

ANALIZA DREWNA W OBIEKTACH ZABYTKOWYCH NA PODSTAWIE BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH

Urszula MIDEK

Politechnika Opolska, Wydział Budownictwa i Architektury, Opole, Polska

Słowa kluczowe: badania wytrzymałościowe, drewno, ściskanie, zginanie statyczne.

1. Wprowadzenie

Drewno jest jednym z najstarszych budulców wykorzystywanych przez człowieka. Eksploatacja i prawidłowe utrzymanie konstrukcji drewnianych wymaga bardzo dobrej znajomości materiału oraz sposobu wykonania elementów i układów konstrukcyjnych. W korzystnych warunkach drewno jest materiałem trwałym, zaś w pozostałych przypadkach szybko ulega procesom destrukcyjnym. Drewno uszkodza się zarówno podczas procesów starzenia materiału, przy zmianach wilgotności, procesów pęcznienia i skurczu; podatne jest też na korozję biologiczną. Uszkodzenia konstrukcji drewnianych następują najczęściej na końcach elementów w miejscach połączeń. Przekroje narażone są na osłabienie poprzez wręby i otwory przeznaczone na łączniki mechaniczne.

Do najczęstszych czynników prowadzących do stanów awaryjnych drewnianych układów konstrukcyjnych zakwalifikować można: korozję biologiczną; zmienne czynniki atmosferyczne; wypaczenia i odkształcenia elementów konstrukcyjnych; zniszczenia w miejscach połączeń; zmiany schematu statycznego całego układu konstrukcyjnego; niewłaściwą eksploatację; brak jakichkolwiek czynności remontowych i konserwatorskich [3].

W obiektach zabytkowych zaleca się, aby każda ocena stanu technicznego była dokładna, a co za tym idzie, aby każdorazowo wykonywać ekspertyzę techniczną. Nawiązując do powyższego, w artykule przedstawione zostały badania kontrolne elementu więźby dachowej XVI-wiecznego kościoła pod wezwaniem św. Jerzego w Mieszkowicach. Zostały one wykonane w celu przeprowadzenia rzeczywistej analizy statycznej całego ustroju konstrukcyjnego więźby na potrzeby projektu renowacji. Głównym celem badań było uzyskanie informacji o rzeczywistej wytrzymałości drewna, porównanie otrzymanych wyników z wartościami referencyjnymi oraz określenie stopnia destrukcji materiału [1].

2. Materiały do badań

Materiałami do badań wytrzymałościowych były drewniane próbki pobrane z elementu więźby dachowej kościoła (rys. 1, 2). Element ten został usunięty z konstrukcji prawdopodobnie z powodu widocznych spękań, korozji biologicznej i uszkodzenia przez owady. Pozostawiono go obok konstrukcji, co oznacza, że w chwili pobrania nie spełniał

żadnej funkcji nośnej. Jego wiek szacuje się na ok. 430 lat. Przypuszczać można, że był on częścią belki podwalinowej ramy wzdłużnej więźby dachowej nad nawą główną kościoła.



Rys. 1. Widok z góry elementu przeznaczony do badania
Fig. 1. View from the top of the element intended for testing



Rys. 2. Widok uszkodzeń elementu przeznaczony do badania
Fig. 2. View of damage of the element intended for testing

Wymiary oraz kształt próbek dobrane zostały w oparciu o wymagania stawiane przez Polskie Normy poszczególnym badaniom wytrzymałościowym¹.

Z uwagi na znaczne rozmiary oraz wady struktury elementu przeznaczony do badania (liczne kanaliki wydrążone przez owady) przygotowano w sumie 77 próbek, z czego do badań użyto 60. Zostały one starannie przygotowane, tak aby próbki mniejsze nie miały żadnych widocznych wad, natomiast próbki większe zawierały widoczne, lecz niewielkie otwory powstałe w wyniku żerowania owadów.

Wykorzystane do poszczególnych badań próbki miały następujące wymiary:

- wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien: ~20 mm x 20 mm x 30 mm, 10 sztuk,
- wytrzymałość na ściskanie w poprzek włókien – kierunek styczny (90°): ~20 mm x 20 mm x 30 mm, 9 sztuk,
- wytrzymałość a ściskanie w poprzek włókien – kierunek promieniowy (0°): ~20 mm x 20 mm x 30 mm, 9 sztuk,
- wytrzymałość na ściskanie w poprzek włókien – kierunek pośredni (45°): ~20 mm x 20 mm x 30 mm, 12 sztuk,
- wytrzymałość na zginanie statyczne – kierunek działania obciążenia w stosunku do słoików – promieniowy (0°): ~20 mm x 20 mm x 300 mm, 4 sztuki (próbki długie),
- wytrzymałość na zginanie statyczne – kierunek działania obciążenia w stosunku do słoików – styczny (90°): ~20 mm x 20 mm x 300 mm, 4 sztuki (próbki długie),

¹ PN-79/D-04102 – „Drewno. Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie wzdłuż włókien”
PN-77/D-04229 – „Drewno. Oznaczenie wytrzymałości na ściskanie w poprzek włókien”
PN-77/D-04103 – „Drewno. Oznaczenie wytrzymałości na zginanie statyczne”

- wytrzymałość na zginanie statyczne – kierunek działania obciążenia w stosunku do słoików – pośredni (45°): ~ 20 mm x 20 mm x 300 mm, 12 sztuk (próbki długie).

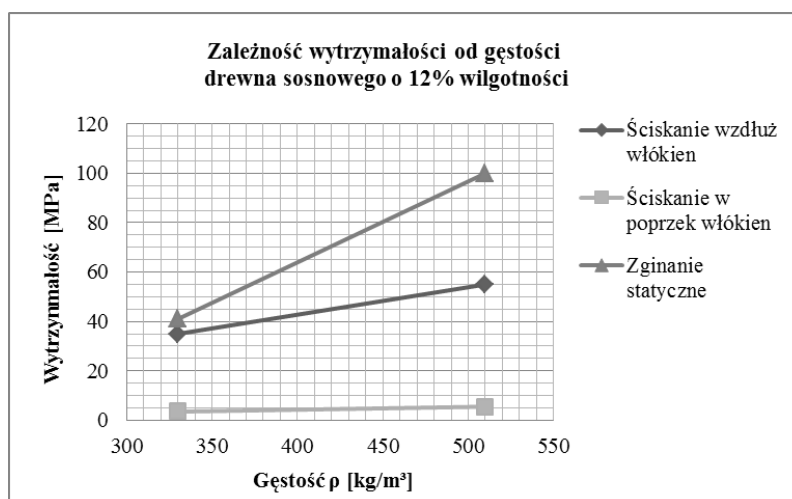
3. Metody badań

Wytrzymałość drewna określona jest poprzez zdolność do przeciwstawiania się działaniu sił, które powodują krótkotrwałe lub trwałe odkształcenia, albo całkowite zniszczenie. Wyróżnić można wytrzymałość doraźną lub trwałą. Wytrzymałość doraźna określana jest, gdy próbka osiąga maksymalne naprężenia w trakcie trwania krótkotrwałej próby. Natomiast wytrzymałość trwała wyznaczana jest podczas trwania obciążenia ciągłego, nieograniczonego zakresem czasowym i jest o około połowę mniejsza niż doraźna.

Należy pamiętać o tym, że podczas badań laboratoryjnych wyznacza się wytrzymałość doraźną drewna, a w rzeczywistości element poddawany jest obciążeniu zarówno długotrwałemu jak i krótkotrwałemu. Tym samym, w realnych sytuacjach, niszczą go naprężenia mniejsze niż wyznaczone w laboratorium [2].

Celem badań było określenie doraźnych, maksymalnych sił niszczących oraz, w przypadku określania wytrzymałości na ściskanie w poprzek włókien, sił występujących na granicy proporcjonalności, przy których wystąpiło zgniecenie.

Analizując literaturę zauważono, że do analizy zabytkowego elementu drewnianego skorzystać można ze związku pomiędzy gęstością i wytrzymałością: R_{CL} , $R_{C\pm}$ i R_g (rys. 3). Na tej podstawie, przy pomocy interpolacji liniowej, można określić wstępne wytrzymałości próbek drewna pozornej gęstości materiału.



Rys. 3. Zależność wytrzymałości od gęstości drewna sosnowego o 12% wilgotności [1]
 Fig. 3. The dependence of the strength on the density of pine wood with 12% moisture [1]

Wyznaczona gęstość pozorna badanego elementu drewnianego wyniosła $\rho = 377,5$ [kg/m³]. Na jej podstawie obliczono drogą interpolacji liniowej wartości referencyjne wytrzymałości drewna o takiej gęstości, tj.: $R_{CL} = 40,28$ [MPa], $R_{C\pm} = 4,03$ [MPa] i $R_g = 56,57$ [MPa].

Element, z którego zostały wycięte próbki do badań, był bardzo zniszczony przez owady. Ponadto miał liczne spękania, co spowodowało, że nie wszystkie próbki nadawały się do badań. Badania rozpoczęto od umieszczenia próbek w komorze klimatycznej przez 11 kolejnych dni, aby doprowadzić ich wilgotność do stanu porównawczego. Początkowo, przez 3 pierwsze dni, zostały one poddane klimatyzowaniu w temperaturze $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ i przy wilgotności $65\pm 3\%$. Po tym czasie temperaturę zwiększono do $24\pm 2^{\circ}\text{C}$. Pomiar mas próbek laboratoryjnych rozpoczęto przed włożeniem do komory klimatycznej. Dodatkowo pomiarów zmiany mas dokonano jeszcze 3 razy. Po ustabilizowaniu się masy rozpoczęto dalsze badania.

Testy wytrzymałościowe przeprowadzono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej Toni Technik, do której podłączony jest komputer wraz z monitorem. Jest to maszyna wytrzymałościowa o napędzie hydraulicznym i zakresie obciążenia od 0 do 20kN.

Badania wytrzymałościowe drewna należało przeprowadzać przy stałej prędkości przyrostu obciążenia, tak aby zniszczenie próbki nastąpiło w czasie $90\pm 30\text{s}$ licząc od chwili początku przyłożenia obciążania. W przypadku maszyny prędkość tę wprowadza się ręcznie. W pierwszej kolejności przeprowadzono badania wytrzymałości drewna na ściskanie wzdłuż włókien i w poprzek włókien, a następnie w trójpunktowym zginaniu statycznym. Podczas badań odpowiednich cech mechanicznych dane rejestrowane były na komputerze, a cały przebieg badania zobaczyć można było na monitorze. Każda próbka laboratoryjna miała swój plik z danymi, które następnie zostały poddane analizie [2].

Uzyskane z pomiarów wyniki zostały przedstawione za pomocą wykresów i tablic, a także porównane z referencyjnymi wartościami wytrzymałości drewna o danej gęstości.

4. Wyniki badań

Do obliczenia wartości wytrzymałości próbek wykorzystano następujące wzory:

$$R_{CL} = \frac{P_{\max}}{A} \text{ [MPa]}, \quad R_{C\pm} = \frac{P_{pr}}{A} \text{ [MPa]}, \quad R_g = \frac{M}{W} \text{ [MPa]}$$

Wilgotność drewna w czasie badania wytrzymałości powinna wynosić 12%, ponieważ wtedy otrzymany wynik jest miarodajny. Natomiast, gdy jest ona inna, lecz mieści się w granicach 9-15%, korzystać należy ze wzoru [2].

$$R_{12} = R_W [1 + \alpha(W - 12)]$$

Otrzymane wyniki ze wszystkich przeprowadzonych badań zestawiono w poniższych tablicach.

Tablica 1. Wytrzymałość próbek na ściskanie wzdłuż włókien

Nr próbki	Siła niszcząca	Wymiar przekroju poprzecznego		Wytrzymałość przy wilgotności 12%
	P_{\max} [kN]	a [mm]	b [mm]	R_{C12} [MPa]
7	12,79	20,3	20,0	28,98
15	11,90	20,0	20,0	27,37

Tablica 1 cd. Wytrzymałość próbek na ściskanie wzdłuż włókien

Nr próbki	Siła niszcząca	Wymiar przekroju poprzecznego		Wytrzymałość przy wilgotności 12%
	P_{\max} [kN]	a [mm]	b [mm]	R_{C12} [MPa]
20	11,49	19,8	20,1	26,56
24	13,73	20,1	20,3	30,96
28	13,65	20,5	20,3	30,18
30	9,76	20,0	20,1	22,33
38	12,06	20,2	20,2	27,19
48	10,91	19,8	20,1	25,22
50	13,77	20,3	20,4	30,59
56	12,67	20,5	20,1	28,29

Tablica 2. Wytrzymałość próbek na ściskanie w poprzek włókien – kierunek styczny

Nr próbki	Siła na granicy proporcjonalności	Wymiar przekroju poprzecznego		Wytrzymałość przy wilgotności 12%
	P_{pr} [kN]	b [mm]	h [mm]	R_{C12}^T [MPa]
4	1,93	20,2	30,3	2,90
10	1,78	20,1	30,2	2,70
16	1,88	20,1	30,1	2,86
23	1,65	20,0	30,0	2,53
26	1,95	20,1	30,3	2,95
35	1,73	20,2	30,3	2,60
36	2,20	20,3	30,3	3,29
45	1,87	20,0	30,9	2,78
46	1,92	20,3	30,2	2,88

Tablica 3. Wytrzymałość próbek na ściskanie w poprzek włókien – kierunek promieniowy

Nr próbki	Siła na granicy proporcjonalności	Wymiar przekroju poprzecznego		Wytrzymałość przy wilgotności 12%
	P_{pr} [kN]	a [mm]	h [mm]	R_{C12}^R [MPa]
1	2,32	20,5	30,3	3,44
5	1,70	20,3	30,2	2,55
6	2,14	20,2	30,2	3,23
9	2,08	20,0	30,3	3,16
11	1,95	20,1	30,1	2,97

Tablica 3 cd. Wytrzymałość próbek na ściskanie w poprzek włókien
– kierunek promieniowy

Nr próbki	Siła na granicy proporcjonalności	Wymiar przekroju poprzecznego		Wytrzymałość przy wilgotności 12%
	P_{pr} [kN]	a [mm]	h [mm]	R_{C12^R} [MPa]
12	1,78	20,3	30,2	2,67
44	1,67	20,0	30,1	2,55
51	2,05	20,3	30,9	3,01
55	1,82	20,2	30,1	2,75

Tablica 4. Wytrzymałość próbek na ściskanie w poprzek włókien – kierunek pośredni

Nr próbki	Siła na granicy proporcjonalności	Wymiar przekroju poprzecznego		Wytrzymałość przy wilgotności 12%
	P_{pr} [kN]	a [mm]	h [mm]	R_{C12^D} [MPa]
13	1,48	19,8	30,2	2,28
19	1,57	20,1	30,2	2,38
27	1,62	20,5	30,3	2,40
32	1,43	20,1	30,1	2,17
33	1,47	20,4	30,2	2,20
34	1,40	20,1	30,2	2,12
39	1,48	20,5	30,3	2,19
40	1,39	20,3	30,1	2,09
41	1,48	20,0	30,0	2,27
42	1,51	20,6	30,2	2,23
43	1,56	19,9	30,3	2,38
52	1,57	20,1	30,2	2,38

Tablica 5. Wytrzymałość próbek na zginanie statyczne – kierunek styczny

Nr próbki	Siła niszcząca	Strzałka ugięcia	Wymiar przekroju poprzecznego		Wytrzymałość przy wilgotności 12%
	P_{max} [kN]	f [mm]	a [mm]	b [mm]	R_{g12^T} [MPa]
2	0,708	3,068	20,1	20,1	28,88
5	1,004	6,513	20,3	20,1	40,54
12	0,596	4,256	19,9	19,9	25,05
18	0,978	5,552	19,9	19,5	42,81

Tablica 6. Wytrzymałość próbek na zginanie statyczne – kierunek promieniowy

Nr próbki	Siła niszcząca	Strzałka ugięcia	Wymiar przekroju poprzecznego		Wytrzymałość dla wilgotności 12%
	P_{\max} [kN]	f [mm]	a [mm]	b [mm]	R_{g12^R} [MPa]
11	0,953	4,544	20,0	20,0	39,45
14	0,839	4,605	19,2	20,2	35,47
17	0,852	4,304	19,8	20,1	35,28
19	1,014	6,141	20,2	20,1	41,15

Tablica 7. Wytrzymałość próbek na zginanie statyczne – kierunek pośredni

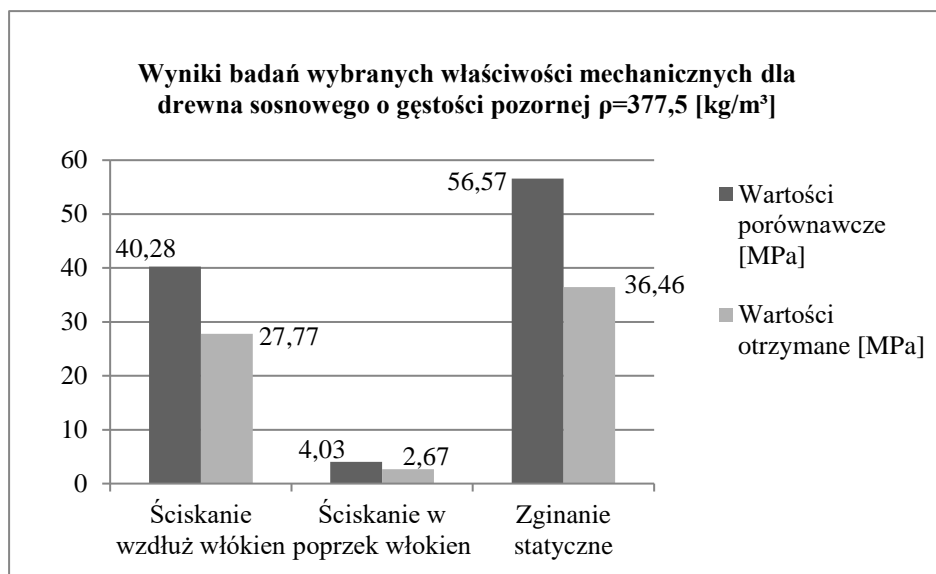
Nr próbki	Siła niszcząca	Strzałka ugięcia	Wymiar przekroju poprzecznego		Wytrzymałość dla wilgotności 12%
	P_{\max} [kN]	f [mm]	a [mm]	b [mm]	R_{g12^D} [MPa]
1	0,997	6,169	19,9	20,1	41,00
3	0,836	5,381	20,3	19,5	36,05
4	0,921	5,760	20,4	20,2	36,58
6	0,914	5,265	20,3	19,6	38,95
7	0,928	5,857	19,3	20,1	39,48
8	1,012	5,589	20,3	20,4	39,61
9	0,990	5,843	20,0	20,2	40,21
10	0,812	4,349	20,1	20,0	33,51
13	0,952	7,085	19,4	20,3	39,38
15	0,884	6,179	19,9	20,3	35,79
16	0,890	5,516	19,8	20,4	35,60
20	0,750	3,596	20,3	20,0	30,64

5. Analiza wyników

Przedstawione poniżej wartości obliczono na podstawie średniej wyników z każdego typu badania:

- ściskanie wzdłuż włókien – $R_{CL}=27,77$ [MPa]
- ściskanie w poprzek włókien – średnia wyliczona na podstawie wyników badań z sumy trzech badanych kierunków: stycznego, promieniowego, pośredniego – $R_{C\perp}= 2,67$ [MPa],
- zginanie statyczne – średnia wyliczona na podstawie wyników z sumy trzech badanych kierunków przyłożenia siły w stosunku do ułożenia słoików w przekroju: stycznego, promieniowego, pośredniego – $R_g=36,46$ [MPa].

Wyniki porównano z wartościami referencyjnymi i zaprezentowano na poniższym rysunku.



Rys. 4. Wyniki badań wybranych właściwości mechanicznych dla drewna sosnowego o gęstości pozornej $\rho = 377,5$ [kg/m³]

Fig. 4. The results of studies of selected mechanical properties for the pine wood with an apparent density $\rho = 377,5$ [kg/m³]

Z powyższego diagramu wynika, że rzeczywista wytrzymałość badanego drewna z zabytkowego kościoła różni się od otrzymanych wartości referencyjnych: na ściskanie wzdłuż włókien o ok. 31%, na ściskanie w poprzek włókien o ok. 34%, a na zginanie o ok. 36%.

Znaczny spadek wytrzymałości obserwuje się w każdym wymienionym przypadku, a jego główną przyczyną jest proces starzenia się zabytkowego elementu drewnianego, wpływ żerowania owadów oraz zmienne i często niekorzystne warunki klimatyczne. Otrzymane wyniki badań mogą posłużyć jako cenna informacja podczas oceny stopnia zużycia materiału w badanym obiekcie budowlanym. Wydają się być one miarodajne, ponieważ do każdego badania użyto nie mniej niż 10 próbek.

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wytrzymałości drewna z więźby dachowej zabytkowego kościoła pozwalają stwierdzić, że tylko uzyskane eksperymentalnie wyniki pozwalają w najbardziej dokładny sposób określić miarodajny stan drewna w tego typu obiekcie, gdyż wartości wytrzymałości, określone na podstawie uśrednionych wyników ze współczesnego drewna w uzależnieniu od jego gęstości i wilgotności, różnią od otrzymanych w laboratorium od 31% do 36%. W zawiązku z tym, przedstawione rezultaty stanowią mogą cenne źródło informacji w przypadku konieczności przeprowadzenia oceny stanu technicznego podobnych obiektów, które podlegają ochronie konserwatorskiej –

szczególnie wtedy, kiedy nie ma możliwości przeprowadzenia szczegółowych testów wytrzymałościowych.

Oznaczenia symboli

- R_{CL} - wytrzymałość drewna na ściskanie wzdłuż włókien,
compressive strength of the wood along the fibres, [MPa],
- $R_{C\perp}$ - wytrzymałość drewna na ściskanie w poprzek włókien,
compressive strength of wood across the fibres, [MPa],
- R_g - wytrzymałość drewna na zginanie statyczne, static bending strength of wood, [MPa],
- P_{pr} - siła ściskająca na granicy proporcjonalności,
compressive force at the proportionally limit, [kN],
- P_{max} - maksymalna (niszcząca) siła ściskająca próbkę,
maximum (destructive) force compressing a sample, [kN],
- M - maksymalny moment zginający, the maximum bending moment, [kNm],
- A - pole przekroju poprzecznego próbki,
cross-sectional area of a sample, [m²],
- W - wskaźnik wytrzymałości na zginanie przekroju poprzecznego próbki,
section modulus of cross-section of a sample, [m],
lub, or,
bezwzględna wilgotność drewna w chwili wykonywania pomiarów,
absolute moisture content at the time of measurement, [%],
- R_{12} - wytrzymałość drewna o wilgotności 12%,
strength of wood of humidity 12%, [MPa],
- R_W - wytrzymałość drewna o wilgotności z przedziału $9\% \leq W \leq 15\%$,
strength of wood of humidity from the interval $9\% \leq W \leq 15\%$, [MPa],
- α - współczynnik proporcjonalności pomiędzy wytrzymałością drewna a jego wilgotnością, ratio of proportionality between strength of wood and its humidity, [-].

Literatura

- [1] Bajno D., Rewitalizacja konstrukcji budowlanych w obiektach zabytkowych, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy, Bydgoszcz, 2013
- [2] Kokociński W., Drewno. Pomiary właściwości fizycznych i mechanicznych., Katedra Nauki o Drewnie Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu, Poznań, 2004
- [3] Żaboklicki A., Rehabilitacja i wzmacnianie zabytkowych konstrukcji drewnianych, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, 2013

ANALYSIS OF WOOD IN HISTORICAL OBJECTS BASED ON TESTING STRENGTH

Summary

The aim of the following paper is to present the research on strength of wood coming from the monumental building. It comprises a short form theoretical introduction on the

assessment of the technical condition and the types of damage in wooden historic construction, a description of the materials used in the research, the way of conducting the laboratory strength tests and the final comparison of the literature based and experimentally obtained values of wood compressive and bending strength. The presented investigations provide a valuable source of information for the assessment of technical condition of the old wooden structures subject to legal protection and conservation.