

dr inż. Justyna Jaskowska-Lemańska¹⁾
ORCID: 0000-0003-3116-0448

Badania konstrukcyjnych elementów drewnianych z wykorzystaniem urządzenia Woodtester®

Structural timber components tests using Woodtester® equipment

DOI: 10.15199/33.2022.11.40

Streszczenie. W artykule przedstawiono zależności korelacyjne pomiędzy cechami mechanicznymi a wynikami badań sklerometrycznych krajowego drewna sosnowego. Siła uzyskanych korelacji była zróżnicowana. Najsilniejszą korelację do wyników badań sklerometrycznych uzyskano w przypadku gęstości drewna, a w dalszej kolejności do wytrzymałości na zginanie i ściskanie. Dodatkowo zaprezentowano funkcje korelacyjne sprowadzone do wartości kwantylowej, mogące stanowić podstawę do oceny cech fizykomechanicznych drewna w istniejących konstrukcjach, przede wszystkim zabytkowych.

Słowa kluczowe: badania semi-niszczące drewna; badania sklerometryczne; Woodtester®; zabytkowe konstrukcje drewniane.

Abstract. The paper presents correlations between mechanical properties for domestic pine wood and the results of sclerometric tests. The correlation power varied, the strongest correlation to the results of sclerometric tests was obtained for wood density, followed by flexural and compressive strength. In addition, the paper presents correlation functions reduced to a quantile value, which can provide a basis for evaluating the physical and mechanical properties of timber in existing structures, in particular historic ones.

Keywords: semi-destructive test of timber; sclerometric tests; Woodtester®; historic timber structures.

W optymalnych warunkach drewno zachowuje niezwykłą trwałość. Natomiast narażane na czynniki atmosferyczne i biologiczne, czy też niewłaściwe użytkowanie, ulega niszczeniu szybciej niż pozostałe materiały budowlane. Z tego powodu konstrukcyjne elementy drewniane, a przede wszystkim obiekty i elementy zabytkowe, wymagają częściej naprawy i wzmocnienia niż wykonane z innych materiałów. Aby je prawidłowo wykonać, niezbędne jest określenie aktualnego stanu technicznego drewna w konstrukcji, a tym samym znajomość właściwości fizycznych i mechanicznych. Problem określenia aktualnej nośności drewnianych elementów konstrukcyjnych, najczęściej stropów i więźb dachowych, występuje każdorazowo przy remoncie, czy też modernizacji obiektów historycznych i zabytkowych. Przykłady obiektów, które wymagały przeprowadzenia takiej oceny stanu technicznego, przedstawiono na fotografii 1.

Jedną z metod określania cech fizykomechanicznych mogą być pomiary twardości. W przypadku drewna, bada-

nia można określić jako semi-niszczące, gdyż pozostawiają niewielkie ślady (włębienia lub otwory) na badanym elemencie po ich wykonaniu. **Pomiary twardości** rozpoczęły się wraz z opracowaniem metod Brinella i Rockwella na początku XX wieku. Od tego czasu ewoluowały, aby sprostać potrzebom ich wykonywania z użyciem innych poziomów siły i innych materiałów niż te, którym były dedykowane. W praktyce można spotkać trzy definicje twardości: **twardość mierzona wgłębniakiem**, tj. odporność na odkształcenie spowodowane stałym obciążeniem; **twardość mierzona odbiciem sprężystym**, tj. wysokość odbicia elementu od badanego materiału oraz **twardość rozumiana jako odporność na zarysowanie**, tj. odporność na pęknięcia lub odkształcenia plastyczne na skutek oddziaływania dynamicznego [1]. Badania twardości są często stosowane ze względu na łatwość i szybkość ich przeprowadzania. Niestety w odniesieniu do elementów drewnianych badania te są trudniejsze do wykonania niż testowanie materiałów izotropowych. Wynika to z większej liczby czynników mających wpływ na cechy fizykomechaniczne drewna, a tym samym na wyniki badań. W tabeli 1 zestawiono najbardziej rozpowszechnione metody badania twardości drewna [2 ÷ 5].

Metody Janki, Brinella i Monnina wykorzystują zależność odkształcenia pod stałym obciążeniem i znajdują zastosowanie w badaniach elementów wykończeniowych. W przypadku elementów konstrukcyjnych, ze względu na typ oprzyrządowania i dostępność powierzchni do badań, zazwyczaj nie są stosowane. Modyfikację tych metod do oceny stanu technicznego elementów konstrukcyjnych zaproponowali Piazza i Turrini, wyprowadzając zależność korelacyjną pomiędzy siłą statyczną, wymaganą do zagłębienia trzpienia o średnicy 10 mm na głębokość 5 mm a modułem sprężystości podłużnej. Opracowana zależność dotyczy jodły, modrzewia i kasztana przy wilgotności 15% oraz z uwzględnieniem oceny makroskopowej i z zastosowaniem odpowiedniego współczynnika korygującego [3]. Przeszkodami w stosowaniu tej metody jest ograniczona liczba gatunków drewna, w przypadku których stworzono krzywe korelacyjne. Ponadto oprzyrządowanie nie jest dostępne komercyjnie oraz wymaga zakotwienia w elemencie badanym, co znacznie zwiększa zakres uszkodzeń powstających podczas badania.

Pozostałe przedstawione testy (sklerometryczne z wykorzystaniem urządzeń Pilodyn lub Woodtester®) polegają

¹⁾ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami; lemanska@agh.edu.pl



Fot. 1. Przykładowe więzby dachowe wymagające oceny stanu technicznego: a) kratownicowa więzba hangaru kajakowego przy ul. Kościuszki w Krakowie; b) więzba dachowa kościoła pw. św. Krzyża w Podlegórze
 Fot. Autor
 Fig. 1. Examples of roof rafter framing in need of technical condition assessment: a) the truss rafter framing of the canoe hangar at Kościuszki Street in Kraków; b) the roof rafter framing of Holy Cross Church in Podlegórze
 Photo Author

Tabela 1. Zestawienie wybranych badań twardości drewna. Opracowano na podstawie [2 – 5]

Table 1. Summary of selected wood hardness tests. Compiled from [2 – 5]

| Metoda badania twardości | Typ badania | Rodzaj wgłębnika |
|---|-------------|--|
| Janki [kG/cm ²] | stacyczne | kula – ϕ 11,284 mm |
| Brinella [kG/cm ²] | stacyczne | kula – ϕ 10 mm |
| Monnina | stacyczne | pobocznicza walca – ϕ 30 mm |
| Piazzę i Turriniego [MPa] | stacyczne | trzcienie – ϕ 10 mm |
| Sklerometryczna* – Pilodyn [mm] (energia: 6, 12 lub 18 J) | dynamiczne | trzcienie (płaskie zakończenie) – ϕ 2,5 (standardowa) + ϕ 2; 5; 6; 10 mm |
| Sklerometryczna* – Woodtester [mm] (energia: 2,3 J) | dynamiczne | igła (końcówka stożkowa) – ϕ 2,5 mm |

* ze względu na analogię do badań sklerometrycznych betonu przyjęto nazwę „badania sklerometryczne”

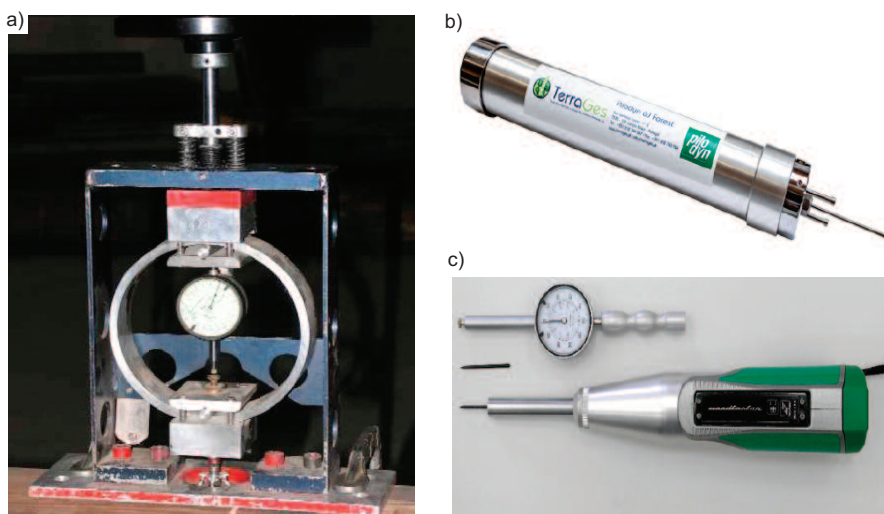
na dynamicznej penetracji materiału cienkim wgłębnikiem. Są używane do jakościowego określania stanu technicznego drewna, rzadziej do szacowania właściwości fizykomechanicznych elementów konstrukcyjnych. Pomiarowi podlega głębokość penetracji stalowej igły/trzcienia wprowadzonej w materiał za pomocą mechanicznego młotka o stałej energii uderzenia. Wielkość zagłębienia pozwala na określenie jakości warstw powierzchniowych elementu oraz wskazanie obszarów o gorszych właściwościach [6]. Otwory pozostałe po wykonaniu badań sklerometrycznych nie mają wpływu na statykę konstrukcji oraz, w zależności od do-

branego trzcienia/igły, minimalny lub nieduży wpływ na jej estetykę. Na fotografii 2 przedstawiono przykładowe urządzenia wykorzystywane do pomiaru twardości drewna w konstrukcjach.

Zaletami stosowania badań sklerometrycznych są krótki czas badania i natychmiastowy wynik pomiaru, a podstawowymi ich ograniczeniami brak krzywych korelacyjnych w przypadku wybranych gatunków drewna pochodzących z danego rejonu oraz lokalny charakter badania. Dotyczy to drewnianych obiektów zabytkowych zlokalizowanych na terenie Polski, ze względu na historycznie stosowane gatunki drewna konstrukcyjnego.

Opis przeprowadzonych badań

W celu określenia zależności między wynikami badań sklerometrycznych a podstawowymi cechami mechanicznymi drewna konstrukcyjnego przeprowadzono korelacyjne badania laboratoryjne. Analizie poddano sosnowe elementy belkowe o wymiarach $\sim 50 \times 50 \times 1000$ mm. W celu uzyskania zróżnicowanej pod względem gęstości próby wykorzystano drewno pochodzące z różnych siedlisk na terenie Polski. W wyniku tego uzyskano próbę o gęstości $348 \div 655$ kg/m³. Elementy badawcze były sezonowane minimum 3 miesiące, a ich wilgotność w chwili badania wynosiła $\sim 11,5\%$.



Fot. 2. Przykładowe urządzenia wykorzystywane do pomiaru twardości drewna w konstrukcjach: a) urządzenie skonstruowane przez Piazzę i Turriniego [7]; b) urządzenie Pilodyn [8]; c) urządzenie Woodtester®

Photo 2. Examples of instruments for measuring the timber hardness in structures: a) the device developed by Piazza and Turrini [7]; b) the Pilodyn device [8]; c) the Woodtester® device

Belki poddano następującej procedurze badawczej:

1) ocena makroskopowa – pomiar cech geometrycznych, określenie wskaźnika sękatości i przypisanie klasy sortowniczej (przyjęto sortowanie wyłącznie na podstawie wskaźnika sękatości, w przypadku występowania innych wad element odrzucano) [9];

2) badania sklerometryczne: badanie wykonywano w dziewięciu punktach pomiarowych;

3) badanie wytrzymałości na zginanie metodą czteropunktową (f_m) z określeniem modułu sprężystości przy zginaniu (E) [10];

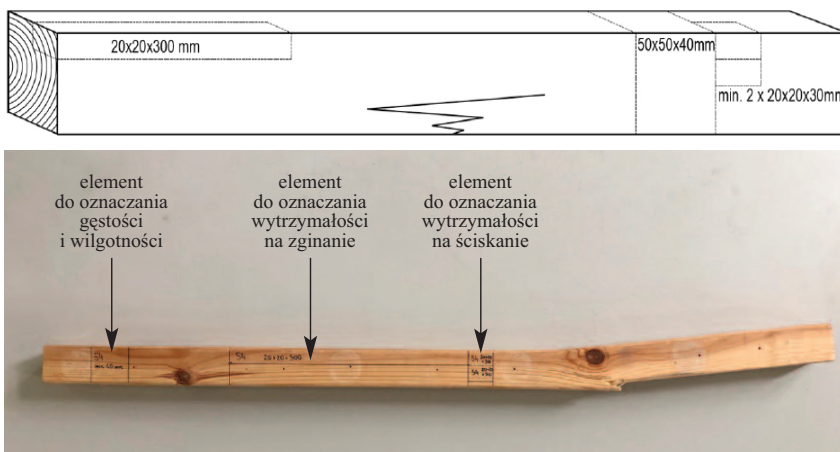
4) rozcięcie belki po zniszczeniu w badaniu wytrzymałości na zginanie na kolejne mniejsze próbki, na których wykonywano oznaczenia: gęstości (ρ) [11]; wytrzymałości na zginanie – próbka bez wad do zginania trójpunktowego (f_m') [12] i wytrzymałości na ściskanie – próbki bez wad ($f_{c,0}$) [13].

Badania sklerometryczne wykonano urządzeniem Woodtester® o energii uderzenia 2,4 J, wyposażonego w stalowe igły o średnicy 2,5 mm i długości 50 mm oraz czujnik zegarowy umożliwiający pomiar z dokładnością do 0,01 mm. Oznaczenia wykonywano w przypadku poziomego ułożenia przyrządu i jednokrotnego (PD_1) oraz dwukrotnego (PD_2) zagłębienia/uderzenia (dwukrotne uderzenie w igłę bez uprzedniego jej wyciągania). Wartością mierzoną była pozostała niezagłębiona część igły. Jako wynik pomiaru traktowano różnicę między długością igły a wielkością zmierzoną. Po dokonaniu odczytów po pierwszym i drugim zagłębieniu igły były usuwane z elementu. Badania prowadzono prostopadle do włókien poza strefami występowania sęków.

Dokładne rozmieszczenie miejsc badań sklerometrycznych było każdorazowo dostosowane do danej sztuki tarcicy, tak aby oznaczenie wykonywane było bez wpływu wad (sęków) występujących w elemencie. Z założenia badania sklerometryczne prowadzone były wzdłuż osi podłużnej elementu, a punkty rozmieszczone w odległości w przybliżeniu co 10 cm i nie mniejszej niż 10 cm od jej czoła. Lokalizację poboru małych próbek bez wad ustalano

każdorazowo po zniszczeniu belki w badaniu wytrzymałości na zginanie w zależności od charakteru złomu. Ideowy schemat rozmieszczenia miejsc poboru małych próbek badawczych wraz z przykładem próbki przedstawiono na rysunku 1.

w sposób analogiczny. W tabeli 2 zestawiono uzyskane funkcje wraz ze współczynnikiem korelacji r przy jednokrotnym i dwukrotnym zagłębieniu igły sklerometru oraz z zakresem zagłębień, w przypadku którego korelacje zostały wyznaczone.



Rys. 1. Przykładowa próbka po badaniu wytrzymałości na zginanie w skali technicznej z wyrwanymi płaszczyznami cięcia w celu pozyskania elementów do dalszych badań
 Fig. 1. A sample specimen after flexural strength test at engineering scale with mapped cut planes to obtain pieces for further testing

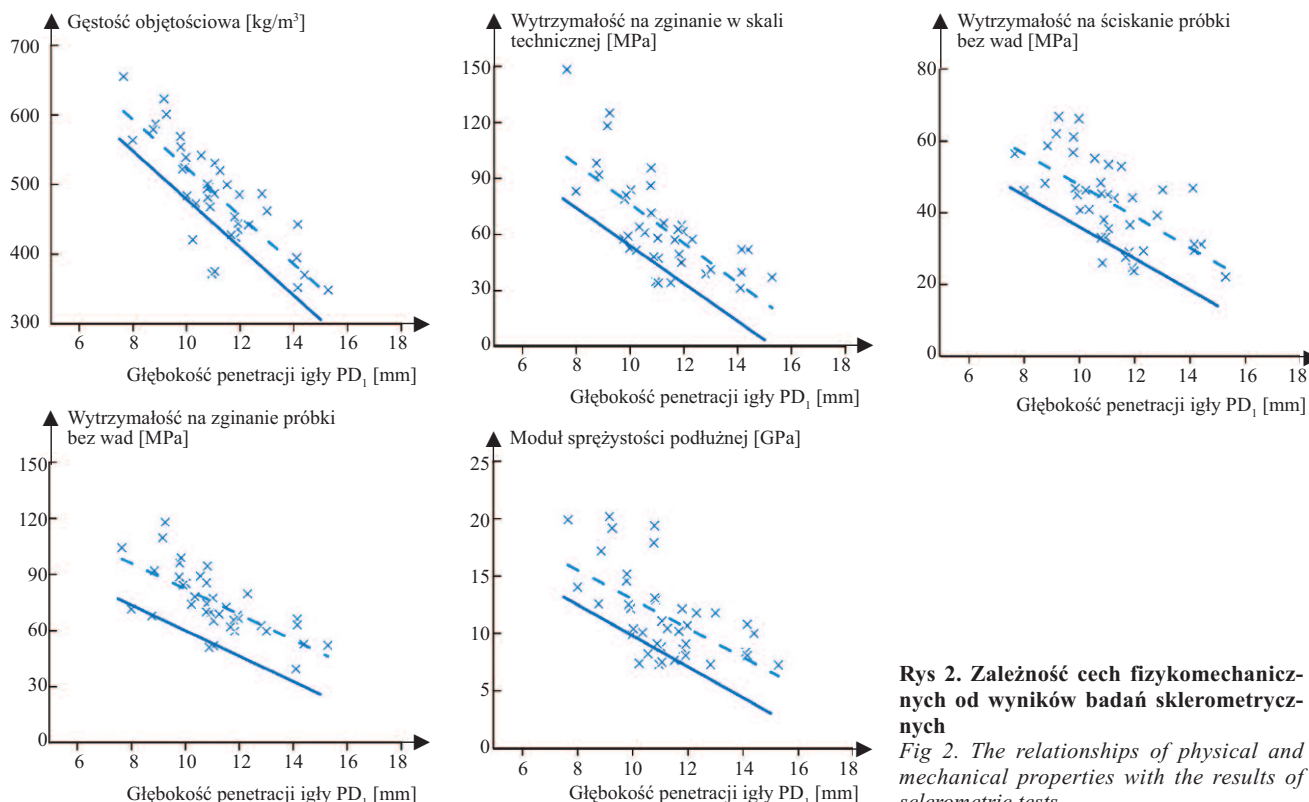
Wyniki badań i ich analiza

W przypadku przeprowadzonych badań wyprowadzono liniowe zależności korelacyjne pomiędzy uzyskanymi cechami fizykomechanicznymi drewna a wynikami badań sklerometrycznych. Uzyskano bardzo silną korelację z gęstością objętościową oraz silne korelacje z wytrzymałością na zginanie (nieznacznie większa korelacja przy badaniu próbek bez wad) i ściskanie. Z kolei uzyskana korelacja z modułem sprężystości była umiarkowana. Wszystkie uzyskane wyniki były istotne statystycznie.

W praktyce proponuje się korzystać z przekształconych zależności liniowych, które zostały sprowadzone do poziomu bezpiecznego (przekształcenie funkcji odpowiadające 5-proc. kwantylowi bezpieczeństwa, tj. nie więcej niż 5% wyników znajduje się poniżej danej funkcji). Na rysunku 2 przedstawiono zależności przy jednokrotnym zagłębieniu (PD_1) w postaci wykresów punktowych z naniesioną linią trendu (wyprowadzona zależność liniowa – linia przerywana) oraz zależnością przekształconą (linia ciągła). Zależności w przypadku dwukrotnego zagłębienia (PD_2) kształtowały się

Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że istnieje możliwość wyznaczenia zależności między badaniami niszczącymi i wynikami badań sklerometrycznych konstrukcji drewnianych. Zapotrzebowanie na takie badania wynika z PN-EN 17121:2020 *Konserwacja Dziedzictwa Kulturowego. Historyczne konstrukcje drewniane. Wytyczne dla oceny miejscowej drewnianych konstrukcji nośnych* [14], w której zaleca się wykonanie badań semi-niszczących, w przypadku których znana jest korelacja z wytrzymałością, a obecnie nie ma takich danych w literaturze. W odpowiedzi na to zapotrzebowanie podjęto próbę wyprowadzenia takich zależności dla krajowego drewna sosnowego. Siła uzyskanych korelacji była zróżnicowana, co jest zjawiskiem naturalnym przy badaniu drewna. Zwiększenie siły tych korelacji i rozbudowanie zakresu ich stosowania planuje się uzyskać przez zwiększenie liczebności próby o badania dotyczące skrajnych przedziałów gęstości drewna. Uzyskane wyniki można zastosować w praktyce inżynierskiej do oszacowania cech fizykomechanicznych drewna w istniejących konstrukcjach. Należy jednak mieć



Rys 2. Zależność cech fizykomechanicznych od wyników badań sklerometrycznych

Fig 2. The relationships of physical and mechanical properties with the results of sclerometric tests

Tabela 2. Zestawienie funkcji korelacyjnych w przypadku zależności badania niszczące – badania sklerometryczne drewna sosnowego

Table 2. Summary of correlation functions for the relationship of destructive testing to sclerometric testing for pine wood

| Charakterystyka | PD ₁ [mm] zakres: 7,5 ÷ 15,5 | r | PD ₂ [mm] zakres: 11,0 ÷ 21,0 | r |
|-----------------------------------|---|-------|--|-------|
| ρ [kg/m ³] | $= -34,593 \cdot PD_1 + 870,06$ | -0,81 | $= -26,299 \cdot PD_2 + 906,23$ | -0,82 |
| $\rho_{5\%}$ [kg/m ³] | $= -34,6 \cdot PD_1 + 825$ | | $= -26,3 \cdot PD_2 + 840$ | |
| f_m [MPa] | $= -10,152 \cdot PD_1 + 176,14$ | -0,65 | $= -7,5324 \cdot PD_2 + 183,79$ | -0,65 |
| $f_{m5\%}$ [MPa] | $= -10,1 \cdot PD_1 + 155$ | | $= -7,5 \cdot PD_2 + 160$ | |
| E [GPa] | $= -1,2683 \cdot PD_1 + 25,671$ | -0,58 | $= -0,926 \cdot PD_2 + 26,386$ | -0,57 |
| $E_{5\%}$ [GPa] | $= -1,35 \cdot PD_1 + 23,3$ | | $= -0,9 \cdot PD_2 + 22,5$ | |
| f'_m [MPa] | $= -6,8236 \cdot PD_1 + 150,54$ | -0,70 | $= -5,0348 \cdot PD_2 + 155,24$ | -0,69 |
| $f'_{m5\%}$ [MPa] | $= -6,8 \cdot PD_1 + 128$ | | $= -5,0 \cdot PD_2 + 133$ | |
| $f_{c,0}$ [MPa] | $= -4,3784 \cdot PD_1 + 91,476$ | -0,63 | $= -3,3075 \cdot PD_2 + 95,719$ | -0,63 |
| $f_{c,05\%}$ [MPa] | $= -4,4 \cdot PD_1 + 80$ | | $= -3,3 \cdot PD_2 + 84$ | |

na uwadze, że ostateczna wytrzymałość elementów drewnianych zależy od występowania i wielkości naturalnych wad, takich jak sęki, spękania czy skręty włókien. Konieczność uwzględnienia tych wad w ocenie stanu technicznego elementów drewnianych zaleca norma [14]. Ponadto należy mieć na uwadze, że na wyniki badań sklerometrycznych będą miały wpływ warunki ich wykonania, a przede wszystkim wilgotność badanego drewna [15], ale również temperatura elementów czy też kierunek badania względem przyrostów rocznych [16].

Literatura

[1] Bøving KG. NDE Handbook, Chapter 10 – Hardness testing. Butterworth-Heinemann. 1989.
 [2] Starecki A. Badania twardości lignofolu i lignostonu różnymi metodami. Folia For. Pol. 1975; 12: 95 – 116.
 [3] Piazza M, Riggio M. Visual strength-grading and NDT of timber in traditional structures. J. Build. Apprais. 2008; 3 (4): 267 – 296.
 [4] Mäkipää R, Linkosalo T. A Non-Destructive Field Method for Measuring Wood Density of Decaying Logs. Silva Fenn. 2011; 45 (6): 1135 – 1142.
 [5] Instrukcja obsługi. WoodTester Novatest. Instrukcja obsługi. WoodTester Novatest.
 [6] Tannert T, Kasal B, Anthony RW. RILEM TC 215 In-situ assessment of structural timber: Report on ac-

tivities and application of assessment methods in World Conference on Timber Engineering, 2010.

[7] Riggio M et al. In situ assessment of structural timber using semi-destructive techniques. Mater. Struct. 2014; 47 (5): 767 – 785.

[8] Katalog produktów TerraGes. p. <https://terrages.pt/product/77/1>, 2022.

[9] PN-D-94021:2013 Tarcica konstrukcyjna iglasta sortowana metodami wytrzymałościowymi.

[10] PN-EN 408:2004 Konstrukcje drewniane. Drewno konstrukcyjne lite i klejone warstwowo. Oznaczenie niektórych właściwości fizycznych i mechanicznych.

[11] PN-EN 384:2004 Konstrukcje drewniane. Oznaczenie wartości charakterystycznych właściwości mechanicznych i gęstości.

[12] PN-D-04103:1977 Drewno. Oznaczenie wytrzymałości na zginanie statyczne.

[13] PN-D-04102:1979 Drewno. Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien.

[14] PN-EN 17121: 2020 Konserwacja Dziedzictwa Kulturowego. Historyczne konstrukcje drewniane. Wytyczne dla oceny miejscowej drewnianych konstrukcji nośnych.

[15] Jaskowska-Lemańska J, Przesmycka E. Semi-destructive and non-destructive tests of timber structure of various moisture contents. Materials (Basel). 2021; 14 (1): 1 – 22.

[16] Íñiguez-González G, Arriaga F, Esteban M, Llana DF. Reference conditions and modification factors for the standardization of nondestructive variables used in the evaluation of existing timber structures. Constr. Build. Mater. 2015; 101: 1166 – 1171.

Przyjęto do druku: 28.09.2022 r.