezpieczenia urządzeń pomiarowych, takich jak maszyny wytrzymałościowe, siłowniki hydrauliczne, czujniki przemieszczeń itp., przed zniszczeniem wskutek oddziaływania wysokiej temperatury. W celu ograniczenia zasięgu ognia, próbki spala-

ne są częściowo, w najbardziej obciążonym przekroju. Pozwala to na kilkukrotne zmniejszenie rozmiaru paleniska przy jednoczesnym zachowaniu możliwości oceny pracy konstrukcyjnej elementu. Pierwsza grupa eksperymentów obejmuje przyłożenie stałego obciążenia w trakcie spalania belek z drewna lub drewna klejonego. Firmanti i in. [10, 11] skupili się na zależności między poziomem naprężeń a ogniodpornością, a Qin i in. [12] stwierdzili, że poziom naprężeń ma istotny wpływ na czas zniszczenia. Schmid i in. [13] spalali próbki zarówno w strefie rozciągania, jak i w strefie ściskania. Lineham i in. [14], Fahni i in. [15] oraz Wang i in. [16] przeprowadzili badania czteropunktowego zginania przy różnych wyteżeniach elementów. We wszystkich przypadkach strefa spalania ustalana była na środku belek.

Druga grupa eksperymentów obejmuje wystawienie próbek na działanie ognia przed przyłożeniem obciążenia. Podejście to nie uwzględnia narażenia obciążonych elementów na działanie ognia w czasie rzeczywistym, w związku z czym może nie pokazywać rzeczywistego zachowania się elementów konstrukcyjnych w ogniu. Takie testy przeprowadzili między innymi Yang i in. [17], Quiquero i in. [18], czy Chorlton i Gales [19]. Próbki umieszczano w ogniu na różny czas ekspozycji, następnie schładzano i poddawano trójpunktowemu lub czteropunktowemu zginaniu. Strefa spalania ustalana była również na środku belek. We wspomnianych pracach opisano eksperymenty przeprowadzone na drewnie litym lub drewnie klejonym. Obecnie nie widać zainteresowania testowa-

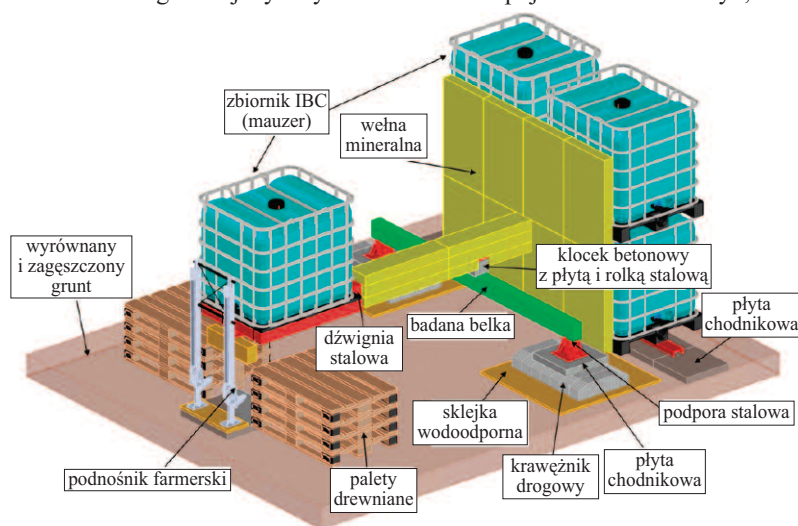
¹⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury

^{*}) Adres do korespondencji: b.kawecki@pollub.pl

niem kompozytów drewno-FRP pod wpływem ognia. Ostatnie badania przeprowadzono ponad dwadzieścia lat temu. Ogawa [20] wykonał badania na belkach z drewna klejonego wzmocnionych CFRP po stronie górnej i dolnej, które polegało na trójpunktowym zginaniu z paleniskiem ustawionym pośrodku próbki. Obciążenie zastosowane przed zapłonem było na poziomie dwóch trzecich rzeczywistej nośności. Wyniki badania wykazały, że wzmocnianie CFRP wydłuża czas potrzebny do zniszczenia. Martin i Tingley [21] przetestowali różne wzmocnienia FRP z kompozytem przyklejonym od spodu i tuż nad ostatnią dolną lamelą. Głównym wnioskiem było to, że zastosowanie FRP nie przyniosło zauważalnego wzrostu odporności ogniowej belek z kompozytu drewno-FRP w porównaniu z belkami z drewna klejonego. Mimo to autorzy stwierdzili, że umieszczenie FRP wewnątrz belki zapewnia lepszą odporność ogniową, ponieważ drewno zabezpiecza FRP. Wymienione prace nie dawały wystarczającej wiedzy na temat zachowania się kompozytów drewno-FRP. Motywacją do naszych badań jest poszerzenie wiedzy naukowej w tej dziedzinie z wykorzystaniem najnowszych metod pomiarowych oraz uwzględnieniem właściwości materiałów i reżimu technologicznego stosowanego przy wytwarzaniu elementów konstrukcyjnych.

Metoda badań

Badania belek z drewna klejonego i kompozytu drewno-CFRP zostały przeprowadzone na samodzielnie zaprojektowanym i zbudowanym stanowisku badawczym (rysunek 1). Idea konstrukcji stanowiska polegała na zastosowaniu mechanizmu dźwigni. Pojedynczy zbiornik IBC o pojemności



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego
Fig. 1. Experimental stand

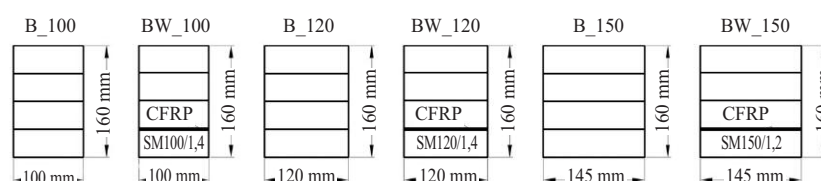
1000 litrów, tzw. mauzer, ustawiono na stalowej dźwigni i napełniano wymaganą ilością wody, co umożliwiało kontrolę wartości obciążenia. Pozostałe cztery mauzery zostały ustawione po przeciwnej stronie badanej belki i po napełnieniu stanowiły przeciwwagę. Wszystkie elementy nieodporne na działanie ognia zostały zabezpie-

czone wełną mineralną. Znaczną oszczędność czasu i wody uzyskano przez zastosowanie podnośników farmerskich do podnoszenia pojedynczego zbiornika bez konieczności wylewania wody i napełniania zbiornika od nowa. Pod pojedynczym zbiornikiem ustawiono również palety drewniane, które zapobiegały spadaniu mauzera na grunt z dużej wysokości w momencie zniszczenia próbki.

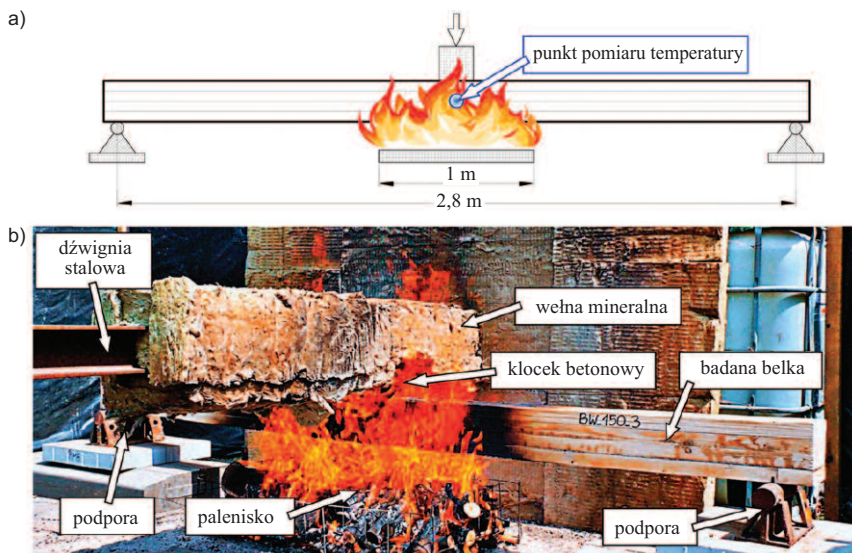
Belki, o długości 3 m każda, zostały przygotowane przez certyfikowanego producenta drewna klejonego, firmę ABIES Polska Sp. z o.o., z wykorzystaniem taśm CFRP od firmy S&P Polska Sp. z o.o., zgodnie z technologią klejenia drewna klasy GL24h (wilgotność 12%, gęstość 480 kg/m³). Wszystkie elementy składowe belek, zarówno lamelle drewniane, jak i taśmy CFRP były ze sobą klejone za pomocą jednoskładnikowego kleju poliuretanowego Loctite HB 110 Purbond. Przekroje (rysunek 2) zostały zaprojektowane zgodnie z założeniami przedstawionymi w pracach [5 – 9]. W badaniach zaplanowano trójpunktowe zginanie belek do 90% ich wyężenia, przy klasie drewna GL24h ($f_m = 24$ MPa) [22]. Maksymalny czas spalania belki z drewna klejonego, o największym przekroju (rysunek 2), potrzebny do przygotowania odpowiedniego paleniska, oszacowano na podstawie prac i norm [10, 11, 15, 23 – 25].

Przed rozpoczęciem spalania każdej z belek dokonywano jednoczesnego pomiaru siły z wykorzystaniem czujnika AXIS FB20kN oraz pomiaru ugięcia z wykorzystaniem czujnika przemieszczeń LVDT ustawionego na środku belki. Siłą sterowano przez dolewanie odpowiedniej ilości wody do zbiornika IBC zamontowanego na dźwigni. Warto zauważyć, że w trakcie przebiegu badania siła nie ulegała zmianie. Natomiast średnie zmierzone ugięcia różniły się zaledwie o 5% od wartości projektowanych.

Pomiaru temperatury dokonywano z częstotliwością 2 Hz na środku przedniej powierzchni badanego elementu, pod punktem przyłożenia obciążenia, za pomocą Pirometru Benetech GM1651 (rysunek 3). W każdej próbie pirometr znajdował się w odległości 1,5 m od badanej belki, dzięki czemu, zgodnie z dokumentacją techniczną urządzenia, pomiarowi podlegało pole o powierzchni koła o średnicy 42 mm. Źródło ognia, w postaci paleniska o szerokości 1/3 długości belki, ustawiano w środku jej rozpiętości. Palenisko zaprojektowano, zakładając kaloryczność drewna na poziomie 14,4 MWs/kg [26, 27]. Przyjęcie takiego założenia możliwe było po przeprowadzeniu badania wilgotności i gęstości materiału opa-

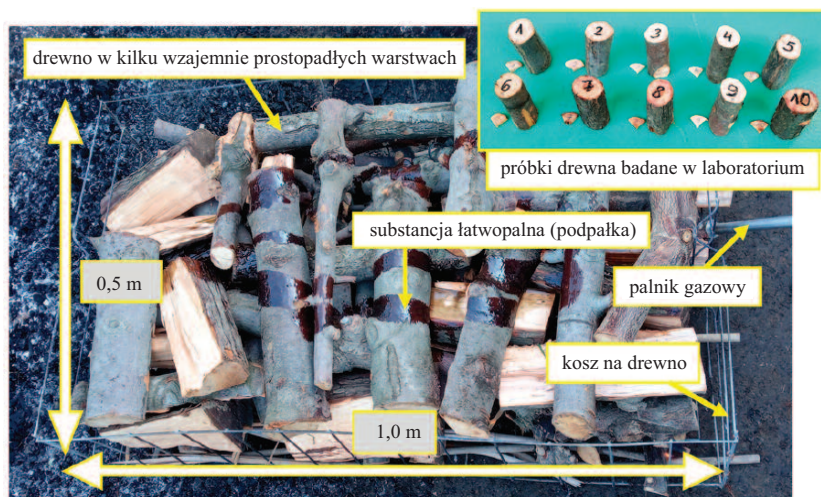


Rys. 2. Przekroje belek – z drewna klejonego (B) i z kompozytu drewno-CFRP (BW)
Fig. 2. Beams' cross-sections – glue laminated timber (B) and wood-CFRP composite (BW)



Rys. 3. Schemat (a) i badania rzeczywiste (b)
Fig. 3. Scheme (a) and real experiments (b)

łowego, których średnia wartość wyniosła odpowiednio 11,8% oraz 690 kg/m³. Czas spalania belki o największym przekroju oszacowano na 30 min, co przy założeniu wspomnianej kaloryczności drewna i konieczności uzyskania temperatury na poziomie 800°C, prowadziło do zużycia 40 kg drewna w pojedynczym badaniu. Pełny koszt drewna, przedstawiony na rysunku 4, mógł pomieścić 86 kg, co zapewniało podwójną wymaganą ilość drewna konieczną do spalania belki o największym przekroju. W związku z tym, że badania odbywały się w warunkach polowych, do ich prowadzenia wybierano dni o przewidywanej małej prędkości wiatru. W celu zapobiegania ewentualnym porywom, stanowisko ogrodzono szczelnie folią do wysokości 2 m. Prowadzono ciągły pomiar warunków atmosferycznych za pomocą urządzenia NAVIS WL 11X/WDS ustawianego wewnątrz ogrodzonego terenu. Średnia wilgotność powietrza podczas badań wyniosła 60%, temperatura 9°C, a średnia prędkość wiatru 0,12 m/s, dzięki czemu negatywny wpływ wiatru na warunki badań można było uznać za pomijalny.



Rys. 4. Palenisko oraz próbki drewna opałowego
Fig. 4. Furnace and firewood samples

W sposób ciągły mierzono również ugięcie, wykorzystując czujnik przemieszczeń LVDT umiejscowiony na stalowej belce osłoniętej wełną mineralną. Następnie korelowano wyniki z pomiarem wstępnym, uzyskanym bezpośrednio na badanej belce. Poprawność pomiarów weryfikowano, wykorzystując nagrania z kamery Panasonic HC-X1000.

Omówienie wyników

Wyniki badania każdej z belek zestawiono w tabeli. W celu ich porównania przyjęto graniczne ugięcie przy spalaniu każdej z badanych belek $w_{max} = 40$ mm. Ugięcie mierzono od momentu zarejestrowania temperatury 300°C na badanym elemencie. Na rysunku 5 przedstawiono zależność czasu spalania od szerokości przekroju. Podsumowano na nim średnie wyniki w zależno-

Wyniki badań

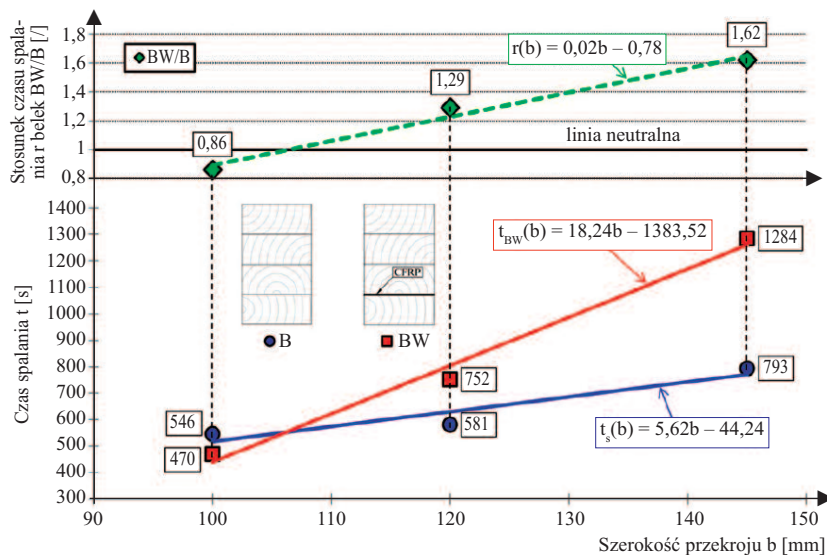
Test results

Oznaczenie belki typu B	Czas do uzyskania ugięcia 40 mm [s]	Odchylenie średnie [%]	Czas średni [s]	Oznaczenie belki typu BW	Czas do uzyskania ugięcia 40 mm [s]	Odchylenie średnie [%]	Czas średni [s]
100_1	767	35,5	546	100_1	444	9,5	470
100_2	713			100_2	406		
100_3	343			100_3	538		
100_4	361			100_4	491		
120_1	685	20,5	581	120_1	729	18,3	752
120_2	486			120_2	585		
120_3	715			120_3	1027		
120_4	437			120_4	667		
150_1	691	8,3	793	150_1	1287	17,6	1284
150_2	922			150_2	1734		
150_3	796			150_3	1123		
150_4	764			150_4	993		

ści od typu belki – bez taśmy (B) lub z taśmą CFRP (BW) oraz zależność stosunku czasu spalania belek BW/B od ich szerokości przekroju. W przypadku obu typów próbek (B oraz BW) zależność średniego czasu spalania oraz stosunek czasu spalania BW/B od szerokości przekroju można aproksymować funkcją liniową. Miejsce, w którym osiąga ona wartość równą 1, można nazwać punktem neutralnym – szerokością przekroju, kiedy wpływ zastosowania taśmy CFRP będzie pomijalny.

Wnioski

Stwierdzono, że taśmy CFRP stosowane wewnątrz przekroju mogą zwiększyć odporność ogniową belek drewnianych. Taśmy muszą być jednak umiejscowione tak, żeby były chronione przez drewno w czasie oddziaływania ognia. W przypadku niewielkiej szerokości lub zbyt małych odle-



Rys. 5. Średnie wyniki czasu spalania w zależności od typu i szerokości belki
 Fig. 5. Averaged results of combustion time depending on beam's type and width

głości taśm CFRP od krawędzi przekroju może dochodzić do zmniejszenia odporności ogniowej w porównaniu z belkami bez zastosowania taśm. Należy podkreślić, że przebieg zniszczenia belek bez taśmy i z taśmą CFRP był odmienny. Pierwsze ulegały gwałtownemu pękaniu, natomiast drugie charakteryzowały się pewną ciągliwością, co jest istotnym elementem bezpieczeństwa. Wykorzystane stanowisko badawcze, jak i cała procedura badań są niekonwencjonalne i nie są metodami normowymi. Otrzymane wyniki mogą być traktowane jedynie jako wstępna ocena zachowania kompozytów drewno-CFRP podczas oddziaływania ognia. Dalsze badania powinny być prowadzone z wykorzystaniem uznanych norm międzynarodowych, takich jak ISO 834.

Literatura

[1] Nowak T. Zastosowanie materiałów kompozytowych do wzmacniania konstrukcyjnych elementów drewnianych, *Materiały Budowlane*. 2019; 1: 22 – 26.

[2] Sobczak-Piąstka J. Metoda badania belki zginanej wykonanej z drewna klejonego ze zbrojeniem mieszanym, *Materiały Budowlane*. 2021; 1: 30 – 32.

[3] Bakalarz MM, Kossakowski PG. Strengthening of Full-Scale Laminated Veneer Lumber Beams with CFRP Sheets, *Materials*. 2022; 15.

[4] Halicka A, Ślósarz S. Analysis of behavior and failure modes of timber beams prestressed with CFRP strips, *Composite Structures*. 2022; 301: 116171.

[5] Kawecki B. Selection of the parameters for numerical models of full girders made of wood-polymer composites reinforced with fibres (in Polish), Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, Poland. <http://bc.pol-lub.pl/dlibra/publication/13966>, 2021.

[6] Kawecki B, Podgórski J. The Effect of Glue Cohesive Stiffness on the Elastic Performance of Bent Wood-CFRP Beams. *Materials*. 2020; 13: 1 – 230.

[7] Kawecki B. Guidelines for FEM modelling of wood-CFRP beams using ABAQUS, *Archives of Civil Engineering*. 2021; 67: 175 – 191.

[8] Kawecki B, Podgórski J. 3D ABAQUS simulation of bent softwood elements, *Archives of Civil Engineering*. 2020; 66: 323 – 337.

[9] Kawecki B. Numerical Modelling and Experimental Testing on Polyurethane Adhesively Bonded Joints Behaviour in Wood-Wood and Wood-Carbon Fibre Reinforced Polymer Layouts, *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2023; 17: 36 – 52.

[10] Firmanti A, Subiyanto B, Takino S, Kawai S. The critical stress in various stress levels of bending member on fire exposure for mechanical graded lumber, *Journal of Wood Science*. 2004; 50: 385 – 390.

[11] Firmanti A, Subiyanto B, Kawai S. Evaluation of the fire endurance of mechanically graded timber in bending, *Journal of Wood Science*. 2006; 52: 25 – 32.

[12] Qin R, Zhou A, Chow CL, Lau D. Structural performance and charring of loaded wood under fire, *Engineering Structures*. 2021; 228: 111491.

[13] Schmid J, König J, Köhler J. Fire-exposed cross-laminated timber - Modelling and tests, 11th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE. 2010; 4: 3268 – 3276.

[14] Lineham SA, Thomson D, Bartlett AI, Bisby LA, Hadden RM. Structural response of fire-exposed cross-laminated timber beams under sustained loads. *Fire Safety Journal*. 2016; 85: 23 – 34.

[15] Fahrni R., Klippel M., Just A., Ollino A., Frangi A., Fire tests on glued-laminated timber beams with specific local material properties, *Fire Safety Journal*. 2019; 107: 161 – 169.

[16] Wang Y, Zhang J, Mei F, Liao J, Li W. Experimental and numerical analysis on fire behaviour of loaded cross-laminated timber panels. *Advances in Structural Engineering*. 2020; 23: 22 – 36.

[17] Yang TH, Wang SY, Tsai MJ, Lin CY, Chuang YJ. Effect of fire exposure on the mechanical properties of glued laminated timber. *Materials and Design*. 2009; 30: 698 – 703.

[18] Quiquero H, Chorlton B, Gales J. Performance of adhesives in glulam after short term fire exposure. *International Journal of High-Rise Buildings*. 2018; 7: 299 – 311.

[19] Chorlton B, Gales J. Mechanical performance of laminated veneer lumber and glulam beams after short-term incident heat exposure. *Construction and Building Materials*. 2020; 263: 120129.

[20] Ogawa H. Architectural application of carbon fibers development of new carbon fiber reinforced glulam. *Carbon*. 2000; 38: 211–226.

[21] Martin ZA, Tingley DA. Fire resistance of FRP reinforced glulam beams, *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering*. 2000.

[22] PN-EN 14080:2013 Timber structures. Glued laminated timber and glued solid timber. Requirements, in: *Polski Komitet Normalizacyjny*, Warsaw, Poland.

[23] Sulik P. Prędkość zwęglania wybranych krajowych gatunków drewna, *Materiały Budowlane*. 2022; 1: 101 – 104.

[24] PN-EN 1995-1-2:2008 Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design, in: *Polski Komitet Normalizacyjny*, Warsaw, Poland.

[25] PN-EN 1363-1:2020 Fire resistance tests - Part 1: General requirements, in: *Polski Komitet Normalizacyjny*, Warsaw, Poland.

[26] Krajnc N. *Wood Fuels Handbook*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Pristina, 2015.

[27] Cichy W, Witczak M, Walkowiak M. Fuel properties of woody biomass from pruning operations in fruit orchards, *BioResources*. 2017; 12: 6458 – 6470.

Badania sfinansowano w ramach projektu Miniatura-5, Narodowego Centrum Nauki, Numer rejestracyjny: 2021/05/X/ST5/00519, a finansowanie artykułu zrealizowano w ramach grantu: FD-20/IL-4/028, FD-20/IL-4/032, FD-20/IL-4/039 oraz FN-5/2022 WBiA Katedra Mechaniki Budowli.

Podziękowania

Dziękujemy firmom ABIES Polska Sp. z o.o. i S&P Polska Sp. z o.o. za dobrą współpracę w ramach prowadzonych badań. Szczególne podziękowania kierujemy do pana Andrzeja Stachowicza z firmy ABIES Polska Sp. z o.o., który wykazał się dużym zaangażowaniem w ten projekt.

Przyjęto do druku: 5.06.2023 r.