

dr hab. inż. arch. Lucjan Kamionka, prof. ndzw.¹⁾

ORCID: 0000-0003-4290-0309

dr inż. Agnieszka Wdowiak-Postulak^{1)*}

ORCID: 0000-0003-0022-8534

dr hab. inż. arch. Joanna Gil-Mastalerczyk, prof. PŚk¹⁾

ORCID: 0000-0002-6904-7304

dr inż. Beata Ordon-Beska²⁾

ORCID: 0000-0003-2236-6065

Wybrane aspekty projektowania proekologicznych budynków na bazie CLT

Selected aspects of designing pro-ecological buildings based on CLT

DOI: 10.15199/33.2024.03.09

Streszczenie. W artykule zaprezentowano aspekty dotyczące projektowania budynków proekologicznych i scharakteryzowano kryteria projektowania. Problem badawczy obejmuje określenie wybranych aspektów projektowania. Metoda badań polega na analizie uwarunkowań proekologicznych w projektowaniu architektoniczno-budowlanym oraz zastosowania materiałów i elementów konstrukcyjnych CLT. W artykule zaprezentowano metody analogii ścinania i Gamma jako wybrane przykłady rozwiązywania problemów konstrukcyjno-materiałowych.

Słowa kluczowe: budynek proekologiczny; drewno klejone krzyżowo CLT; metody analityczne; uwarunkowania proekologiczne.

Abstract. This paper presents aspects of designing pro-ecological buildings and the design criteria were characterized. The research problem includes determining selected aspects of design. The research method involves the analysis of ecological conditions in architectural and construction design and the use of CLT materials and construction elements. This paper presents shear analogy methods and Gamma methods as selected examples of solving construction and material problems.

Keywords: ecological building; cross-laminated timber CLT; analytical methods; ecological considerations.

W projektowaniu budynków dużą rolę odgrywają standardy proekologiczne, gdyż coraz więcej z nich aspiruje do posiadania odpowiednich certyfikatów. Analizy metod wielokryterialnej oceny budynków, na podstawie których wydaje się certyfikaty proekologiczne, ich zakres i popularność zastosowania na świecie, w tym w Polsce, przedstawiono w monografii [1]. Metody te są zróżnicowane, ale obejmują takie zagadnienia, jak: integracja budynku ze środowiskiem; gospodarka wodno-ściekowa; energia i atmosfera; surowce i materiały; proekologiczność i komfort użytkowania. Wszystkie te kryteria powinny podlegać analizie i ocenie w procesie projektowania budynków. Istotne jest zastosowanie odpowiednich surowców i materiałów. W budownictwie proekologicznym wykorzystywane są materiały naturalne, odnawialne oraz łatwo nadające się do recyklingu, które

cieszą się coraz większą popularnością. Konstrukcje drewniane, powszechnie stosowane jako substytut konstrukcji stalowych i betonowych, minimalizują wpływ na środowisko ze względu na niewielki ślad węglowy i w związku z tym przyczyniają się do zrównoważonego rozwoju [2, 3], ale ich stosowanie jest ograniczone, szczególnie w przypadku budynków wysokich [2, 4 ÷ 9]. W 2012 r. wybudowano w Australii 9-piętrowy budynek drewniany w technologii CLT o wysokości 32,2 m. W porównaniu z analogicznymi konstrukcjami żelbetowymi ma mniejszą emisję dwutlenku węgla o 1451 t [6, 7]. W 2017 r. Uniwersytet Kolumbii Brytyjskiej w Kanadzie wybudował 18-piętrowy budynek o wysokości 54 m. W wyniku zastosowania prefabrykowanego elementu z drewna klejonego krzyżowo ograniczono odpady budowlane o dwie trzecie i zmniejszono emisję dwutlenku węgla o 2432 t w porównaniu z konstrukcjami żelbetowymi [5, 7]. W przyszłości nowoczesne konstrukcje drewniane CLT mogą odegrać istotną rolę w zmniejszeniu emisji dwutlenku węgla.

Celem analizy zaprezentowanej w artykule jest wykazanie, że współczesne projektowanie na bazie CLT wpływa na jakość ekologiczną budynku i jakość życia mieszkańców [1, 10]. Obejmuje ona określenie wybranych aspektów zrównoważonego projektowania. Metoda badań polega na analizie uwarunkowań proekologicznych, określeniu wynikających z nich kryteriów projektowania oraz zastosowaniu konstrukcji z drewna klejonego krzyżowo w technologii CLT. Omówiono wybrane aspekty projektowania proekologicznych budynków na bazie CLT dotyczące zagadnień architektoniczno-urbanistycznych i konstrukcyjnych. Należy podkreślić, że proces projektowania i oceny proekologicznych budynków jest wielokryterialny [11].

Kryteria projektowe wynikające z uwarunkowań proekologicznych

O uwarunkowaniach projektowania budynków proekologicznych pisano w wielu publikacjach [1 – 30]. Analizowane problemy obejmują zróżnicowane kryteria wynikające z uwarunkowań

¹⁾ Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury

²⁾ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

^{*} Adres do korespondencji: awdowiak@tu.kielce.pl

ekologicznych dotyczących [1, 10, 11]: wyboru terenu i usytuowania obiektu; komunikacji; efektywności energetycznej; efektywności gospodarki wodno-ściekowej; efektywności użycia materiałów i surowców oraz ich proekologiczności. Kryteria te szczegółowo omówiono w [1, 10, 30].

Efektywność użycia materiałów i surowców. Oceniany zakres zagadnień materiałowo-surowcowych powinien dotyczyć zastosowania: materiałów proekologicznych, materiałów naturalnych, z recyklingu, odnawialnych, miejscowych, o niewielkim udziale energii wbudowanej oraz eliminacji materiałów zawierających substancje toksyczne. Wymienione uwarunkowanie spełnia i coraz częściej jest stosowane drewno klejone krzyżowo CLT, np. produkowane jako wielkoformatowe elementy budowlane. Panele CLT często są wykonane z drewna świerkowego, rzadziej sosnowego czy innego iglastego [2]. Składają się zazwyczaj z trzech do siedmiu warstw [9], sklejonych ze sobą, we wszystkich kierunkach za pomocą kleju poliuretanowego lub melaminowego, spełniającego restrykcyjne wymagania normowe dotyczące emisji formaldehydu. Panele CLT są bezpieczne dla zdrowia w trakcie produkcji i użytkowania. Poszczególne warstwy łączy się dodatkowo za pomocą tzw. złączy palcowych. Panele mogą być stosowane w pionowych i poziomych konstrukcjach nośnych, ponieważ charakteryzują się dobrymi właściwościami mechanicznymi [2, 5, 10].

Problem śladu węglowego. Ważnym aspektem wpływającym na jakość klimatu i uwarunkowania proekologiczne w procesie projektowania budynku jest tzw. ślad węglowy. Podstawą budownictwa o niewielkim śladzie węglowym są materiały lokalne.

Ślad węglowy dzielimy na wbudowany w materiały i operacyjny, który powstaje w trakcie użytkowania budynku, a więc ogrzewania, chłodzenia czy korzystania z energii elektrycznej. Ważny jest rodzaj materiału oraz energochłonność procesu produkcji. Dostępne są różne metody oceny wielkości śladu węglowego. Interesującą ocenę całego cyklu funkcjonowania obiektu zaprezentował Giesekam [12]. W [13] porów-

nano takie same budynki wybudowane w technologii tradycyjnej, drewnianej i drewnianej pasywnej. Z przeprowadzonych badań i analiz wynika, że budynki drewniane charakteryzują się najmniejszym śladem węglowym i najkorzystniejszym z punktu widzenia człowieka klimatem. Publikacje dla projektantów, wykonawców oraz inwestorów zawierają dane świadczące o przewadze drewna klejonego w technologii CLT nad innymi materiałami budowlanymi. Powołano się na badania przeprowadzone w Bangor University w Walii, które pokazują m.in., że podczas wznoszenia budynku betonowego emitowane jest do atmosfery średnio aż 992 t CO₂. Konstrukcja drewniana natomiast nie wytwarza go w ogóle, w zamian przechowując aż 426 t CO₂ dzięki zmagazynowaniu węgla w drewnie. To oznacza, że efekt netto wykorzystania technologii drewnianej zamiast betonowej to 1418 t mniej CO₂ w atmosferze. Budynki z drewna klejonego krzyżowo CLT są proekologiczne i zrównoważone. Z tych względów wybrano go do zastosowania w procesie projektowym analizowanych budynków.

Metody analityczne w projektowaniu proekologicznych konstrukcji z drewna CLT

Obecnie w Europie nie dysponujemy jednolitym powszechnie zaakceptowanym podejściem do analizy konstrukcyjnej drewna klejonego krzyżowo. Znowelizowana norma EN 1995-1-1 prawdopodobnie będzie dopiero zawierać zdefiniowane wytyczne dotyczące projektowania konstrukcji drewnianych, m.in. metody obliczeniowe CLT i LVL. W związku z tym w artykule zaprezentowano **metodę analogii ścinania oraz metodę Gamma** jako przykład rozwiązywania problemów konstrukcyjno-materiałowych w projektowaniu budynków proekologicznych na bazie CLT. W literaturze światowej omówiono kilka metod analitycznych, do których należą m.in.: Gamma (teoria belek zespolonych mechanicznie); teoria kompozytu (metoda-k, ang. k-method); analogia ścinania (metoda Kreuzingera); teoria belki Timoshenki [3, 27]. Przykładowe badania, m.in. doświadczenia, anali-

tyczne i numeryczne drewnianych wzmocnionych elementów konstrukcyjnych przedstawiono w [31 – 33].

Metoda Gamma [25 ÷ 27] zakłada, że obciążenie panelu jest przenoszone wyłącznie przez warstwy podłużne, natomiast naprężenie ścinające przez warstwy poprzeczne. Wprowadzono współczynnik γ w celu określenia efektywności połączenia warstw poprzecznych. Zależność pomiędzy naprężeniem ścinającym τ i siłą ścinającą V wyraża wzór (1):

$$\tau = \frac{(EQ)V}{(EI)_{\text{eff}} b} \quad (1)$$

gdzie:

$(EI)_{\text{eff}}$ – sztywność zastępcza przy zginaniu obliczona wg wzoru (2):

$$(EI)_{\text{eff}} = \sum_{i=1}^n (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i k_i^2) \quad (2)$$

gdzie:

E_i – moduł sprężystości i -tej warstwy w kierunku wzdłużnym belki;

EQ – ekwiwalentny moment statyczny;

I_i – moment bezwładności przekroju poprzecznego i -tej warstwy;

A_i – pole przekroju poprzecznego i -tej warstwy;

k_i – odległość środka ciężkości przekroju poprzecznego i -tej warstwy od środka ciężkości przekroju;

γ_i – współczynnik efektywności połączenia i -tej warstwy, który można wyznaczyć zgodnie ze wzorem:

$$\gamma_i = \left(1 + \frac{\pi^2 E_i b_i h_i}{L_{\text{eff}}^2 G_{ij} b_j h_j} \right)^{-1} \quad (3)$$

gdzie:

L_{eff} – efektywna długość belki;

b_i ; h_i – odpowiednio szerokość oraz wysokość i -tej warstwy podłużnej;

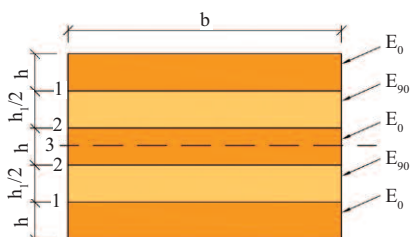
G_{ij} – moduł ścinania j -tej warstwy poprzecznej łączącej i -tą warstwę podłużną;

b_j ; h_j – szerokość i wysokość j -tej warstwy podłużnej.

$$(EQ)_5 = \gamma_1 E_0 b h (h + h_1) + 1/2 E_{90} b t (h + h_1) + 1/8 \gamma_2 E_0 b h^2 \quad (4)$$

Na rysunku 1 przedstawiono przekrój zastępczy belki 5-warstwowej.

Metoda analogii ścinania [25] zakłada, że panel warstwowy jest pozornym przekrojem złożonym z dwóch belek A i B. Belka A zapewnia sztywność na zginanie poszczególnych warstw wzdłuż własnej osi, natomiast belka B – sztywność na zginanie i ścinanie wszystkich warstw. Belki są połączone pomocniczym środkiem – elementem łączącym o nieskończonej sztywności osiowej. W związku z tym należy sprawdzić jednakowe odkształcenie w dowolnym



Rys. 1. Przekrój zastępczy belki 5-warstwowej CLT

Fig. 1. Equivalent section for 5-layer CLT beam

miejsca wzdłuż belki z uwagi na to, że przenosi ona obciążenie poprzeczne. W przypadku płyty CLT, która ma warstwy podłużne, moduł sprężystości równoległy do włókien E_i , szerokość b_i i grubość h_i oraz sztywność zastępczą przy zginaniu $(EI)_A$ i $(EI)_B$ można określić ze wzorów:

$$(EI)_A = \sum_{i=1}^n E_i b_i \frac{h_i^3}{12} \quad (5)$$

$$(EI)_B = \sum_{i=1}^n E_i A_i k_i^2 \quad (6)$$

gdzie:

$A_i = b_i h_i$ – powierzchnia przekroju i-tej warstwy podłużnej;

k_i – odległość środka ciężkości przekroju poprzecznego i-tej warstwy od środka ciężkości przekroju.

W związku z tym siła lub moment muszą być proporcjonalnie przenoszone przez belki A i B zgodnie z ich sztywnością zastępczą przy zginaniu i dlatego siłę ścinającą $V_{A,i}$ przenoszona przez i-tą warstwę belki A określa wzór:

$$V_{A,i} = \frac{E_i I_i}{(EI)_A} V_A \quad (7)$$

gdzie:

V_A – siła ścinająca przenoszona przez belkę A.

Napężenie ścinające każdej pojedynczej warstwy belki A, $\tau_{A,i}$ można zatem wyznaczyć ze wzoru:

$$\tau_{A,i} = \frac{3}{2b h_i} \frac{E_i I_i}{(EI)_A} V_A \quad (8)$$

gdzie:

$I_i = b_i h_i^3 / 12$ – moment bezwładności i-tej warstwy podłużnej.

Napężenie ścinające belki B, $\tau_{B,i+1}$ określa wzór:

$$\tau_{B,i+1} = \frac{V_B}{(EI)_B} \sum_{j=i+1}^n E_j A_j k_j \quad (9)$$

gdzie:

V_B – siła ścinająca przenoszona przez belkę B.

Wyznaczając ścinanie w płaszczyźnie prostopadłej do włókien panelu CLT, można obliczyć maksymalną siłę ścinającą przenoszoną przez belkę B, na podstawie równania (8), zastępując $\tau_{B,i+1}$. Nośność belki na ścinanie można więc wyznaczyć ze wzoru (9):

$$V = V_B \left[1 + \frac{(EI)_A}{(EI)_B} \right] \quad (10)$$

Wybrane projekty proekologicznych budynków na bazie CLT

W wyniku przeprowadzonych analiz oraz bazując na modelach budynków zrównoważonych [1, 10], studenci pod naszą opieką merytoryczną opracowali projekty budynków proekologicznych na bazie CLT (rysunki 2 i 3). Dokonano optymalizacji wyboru miejsca lokalizacji budynków i wykorzystania istniejących uwarunkowań terenowych [1]. Zaprojektowano budynki zintegrowane z istniejącą i projektowaną zielenią. Wykorzystano takie odnawialne źródła energii, jak: fotowoltaika; miniturbiny wiatrowe; pompy ciepła; rekuperację oraz sterowanie komputerowe infrastruktury budynku. Głównym materiałem konstrukcyjnym i architektonicznym były elementy z drewna klejonego krzyżowo CLT, które zapewniły budynkom odpowiednie walory proekologiczne



Rys. 2. Projekt bioklimatycznej jednostki modularnej – jako dominanty przestrzennej

Rys. A. Hajdenrajch

Fig. 2. Design of the Bioclimatic modular unit – as a spatial dominant

Fig. A. Hajdenrajch



Rys. 3. Projekt obiektu usługowo-handlowego zintegrowanego z przyrodą

Rys. J. Maciantowicz

Fig. 3. Design of a service and commercial facility integrated with nature

Fig. J. Maciantowicz

ne oraz nadały im oryginalną formę architektoniczną. Duża wytrzymałość oraz sztywność elementów z CLT jest porównywalna ze stałą i znacznie lepsza niż elementów betonowych. Związane jest to z procesem, w którym naturalna zmienność strukturalna i niejednorodność drewna naturalnego zostaje wyeliminowana [29]. Niewielka sztywność na łączeniach elementów czy niewielka masa materiału mogą powodować ruchy na wyżej położonych kondygnacjach budynku. Można je wyeliminować przez precyzyjne przygotowanie elementów prefabrykowanej konstrukcji drewnianych oraz poprawny ich montaż na budowie.

Ważną kwestią w procesie projektowania jest dbałość o środowisko naturalne. Badania [28, 29] potwierdziły, że zastąpienie betonu i stali materiałami pochodzenia naturalnego może wpłynąć na zmniejszenie emisji CO₂ nawet o 15 – 20%. Przeszkodą w realizacji wysokich i wysokościowych budynków w Polsce i innych krajach stanowią przepisy budowlane. Wiele firm i organizacji związanych z propagowaniem i realizowaniem budownictwa z elementów drewnianych przeprowadziło badania odporności ogniowej drewna klejonego. Stwierdzono, że panele warstwowe mogą uzyskać klasę

odporności ogniowej EI30, która jest uwarunkowana liczbą zastosowanych warstw drewna. Dodatkowym zabezpieczeniem konstrukcji drewnianej może być hermetyzacja, czyli obłożenie drewnianych elementów np. dwiema warstwami płyt gipsowych.

Podsumowanie

W artykule zaprezentowano wybrane aspekty projektowania proekologicznych budynków na bazie CLT. Działania prowadzone przez projektujących z wykorzystaniem modelu i opracowanej metody oceny projektowania proekologicznych budynków dały zadowalające rozwiązania. Model ilustrujący metodę i kryteria oceny budynków wraz z ich wartościowaniem zaprezentowane w [1] posłużyły do opracowania zadania projektowego. Potwierdzono trafność zaproponowanych kryteriów oceny i zastosowano je w procesie projektowania. Opracowana metoda może być stosowana w procesie projektowania proekologicznych i zrównoważonych obiektów, wychodzących naprzeciw oczekiwaniom społecznym [30].

Aspekt proekologiczny projektu powinien obejmować analizy dotyczące: wyboru terenu i usytuowania obiektu; komunikacji; energooszczędności; efektywności gospodarki wodno-ściekowej; efektywności użycia materiałów i surowców oraz ich proekologiczności.

Istotnym problemem jest wybór proekologicznego rozwiązania materiałowo-konstrukcyjnego. W analizowanych przykładach zastosowano konstrukcje m.in. z elementów drewnianych klejonych krzyżowo CLT. Przykłady badań klejonych elementów konstrukcyjnych przedstawiono m.in. w [31 – 33]. W artykule zaprezentowano wybrany sposób wymiarowania elementów. Analizowane projekty proekologicznych budynków są pozytywnymi przykładami architektury przyszłości. Zastosowane metody w procesie ich projektowania stanowią niekwestionowany postęp w kształtowaniu proekologicznych budynków na bazie CLT. Projekty architektoniczno-budowlane powinny być wykonywane z troską o jakość naszego środowiska oraz odpowiadać potrzebom społecznym.

Literatura

- [1] Kamionka L. Architecture in a Sustainable Environment. The Future Begins Today. Monography, Architecture 16, Kielce University of Technology, Kielce. 2021.
- [2] Dobeš P, Lokaj A, Vavrušová K. Stiffness and Deformation Analysis of Cross-Laminated Timber (CLT) Panels Made of Nordic Spruce Based on Experimental Testing, Analytical Calculation and Numerical Modeling. Buildings. 2023; <https://doi.org/10.3390/buildings13010200>.
- [3] Svortevik VJ, Engevik MB, Kraniotis D. Use of cross laminated timber (CLT) in industrial buildings in Nordic climate – A case study. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2020, 410, 012082.
- [4] Van De Kuilen JWG, Ceccotti A, Xia Z, He M. Very tall wooden buildings with cross laminated timber. Procedia Eng. 2011, 14, 1621 – 1628.
- [5] Brandner RJ, Flatscher G, Ringhofer A, Schickhofer G, Thiel, Cross laminated timber (CLT): Overview and development. Eur. J. Wood Prod. 2016, 74, 331 – 351.
- [6] Luyev Yan, Yi Li, Wen-Shao Chang, Haoyu Huang. Seismic control of cross laminated timber (CLT) structure with shape memory alloy-based semi-active tuned mass damper (SMA-STMD). Structures. 2023; <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105093>.
- [7] Woodsolutions. Forte Living. 2023; Available from: <https://www.woodsolutions.com.au/case-studies/forte-living>.
- [8] United Nations. Circularity concepts in wood construction ed. C.o. F.a.t.F. Industry. 2022, Geneva: United Nations.
- [9] EAD 130005-00-0304 solid wood slab element to be used as a structural element in buildings, March 2015.
- [10] Kamionka L, Wdowiak-Postulak A, Hajdenrajch A. Nowoczesne budownictwo drewniane w technologii CLT na przykładzie budynku Bioklimatycznej Jednostki Modularnej. Materiały Budowlane. 2022, 3 (595):
- [11] Niezabitowska E, Masły D. Ocena jakości środowiska zabudowanego i znaczenie dla rozwoju koncepcji budynku zrównoważonego, Gliwice. 2007.
- [12] Giesekam J. Reducing carbon in construction: a whole life approach. April 2018. Leeds: CIE-MAP.
- [13] Jae-Won Oh, Keum-Sung Park, Hyeon Soo Kim, Ik Kim, Sung-jun Pamg, Kyung-San Ahn, Jung-Kwon Oh. Comparative CO₂ emissions of concrete and timberslabs with equivalent structural performance. Energy and Buildings. Volume 281.2023.
- [14] Baranowski A. Projektowanie zrównoważone w architekturze, Gdańsk, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej. 1998.
- [15] Stawicka-Wałkowska M. Budownictwo przyjazne środowisku naturalnemu w aspekcie strategii zrównoważonego rozwoju. Sekcja Fizyki Budowli, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Łódź. 2011.
- [16] Panek A. E-Audyt metoda oceny oddziaływania na środowisko obiektów budowlanych, Warszawa 2002.
- [17] Schneider-Skalską G. Zrównoważone środowisko mieszkaniowe. Społeczne – oszczędne – piękne, Kraków. 2012.

- [18] Jagiello-Kowalczyk M. Dom zrównoważony – energooszczędny – ekologiczny – trwały. Kraków. 2019.
- [19] Horn P. Zrównoważony rozwój w procesie kształtowania współczesnego osiedla. Idee, przykłady, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej. 2019.
- [20] Augustyn A. Zrównoważony rozwój miast w świetle idei Smart City. Wydawnictwo Uniwersytetu w Białymstoku, 2020.
- [21] Brownind WD, Barnett DL. A primer on Sustainable Building, 1995.
- [22] Anink D. Handbook of Sustainable Building. 1996.
- [23] Bennets H, Redford A, Bennets H. Understanding Sustainable Architecture. 2004,
- [24] Bott G, Grassl S, Anders Bott H, Grassl G, Anders S. Sustainable Urban Planig. Vibrant Neighbourhoods-Smart City-Resilience. Detail 2019.
- [25] Zirui Huang, Lingyun Jiang, Chun Ni and Zhongfan Chen. The appropriacy of the analytical models for calculating the shear capacity of cross-laminated timber (CLT) under out-of-plane bending. Journal of Wood Science (2023) 69:14, <https://doi.org/10.1186/s10086-023-02089-y>.
- [26] Poński M, Paluszyński J. Wymiarowanie elementów zginanych wykonanych z drewna klejonego krzyżowo (CLT) w ujęciu PN-EN 1995-1-1. Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym, Vol. 7 Nr 2, 2018. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej.
- [27] PN-EN 1995-1-1. Eurokod 5. Projektowanie konstrukcji drewnianych. Część 1-1: Postanowienia ogólne. Reguły ogólne dotyczące budynków.
- [28] Dmitruk M. Zastosowanie drewna klejonego w konstrukcji budynków wysokościowych, na przykładzie realizacji z krajów zachodnich. TEKA 2020, Nr 2 Komisji Architektury, Urbanistyki i Studiów Krajobrazowych Oddział Polskiej Akademii Nauk w Lublinie. <https://orcid.org/0000-0002-6368-4206>.
- [29] Cornwall W. Would you live in a wooden skyscraper. Science. 2016. <https://www.sciencemag.org/news/2016/09/would-you-live-wooden-skyscraper-stand-na-dzień-27.03.2020>.
- [30] Kamionka L. Multi-criteria assessment methods and their impact on the ecological quality of the built environment/Metody wielokryterialnej oceny i ich wpływ na jakość ekologiczną przestrzeni zabudowanej. Urbanism and Architecture Files of Polish Academy of Sciences Krakow branch, tom/volume LI 2023. Teka Komisji Urbanistyki i Architektury. Oddział PAN w Krakowie.
- [31] Wdowiak-Postulak A, Świt G, Dziedzic-Jagocka I. Application of Composite Bars in Wooden, Full-Scale, Innovative Engineering Products – Experimental and Numerical Study. Materials. 2024; 17 (3), 730; <https://doi.org/10.3390/ma17030730>.
- [32] Wdowiak-Postulak A. Numerical, theoretical and experimental models of the static performance of timber beams reinforced with steel, basalt and glass pre-stressed bars. Composite Structures. 2023; Vol. 305, 116479; <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116479>.
- [33] Wdowiak-Postulak A. Basalt Fibre Reinforcement of Bent Heterogeneous Glued Laminated Beams. Materials. 2021; 14 (1), 51; <https://doi.org/10.3390/ma14010051>.

Przyjęto do druku: 28.02.2024 r.