



## Badania belek z drewna klejonego warstwowo wzmocnionych prętami bazaltowo-epoksydowymi

Marlena Rajczyk<sup>1</sup>, Damian Jończyk<sup>2</sup>

### STRESZCZENIE:

Obecnie zastosowanie kompozytów włóknistych staje się coraz powszechniejsze w wielu obszarach budownictwa. Wzmocnienie elementów konstrukcyjnych na etapie produkcji za pomocą materiałów FRP daje korzyści związane z redukcją wymiarów konstrukcji lub możliwością zastosowania większych pręseł. Wzmacnianie elementów z żelbetu jest bardzo popularne, natomiast zbrojenie elementów drewnianych jest w fazie rozwoju. Wiele prac koncentruje się na wykorzystaniu taśm i mat FRP, a badania nad wykorzystaniem prętów BFRP do wzmocnienia drewna są rzadkością. W pracy wykonano eksperymentalne badania belek z drewna klejonego zbrojonego prętami bazaltowo-epoksydowymi BFRP. Pręty zostały wklejone w przekroju w różnych konfiguracjach.

### SŁOWA KLUCZOWE:

drewno; wzmacnianie; BFRP; kompozyty

## 1. Wprowadzenie

Drewno ze względu na wysokie wartości estetyczne i korzystne właściwości fizyczne jest obecnie często stosowanym materiałem konstrukcyjnym, lecz dlatego że jest materiałem naturalnym, trudno jest je w zaawansowanym zakresie pod względem materiałowym modyfikować. Przykładem pewnej modyfikacji drewna, która jest stosowana od wielu lat w budownictwie, jest drewno klejone warstwowo. Drewno klejone warstwowo ze względu na fakt, iż powstaje z segregowanych lameli, ma lepsze właściwości wytrzymałościowe.

Szybki rozwój chemii materiałowej pozwala wykorzystać nowoczesne materiały do polepszenia charakterystyk wytrzymałościowych tradycyjnych materiałów. Coraz częściej stosowanym materiałem w nowoczesnym budownictwie są kompozyty włókniste (Fiber Reinforced Polymer – FRP). Mają one szereg zalet, takich jak: niski ciężar własny, wysoka wytrzymałość na rozciąganie, duża odporność na działanie czynników chemicznych. Dzięki tym zaletom materiały kompozytowe znalazły zastosowanie jako materiał do wzmacniania różnych elementów konstrukcyjnych.

Połączenie dwóch przedstawionych powyżej materiałów jest coraz częściej badaniem, a także w praktyce stosowanym rozwiązaniem. Ze względu na fakt, iż możliwości łączenia drewna z materiałami kompozytowymi jest wiele, zatem zasadne jest prowadzenie dalszych badań naukowych, aby lepiej zrozumieć pracę elementów konstrukcyjnych powstałych z połączenia drewna i kompozytów włóknistych.

<sup>1</sup> Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 3, 42–218 Częstochowa, e-mail: mrajczyk@bud.pcz.pl, orcid id: 0000-0002-4893-0931

<sup>2</sup> Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 3, 42–218 Częstochowa, e-mail: djonczyk@bud.pcz.pl, orcid id: 0000-0003-2161-4768

Wzmacnianie elementów drewnianych za pomocą kompozytów włóknistych może odbywać się w celu naprawy konstrukcji już istniejących. Często elementy wzmacniane są bardzo starymi, często zabytkowymi konstrukcjami, przez co należy zachować szczególną ostrożność przy naprawie takich elementów. Ponadto potrzebne jest zachowanie wysokiej estetyki użytej metody naprawczej. Bardzo szeroko tym tematem zajęli się Jasieńko [1] oraz Nowak [2]. W pracy [1] przedstawiono dorobek naukowy autora w zakresie wzmacniania litych elementów drewnianych za pomocą elementów stalowych oraz elementów FRP. Natomiast Nowak w rozprawie doktorskiej [2] przedstawił wyniki badań nowych elementów litych jako badań pilotażowych oraz stuletnich belek, które symulowały elementy zabytkowe wzmacniane węglowymi kompozytami włóknistymi. Badane stuletnie belki zostały ponacinane, aby symulować uszkodzenia drewna, po czym wzmocnione taśmami z włókna węglowego w różnych konfiguracjach. Wzrost nośności badanych belek wyniósł od 21% (seria F) do 69% (seria D). Wyniki te były kontrolowane poprzez przeprowadzenie obliczeń numerycznych oraz analitycznych z zastosowaniem autorskiego modelu analitycznego.

W pracy [3] przeprowadzono badania analityczne, numeryczne i laboratoryjne starych belek drewnianych. Obliczenia analityczne dotyczyły zakresu liniowego i plastycznego i stały się pomocne do wykonania analizy numerycznej także w zakresie nieliniowym. Następnymi badaniami laboratoryjnymi były próby czteropunktowego zginania belek wzmocnionych taśmami CFRP w sposób bierny, sprężonymi oraz wzmocnionych prętami CFRP także sposobem biernym i czynnym. Belki wzmocnione wykazały wzrost sztywności oraz nośności.

Także coraz więcej polskich ośrodków naukowych zajmuje się badaniem wzmacniania elementów drewnianych, publikując wstępne wyniki badań [4–7].

Wzmocnienie belki z drewna klejonego warstwowo było pierwszym zastosowaniem na skalę komercyjną kompozytów włóknistych. Rozwiązanie to zostało opatentowane przez Dana Tingleya [8]. Zakładało ono wklejenie taśmy z kompozytu włóknistego pomiędzy ostatnią a przedostatnią lamelę.

Szeroko zakrojone badania belek z drewna klejonego warstwowo wzmocnionych prętami bazaltowo-epoksydowymi przeprowadził Raftery [9–12]. Badał on różne konfiguracje wzmocnienia belek, wklejając pręty w przygotowane wcześniej podłużne otwory na całej długości belki na dolnej lub dolnej i górnej płaszczyźnie. Badania wykazały, że zastosowanie zbrojenia zmienia pracę statyczną belek, gdyż belki niewzmocnione pracowały w zakresie sprężystym, natomiast belki ze zbrojeniem przechodziły w stan plastyczny. Zastosowanie zbrojenia w ilości 1,4% powodowało zwiększenie sztywności o 11,2–13,9%, natomiast zbrojenie w ilości 2,8% powodowało zwiększenie sztywności belki o 22–29,6%.

## 2. Materiały

### 2.1. Drewno

Do wykonania belek użyto drewna świerkowego PCAB (*Picea abies*). Drewno świerkowe jest stosunkowo łatwe w obróbce. Można je łatwo ciąć, szlifować, frezować i wiercić. Podczas suszenia ma niewielką skłonność do pęknięcia i paczenia. Do produkcji gotowych elementów wykorzystano lamele o klasie T14 (C24), których właściwości wytrzymałościowe wynoszą odpowiednio: wytrzymałość charakterystyczna desek na rozciąganie wzdłuż włókien  $f_{t,0,1,k} = 14 \text{ N/mm}^2$ , średni moduł sprężystości podłużnej desek  $E_{t,0,1,\text{mean}} = 11\,000 \text{ N/mm}^2$ , gęstość desek  $\rho_{1,k} = 350 \text{ kg/m}^3$ . Użyte deski nie miały sęków o średnicy powyżej 6 mm. Wilgotność desek wahała się w granicach od 6 do 15%, przy czym dla dwóch łączonych ze sobą desek różnica wilgotności była nie większa niż 5%. Dokładna segregacja desek została wykonana według normy [13] w fabryce, która wyprodukowała belki. Materiałem do wykonania gotowych belek było drewno klejone warstwowo klasy GL24h (tab. 1).

## 2.2. Pręty bazaltowe BFRP

Do wzmocnienia belek zastosowano pręty bazaltowo-epoksydowe BFRP, które są wykonane w taki sposób, że wiązki włókien ułożone są w jednym kierunku, wzdłuż osi pręta i są zatopione w matrycy. Pręty zostały zakupione w firmie POLPREK Polskie Pręty Kompozytowe o średnicach  $\phi 7$  i  $\phi 9$ , gdyż firma ma w swojej ofercie dostępne jedynie takie średnice prętów. W firmie POLPREK pręty produkowane są metodą pultruzji, czyli przeciągania w maszynie spolimeryzowanych włókien, które są zatopione w żywicy epoksydowej. Cechy wytrzymałościowe prętów firmy POLPREK możemy znaleźć w sprawozdaniach z badań przeprowadzonych przez Katedrę Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej [14–16]. Zestawienie charakterystyk wytrzymałościowych prętów bazaltowych BFRP przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 1**

Charakterystyczne wartości wytrzymałości i sprężystości [ $N/mm^2$ ] oraz gęstości [ $kg/m^3$ ] dla jednorodnego drewna klejonego warstwowo [13]

Właściwość	Symbol	Wartość
Wytrzymałość na zginanie	$f_m, g, k$	24
Wytrzymałość na rozciąganie	$f_t, 0, g, k$	19,2
	$f_t, 90, g, k$	0,5
Wytrzymałość na ściskanie	$f_c, 0, g, k$	24
	$f_c, 90, g$	2,5
Wytrzymałość na ścinanie	$f_v, g, k$	3,5
Moduł sprężystości	$E_{0, g, mean}$	11 500
	$E_{0, g, 05}$	9600
	$E_{90, g, mean}$	300
	$E_{90, g, 05}$	250
Moduł odkształcenia postaciowego	$G_{g, mean}$	650
	$G_{g, 05}$	540
Gęstość	$\rho_{g, k}$	405
	$\rho_{g, mean}$	445

**Tabela 2**

Charakterystyczne wartości wytrzymałości i sprężystości dla prętów bazaltowo-epoksydowych BFRP [14–16]

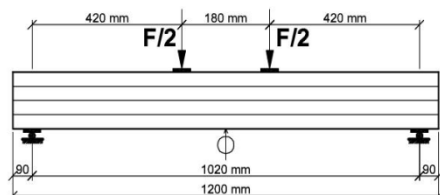
Właściwość	Symbol	Wartość [MPa]
Wytrzymałość średnia na rozciąganie dla prętów $\phi 7$	ffu	1 184,97
Wytrzymałość charakterystyczna na rozciąganie dla prętów $\phi 7$		1 474,90
Wytrzymałość średnia na rozciąganie dla prętów $\phi 9$	ffuk	817
Wytrzymałość charakterystyczna na rozciąganie dla prętów $\phi 9$		1038
Moduł sprężystości dla prętów $\phi 7$	Ef,śr	52 800
Moduł sprężystości dla prętów $\phi 9$		56 300

## 3. Badania eksperymentalne

Do badań laboratoryjnych belki zostały przygotowane przez firmę ANDREWEX Sp. z o.o. specjalizującą się w produkcji elementów konstrukcyjnych z drewna klejonego warstwowo.

Elementy konstrukcyjne w zakładzie ANDREWEX sp. z o. o. wykonywane są zgodnie z normą PN-EN 14080:2013 [13], która określa parametry przy wykonywaniu belek.

Zaplanowano przebadanie w sumie 12 belek długości 1,2 m o przekroju poprzecznym 7x16 cm wykonanych z drewna klejonego warstwowo. Jako zbrojenie zastosowano dwie średnice prętów: 7 oraz 9 mm.



Rys. 1. Schemat statyczny badanych belek



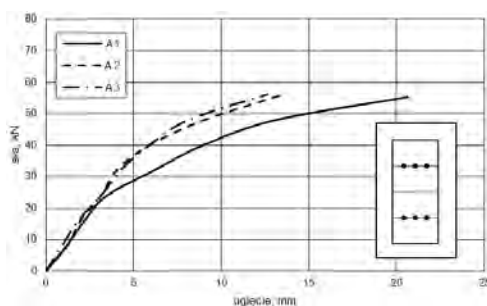
Rys. 2. Widok stanowiska badawczego

Belki podczas badań laboratoryjnych zostały poddane czteropunktowemu zginaniu w maszynie wytrzymałościowej umożliwiającej przeprowadzenie próby czteropunktowego zginania do obciążenia wynoszącego 100 kN. Schemat statyczny badanych belek przedstawiono na rysunku 1, natomiast stanowisko badawcze na rysunku 2. Nad podporami zastosowano podparcie widełkowe, aby zabezpieczyć belki przed zwichrzeniem. Aby zabezpieczyć belki przed lokalnymi wgnieceniami, zastosowano metalowe płytki o grubości 10 mm, zarówno nad podporami, jak i pod siłami skupionymi. Prędkość obciążenia wynosiła 0,200 kN/s. Średni czas do zniszczenia wynosił około 300 sekund. Podczas badań rejestrowane były wartości siły obciążającej i niszczącej, wartość przemieszczenia w środku rozpiętości za pomocą czujnika zegarowego.

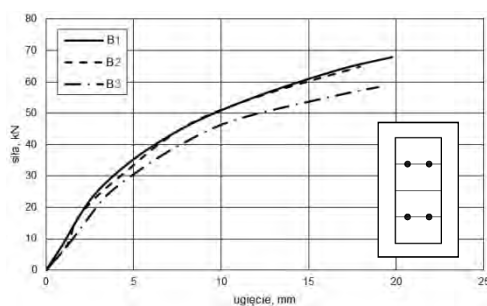
#### 4. Wyniki i dyskusja

Wykresy ugięcie-siła dla wszystkich serii przedstawiono na rysunkach 3–6.

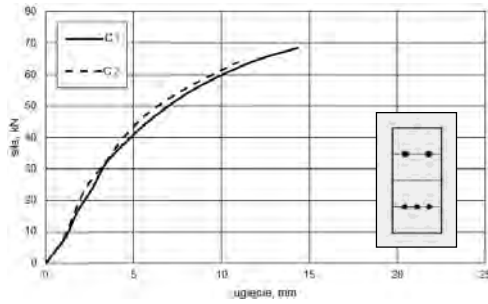
W literaturze można spotkać badania niewzmocnionych belek z drewna klejonego warstwowo, m.in. [17]. Pokazują one liniową charakterystykę pracy tego typu belek. Dodanie zbrojenia we wszystkich badanych belkach pokazuje charakter pracy z wejściem w stan plastyczny. Najbardziej korzystny charakter pracy wykazują serie C i D (rys. 5 i 6, tab. 3), gdyż osiągnęły największe wartości sił niszczących (rys. 7) przy najmniejszej wartości ugięć.



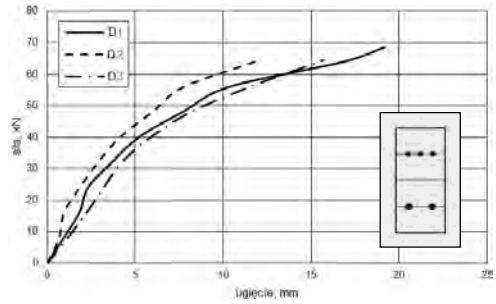
Rys. 3. Wykres ugięcie-siła dla belek z serii A



Rys. 4. Wykres ugięcie-siła dla belek z serii B



Rys. 5. Wykres ugięcie-siła dla belek z serii C

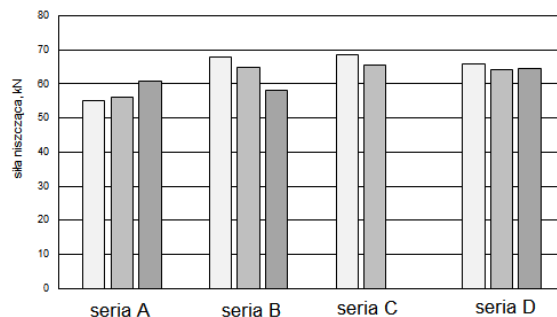


Rys. 6. Wykres ugięcie-siła dla belek z serii D

Tabela 3

Zestawienie wartości sił niszczących i ugięć

Seria	Próbka	Zbrojenie	Siła niszcząca [kN]	Średnia siła niszcząca [kN]	Średni moment niszczący [kNm]	Ugięcie przy zniszczeniu [mm]	Średnie ugięcie przy zniszczeniu [mm]
A	A1	Strefa ściskana 3 $\phi 7$	55,25	57,44	12,06	20,614	16,82
	A2	Stefa rozciągana 3 $\phi 7$	56,26			13,671	
	A3		60,8			16,189	
B	B1	Strefa ściskana 2 $\phi 9$	67,92	63,67	13,37	19,769	18,88
	B2	Strefa rozciągana 2 $\phi 9$	64,78			17,915	
	B3		58,3			18,953	
C*	C1	Strefa ściskana 2 $\phi 9$	68,54	66,98	14,07	14,334	13,10
	C2	Strefa rozciągana 3 $\phi 7$	65,42			11,856	
			* ilość 2 ze względu na błędy wykonawcze w fabryce				
D	D1	Strefa ściskana 3 $\phi 7$	65,9	64,85	13,62	19,141	15,55
	D2	Strefa rozciągana 2 $\phi 9$	64,25			11,829	
	D3		64,39			15,694	



Rys. 7. Zestawienie wartości sił niszczących

Charakterystyka pracy dla serii A i B jest podobna (rys. 3, 4) jednak wartości sił niszczących jest wyższa dla próbek serii B (tab. 3).

Na rysunkach 3 i 6 widoczne są duże rozbieżności w wynikach dla poszczególnych próbek.

## 5. Wnioski

Na podstawie badań eksperymentalnych można sformułować następujące wnioski:

1. Najlepszą pracą statyczną charakteryzowały się seria C i D, osiągając przy największych wartościach sił niszczących najmniejsze wartości ugięć, co jest związane z największym procentem zbrojenia w tych próbkach.
2. W seriach A, B, D występują znaczne rozbieżności w wynikach badań, co jest najprawdopodobniej spowodowane złą dokładnością wykonania belek, które są rozwiązaniem innowacyjnym i technologię wykonania należałoby dopracować. O problemach z wykonawstwem szczególnie sygnalizować może problem z próbką w serii C, której na etapie oceny wzrokowej nie można było zakwalifikować do badań.
3. Wartości sił niszczących i maksymalnych ugięć nie są proporcjonalne do procentu zbrojenia, co także może być spowodowane niedokładnością wykonania i zaburzoną w związku z tym współpracą drewna i prętów bazaltowych.

## Literatura

- [1] Jasieńko J., Połączenia klejowe w rehabilitacji i wzmocnianiu zginanych belek drewnianych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
- [2] Nowak T., Analiza pracy statycznej zginanych belek drewnianych wzmocnianych przy użyciu CFRP, Rozprawa doktorska, Wrocław 2007.
- [3] Borri A., Corradi M., Grazini A., A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials, *Composites: Part B* 2005, 36, 143–153.
- [4] Major M., Major I., Współczesne drewniane więzary kratowe – technologia Mitek, *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej* 2015, seria Budownictwo 21, 211–217.
- [5] Major M., Różycka J., Łączniki stalowe w konstrukcjach drewnianych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej* 2013, seria Budownictwo 19, 107–114.
- [6] Nawrot J., Przykładowe rozwiązanie wzmocnienia konstrukcji drewnianego stropu belkowego, *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej* 2013, seria Budownictwo 19, 107–114.
- [7] Rajczyk M., Jończyk D., Stachecki B., Experimental Research of Glulam Beams Reinforced with BFRP Basalt-Epoxy Rods, 10th International Conference on Contemporary Problems of Architecture and Construction, Beijing, Chiny, 442–447.
- [8] Martin Z., Stith J., Tingley D.: Commercialization of FRP reinforced glulam beam technology, *Word Conference on Timber Engineering, Whistler Resort, British Columbia, Canada, 2000*, poz. P51.
- [9] Raftery G.M., Kelly F., Basalt FRP rods for reinforcement and repair of timber, *Composites: Part B* 2015, 70, 9–19.
- [10] Raftery G.M., Harte A.M., Nonlinear numerical modelling of FRP reinforced glued laminated timber, *Composites: Part B* 2013, 52, 40–50.
- [11] Raftery G.M., Harte A.M., Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate, *Composites: Part B* 2011, 42, 724–735.
- [12] Raftery G.M., Harte A.M., Rodd P.D., Bond quality at the FRP-wood interface using wood-laminating adhesives, *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2009, 29, 101–110.
- [13] PN-EN 14080:2013 Konstrukcje drewniane – Drewno klejone warstwowo i drewno lite klejone warstwowo – Wymagania.
- [14] Szymczak P., Olbryk P., Chołostiakow Sz., Kamińska M., Badanie betonowych belek zbrojonych prętami kompozytowymi, Wyniki badania belek zbrojonych prętami GFRP i BFRP. Sprawozdanie z badań.
- [15] Szymczak P., Olbryk P., Chołostiakow Sz., Kamińska M., Badanie przyczepności prętów kompozytowych GFRP i BFRP do betonu, Wyniki badania próbek zbrojonych prętami GFRP i BFRP. Sprawozdanie z badań.
- [16] Szymczak P., Olbryk P., Chołostiakow Sz., Kamińska M., Badanie prętów kompozytowych, Wyniki badania prętów kompozytowych GFRP i BFRP. Sprawozdanie z badań.

## Study on timber beams reinforced with basalt-epoxy rebars

### ABSTRACT:

Nowadays, the use of fiber composites is becoming more and more common in many areas of construction. Strengthening the structural elements at the production stage using FRP materials gives benefits related

to reducing the dimensions of the structure or the possibility of using larger spans. The strengthening of reinforced concrete elements is very popular, while wooden elements are becoming more and more popular as well. Many works focus on the use of FRP tapes and mats, while research on the use of BFRP rods for wood reinforcement is scarce. In the work, experimental studies of beams made of glued laminated timber reinforced with BFRP basalt–epoxy rods were carried out. The rods have been glued in cross–section in various configurations. The comparison showed a beneficial effect of the use of bars on static work.

**KEYWORDS:**

timber; strengthening; BFRP; composites