

# Ocena doświadczalna i numeryczna belek drewnianych wzmocnionych za pomocą prętów stalowych i kompozytowych

Experimental and numerical evaluation of wooden beams reinforced with steel and composite bars

dr inż. Janusz Broł (ORCID: 0000-0001-7413-1191), Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, dr inż. Agnieszka Wdowiak-Postulał (ORCID: 0000-0003-0022-8534), Katedra Wytrzymałości Materiałów i Analiz Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Świętokrzyska

DOI: 10.5604/01.3001.0054.3606

**Streszczenie:** Zastosowanie prętów kompozytowych i stalowych do wzmocnienia w belkach z drewna klejonego warstwowo stanowi skuteczną technikę zbrojenia, która umożliwia redukcję przekrojów elementów konstrukcyjnych. W pracy przedstawiono wyniki eksperymentalne dotyczące zbrojenia w pełnowymiarowych belkach drewnianych o przekroju poprzecznym 82x162 mm i długości 3650 mm. Przeprowadzono również badania numeryczne za pomocą metody elementów skończonych z uwzględnieniem współczynnika zbrojenia, rodzaju zbrojenia, siły niszczącej, odkształceń czy przemieszczeń wykonane w programie ANSYS. Wyniki z badań doświadczalnych dla belek niewzmocnionych porównano z wynikami dla belek zbrojonych, a następnie określono przyrosty nośności, sztywności, wytrzymałości na zginanie i modułu sprężystości, a ponadto omówiono analizę postaci uszkodzeń. Wyniki pokazały średni wzrost nośności dla belek wzmocnionych prętami stalowymi odpowiednio 56,2 i 45,2% dla belek wzmocnionych prętami bazaltowymi, dla współczynnika zbrojenia w obu przypadkach równym 1,2%. W przeprowadzonej analizie numerycznej otrzymano zadowalającą korelację z wynikami doświadczalnymi, otrzymana różnica zawierała się w przedziale od 4,3 do 10,2%.

**Słowa kluczowe:** belki drewniane, stal, BFRP, pręty, czteropunktowe zginanie, model numeryczny.

**Abstract:** The use of composite and steel bars for reinforcement in glued laminated timber beams is an effective reinforcement technique that allows reducing the cross-sections of structural elements. The paper presents experimental results for reinforcement in full-size wooden beams with a cross-section of 82x162 mm and a length of 3650 mm. Numerical tests were also carried out using the finite element method, taking into account the reinforcement factor, type of reinforcement, destructive force, deformations or displacements performed in the ANSYS program. The results from experimental tests for unreinforced beams were compared with the results for reinforced beams, and then the increases in load capacity, stiffness, bending strength and modulus of elasticity were determined, and the analysis of damage patterns was discussed. The results showed an average increase in resistance for steel-reinforced beams of 56,2 and 45,2% for basalt-reinforced beams, respectively, for a reinforcement factor of 1,2% in both cases. In the numerical analysis, a satisfactory correlation with the experimental results was obtained, the obtained difference was in the range of 4,3 to 10,2%.

**Keywords:** wooden beams, steel, BFRP, rods, four-point bending, numerical model.

## 1. Wprowadzenie

Naturalne materiały, w tym drewno, stają się coraz bardziej atrakcyjne i coraz powszechniej stosowane w budownictwie [1–4]. Drewno jest materiałem odnawialnym i ma wysoką wytrzymałość w stosunku do swojej masy, może być stosowane w różnych elementach konstrukcyjnych, w tym jako belki o dużych rozpiętościach. Z uwagi na niewielki moduł sprężystości drewna przy zginaniu by zapewnić odpowiednią sztywność belki w celu ograniczenia ugięć, wymagane są znaczne przekroje belek drewnianych. Innym problemem,

o którym należy pamiętać, wykorzystując drewno w konstrukcji, to jego naturalne wady (np sęki), zwłaszcza gdy występują w strefie rozciąganej belki. By przeciwdziałać tym problemom i ograniczać wielkości stosowanych przekrojów drewna przy równoczesnym podnoszeniu bezpieczeństwa konstrukcji, podejmowane są różne próby wzmocnienia elementów drewnianych różnymi technikami [5–20]. Najczęściej realizowane techniki wzmocnienia konstrukcji drewnianych, poza zwiększaniem przekroju drewna nakładkami drewnianymi, to wzmocnienia z wykorzystaniem kompozytów włóknistych (FRP) [7–10, 13–18] lub stalowych elementów (zwykle

plyty w strefie rozciąganej ewentualnie w strefie ściskanej) [11–12]. Wzmocnienia elementów drewnianych kompozytami włóknistymi poprawiają nie tylko ich sztywność i nośność, ale również ciągliwość strefy rozciąganej belek. Poza tym wykorzystanie materiałów FRP eliminuje możliwość korozji, którą można spotkać w przypadku zastosowania prętów stalowych. Dostępne w literaturze przedmiotu przykłady potwierdzają te tezy [13–18, 20].

Zastosowanie włókien bazaltowych [7, 17] jako materiału wzmacniającego wykazuje ogromny potencjał nie tylko z uwagi na to, że to naturalny surowiec, ale także ze względu na korzystną opłacalność ekonomiczną w porównaniu do innych włókien w szczególności włókien węglowych. Mimo to nadal zbrojenia konstrukcji drewnianych są wykonywane głównie z wykorzystaniem stali, w formie blach, płaskowników, płyt (najczęściej stosowane), prętów [19] lub cięgien [21].

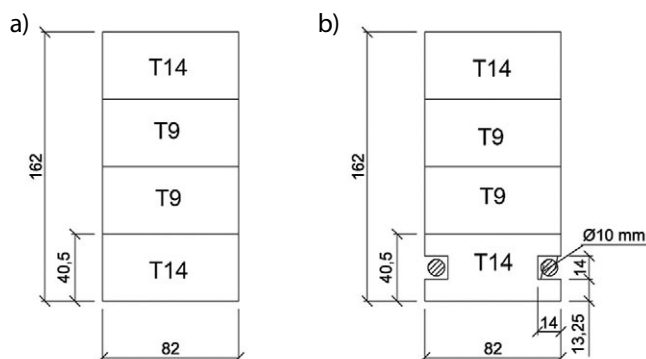
Metodologia obliczania belek z drewna klejonego warstwowo zbrojonych prętami stalowymi i kompozytowymi w literaturze jest słabo opisana. Można zauważyć, że największą przeszkodą, która powoduje, że projektanci wahają się przed zastosowaniem niektórych z tych materiałów stanowi brak wiedzy na temat ich pracy statycznej [21]. W modelowaniu numerycznym (MES) natomiast największą trudność sprawia dobranie odpowiednich parametrów materiałowych, etapów zniszczenia czy też określenie wewnętrznych zależności między właściwościami mechanicznymi wynikającymi z niejednorodności i anizotropii drewna.

Poniżej w artykule przedstawiono własne badania doświadczalne i numeryczne belek wzmocnionych prętami stalowymi i belek wzmocnionych prętami bazaltowymi w porównaniu do belek niewzmocnionych. Jako materiał wzmacniający wykorzystano pręty stalowe i pręty bazaltowe o takiej samej ilości i tej samej średnicy. Wykonano porównanie nośności i sztywności badanych rozwiązań. Przedstawiono również porównanie wyników badań doświadczalnych z badaniami numerycznymi wykonanymi w programie Ansys, belek niewzmocnionych i wzmocnionych prętami stalowymi oraz belek wzmocnionych prętami bazaltowymi. Głównym celem badań doświadczalnych stanowiło określenie efektywności zastosowanego wzmocnienia, natomiast analizy numeryczne wykonane w programie Ansys były próbą oceny możliwości wykorzystania tego oprogramowania do analizy wzmacnianych konstrukcji.

## 2. Materiały

### 2.1. Drewno

Wszystkie belki do badań przygotowano ze świerkowego drewna klejonego warstwowo klasy GL24c (warstwy zewnętrzne – T14, warstwy wewnętrzne – T9). Badania doświadczalne zostały przeprowadzone na belkach o wymiarach przekroju poprzecznego 82x162 mm i długości 3650 mm. Przekroje przygotowanych do badań belek pokazano na rysunku 1.



**Rys. 1.** Przekrój belek do badań; a) niewzmocnionej NW, b) wzmocnionej stalą (S) lub prętą BFRP (B)

Średnia gęstość i wilgotność wynosiły odpowiednio 472 kg/m<sup>3</sup> (odchylenie 21 kg/m<sup>3</sup>) i 12,54% (odchylenie 1,22%). Wilgotność mierzono zgodnie z normą EN 13183-1:2002 [22].

### 2.2. Pręty stalowe i BFRP

Do wzmocnienia belek drewnianych zastosowano pręty stalowe i BFRP. W dziewięciu belkach wykonano poziome nacięcia (rys.1b) o długości 3300 mm, w których następnie umieszczano pręty stalowe lub BFRP. Pręty stalowe i BFRP o średnicy 10 mm przetestowano doświadczalnie na rozciąganie zgodnie z normą ASTM D3039 [23]. Odształcenia odczytano za pomocą ekstensometru mechanicznego o ustalonej bazie pomiarowej typu „Demec”. Podczas badań sprawdzono wytrzymałość na rozciąganie, moduł Younga, a następnie porównano je z danymi podanymi w karcie katalogowej producenta. Średnie wartości z badań doświadczalnych podano w tabeli 1.

**Tabela 1.** Właściwości mechaniczne prętów stalowych i BFRP

Typ	Średnica (mm)	Siła niszcząca (kN)	Wytrzymałość na rozciąganie (MPa)	Moduł Younga (GPa)
Stal S355J2	10	28.55	525	225
BFRP	10	64.22	1422	65.23

### 2.3. Klej epoksydowy

Do zespolenia pręta bazaltowego oraz stalowego z drewnem zastosowano dwuskładnikowy, bezrozpuszczalnikowy klej epoksydowy z utwardzaczem aminowym typu S&P Resin 55 HP [24]. Po umieszczeniu prętów w przygotowanych wcześniej nacięciach oraz ich naprężeniu w celu uzyskania ich prostoliniowości nacięcia wypełniono klejem epoksydowym. Klej utwardzono przez 7 dni w temperaturze pokojowej. Wstępne naprężenie prętów wykonano za pomocą nakrętek i podkładek stalowych osadzonych na zagwintowanych końcach prętów. Pręty były zakotwione poprzez podkładki i nakrętki do czoła belki. W trakcie naprężania kontrolowano wydłużalność prętów na podstawie liczby

obrotów nakrętki. Wielkości wstępnego naprężenia prętów na podstawie ich wydłużenia oszacowano na poziomie 10 MPa. Właściwości mechaniczne kleju epoksydowego badano na podstawie ASTM D695 [25] i D638 [26]. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 2.** Właściwości mechaniczne kleju epoksydowego

Właściwości mechaniczne	Badania doświadczalne	Badania producenta [24]
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	129.54	≥ 100
(odchylenie standardowe) [MPa]	4.23	-
Moduł Younga [MPa]	3450.26	≥ 3200
(odchylenie standardowe) [MPa]	4.89	-

### 3. Badania doświadczalne

Do badań wytrzymałościowych na zginanie przygotowano po 3 belki na każdą serię (seria niewzmocniona NW, seria S – pręty stalowe, seria B – pręty bazaltowe) belek niewzmocnionych i wzmocnionych. Łącznie dziewięć belek poddano próbie czteropunktowego zginania, zgodnie z normą PN EN 408 [27]. Badania pod obciążeniem doraźnym na zginanie przeprowadzono przy rozpiętości między podporami wynoszącym 3000 mm i odległości między obciążeniami 1000 mm. Obciążenie przykładano statycznie aż do zniszczenia za pomocą siłowników hydraulicznych. Pionowe przemieszczenie belek rejestrowano za pomocą trzech czujników mechanicznych. Wytrzymałość na zginanie  $f_m$  obliczono ze wzoru:

$$f_m = \frac{3Fa}{bh^2} \quad (1)$$

gdzie:

$f_m$  – wytrzymałość na zginanie [N/mm<sup>2</sup>],

$F$  – obciążenie [N],

$a$  – odległość miejsca przyłożenia siły od najbliższej podpory [mm],

$b$  – szerokość elementu w badaniu na zginanie lub wymiar mniejszego boku przekroju [mm],

$h$  – wysokość elementu w badaniu na zginanie lub wymiar większego boku przekroju [mm].

Globalny moduł sprężystości  $E_{m,g}$  wyznaczono za pomocą następującego wzoru:

$$E_{m,g} = \frac{3al^2 - 4a^3}{2bh^3 \left( \frac{2(w_2 - w_1)}{F_2 - F_1} - \frac{6a}{5Gbh} \right)} \quad (2)$$

gdzie:

$E_{m,g}$  – ogólny moduł sprężystości przy zginaniu [MPa],

$l$  – moment bezwładności przekroju [mm<sup>4</sup>],

$a$  – odległość miejsca przyłożenia siły od najbliższej podpory [mm],

$l$  – rozpiętość w osiach podpór belki [mm],

$w_1$  – ugięcie przy  $F_1$  [mm],

$w_2$  – ugięcie przy  $F_2$  [mm],

$F_1$  – przyłożone obciążenie przy 10% szacowanego obciążenia maksymalnego [N],

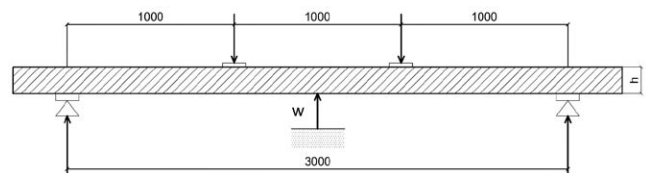
$F_2$  – przyłożone obciążenie przy 40% szacowanego obciążenia maksymalnego [N],

$G$  – moduł odkształcenia postaciowego [MPa],

$b$  – szerokość belki [mm],

$h$  – wysokość belki [mm].

Schemat obciążenia przedstawiono na rysunku 2.



**Rys. 2.** Schemat badawczy według PN-EN 408+A1:2012 [27]

### 4. Modelowanie numeryczne

Trójwymiarowe modele numeryczne zostały zbudowane przy użyciu oprogramowania ANSYS 16.0 przy wykorzystaniu modułu Static Structural, opartego na metodzie elementów skończonych – MES. Modele geometryczne belek wykonano w programie CATIA V5 jako złożenie składające się następujących elementów: bloków stanowiących podpory i punkty przyłożenia sił obciążających, lamel, prętów wzmacniających oraz kleju wypełniającego przestrzeń pomiędzy lamelą a prętem, jak i między lamelami. Siatkę elementów skończonych złożono z elementów heksa- i tetragonalnych. Lamelle i podpory zamodelowano jako elementy heksagonalne o wymiarze równym 10 mm. Pręty oraz klej epoksydowy zdefiniowano jako elementy tetragonalne o wielkości równej 5 mm. Połączenie klejone między kolejnymi lamelami zostało uwzględnione w analizie poprzez połączenie typu „Bonded”. Każda lamela została zamodelowana jako oddzielny element (rys. 3).

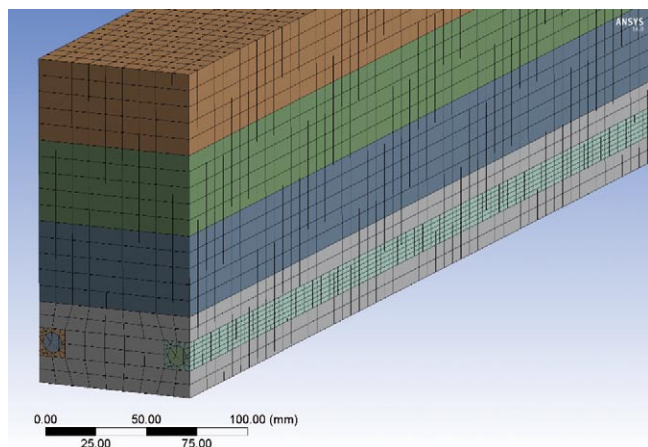
Celem tej analizy numerycznej było wykonanie symulacji zachowania się belek zbrojonych przy zginaniu po wprowadzeniu prętów stalowych i bazaltowych w strefie rozciąganej. Podczas modelowania numerycznego analizowano belki drewniane o wymiarach przekroju poprzecznego 82x162 mm (rys. 1) i długości 3650 mm. Modele numeryczne określano na podstawie wyników dziewięciu badanych belek, trzech bez zbrojenia i sześciu ze zbrojeniem. Właściwości mechaniczne wprowadzone do programu ANSYS pokazano w tabeli 3.

### 5. Wyniki badań doświadczalnych i numerycznych

Wyniki badań doświadczalnych belek niewzmocnionych, wzmocnionych prętami stalowymi (seria S) i prętami

**Tabela 3.** Właściwości mechaniczne materiałów

Materiał	MOE (MPa)			Współczynnik Poissona			G (MPa)		
	X	Y	Z	X	Y	Z	XY	YZ	XZ
Lamela KS	10600	350	350	0.54	0.027	0.54	630	63	630
Lamela KG	8500	281	281	0.54	0.027	0.54	440	44	440
Klej epoksydowy	3450	104.19	104.19	0.3	0.015	0.3	-	-	-
Stal	225000	7442.94	7442.94	0.25	0.0125	0.25		8000	80000
BFRP	65230	2159.90	2159.90	0.19	0.0095	0.19	-	-	-



**Rys. 3.** Model belek wzmocnionych

bazaltowymi (seria B) przedstawiono w tabeli 4. Zastosowanie prętów BFRP do wzmocnienia belek spowodowało zwiększenie nośności o 45,2%, natomiast wykorzystanie prętów stalowych zwiększyło nośność o 56,2% w porównaniu do belek niezbrojonych. Stwierdzono również ograniczenie wielkości ugięć dla belek wzmocnionych. Belki wzmocnione stalą czy BFRP w początkowym etapie obciążenia pracowały w zakresie liniowo – sprężystym. W zakresie ugięć dopuszczalnych wynoszących  $l/300 = 10$  mm, stwierdzono wzrost dopuszczalnej nośności o 12 i 28% odpowiednio do belek wzmocnionych prętami bazaltowymi i belek wzmocnionych prętami stalowymi, w porównaniu do belek niewzmocnionych.

Obserwując postacie zniszczenia belek niewzmocnionych, zaobserwowano, że zniszczenie następowało w bezpośrednim sąsiedztwie występowania wad drewna (w szczególności sęków) po stronie rozciąganej belki. W trakcie badania belek wzmocnionych zaobserwowano, że istotnie zmieniła się postać zniszczenia. Zastosowanie prętów stalowych lub bazaltowych skutecznie ograniczało wpływ wad drewna



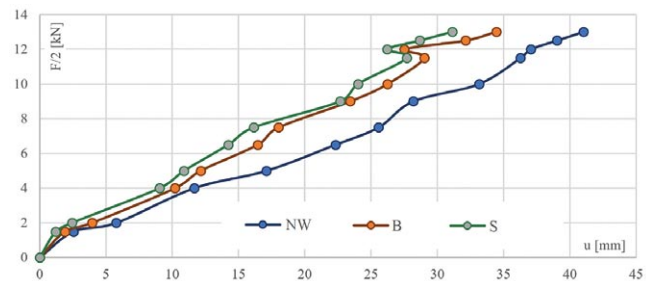
**Rys. 4.** Postać zniszczenia belki wzmocnionej prętami BFRP (B)

zlokalizowanych w dolnej części belki (po stronie włókien rozciąganych) na nośność. W trakcie obserwacji badania belek wzmocnionych zauważono wyraźne uplastycznienie się drewna w strefie ściskanej belki (rys. 4), a dopiero po chwili następowało zniszczenie belki wskutek odspojenia się prętów wzmocniających.

**Tabela 4.** Wyniki badań doświadczalnych

Rodzaj wzmocnienia	Wytrzymałość na zginanie (MPa)	Globalny moduł sprężystości (GPa)	Ugięcie przy sile maksymalnej (mm)	Wzrost wytrzymałości [%]
Niewzmocnione – NW	23,70	10,6	44,1	-
wzmocnione stalą – S	37,0	12,2	38,9	56,2
wzmocnione BFRP – B	34,4	11,9	42,4	45,2

Podsumowując badania doświadczalne, można stwierdzić, że dla wszystkich badanych belek, eksperymentalne badania na zginanie wykazały, że zastosowanie prętów BFRP lub stalowych jako wzmocnienia, połączonego klejem epoksydowym z drewnem, zwiększa nośność i sztywność belki oraz ogranicza wpływ wad drewna (w szczególności tych zlokalizowanych w strefie rozciąganej belek) na nośność belek. Przeprowadzone badania numeryczne obejmowały sprawdzenie oraz porównanie ugięć elementów belkowych niezbrojonych z elementami zbrojonymi w analizie laboratoryjnej i numerycznej. Wyniki porównawcze zamieszczono w tabeli 5.



**Rys. 5.** Krzywa „obciążenie – przemieszczenie”, wyniki uzyskane dla badań doświadczalnych

## 6. Podsumowanie

W pracy opisano eksperymentalne i numeryczne badania wpływu wzmocnienia prętami stalowymi i prętami BFRP na pracę statyczną zginanych belek z drewna klejonego warstwowo, z których można wyciągnąć poniższe wnioski.

- Wykorzystanie prętów stalowych lub bazaltowych zwiększa nośność i sztywność belek. W przedstawionych badaniach zastosowanie prętów BFRP spowodowało zwiększenie nośności belki o 45,2%, natomiast zastosowanie prętów stalowych spowodowało zwiększenie nośności o 56,2%.

- Porównując badania wykonane z wykorzystaniem analiz numerycznych wykorzystujących metody elementów skończonych z badaniami doświadczalnymi stwierdzono zadawalającą korelację wyników, otrzymana różnica zawierała się w przedziale od 4,3 do 10,2%, co w przypadku drewna, które jest materiałem niejednorodnym, jest według autorów zadawalającym rezultatem. Wymaga to jednak dalszych prac, bo właściwe określenie parametrów materiałowych drewna w analizach numerycznych umożliwi w przyszłości znaczne ograniczenie wykonywania kosztowych badań doświadczalnych.

- W trakcie badań belek niewzmocnionych zaobserwowano, że główną przyczyną niszczenia belek były występujące wady drewna, głównie sęki. Obecność sęków czy odchylenia włókien miały istotny wpływ na propagację pęknięć. Zastosowanie wzmocnienia skutecznie ograniczyło wpływ wad drewna zlokalizowanych w strefie rozciąganej belek. Podsumowując, można stwierdzić, że wzmocnianie prętami stalowymi lub prętami BFRP z wykorzystaniem kleju epoksydowego do ich zespolenia w belkach z drewna nie tylko zwiększa nośność i sztywność wzmocnionych belek, ale także poprawia bezpieczeństwo szczególnie w przypadku belek wykonanych z drewna gorszej jakości. Wady drewna lub uszkodzenia zlokalizowane w strefie rozciąganej belek nie wpływają istotnie na nośność belek. Zarówno pręty stalowe, jak i kompozytowe skutecznie „uciągają” tę strefę.

**Tabela 5.** Porównanie wyników doświadczalnych i numerycznych

Rodzaj wzmocnienia	Procent wzmocnienia (%)	Badania doświadczalne, siła niszcząca (kN)	Badania doświadczalne, ugięcie maks. (mm)	Badania numeryczne, ugięcie maks. (mm)	Różnica (%)
niewzmocnione	0,00	34,00	44,1	42,2	4,3
wzmocnione prętami bazaltowymi	1,22	49,34	42,4	38,3	9,7
wzmocnione prętami stalowymi	1,22	53,11	38,9	35,3	10,2

### BIBLIOGRAFIA

- Christoforo A. L., Gomes A. F. F., Arroyo F. N., Mascarenhas F. J. R., dos Santos H. F., Topolnani L., Akasaki J. L., Reinforcement of Timber Beams with Steel Bars: Parametric Analysis Using the Finite Element Method. *Buildings* 12/2022, str. 1036. <https://doi.org/10.3390/buildings12071036>
- We Y., Zhou M. Q., Chen D. J., Flexural behaviour of glulam bamboo beams reinforced with near-surface mounted steel bars, *Materials Research Innovations* 2015, 19, S1-98-S1-10
- Fiorelli J., Rempe N., Molina J. C., Dias A. A., Natural Fiber-Reinforced Polymer for Structural Application, In *Agricultural Biomass Based Potential Materials*, Springer: Cham, Switzerland, 2015, str. 435-449
- Allam S. M., Shoukry M. S., Rashad G. E., Hassan A. S., Evaluation of tension stiffening effect on the crack width calculation of flexural RC members, *Alexandria Engineering Journal* 52, 2013, str. 163-173
- Yang H., Liu W., Lu W., Zhu S., Geng Q., Flexural behavior of FRP and steel reinforced glulam beams: Experimental and theoretical evaluation, *Construction and Building Materials* 106, 2016, str. 550-563
- Vecchi C., Colajanni S., Deletis R., Catanese A., Iudicello S., Reinforced glulam: An innovative building technology, *International Journal for Housing Science its Applications*, 32, 2008, str. 207-221
- Wdowiak A., Brol J., Effectiveness of Reinforcing Bent Non-Uniform Pre-Stressed Glulam Beams with Basalt Fibre Reinforced Polymers Rods, *Materials* 12/2019, str. 3141
- Brol J., Wdowiak-Postulak A., Old Timber Reinforcement with FRPs, *Materials* 12/2019, str. 4197
- Wdowiak-Postulak A., Basalt Fibre Reinforcement of Bent Heterogeneous Glued Laminated Beams, *Materials* 14, 2020, str. 51
- Wdowiak-Postulak, A. Natural Fibre as Reinforcement for Vintage Wood. *Materials* 2020, 13, str. 4799
- 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* 305, 2023, str. 116479
- Wdowiak-Postulak A., Wieruszewski M., Bahleda F., Prokop J., Brol J., Fibre-Reinforced Polymers and Steel for the Reinforcement of Wooden Elements – Experimental and Numerical Analysis, *Polymers* 15, 2023, str. 2062, <https://doi.org/10.3390/polym15092062>
- Al-deen S., Ranzi G., Vrcelj Z., Shrinkage effects on the flexural stiffness of composite beams with solid concrete slabs: An experimental study, *Engineering Structures* 33(4)2011, str. 1302-1315, DOI 10.1016/j.engstruct.2011.01.007
- Al-dee, S., Ranzi G., Vrcelj Z. (). Full-scale long-term and ultimate experiments of simply-supported composite beams with steel deck. *Journal of Constructional Steel Research Engineering Structures* 67(10)2011, str. 1658-1676, DOI 10.1016/j.jcsr.2011.04.010
- Zhao X. B., Zhang F. L., Xue J. Y., Ma L. L., Shaking table tests on seismic behavior of ancient timber structure reinforced with CFRP sheet, *Engineering Structures*, 197, 2019, str. 109405.1-109405.16, DOI 10.1016/j.engstruct.2019.10940
- Ghanbari-Ghazijahani T., Russo T., Valipour H. R., Lightweight timber I-beams reinforced by composite materials, *Composite Structures* 233, 2019, str. 111579
- Raftery G. M., Kelly F., Basalt FRP rods for reinforcement and repair of timber, *Composites Part B Engineering*, 70, 2015, str. 9-19
- Luca V., Marano C., Prestressed glulam timbers reinforced with steel bars, *Construction and Building Materials*, 30, 2012, str. 206-217
- Soriano J., Pellis B. P., Mascia N. T., Mechanical performance of glued-laminated timber beams symmetrically reinforced with steel bars, *Composite Structures* 150, 2016, str. 200-207
- McConnell E., McPolin D., Taylor S., Post-tensioning of glulam timber with steel tendons, *Construction and Building Materials*, 73, 2014, str. 426-433
- Donadon B. F., Mascia N. T., Vilela R., Trautwein L. M., Experimental investigation of glued-laminated timber beams with Vectran-FRP reinforcement, *Engineering Structures* 202, 2019, str. 109818
- Moisture content of a piece of sawn timber – Part 2: Determination of moisture content using an electrical resistance moisture meter; PN EN 13183-2:2002; Polish Standards Institute: Warsaw, Poland, 2004
- Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Material, ASTM D3039, ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2014
- <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=%5E26P+Resin+55+HP+>
- Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics; ASTM D695, ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2014
- Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM D638; ASTM: West Conshohocken, PA, USA, 2014
- PN-EN 408+A1:2012, Timber Structures – Structural Timber and Glued Laminated Timber – Determination of Some Physical and Mechanical Properties, Polish Committee for Standardization: Warsaw, Poland, 2012