

ROZWIĄZANIA KONSTRUKCJI

z drewna i materiałów drewnopochodnych

Pomimo dominacji żelbetu i stali drewno przeżywa dziś swój renesans i jest chętnie stosowane do wznoszenia obiektów mieszkalnych, użyteczności publicznej, a szczególnie sportowych.

dr inż. Janusz Broł
Politechnika Śląska, Katedra Inżynierii Budowlanej

Dążenie do jak najefektywniejszego wykorzystania materiału jest zjawiskiem dosyć powszechnym. Zagadnienie to nie ominęło także konstrukcji wykonywanych z naturalnego materiału, jakim jest drewno.

Drewno lite

Pierwotnie do budowy obiektów o konstrukcji drewnianych stosowano drewno lite, często obrabiane w sposób minimalny. Wadą takiego wykorzystania drewna są ograniczenia co do maksymalnych wymiarów przekroju elementów oraz możliwości wykonywania elementów o znacznych rozpiętościach. Drewno, ze swoimi ogromnymi zaletami, jako surowiec organiczny o dużej niejednorodnej budowie anizotropowej ma również szereg mniej lub bardziej istotnych wad. Wady te niejednokrotnie utrudniają, a czasami uniemożliwiają prawidłowe wykorzystanie drewna. Dobra znajomość właściwości fizycznych i mechanicznych poszczególnych gatunków drewna pozwala na projektowanie i wykonywanie konstrukcji drewnianych, z drewna litego lub klejonego warstwowo, które mogą w pełni konkurować z konstrukcjami wykonanymi z takich materiałów jak beton czy stal. Ewidentnym przykładem konstrukcji wykonanych z drewna jest szczególna

konstrukcja, o której nie sposób tutaj nie wspomnieć – drewniana wieża Radiostacji Gliwickiej o wysokości 110,7 m (rys. 1). Wykonana w roku 1935, w całości z litego drewna modrzewiowego, służy nieprzerwanie przez ponad 75 lat na wolnym powietrzu, czyli jest poddawana wszystkim niekorzystnym czynnikom atmosferycznym, i aktualnie znajduje się w dobrym stanie technicznym. Jest to obecnie najwyższa zabytkowa (możliwe, że nie tylko zabytkowa – brak potwierdzonego istnienia konstrukcji wyższej) wieża na świecie wykonana w całości z drewna litego. Szerszy opis konstrukcji można znaleźć między innymi w [1], [2].

Istnieje jeszcze wiele konstrukcji z drewna litego które można by przywołać, ale z reguły są to konstrukcje powszechnie znane i stosowane.

W cyklu artykułów ograniczono się do zaprezentowania rozwiązań z drewna klejonego warstwowo z uwzględnieniem drewna klejonego warstwowo wzmacnianego na etapie produkcji kompozytami włóknistymi – jako rozwiązanie nowego i efektywnego sposobu wykorzystania drewna. Przedstawione zostaną również przykłady ciekawych, specyficznych rozwiązań konstrukcyjnych z wykorzystaniem drewna litego i klejonego warstwowo. Ponadto – nowe rozwiązania z drewna i materiałów drewnopochod-



Rys. 1.
Widok ogólny
drewnianej
wieży
Radiostacji

nych, takich jak fornir klejony warstwowo LVL, belki dwuteowe, kratownice na płytki kolczaste oraz belki stropowe o pasach równoległych. W części końcowej zaprezentowane zostaną nowoczesne złącza i łączniki stosowane w konstrukcjach drewnianych.

Drewno klejone warstwowo

Jednym z materiałów obecnie powszechnie wykorzystywanych w budownictwie wielkopowierzchniowym jest drewno klejone warstwowo, czyli materiał uzyskany poprzez sklejenie warstw tarcicy o równoległym układzie włókien. Do wykonania elementów klejonych wykorzystuje się drewno odpowiednio wysuszone i posegregowane wg klas wytrzymałościowych drewna litego. Wady drewna mające wpływ na wytrzymałość są wycinane, a następnie tarcica jest sklejana na długości na mikrowczyepy (wczepy klinowe), tworząc w ten sposób „deskę” o potencjalnie nieskończonej długości. Jedynym ograniczeniem długości elementu są względy technologiczne (np. długość hali produkcyjnej) i transportowe. Tak przygotowane długie pasy tarcicy z ograniczoną liczbą wad składane są warstwami i sklepane na grubość w specjalnych prasach. Powstają w ten sposób elementy o odpowiednim kształcie i pożądanym wymiarach. Głównym ograniczeniem wymiarów przekrojów poprzecznych są względy techniczne, czyli ograniczenia maszyn wykorzystywanych do obróbki. Maksymalne wymiary przekrojów mogą wynosić ok. 0,3 x 2,5 m.

Do wykonania elementów klejonych wykorzystuje się głównie kleje melaminowe (z uwagi na ich cenę oraz bezbarwną spoinę) oraz – w mniejszym stopniu – kleje rezorcynowe (z uwagi na wyższą cenę oraz ciemną spoinę wykorzystywane głównie tam, gdzie potrzebna większa wytrzymałość spoin). W tabeli 1 przedstawiono przykłady ważniejszych rozwiązań produkowanych fabrycznie rodzajów dźwigarów z drewna klejonego warstwowo, a w tabeli 2 – przykłady ważniejszych rozwiązań ram i łuków z drewna klejonego warstwowo. W tabelach 1 i 2 podano również zalecane rozpiętości oraz proporcje wysokości do rozpiętości. Zastosowanie drewna klejonego warstwowo w konstrukcji kratownic przedstawione zostanie w kolejnym numerze.

Korzyści zastosowania kompozytów w belkach z drewna klejonego

- znaczny wzrost nośności przekroju,
- wzrost sztywności,
- mniejsze zużycie drewna,
- większa ognioodporność wskutek niższej przewodności (dotyczy kompozytów wklejanych w przekrój)

Tabela 1. Przykłady dźwigarów z drewna klejonego warstwowo (na podstawie (3) i (4))

Schemat statyczny	Opis	Kąt nachylenia [stopnie]	Zalecana rozpiętość [m]	Zalecana wysokość
	dźwigar o stałej wysokości przekroju poprzecznego	< 5	< 30	$h = l/17$
	dźwigar trapezowy dwuspadowy z dolną krawędzią prostą	3 - 10	10 - 30	$h = l/30$ $H = l/16$
	dźwigar trapezowy jednospadowy	< 5	< 25	$h = l/30$ $H = l/16$
	dźwigar z górną i dolną krawędzią trapezową dwuspadowy	3 - 15	10 - 20	$h = l/30$ $H = l/16$
	dźwigar ciągły	3 - 10	10 - 30	$h = l/20$

Tabela 2. Przykłady ram i łuków z drewna klejonego warstwowo (na podstawie (3) i (4))

Schemat statyczny	Opis	Kąt nachylenia [stopnie]	Zalecana rozpiętość [m]	Zalecana wysokość
	rama trójprzegubowa z ciągniami stalowymi	$^{\circ} 14$	10 - 35	$h = (S1+S2)/15$
	system trójprzegubowy ze słupem i łukiem	$^{\circ} 20$	10 - 25	$h = l/25$
	łuk trójprzegubowy ze ściągiem stalowym	$f/l \approx 1,144$	20 - 100	$h = l/50$
	rama trójprzegubowa	$^{\circ} 14$	15 - 25	$h = (S1+S2)/13$

Konstrukcje wzmocnione kompozytami

Koncepcja wzmocnienia konstrukcji drewnianych kompozytami odpowiada znanej i stosowanej metodzie polegającej na przyklejeniu elementów wzmacnianych stalowych (prętów, blach, płaskowników) do powierzchni zewnętrznych lub wklejaniu do wnętrza przekroju. Skuteczność zespolenia różnorodnych materiałów w dużym stopniu zależy od podobieństwa parametrów fizycznych i mechanicznych. Pod względem materiałowym włókniasta struktura kompozytów jest podobna do struktury drewna. Często w podręcznikach poświęco-

nych kompozytom drewno podawane jest jako przykład kompozytu naturalnego [5], możemy więc stwierdzić, że „kompozyt wzmacniany jest kompozytem”. Jako potencjalne korzyści zastosowania kompozytów w belkach z drewna klejonego można wymienić: znaczny wzrost nośności przekroju, wzrost sztywności, mniejsze zużycie drewna oraz większą ognioodporność wskutek niższej przewodności (dotyczy kompozytów wklejanych w przekrój) – z badań przeprowadzonych pod kierunkiem Martina [6] wynika, że ukrycie taśm wewnątrz przekroju wpływa korzystnie na nośność w trakcie pożaru krótkotrwałego.



Kompozyty włókniste

Większość materiałów kompozytowych jest zbudowana z dwóch faz – fazy ciągłej, zwanej matrycą, otaczającej fazę drugą, tzw. fazę rozproszoną, zwaną też zbrojeniem. W zależności od rodzaju fazy rozproszonej materiały kompozytowe można podzielić na kompozyty zbrojone cząstkami, zbrojone dyspersyjnie oraz zbrojone włóknami.

Kompozyty zbrojone włóknami (kompozyty włókniste) są najbardziej efektywnymi spośród materiałów kompozytowych, wykazując najlepsze właściwości mechaniczne, przy najmniejszym ciężarze właściwym. Podstawowym elementem nośnym w kompozytach włóknistych są włókna, natomiast matryca służy jako łączące je spoiwo, zapewnia rozdział obciążenia zewnętrznego między włókna, a także chroni je przed czynnikami zewnętrznymi. W niewielkim natomiast stopniu uczestniczy ona w przeniesieniu obciążeń zewnętrznych. W kompozytach włóknistych jako matryce stosuje się zazwyczaj cementowe i żywice polimerowe, a czasem metale. Kompozyty o matrycach metalowych (aluminiowych, miedzianych, magnezowych, tytanowych) wykazują bardzo dobre właściwości mechaniczno-wytrzymałościowe w wysokich temperaturach, co sprawia, że są wykorzystywane głównie w przemyśle lotniczym. Kompozyty o matrycach bazujących na cemencie to wszelkiego rodzaju włóknobeton i materiały określane jako ECC (*Engineered Cementitious Composites*).

Dla celów wzmocnień podstawowe jednak znaczenie mają obecnie kompozyty włókniste o matrycach polimerowych (żywice termoplastyczne i termoutwardzalne), zbrojone różny-

mi włóknami: węglowymi, w tym także grafitowymi, szklanymi, borowymi czy aramidowymi.

Najczęściej spotykane rodzaje włókien stosowanych w kompozytach wykorzystywanych w budownictwie to:

- włókna szklane (kompozyt GFRP – Glass Fibre Reinforced Polymers),
- włókna aramidowe (kompozyt AFRP – Aramid Fibre Reinforced Polymers),
- włókna węglowe (kompozyt CFRP – Carbon Fibre Reinforced Polymers):

W tabelach 3 i 4 przedstawiono porównanie podstawowych właściwości włókien.

Pierwsze zastosowania w Polsce

Wykorzystanie kompozytów włóknistych, takich jak włókna węglowe, aramidowe lub szklane, do wzmocnienia konstrukcji drewnianych już na etapie produkcji skutecznie ogranicza zużycie drewna w elementach belkowych. Wykonywanie wzmocnień konstrukcji włóknami aramidowo-szklanymi jest z praktycznego punktu widzenia analogiczne do wzmocnień wykonywanych innymi kompozytami włóknistymi. W Europie, w tym również, od 2004 r., w Polsce (rys. 2.), powstają nowe wznoszone obiekty z drewna klejonego warstwowo z elementami belkowymi wzmocnionymi, już na etapie produkcji, taśmami AFRP, GARP i CFRP. Sposób wzmocnienia polega na wklejeniu taśmy z włóknami aramidowymi (ale także aramidowo-węglowymi lub szklano-węglowymi) pod ostatnią warstwę drewna klejonego lub jako warstwy zewnętrznej, głównie w strefie włókien rozciąganych, ale także w strefie włókien ściskanych. Technologia wykonywania tego typu wzmocnień została opa-



Rys. 2. Pierwszy obiekt w Polsce ze wzmocnionymi podciągami taśmami AFRP

tentowana w USA przez D.A. Tingleya z Wood Science & Technology Institute, LLC, Corvallis, Oregon USA., oraz doczekała się opracowań normowych w postaci norm amerykańskich [13] i [14]. Według wspomnianych autorów rozwiązanie to pozwala zaoszczędzić od 25% do 40% drewna.

Wzmocnianie belek drewnianych taśmami kompozytowymi jest ciekawą alternatywą podniesienia nośności i sztywności elementów konstrukcji.

W badaniach przeprowadzonych na Politechnice Śląskiej na elementach w skali technicznej o wymiarach 0,14 x 0,32 x 6,2 m stwierdzono, że sztywność wzrosła w małym zakresie (ugięcia zmalały o ok. 15%), natomiast średni wzrost nośności jest znaczny (nawet o 68%). Jak wynika także z badań [15], [16], [17] i [18], wykonywanie wzmocnień zginanych belek drewnianych kompozytami włóknistymi wpływa korzystnie przede wszystkim na nośność. Rozwiązanie to powinno być wykorzystywane szczególnie tam, gdzie o nośności elementu decyduje pierwszy stan graniczny – wytrzymałość materiału. Stosowanie tego rozwiązania w przypadku ograniczenia wielkości ugięć jest rozwiązaniem mniej efektywnym, ale możliwym. Celowym byłoby wtedy stosowanie taśm o wyższym module sprężystości. Nie bez znaczenia jest zmiana postaci zniszczenia drewna. Elementy wzmocnione niszczyły się głównie poprzez uplastycznienie strefy ściskanej.

Szacowanie nośności belek zginanych wzmocnionych taśmami FRP

Przedstawiony dalej ogólny zarys metody szacowania nośności wg [13] i [14] jest ciekawym podejściem dającym realne wyniki obliczeń. Jest to jednak metoda bazująca na stałych materiałowych „amerykańskich” i nie jest łatwa do bezpośredniego przełożenia na warunki krajowe chociażby z uwagi na rozróżnienie modułów sprężystości przy ściskaniu i rozciąganiu, a w związku z tym istnieje konieczność przyjmowania pewnych uproszczeń.

W normach [13] i [14] przedstawiono sposób wyznaczania nośności i sztywności wzmocnionych już na etapie produkcji belek drewnianych z drewna klejonego ze wzmocnieniem w strefie włókien rozciąganych lub w strefie włókien roz-

Tabela 3. Właściwości wybranych włókien opracowane na podstawie (7) (8) (9) (10)

Rodzaj włókien		Średnica [μm]	Ciężar właściwy ρ [kN/m ³]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł sprężystości E _r [GPa]	Wydłużenie graniczne [%]
Szklane	E-Glass	10-16	25,0-20,5	1700-3400	72	1,5-4,0
	S-Glass		24,4-24,5	2500-4800	86-87	1,5-4,0
Węglowe	o wysokiej wytrzymałości	6-10	14-18	2450-4800	165-235	1,1-2,0
	o ultrawysokiej wytrzymałości			2500-6000	215-235	1,5-2,3
	o wysokim module sprężystości			1800	350-450	0,5-0,9
	o ultrawysokim module sprężystości			1000-1300	450-640	0,2-0,4
Aramidowe (kevlar)	o niskim module sprężystości	12	14,1 14,4	3500-4100	70-120	4,0-5,0
	o wysokim module sprężystości			3500-4000	115-200	1,8-3,5

Tabela 4. Ogólna klasyfikacja zalet podstawowych grup włókien (11) (12)

Cecha	Rodzaj włókna		
	szklane	węglowe	aramidowe
Najniższa cena	+++	++	+
Wytrzymałość właściwa	++	++	+++
Moduł właściwy	+	+++	++
Odporność na pelzanie	+	+++	++
Odporność na rozszerzalność cieplną	+	++	+++
Odporność zmęczeniowa	+	++	+++
Odporność udarowa	+++	+	++
Odporność chemiczna	+	+	+

ciąganych i ściskanych. Uwzględniono również projektowanie wzmocnienia na środkowym odcinku belki – wzmocnienie nie doprowadzone do podpory.

Minimalny procent zbrojenia powinien być nie mniejszy niż 0,25%, natomiast maksymalny procent zbrojenia powinien być nie większy niż 2% w przypadku zbrojenia pojedynczego oraz 4% w przypadku zbrojenia podwójnego. Taśmy z materiałów kompozytowych mogą być wklejane w przekrój belki (pod ostatnią warstwę – rysunek 3.), bądź przyklejane do dolnej i górnej powierzchni.

W wyznaczeniu położenia osi bezwładności przekroju przy zginaniu poczyniono następujące założenia (wg [13] [14]):

- rozróżniono moduły sprężystości drewna wzdłuż włókien przy ściskaniu i przy rozciąganiu,
- moduł sprężystości drewna przy rozciąganiu sprowadzono do modułu sprężystości drewna wzdłuż włókien przy ściskaniu za pomocą współczynnika

$$n' = \frac{E_{t,0,mean}}{E_{c,0,mean}}, \quad (1)$$

- moduł sprężystości taśmy FRP przy rozciąganiu sprowadzono do modułu sprężystości drewna wzdłuż włókien przy ściskaniu za pomocą współczynnika

$$n = \frac{E_f}{E_{c,0,mean}}, \quad (2)$$

gdzie:

E_f – moduł sprężystości taśmy FRP przy rozciąganiu,

$E_{t,0,mean}$ – średni moduł sprężystości drewna przy rozciąganiu wzdłuż włókien,

$E_{c,0,mean}$ – średni moduł sprężystości drewna przy ściskaniu wzdłuż włókien.

Dla tak sprowadzonych modułów sztywności wysokość strefy ściskanej, w rozwiązaniu ze zbrojeniem tylko strefy rozciąganej, wynosi:

$$a = a' + M_t - N_t, \quad (3)$$

gdzie:

$$a' = h \frac{\sqrt{n'}}{1 + \sqrt{n'}}, \quad (4)$$

$$N_t = n' d_1 (n - 1)^{0,63} \frac{t_f}{a'}, \quad (5)$$

$$M_t = n' (n - 1)^{0,63} t_f, \quad (6)$$

gdzie (oznaczenia na rys. 4.):

h – wysokość belki,

t_f – grubość taśmy FRP,

d_1 – grubość „otuliny” taśmy,

d_1 – środek ciężkości zbrojenia.

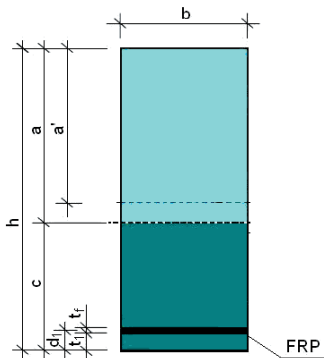
Po wyznaczeniu osi obójnej wzmocnionego elementu, obliczono moment bezwładności I_z sprowadzonego przekroju z wykorzystaniem twierdzenia Steinera:

$$I_z = \frac{b a^3}{3} + \frac{b n' h_i^3}{3} + b n t_l \left[\frac{t_l^2}{12} + (c - d_1)^2 \right] + b n' t_l \left[\frac{t_l^2}{12} + \left(c - \frac{t_l}{2} \right)^2 \right], \quad (7)$$

gdzie:

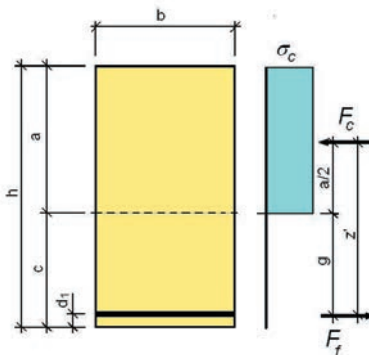
$$h_i = h - a - t_l - t_f, \quad (8)$$

$$c = h - a, \quad (9)$$



Rys. 3. Geometria przekroju i sposób wzmocnienia belek wg (14)

Dla tak wyznaczonego sprowadzonego momentu bezwładności ugięcie obliczane jest ze znanych wzorów z teorii sprężystości, w zależności od schematu obciążenia, z uwzględnieniem sprowadzonego momentu bezwładności oraz średniego modułu sprężystości przy zginaniu $E_{0,mean}$:



Rys. 4. Schemat obliczeniowy wg (14)

W [13] i [14] nośność przekroju wzmocnionego wyznaczana jest przy założeniu pełnego uplastycznienia strefy ściskanej (rys. 4.). O nośności decyduje wyczerpanie nośności strefy ściskanej drewna. W wyznaczeniu nośności pominięto udział drewna w strefie włókien rozciąganych. Zakłada się, że naprężenia rozciągane przenosi taśma FRP (analogia do obliczania przekrojów żelbetowych). Poniżej przedstawiono sposób wyznaczenia nośności dla belek zginanych zbrojonych w strefie włókien rozciąganych.

Dla tak poczynionych założeń dopuszczalny moment przenoszony przez przekrój wynosi:

$$M_r = F_c \cdot z', \quad (10)$$

gdzie:

$$F_c = \sigma_{aa} \cdot b, \quad (11)$$

$$z' = \frac{a}{2} + g = \frac{a}{2} + (c - d_1) = h - \frac{a}{2} - d_1, \quad (12)$$

Naprężenia rozciągające w taśmie FRP wyznacza się wg wzoru:

$$\sigma_f = \frac{M_r \cdot \left(g + \frac{t_f}{2} \right) \cdot n}{I_z}. \quad (13)$$

Dopuszczalne naprężenia ścinające dla zbrojonych wyznacza się ze wzoru:

$$\tau_f = \frac{2}{3} \cdot f_v' \cdot b \cdot h, \quad (14)$$

gdzie:

$$f_v' = f_v + 20 \ln(x). \quad (15)$$

Literatura

- [1] Ajdukiewicz A., Brol J., Malczyk A., Wlasczuc M., Rehabilitation of the Highest Wooden Tower in Poland. Structural Engineering International, No 3, Vol. 10, August 2000, s.161-163.
- [2] Ajdukiewicz A., Brol J., Malczyk A., Wlasczuc M., O zagrożeniach i wzmocnieniach najwyższej w świecie zabytkowej wieży drewnianej. XIX Konferencja Naukowo- Techniczna „Awary Budowlane”, Szczecin-Międzyzdroje, 19-22 maja 1999, t. I, s.195-202.
- [3] Mielczarek Z., Budownictwo drewniane, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1994.
- [4] Neuhaus H., Budownictwo drewniane. Polskie Wydawnictwo Techniczne, Rzeszów 2004.
- [5] Wilczyński A.P., Polimerowe kompozyty włókniste. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.
- [6] Zeno M., Tingley D. A., Fire resistance of RFP reinforced glulam beams. World Conference on Timber Engineering, Whistler Resort, British Columbia, Canada 2000.
- [7] Hyla I., Elementy mechaniki kompozytów, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1995.
- [8] Materiały firmy EnForce.
- [9] Materiały firmy SIKA.
- [10] Materiały firmy S&P Clever Reinforcement Company AG, Szwajcaria.
- [11] German J., Podstawy mechaniki kompozytów włóknistych, skrypt Politechniki Krakowskiej, Kraków 1996.
- [12] Meier U., Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites. Construction and Building Materials, Elsevier 1995, s. 341-351.
- [13] Norma amerykańska US standard ICBO/Uniform Building Code 5100.
- [14] Norma amerykańska US standard ICBO/Uniform Building Code 6046.
- [15] Brol, J., Wzmacnianie stropów drewnianych taśmami z włókien węglowych, VI Konferencja naukowa „Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych”, Międzyzdroje 27-29 maja 2004.
- [16] Brol, J., Skuteczność wzmacniania belek drewnianych taśmami CFRP, VII Konferencja naukowa „Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych”, Międzyzdroje 12-13 maja 2006.
- [17] Brol J., Grygierek, K., Wzmacnianie zginanych belek z drewna klejonego taśmami GARP nie dochodzącymi do podpór, 5th International Conference on „New Trends on Statics and Dynamics of Buildings”, Bratysława (Słowacja), 19-20 October 2006, s. 51-54.
- [18] Brol J., Wzmacnianie konstrukcji drewnianych kompozytami włóknistymi, Konferencja „Problemy remontowe u budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych”, REMO 2006, Wrocław-Kliczków, 6-8 grudnia 2006; praca zbiorowa pod red. Jansieński J. i in., Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2006, s. 200-207.
- [19] Norma PN-B-03150:2000 Konstrukcje drewniane. Obliczenia statyczne i projektowanie.