

Marlena Rajczyk, Bartłomiej Stachecki

PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH WZMACNIANIA BELEK Z DREWNA KLEJONEGO ZBROJENIEM W POSTACI PRĘTÓW

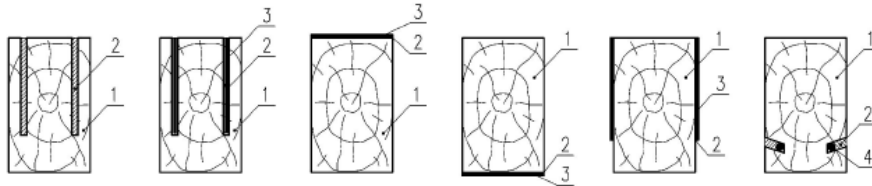
Wprowadzenie

Opatentowanie rozwiązania dla drewna klejonego warstwowo nastąpiło w 1906 r. jako tzw. „system dźwigarów Hetzera”, nazwa pochodzi od nazwiska autora rozwiązania O. Hetzera, ale pierwsze użycie belek klejonych warstwowo w budownictwie wykorzystano w konstrukcji dachowej hali audytorium w Bazylei już w 1893 r. [1]. Dopiero w II połowie XX w. dzięki zwiększeniu efektywności suszenia, sortowania oraz klejenia i połączenia lameli za pomocą złączy palcowych otrzymano pierwotny wzór elementu konstrukcyjnego, który jest stosowany obecnie. Jednoczesne odkrycie włókien sztucznych i wykorzystanie ich w procesie produkcji materiałów kompozytowych umożliwiło efektywniejsze wykorzystanie przekrojów drewnianych i komponowanie belek zbrojonych już na etapie produkcji. Równie ważny wpływ na współpracę obu materiałów miało wprowadzenie z początkiem XXI w. nowych generacji klejów przede wszystkim z grupy żywic melaminowo-mocznikowo-formaldehydowych (MUF) oraz poliuretanowych (PUR) i epoksydowych. Nowoczesne technologie klejenia zapewniają spoiny o wysokiej wytrzymałości i wodoodporności, wydatnie rozszerzając zakres możliwości zastosowań klejonego drewna w różnych dziedzinach budownictwa [2].

1. Celowość wzmocnienia belek drewnianych

Belki z drewna klejonego warstwowo są obecnie powszechnie stosowane w budownictwie z uwagi na ogromne zalety, wynikające m.in. z wysokich parametrów wytrzymałościowo-konstrukcyjnych oraz odporności ogniowej. Duża swoboda w realizacji projektów architektonicznych pozwala na stosowanie drewna w miejscach, gdzie zastosowanie innych materiałów budowlanych jest technicznie niemożliwe lub ekonomicznie nieopłacalne. Dodatkowo daleko posunięta prefabrykacja rozwiązań pozwala uzyskać znaczną oszczędność czasu.

W literaturze można spotkać opisy licznych sposobów wykorzystania materiałów stalowych i kompozytowych do wzmocnienia belek drewnianych. Dość szeroko problem ten badał Jasieńko [3-5]. Na rysunku 1 przedstawiono przekroje poprzeczne drewnianych belek wzmocnionych stalą i żywicą. Jak możemy zaobserwować, część z nich w ogóle nie posiada metalowych wtrąceń, a jedynie iniekcją żywicy. Wszystkie przedstawione belki zyskały na wzroście nośności, z tym że dla poniższych rozwiązań najbardziej efektywne okazało się zbrojenie odpowiednio wąskimi blachami stalowymi zamocowanymi na boku.



Rys. 1. Przykłady wzmocnienia drewna stalą i żywicą epoksydową [6]:
1 - belka drewniana, 2 - kompozycja epoksydowa, 3 - blacha stalowa, 4 - pręt

Szeroki i szybki rozwój inżynierii materiałowej kompozytów znacząco unowocześnił rynek i pozwolił na wprowadzenie tych materiałów już nie tylko w postaci dekoracyjno-użytkowej (np. panele tarasowe, elewacyjne itp.), ale również jako aktywne zbrojenie. Zbrojenie materiałami polimerowymi pozwala na uzyskiwanie większych rozpiętości oraz redukuje ciężar konstrukcji. Jedno z najbardziej popularnych i sprawdzonych rozwiązań w ostatnich latach to zbrojenie w postaci taśm FRP głównie z węglowych i szklanych kompozytów włóknistych. Taśmy (często sprężone) można umieszczać pomiędzy lamelami w procesie produkcji, możliwy jest również ich montaż do konstrukcji istniejącej na spodzie elementu wbudowanego w określoną strukturę (rys. 2). Liczne badania potwierdziły, iż zastosowanie zbrojenia w postaci taśm FRP zwiększa nośność, jednocześnie ujednolicając cechy wytrzymałościowe przekrojów [6].



Rys. 2. Wzmocnienie krokwi przez doklejenie taśm z włókna węglowego (CFRP) [6]

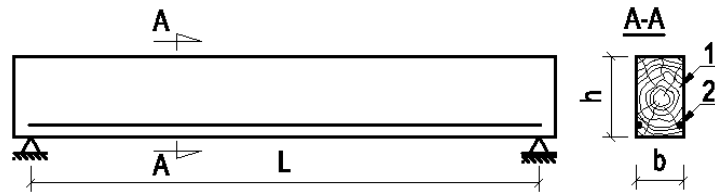
Na dodatkową uwagę zasługuje nowoczesne rozwiązanie zaproponowane w pracy [7]. Zbrojenie belek drewnianych w postaci odpowiednio przygotowanych (splcionych) oraz zakotwionych sznurów wykonanych z włókien aramidowych jest w stanie przenosić naprężenia, podobnie jak ma to miejsce w przypadku taśm kompozytowych. Rozwiązanie znajduje się obecnie w sferze badań wstępnych, ale pierwsze analizy numeryczne pozwoliły na stwierdzenie, iż zbrojenie bardzo korzystnie wpływa na wzrost nośności belki.

2. Zbrojenie belek prętami stalowymi

W elementach drewnianych, poddanych przede wszystkim pracy momentów zginających, o nośności belki decyduje zazwyczaj strefa rozciągania - wynika to przede wszystkim z różnych parametrów wytrzymałościowych drewna. Naprężenia ściskające dla drewna sosny w stanie powietrzno suchym sięgają zazwyczaj ok. 50% wytrzymałości na rozciąganie. Dodatkowo wady drewna, takie jak sęki czy skręt włókien, mają stosunkowo mały wpływ na wytrzymałość drewna przy ściskaniu, w porównaniu na tę samą wartość przy rozciąganiu [8]. Zatem odpowiednie wzmocnienie strefy rozciąganej pozwala na optymalizację konstrukcji i jej efektywniejsze wykorzystanie.

Chronologicznie, nowatorskie próby komponowania drewna z prętami stalowymi miały miejsce na świecie w latach 40. XX w. Pierwsze krajowe prace na temat wzmocniania konstrukcji drewnianych prętami przedstawił Ganowicz [4]. Wykorzystał on trzy serie belek o zbrojeniu stalowym $\phi 6$ mm lub $\phi 8$ mm wklejonym 2 cm od krawędzi rozciąganej belki swobodnie podpartej. I serię belek potraktowano jako „belki świadkowe” - czyli elementy z samego drewna, niezbrojone, pomagające określić realną ocenę wzmocnienia oraz parametry obciążeń do badań pozostałych belek. Kolejna seria została wzmocniona z użyciem wyżej wymienionych prętów z zastosowaniem kleju kazeinowego. Tak samo zazbrojono III serię belek, używając jednak kleju fenolowo-formaldehydowego - ponadto belki z tej serii użyto do opracowania pracy modelu reologicznego przy odkształceniach długotrwałych. Końcowe wnioski z badań uzasadniły celowość zastosowania zbrojenia w celu zmniejszenia ugięcia i poprawy jednorodności belek, ale z zastosowaniem stopnia zbrojenia minimum 1%. Autorskie badania wykorzystano także do budowy w 1977 r. w Poznaniu hali magazynu, w której jako płatwie dachu zastosowano belki zbrojone prętami w sposób jak dla II serii badań pilotażowych. Praca elementów oraz ich ugięcia zgodne były z przewidywaniami i wnioskami z próbnych badań.

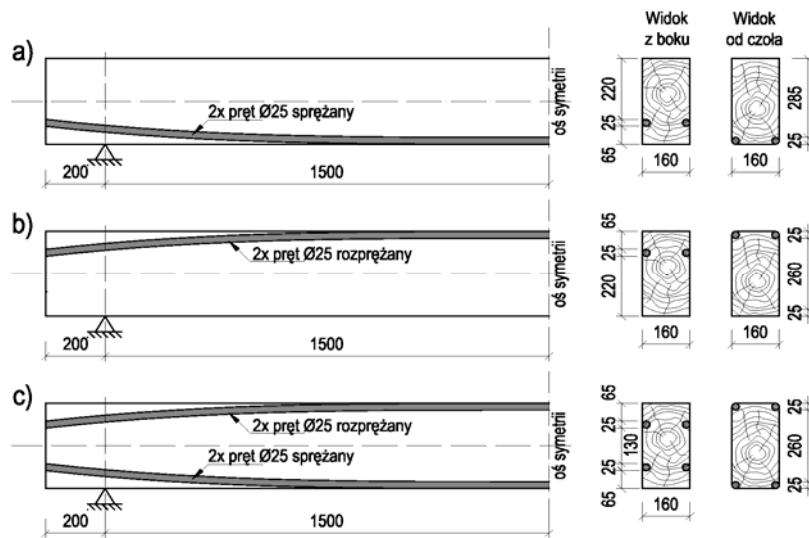
Zbrojeniem belek prętami stalowymi, szczególnie w kontekście napraw istniejących konstrukcji, zajmował się szeroko w swoich opracowaniach Jasieńko [8]. W badaniach zaproponował wklejenie na całej rozpiętości belki w wykonane specjalnie do tego celu kieszenie prętów stalowych żebrowanych o klasie minimum A-II (rys. 3). Według autora, analiza wyników badań wykazuje, że wklejenie w strefę rozciąganą prętów pozwala dla optymalnego stopnia zbrojenia uzyskać ugięcie niższe nawet o 60%. Stopień zbrojenia wg autora powinien wynosić 1,5% dla zbrojenia pojedynczego i 3% dla zbrojenia podwójnego [9].



Rys. 3. Schemat statyczny i przekrój belki wzmocnionej klejonymi prętami [5]:
1 - drewno, 2 - pręt i kompozycja klejowa

W połowie lat 70. XX w. narodziła się koncepcja (znana już dla elementów żelbetowych) zbrojenia belek drewnianych za pomocą sprężonych prętów stalowych, co w praktyce oznaczało przeciwstawienie obciążeń konstrukcji obciążeniom powstałym w wyniku sił rozciągających (lub ściskających) w prętach zbrojenia. Stal użyta do sprężania powinna nosić cechy stali wysokowytrzymałościowej. Pierwsze próby sprężania realizował w latach 60. XX w. Bohannon [10]. Do badania użył sześciu belek porównawczych (niezbrojonych) oraz sześciu sprężonych. Konstrukcja sprężenia polegała na zamocowaniu jedynie na końcach belek w specjalnie wykonanym otworze stalowej struny. Stosunek wzrostu nośności w porównaniu obu grup belek wyniósł od 1,03 do 1,52. Podobne badania podjął Peterson, z tym iż zastosował on sprężoną taśmę stalową przyklejoną na całej długości belki w strefie rozciąganej. Spowodowało to, oprócz wzrostu sztywności (o 76%), także wzrost nośności (o 26%) [11]. Krajowe badania w tym zakresie prowadzili Gano-wicz i in. [12]. Innowacyjne prace badawcze przedstawili Cyruliński i in. [13]. Do badań użył czterech belek swobodnie podpartych o rozpiętości 3 m, wykonanych w skali naturalnej - przekrój poprzeczny 16 cm x 31 cm. Pierwsza z nich, niezbrojona, pozwalała porównywać wyniki. Kolejna, zbrojona sprężaną stalą jedynie w strefie rozciąganej. Następna belka traktowana jako rozprężana, zazbrojona została w strefie ściskanej, a ostatnia wykonana z połączenia obu technologii (czyli belka sprężano-rozprężana) (rys. 4), zbrojona została w strefie ściskanej i rozciąganej. Do zbrojenia użyto prętów Macalloy o średnicy 25 mm umiejscowionych w specjalnie wytrasowanych kanałach na boku belki. Zakrzywienie tras prętów umożliwiło zwiększenie mimośrodowość sił sprężających i rozprężających głównie w miejscu występowania największych ugięć (na środku belki). Belki w badaniu czteropunktowego zginania obciążano siłą aż do zniszczenia. Wnioski końcowe z badań uzasadniają celowość zastosowania sprężenia szczególnie dla belek rozprężanych oraz sprężano-rozprężanych, która przeniosła największą wartość obciążeń - siła niszcząca miała wartość wyższą o 48% w stosunku do belki porównawczej [14].

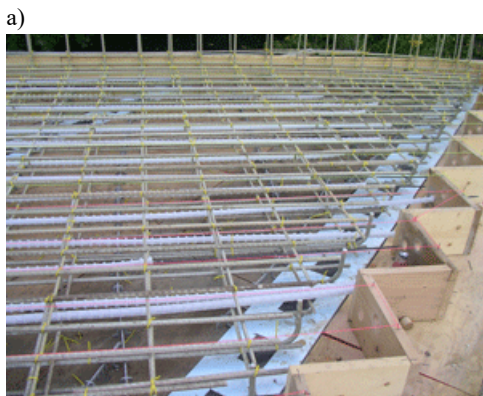
Podsumowując problem sprężania prętów w konstrukcjach drewnianych, należy pamiętać, że w drewnie z upływem czasu zachodzą znaczne zmiany reologiczne, powodując straty siły od wstępnego sprężania i pomniejszając w ten sposób nośność. Oszacowania strat siły podjął się Dziuba, który wyznaczył tę wartość na 25% [15].



Rys. 4. Przebieg trasy prętów sprężających i rozprężających Macalloy w belce zbrojonej:
a) b. sprężana; b) b. rozprężana; c) b. sprężano-rozprężana

3. Zbrojenie belek prętami kompozytowymi

Jak wspomniano we wprowadzeniu, odkrycie materiałów kompozytowych spowodowało dynamiczny rozwój inżynierii materiałowej kompozytów i stałe dążenie do ulepszania ich właściwości. Słuszność wzmocnienia elementów konstrukcyjnych najpierw żelbetowych, a później drewnianych poprzez doklejenie taśm z włókien potwierdziły już liczne badania naukowców na całym świecie. Jednak oferta handlowa kompozytowych materiałów budowlanych stale powiększa swój zakres, tym bardziej celowe jest poszukiwanie nowych możliwości zbrojenia, szczególnie w sytuacji, w której możliwe jest wyeliminowanie wad poprzedniego rozwiązania.



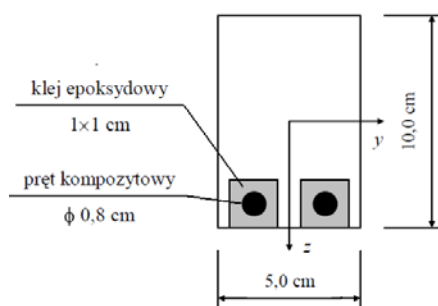
- Rys. 5. Realizacja obiektów inżynierskich z prętów kompozytowych [16]:
a) Floodway Bridge - Winnipeg Manitoba - zbrojenie prętami szklanymi;
b) Southview Bridge Rolla Missouri - zbrojenie prętami węglowymi

Choć pręty kompozytowe jako materiał umożliwiający dozbieranie konstrukcji są stosunkowo nowym produktem, stosowane są już na świecie w licznych konstrukcjach (rys. 5). W porównaniu do typowych prętów stalowych ich niewątpliwą zaletą jest niski ciężar własny przy bardzo wysokich współczynnikach na rozciąganie i ściskanie. Parametry materiałowe wpływają na lepszą przyczepność mieszanki klejowej, a jeszcze bardziej zbliżony (w stosunku do stali) współczynnik rozszerzalności termicznej materiałów wykazuje polepszenie współpracy w zmiennych warunkach atmosferycznych.

3.1. Pręty poliestrowo-szklane

Krajowe prace badawcze z użyciem prętów szklanych sięgają lat 80. XX w. Zespół w składzie Niczyj i Wojtaszewski wykonał samodzielnie pręty prostokątne o przekroju 0,5 cm x 1 cm, korzystając z rowingu szklanego oraz epoksydowej żywicy. Pręty wklejano na spód belki swobodnie podpartej o rozpiętości 1 m i przekroju poprzecznym 4 cm x 6 cm. Badanie dotyczyło pomiarów siły niszczącej oraz zależności siła-odkształcenie w środku rozpiętości. Istotnym wnioskiem z badań, poza oczywistym wzmocnieniem elementu, były wzajemne krytyczne dla nośności relacje w połączeniu belki i zbrojenia, gdyż zniszczenie próbek następowało gwałtownie po utracie przyczepności kleju [17].

Zagadnieniem zbrojenia prętami kompozytowymi belek drewnianych w szczególności z uwzględnieniem właściwości reologicznych drewna zajmował się Socha [18]. W swych pracach przedstawił rozważania teoretyczne oraz przeprowadził badania laboratoryjne belek zbrojonych prętami poliestrowo-szklanymi. Badanie czteropunktowego zginania przeprowadzono dla belki swobodnie podpartej o rozpiętości w osiach podpór 3 m (badania siły niszczącej) i 4,2 m (badania ugięcia przy długotrwałym obciążeniu statycznym) [19]. Na rysunku 6, gdzie przedstawiony jest przekrój poprzeczny zbrojonej belki, uwagę zwraca dość znaczna ilość kleju użyta w belce w stosunku do całego przekroju poprzecznego. Faktem jest, co wykazywali w swych pracach Żaboklicki [20] oraz wspomniany wcześniej Jasińko [9], że odpowiednio wytrzymały klej, szczególnie w sytuacji iniekcji w materiał, może również pomóc w przenoszeniu naprężeń. Parametry prętów kompozytowych użyte do badania przedstawione są w tabeli 1.



Rys. 6. Przekrój poprzeczny belek z doklejonym zbrojeniem kompozytowym [18]

TABELA 1

Porównanie podstawowych parametrów materiałowo-wytrzymałościowych dla prętów stalowych oraz prętów kompozytowych o średnicy 8 mm

Parametr	Rodzaje prętów		
	stalowe	poliesterowo-szklane ¹⁾	epoksydowo-bazaltowe ²⁾
Średnica, mm	8	8	8
Gęstość, g/cm ³	7,85	2,00	1,90
Ciężar 1 mb, g	395	101	96
Wytrzymałość na zginanie, MPa	400÷550	390÷580	1370÷1350*
Wytrzymałość na ściskanie, MPa	290÷440	490÷680	1375÷1615*
Moduł Younga, GPa	210	45	90
* podane widełki parametrów wiążą się z różnorodnością materiału kompozytu (matrycy żywicznej)			
1) produkcja Krośnieńskich Hut Szkła, dane z [18]			
2) katalog producenta EEC group [21]			

Wyniki analizy sił niszczących wykazały wzrost o ok. 146% wartości średniej siły niszczącej dla belki litej o zbliżonych parametrach geometrycznych i niezbrojonej. Wnioski dodatkowe związane są ponownie z kwestią połączenia klejowego. Żywica użyta do badań wykazywała dużą przyczepność do drewna, zaś słabą do prętów. Autor we wnioskach końcowych proponuje więc zastosowanie innego rodzaju kleju lub zwiększenie przyczepności poprzez użycie prętów żebrowanych tak, aby powierzchnia styku obu materiałów zdolna była wytrzymać większe wartości naprężeń.

3.2. Pręty epoksydowo-bazaltowe

Pręty epoksydowo-bazaltowe z uwagi na swą uźebrowaną powierzchnię, wynikającą z wykonania dodatkowego nawoju, oraz dużo wyższe parametry wytrzymałościowe są rezultatem poszukiwań materiału pozwalającego polepszyć wzmocnienie będące efektem współpracy użytego zbrojenia i drewna (rys. 7).



Rys. 7. Widok prętów epoksydowo-bazaltowych połączonych samozaciskową taśmą [21]

Niewątpliwą zaletą prętów są wysokie wartości naprężeń na ściskanie i rozciąganie przy niskiej wadze, co powoduje, że całkowity ciężar konstrukcji ulega zmniejszeniu (tab. 1). Pręty nie przewodzą prądu - mają właściwości dielektryczne i ferromagnetyczne oraz są transparentne dla fal elektromagnetycznych - można je więc z powodzeniem stosować przy budowie konstrukcji, w której unika się niezamierzonego wpływu pola magnetycznego (np. infrastruktura morska, lotnicza, specjalistyczne laboratoria lecznicze). Pręty nie korodują, więc czas pracy konstrukcji ulega znacznemu wydłużeniu, a ponieważ do 80% kompozytu stanowi włókno bazaltowe będące wyrobem naturalnym, rozwiązanie można uznać za proekologiczne, podlegające łatwemu i pełnemu recyklingowi bez negatywnego wpływu na środowisko naturalne i człowieka [22].

Z danych zawartych w tabeli 1 wyraźnie widać korzyści, jakie niesie zastosowanie zbrojenia kompozytowego, szczególnie epoksydowo-bazaltowego, które oprócz dużo niższej wagi wykazuje wyższe wartości granicznych naprężeń. Krajowa literatura nie zawiera jeszcze żadnych badań dotyczących zbrojenia wyżej wymienionymi prętami konstrukcji drewnianych, choć w chwili obecnej pręty te są już z powodzeniem stosowane w zbrojeniu konstrukcji żelbetowych. Niestety, z uwagi na wysoką cenę materiału, nie należy się spodziewać w najbliższym czasie całkowitego wyparcia stali z roli, którą pełni w betonowych elementach konstrukcyjnych.

Podsumowanie

W drewnie klejonym warstwowo poprzez odpowiednie dobieranie posortowanej tarcicy i stosowanie wysokiej jakości klejów wyeliminowano większość wad drewna naturalnego. Proces ten w znaczący sposób wpłynął na zwiększenie nośności przekrojów drewnianych. Nie należy jednak oczekiwać, że elementy klejone w pełni zastąpią stosowane od dawna typowe elementy więźby dachowej w jedno- i wielorodzinnych obiektach mieszkalnych, gdyż najczęściej drewno klejone stosuje się w budownictwie halowym, zarówno przemysłowym, jak i użyteczności publicznej, gdzie zalecana jest duża rozpiętość elementów konstrukcyjnych bez podpór pośrednich. Biorąc pod uwagę bardzo szybki rozwój nowoczesnych struktur materiałowych oraz coraz wyższe wymagania stawiane samym konstrukcjom w zakresie nośności czy odporności na czynniki atmosferyczne, można założyć, że mate-

riały kompozytowe w coraz większym stopniu będą wypierać tradycyjne sposoby zbrojenia, jak chociażby pręty stalowe.

Literatura

- [1] Biliszczuk J., Bień J., Maliszkievicz P., Mosty z drewna klejonego, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2001.
- [2] Krystofiak T., Proszyk S., Lis B., Kleje do produkcji wielkowymiarowych elementów konstrukcyjnych z drewna dla budownictwa, Instytut Technologii Drewna w Poznaniu, Poznań 2007.
- [3] Jasięko J., Naprawa i wzmacnianie zginanych belek drewnianych, Materiały Budowlane 2000, 5, 19-23, 26.
- [4] Ganowicz R. i in., Badania belek z drewna warstwowo klejonego zbrojonego stalą, Inżynieria i Budownictwo 1980, 6, 221-227.
- [5] Jasięko J., Połączenia klejowe w rehabilitacji i wzmacnianiu zginanych belek drewnianych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
- [6] Nowak T., Analiza pracy statycznej zginanych belek drewnianych wzmacnianych przy użyciu CFRP, Rozprawa doktorska, Wrocław 2007.
- [7] Mielczarek Z., Budownictwo drewniane, Arkady, Warszawa 1994.
- [8] Rajczyk M., Jończyk D., Odporność ogniowa belek z drewna klejonego wzmocnionych kompozytami włóknistymi, [w:] Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym, praca zbiorowa pod red. T. Bobki, J. Rajczyka, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2011, 193-201.
- [9] Jasięko J., Opracowanie metod wzmacniania konstrukcji drewnianych przy zastosowaniu żywic syntetycznych, Etap I i II, Raport Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1988.
- [10] Bohannon B., Prestressing Wood Members, Forest Products Journal, University of Wisconsin, December 1962.
- [11] Peterson J., Wood beams prestressed with bonded tension elements, Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 1965.
- [12] Ganowicz R., Dziuba T., Latusek D., Konstrukcje drewniane klejone sprężone stalą, Inżynieria i Budownictwo 1980, 8, 285-290.
- [13] Cyruliński Z., Drewnowski S., Marks W., Zwiększenie nośności belek z drewna klejonego poprzez naprężanie ich ciągniami wzdłuż włókien. Materiały konferencyjne, Wydawnictwo DNK, Sankt Petersburg 2006.
- [14] Cyruliński Z., Ocena celowości wstępnego naprężania ciągniami belek z drewna klejonego, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Wydział Budownictwa, Częstochowa 2006.
- [15] Dziuba T., Pelzanie belki drewnianej sprężonej stalą, I Sympozjum Naukowe Reologia drewna i konstrukcji drewnianych, Poznań-Zielonka 1982, 151-162.
- [16] Materiały informacyjne - Aslan FRP, Hughes Brothers, Inc - 210 N. 13th Street Steward NE USA.
- [17] Niczyj J., Wojtaszewski R., Obliczanie belek drewnianych zbrojonych kompozytem szklano-epoksydowym, Inżynieria i Budownictwo 1979, 5.
- [18] Socha T., Badania belek drewnianych zbrojonych włóknokompozytami, IV Konferencja Naukowa Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych, Szczecin-Swinoujście 1999, 199-204.
- [19] Socha T., Ocena wpływu obciążeń długotrwałych na naprężenia i odkształcenia w drewnianych belkach z wklejonym zbrojeniem kompozytowym, praca doktorska, Zielona Góra 2005.
- [20] Żaboklicki A., Wzmacnianie drewnianych stropów zabytkowych metodą inkluzji żywicznych, Inżynieria i Budownictwo 1989, 2, 78-79.
- [21] Materiały katalogowe firmy EEC group dla prętów kompozytowych Comfibertech™.

- [22] Rajczyk M., Stachecki B., Współczesne materiały kompozytowe. Wybrane kierunki rozwoju nowych technologii, [w:] Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym, praca zbiorowa pod red. T. Bobki, J. Rajczyka, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2011, 202-211.

Streszczenie

W artykule przedstawiono przegląd rozwiązań konstrukcyjnych wzmocnienia belek z drewna klejonego warstwowo zbrojeniem w postaci prętów. Szczególną uwagę zwrócono na pręty kompozytowe jako alternatywę dla taśm z włókien kompozytowych i stalowych prętów. Na zakończenie przedstawiono krótką charakterystykę prętów poliestrowo-szklanych i epoksydowo-bazaltowych.

A review of solutions of strengthening glulam beams with rods

Abstract

This paper presents a review of methods of strengthening glulam beams with bars. Particular attention was paid to the composite rods as an alternative to FRP belt and steel rods reinforcement. In conclusion is presented short characterization of polyester-glass and basalt-epoxy rods.