



# Ocena możliwości wzmocnienia elementów drewnianych przez sprężanie taśmami kompozytowymi

Mgr inż. Szymon Ślósarz, Politechnika Lubelska, mgr inż. Tomasz Bartosik, Euro-Projekt

## 1. Wprowadzenie

Drewno jako materiał tani i ogólnodostępny stosowany jest od wieków do prawie wszystkich typów konstrukcji, począwszy od małych budynków gospodarczo-inwentarskich, aż do obiektów okazałych, np. kościołów, gdzie drewno jest budulcem dla całego obiektu lub tylko jego przekrycia. Podstawowym atutem drewna jest niewielki ciężar, co obniża koszty transportu oraz budowy, znacznie ograniczając lub nawet eliminując użycie ciężkich maszyn. To sprawia, że obecnie obserwuje się renesans konstrukcji drewnianych. Wprowadzone współcześnie drewno klejone stało się doskonałym materiałem do konstruowania przekryć o dużych rozpiętościach, np. hal sportowych.

Dla zginanych elementów drewnianych o większych rozpiętościach jednym z newralgicznych stanów granicznych jest stan graniczny ugięcia, narastającego wraz z okresem użytkowania. Nadmierne ugięcia mogą być spowodowane ubytkiem przekroju lub zmniejszeniem sztywności na skutek korozji, ale także pęcznienia drewna przy obciążeniu długotrwałym. Dlatego wzmocnienie elementu drewnianego z uwagi na zginanie jest często ukierunkowane nie tylko na zwiększenie nośności przekroju, ale także zmniejszenie istniejących lub prognozowanych ugięć. W takim przypadku poza wzmocnieniem przekroju zachodzi potrzeba „wyprostowania”, a więc uniesienia belki do góry w środku jej rozpiętości. W przypadku konstrukcji użytkowanych, zazwyczaj wykonuje się to poprzez wyparcie siłownikami, opartymi na murze lub na kotwionych w murze belkach stalowych. Przyjmując, że podobny efekt dać może sprężenie, zaprogramowano badania belek drewnianych, sprężonych przez wstępnie napięte taśmy kompozytowe. Taki sposób redukcji ugięcia dotyczyłby zwłaszcza elementów nowo projektowanych, choć przy opanowaniu technologii możliwy byłby on także w przypadku konstrukcji użytkowanych.

Na wstępie niniejszego artykułu dokonano przeglądu metod wzmocnień konstrukcji drewnianych elementami z materiałów innych niż drewno (głównie elementami stalowymi), kładąc szczególny nacisk na próby sprężania prętami stalowymi i wzmocnianie bierne taśmami kompozytowymi. W literaturze przedmiotu natrafiono jedynie na dwie publikacje opisujące próby sprężenia elementów drewnianych taśmami kompozytowymi [1, 2]. Taką próbę, opisaną dalej,

podjęli również autorzy. W drugiej części artykułu zaprezentowany został plan prac badawczych i pierwsze efekty pilotażowego sprężenia belek z drewna litego.

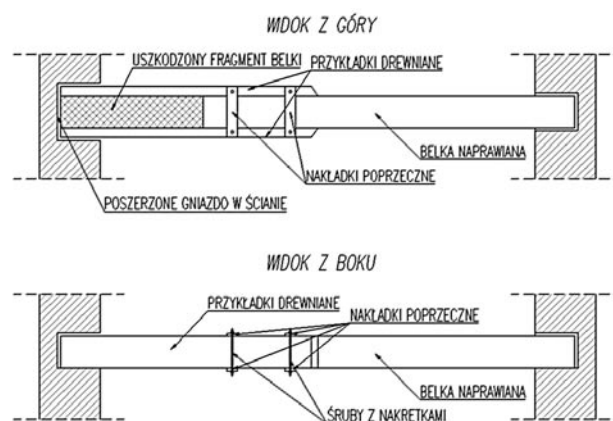
## 2. Przegląd metod wzmocnień elementów drewnianych przy użyciu materiałów tradycyjnych

### 2.1. Wzmocnienia bierne

Elementy istniejące wzmocnia się zazwyczaj, gdy przewiduje się zwiększenie obciążeń (np. obciążeń stropu lub dachu). Wzmocnienia elementów drewnianych dotyczyć mogą strefy zginanej lub strefy ścinania przy podporze. Do wzmocnienia stosowane są elementy drewniane lub stalowe.

Tradycyjnym sposobem wzmocniania istniejących elementów drewnianych jest zwiększenie przekroju poprzecznego przez dołączanie dodatkowych elementów drewnianych, mocowanych za pomocą mechanicznych łączników, najczęściej gwoździ lub śrub (rys. 1). W efekcie zwiększa się wskaźnik wytrzymałości i moment bezwładności przekroju, mogą być więc przeniesione obciążenia przewyższające nośność elementów pierwotnych. Przykładki są mocowane po bokach elementu (najczęściej belki stropowe lub końcówki belek), a nakładki (nadbitki) na górnych i dolnych płaszczyznach.

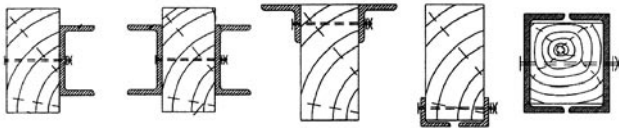
Wzmocniające elementy stalowe najczęściej są mocowane na bocznych płaszczyznach belki drewnianej. Stosuje się



Rys. 1. Wzmocnienie bierne belek drewnianych przy użyciu przykładek drewnianych [3]

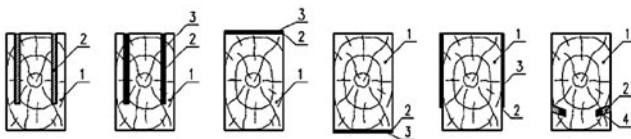


profile walcowane – kątowniki, ceowniki (rys. 2) oraz płaskowniki. Najczęściej elementy stalowe umieszcza się po obu stronach i skręca ze sobą na przelot. Zazwyczaj tego typu wzmocnienia projektuje się w taki sposób, aby dodatkowy element stalowy przenosił moment zginający, zaś element drewniany traktuje się jako niepracujący. Wzmocnienie może być wykonane na całej długości elementu, w celu zwiększenia jego nośności, lub jedynie na fragmencie, aby zastąpić uszkodzoną część przekroju.



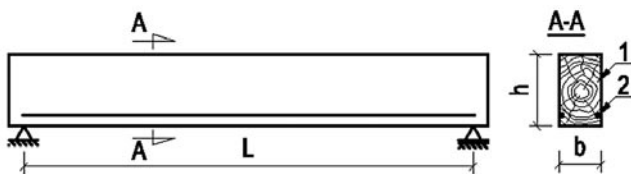
**Rys. 2.** Wzmocnienie bierne belek drewnianych przy użyciu kształtowników stalowych [3]

Wzmacnianie belek drewnianych za pomocą blach i prętów polega na wykonaniu frezu na długości belki, w który wprowadzana jest żywica epoksydowa, a w nią zatapiający pręt stalowy lub blacha. Rozwiązanie to nie zwiększa przekroju i może być przeprowadzone bez naruszenia tej powierzchni belki, która jest uznana za wartościową np. ze względów konserwatorskich. Metodą wklejania elementów stalowych w przekrój można wzmacniać zarówno część rozciągającą (która z reguły decyduje o nośności elementu), jak i ściskaną w strefach podporowych. W pracy [4] zrelacjonowano wyniki badań belek, w których zastosowano omawianą metodę w różnych wariantach (rys. 3). Stwierdzono, że najbardziej korzystne ze względu na wzrost nośności jest doklejenie blach stalowych do bocznych płaszczyzn belek drewnianych.



**Rys. 3.** Wzmocnienie bierne belek drewnianych przy użyciu płaskowników i prętów stalowych [4]: 1 – wzmocniana belka, 2 – kompozycja epoksydowa, 3 – blacha stalowa, 4 – pręt stalowy

Jasienko w swoich pracach [4, 5] szeroko zajął się wzmacnianiem istniejących belek za pomocą zbrojenia prętami stalowymi (rys. 4). Wykorzystując zależności analogiczne jak



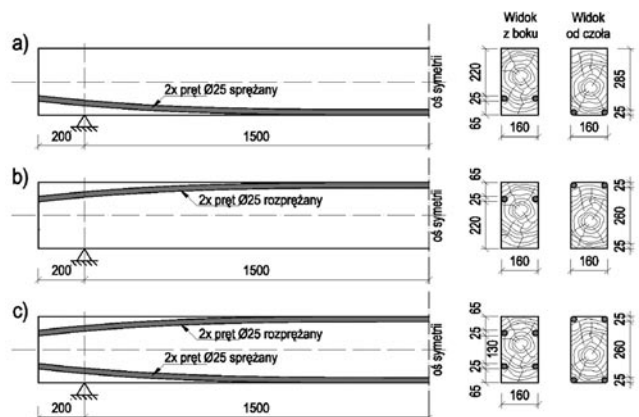
**Rys. 4.** Wzmocnienie bierne belek drewnianych przez zbrojenie prętami wklejanymi na żywicę epoksydową [4]: 1 – wzmocniana belka drewniana, 2 – kompozycja klejowa z prętami zbrojeniowym

w teorii żelbetu wprowadził pręty stalowe do strefy rozciąganej belki drewnianej. Stosując zbrojenie w jednym rzędzie (stopień zbrojenia – 1,5%) oraz w dwóch rzędach (stopień zbrojenia 3%) uzyskał ugięcie o ok. 60% mniejsze niż ugięcie belek niezbrojonych (w przypadku zastosowania większego stopnia zbrojenia).

## 2.2. Wzmocnienia aktywne

W połowie lat 70. dokonano próby przeniesienia technologii sprężania elementów żelbetowych na konstrukcje drewniane – siły sprężające miały przeciwstawić się siłom rozciągającym spowodowanym obciążeniem zewnętrznym. Stal wykorzystywana do sprężania miała być stalą wysokiej wytrzymałości. Sprężenie wykonywano za pomocą drutów, jak również sprężających taśm stalowych przyklejanych od dołu w strefie rozciąganej. Takie sprężenie zastosowane przez Petersona [6] spowodowało wzrost nośności belek (o ok. 26%) oraz wzrost ich sztywności i zmniejszenie ugięć (o ok. 76%) w stosunku do belek niesprężonych.

Podstawowym problemem przy sprężaniu belek drewnianych są straty sprężania. W drewnie, z upływem czasu, zachodzą zmiany reologiczne związane z wysychaniem oraz skurczem drewna, które w znaczący sposób zmniejszają skuteczność sprężenia. Według pracy [7] straty siły sprężającej oscylują w granicach 20–25%, co jest wartością stosunkowo wysoką.



**Rys. 5.** Przebieg tras prętów sprężających i rozprężających w belkach badanych przez Cyrulińskiego [8]: a) belka sprężana, b) belka rozprężana, c) belka sprężano-rozprężana

Próby wprowadzania naprężeń wstępnych do konstrukcji z drewna klejonego dokonał Cyruliński [8]. Była to konstrukcja nie tylko sprężana w strefie rozciąganej, ale dodatkowo rozprężana w strefie ściskanej (rys. 5). Autor badań wprowadził specjalne trasowanie kanałów po bokach belki, zapewniające dostosowanie mimośrodów sił sprężających i rozprężających do wartości spodziewanych naprężeń eksploatacyjnych. Największy wzrost obciążeń niszczących belki sprężano-rozprężanej w stosunku do belki niesprężonej wyniósł 48%.



### 3. Wzmacnianie drewna przy użyciu materiałów kompozytowych

Coraz częściej do wzmocnienia elementów drewnianych stosowane są kompozyty (FRP), w których matryca z żywicy epoksydowej zbrojona jest materiałem włóknistym. W zależności od zastosowanych włókien otrzymuje się kompozyt o różnych parametrach.

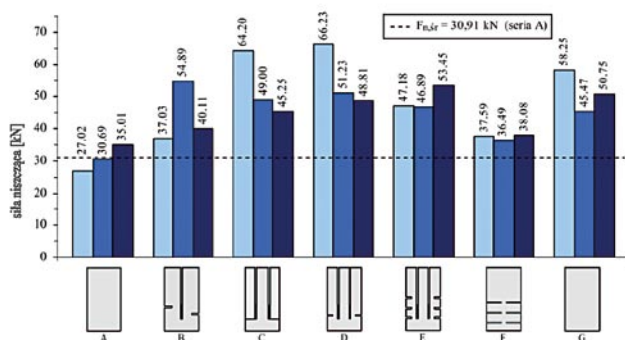
**Tabela 1.** Parametry techniczne włókien stosowanych w kompozytach [9]

Rodzaj włókna	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł sprężystości podłużnej [GPa]
Szklane (GFRP E-glass)	2,5	2000...3500	70
Szklane (GFRP S-glass)	2,5	4570	86
Aramidowe (AFRP)	1,4	3000...3150	63...67
Węglowe (CFRP)	1,4	4000	230...240

Wzmacnianie konstrukcji drewnianych przy zastosowaniu materiałów kompozytowych realizowano skutecznie zarówno dla drewna litego, jak i klejonego.

Rozległe badania w zakresie elementów z drewna litego przeprowadził Nowak [10]. Badał on wpływ lokalizacji wklejenia kompozytu na wzrost nośności belki. Istotnym założeniem było wprowadzenie taśmy do wnętrza przekroju, przez co symulowano wzmacnianie starych, zabytkowych belek. Użyto taśm CFRP, które wklejano w nieobciążoną belkę o przekroju 12x22 cm i długości 400 cm zarówno od góry, jak i z boku. Belki poddawano obciążeniu w schemacie czteropunktowym. Przebadano łącznie 21 belek drewnianych w 7 seriach oznaczonych literami A-G (w każdej serii zbadano 3 belki). Do badań belek z serii A-F użyto ok. 100-letniego drewna sosnowego, zaś serię porównawczą G wykonało ze współczesnego drewna nowo pozyskanego.

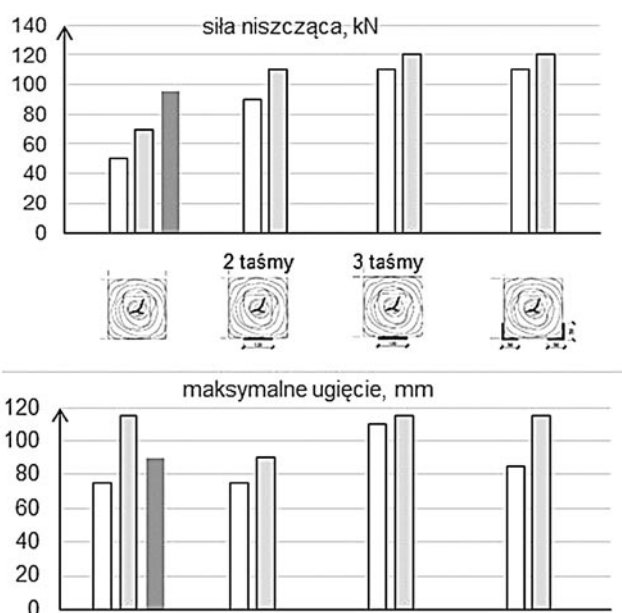
Siły obciążające, przy których nastąpiło zniszczenie poszczególnych belek, zestawiono na rysunku 6. Dla porównania zbadano 2 serie niewzmacniane – serię A ze starego drewna oraz serię G z drewna nowego. Największy



**Rys. 6.** Wyniki badań przeprowadzonych na litych belkach przez Nowaka [10]

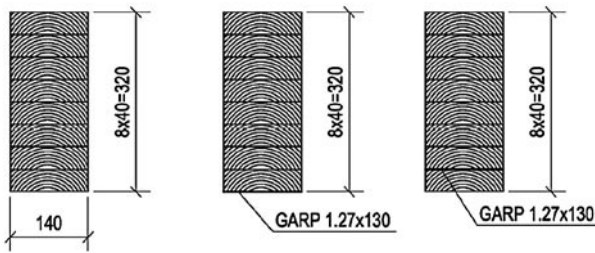
wzrost nośności w stosunku do średniej siły niszczącej belki serii A odnotowano w serii D, w której taśmy wklejano od góry i od boków (ok.79%), natomiast najmniejszy dla serii F, gdzie taśmy wklejano jedynie w poziomie z obu stron belki (ok. 21%).

Badania nad wzmacnianiem belek z drewna litego za pomocą taśm z włókna węglowego prowadzili również Borri i inni [1]. Badaniom poddali oni belki o przekroju 20x20cm o długości 400 cm wzmocnione w różnych wariantach (rys. 7). Przeanalizowano wzmacnianie poprzez przyklejanie dwóch warstw taśm (seria B) do dolnej płaszczyzny, poprzez przyklejanie trzech warstw taśm do dolnej płaszczyzny (seria C) oraz poprzez przyklejanie taśm w dolnych narożach przekroju (seria D). Wzmacnianie poprzez przyklejanie taśmy od spodu belki dało zwiększenie siły niszczącej nawet o 42,3–60,3% w stosunku do średniej siły niszczącej belki referencyjnej. Największy wzrost siły niszczącej odnotowano dla belek wzmacnianych od spodu trzema warstwami taśmy.



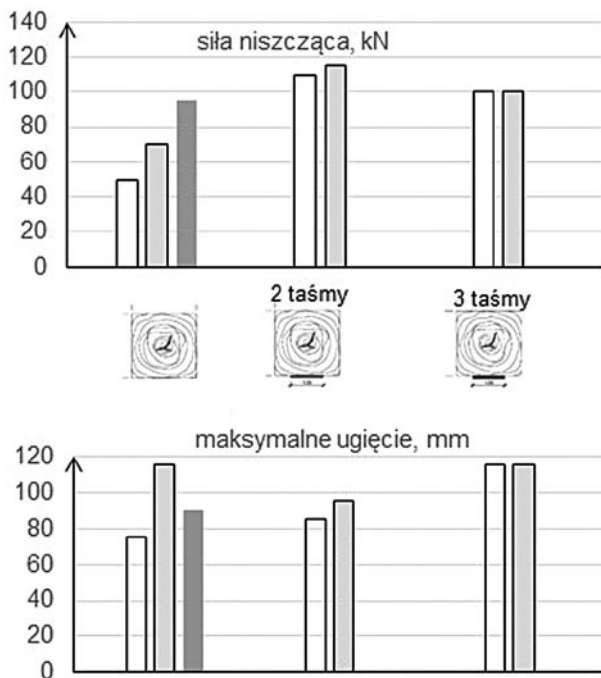
**Rys. 7.** Zestawienie sił niszczących i ugięć belek z drewna litego, wzmacnianych przez przyklejanie taśm CFRP od spodu belki, używanych w badaniach Borri i innych [1]

Wzmacnianie drewna klejonego przy użyciu taśm z włókna węglowego polega na wklejeniu ich na etapie produkcji pomiędzy ostatnie lamele lub od spodu belki. Brol [11] wykonywał badania na belkach przedstawionych na rysunku 8 i uzyskał wzrost nośności (w stosunku do belek niewzmacnianych) dla zbrojenia przymocowanego od spodu belki o 54%, zaś dla zbrojenia wklejanego pomiędzy lamele aż o 68%. Stwierdził, że wzmacnianie taśmami belek z drewna klejonego pozwala na zaoszczędzenie nawet 25% drewna użytego w konstrukcji, jednak zaproponowane metody możliwe są jedynie na etapie produkcji.



Rys. 8. Belki z drewna klejonego badane przez Broła [11]

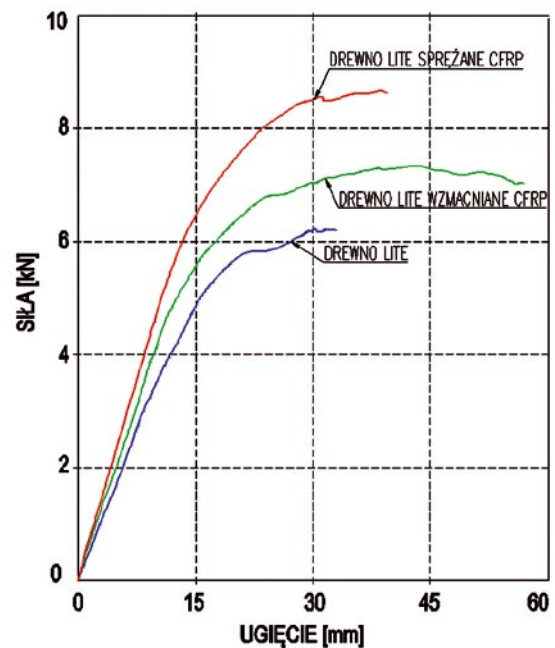
Kolejnym krokiem badawczym były próby wzmacniania belek drewnianych taśmami kompozytowymi wstępnie napiętymi. Borri i inni [1] po stwierdzeniu wzrostu nośności belek wzmacnianych biernie taśmami węglowymi podjęli się wstępnego sprężenia 4 belek z drewna litego w celu zmniejszenia planowanych ugięć belek. Belki z serii E miały 2 warstwy taśmy CFRP wstępnie napięte przyklejone do spodu belki, zaś belki serii F – 3 warstwy (rys. 9). W artykule nie opisano jednak wielkości siły sprężającej ani technologii sprężenia. Wyniki, które otrzymali badacze, wskazują jednoznacznie na znaczący wzrost nośności (43,8–52,4%) oraz sztywności (24,8–27,7%) w stosunku do belek niewzmacnianych podczas statycznej próby zginania. Autorzy zwracają uwagę na konieczność starannego przygotowania powierzchni zarówno drewna, jak i taśm w momencie przyklejania.



Rys. 9. Zestawienie sił niszczących i ugięć belek z drewna litego wstępnie sprężonych CFRP na tle wzmacnianych CFRP, uzyskanych w badaniach Borri i innych [1]

Badania nad stosowaniem sprężenia w konstrukcjach drewnianych prowadzili Triantafillou i Deskovic [2]. Autorzy próbowali oszacować analitycznie oraz doświadczalnie wstępne naprężenia, które może przenieść drewno oraz znaleźć

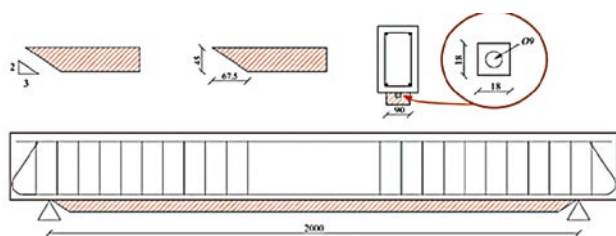
sposób na zakotwienie napiętej taśmy w drewnie. Przebadało 3 belki: dwie o wymiarach 45x60x800 mm oraz jedną o wymiarach 45x80x800 mm. We wszystkich przypadkach napięte taśmy za pomocą siłownika hydraulicznego przyklejano do dolnej płaszczyzny belki za pomocą kleju na bazie żywicy epoksydowej, stosując w zakotwieniach blachy stalowe o zmiennej grubości. Autorzy zwrócili uwagę na konieczność dokładnego oczyszczenia elementów sklepanych (powierzchni belki) oraz dokładnego przygotowania powierzchni przed klejeniem. Uzyskane w pracy [2] wykresy „siła-ugięcie” dla belek z drewna litego wzmacnianego kompozytami FRP oraz wzmacnianego wstępnie napinanymi kompozytami FRP w porównaniu do belki niewzmacnionej przytoczono na rysunku 10. Wyniki świadczą o zwiększeniu nośności i zmniejszeniu ugięć elementów sprężanych w stosunku do elementów niewzmacnianych, a także wzmacnianych taśmami w sposób bierny.



Rys. 10. Zależność „siła-ugięcie” dla różnych typów belek drewnianych w badaniach Triantafillou i Deskovic [2]

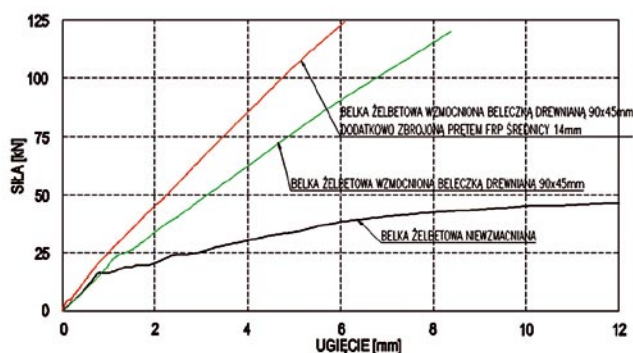
#### 4. Nietypowe użycie drewna i pręta kompozytowego przy wzmacnianiu belek żelbetowych

Wzmacnianie belek żelbetowych za pomocą FRP i drewna zaproponowali Grazide i inni [12]. Badaniom poddali żelbetowe belki o przekroju 15x25 cm. Ideą było znalezienie wzmocnienia elementów żelbetowych, które okaże się tanie oraz ekologiczne. Uznali oni, że owijanie elementów taśmami CFRP i GFRP należy do jednych z droższych metod wzmocnienia. Zaproponowano więc wzmacnianie belek żelbetowych za pomocą zewnętrznego zbrojenia zespolonego składającego się drewna i kompozytowego pręta FRP (rys. 11).



Rys. 11. Wzmocnienie za pomocą drewna i FRP [12]

W kolejnych seriach zmieniano grubość pasa drewnianego od 25 do 45 mm oraz materiał pręta (GFRP lub CFRP) i jego średnicę (od 9 do 14 mm). Wykres „siła-ugięcie” uzyskany w zginaniu czteropunktowym dla wszystkich belek pokazuje znaczący wzrost nośności i sztywności w stosunku do belek niewzmocnionych (rys. 12). Siła niszcząca dla belek wzmocnianych w granicach 100–125 kN okazała się wyższa od siły niszczącej belkę referencyjną niewzmocnioną (48,3 kN) ponad dwukrotnie, co świadczy o skuteczności zastosowanego wzmocnienia. Ugięcie belek wzmocnianych w ten sposób okazało się znacząco mniejsze. Dla siły niszczącej belkę referencyjną (48,3 kN) ugięcie wynosiło około 12 mm, zaś przy tej samej sile ugięcia belek wzmocnianych oscyływały w granicach 2–4 mm, co daje średnio 3-krotny spadek ugięć.

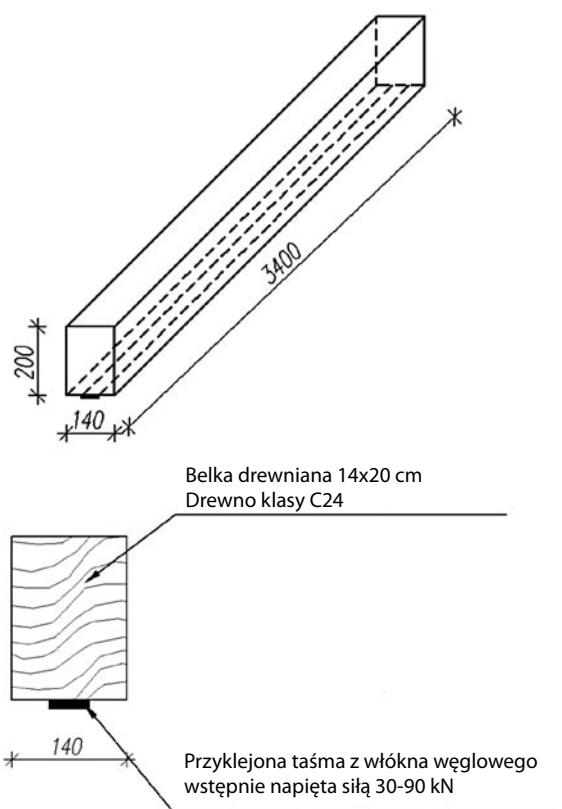


Rys. 12. Przykładowe wykresy „siła-ugięcie” dla różnych typów wzmocnienia, uzyskane w badaniach Grazide i innych (na podstawie [13])

## 5. Program badań własnych

Opracowania przywołane w niniejszym artykule pokazują, że sprężanie elementów drewnianych jest możliwe i może być efektywne, dotyczy to w szczególności stosowania wstępnie napiętych taśm kompozytowych. Biorąc ten wniosek ze studiów literaturowych za podstawę, zaprogramowano dwuetapowe badania własne: pierwszym etapem są badania belek sprężonych z drewna litego, a drugim – z drewna klejonego warstwowo. Założono realizację sprężenia przez wstępne napięcie taśm z włókna węglowego.

Do celów badań pierwszego etapu wykonano 12 belek o przekroju 14x20 cm (rys. 13) wykonanych z drewna klasy C24, z czego 3 traktowano jako referencyjne – niewzmocnione,



Rys. 13. Belka drewniana – schemat wzmocnienia

zaś pozostałe wzmocniono poprzez sprężenie przy różnych poziomych sił (30, 60, 75 oraz 90 kN). Typy badanych belek zestawiono w tabeli 2, parametry taśm zawarto w tabeli 3, zaś parametry żywicy – w tabeli 4.

Tabela 2. Serie i liczba badanych belek

Symbol belki	Siła sprężająca [kN]	Liczba belek	Klasa drewna
0/1 0/2 0/3	-	3 szt.	C24
30/1 30/2 30/3	30	3 szt.	C24
60/1 60/2 60/3	60	3 szt.	C24
75/1	75	1 szt.	C24
90/1 90/2	90	2 szt.	C24

Tabela 3. Parametry techniczne taśmy CFRP stosowanej do badań [13]

Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	Objętość włókna	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł sprężystości podłużnej [GPa]	Wydłużenie przy zerwaniu [%]
1,6	>68%	≥ 2800	≥ 170	≥ 13,5



**Tabela 4.** Parametry mechaniczne żywicy stosowanej do klejenia [14]

Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	Wytrzymałość na ścinanie [MPa]	Moduł sprężystości podłużnej [GPa]
1,7–1,8	>70	≥ 26	7100

### 5.1. Sprężanie belek

Sprężenie dokonano za pomocą taśm przyklejanych do spodu belek (sprężenie realizowano w pozycji odwróconej). Powierzchnię belki przygotowano przez szlifowanie, nawiercanie otworów pod śruby kotwiące oraz odpylenie powierzchni belki. Na wolną od zanieczyszczeń powierzchnię nałożono klej na bazie dwuskładnikowej żywicy epoksydowej oraz przygotowano powierzchnię taśmy przez gruntowne oczyszczenie i odtłuszczenie. Taśmy wstępnie naprężono za pomocą siłownika hydraulicznego do założonego poziomu siły (poziom siły kontrolowany był poprzez wskazania na manometrze urządzenia naciągowego oraz odkształcenie



**Rys. 14.** Nakładanie kleju na bazie żywicy na przygotowaną powierzchnię belki, napinanie taśmy za pomocą siłownika hydraulicznego



**Rys. 15.** Belka z przyklejoną napiętą taśmą oraz przykręconymi blachami kotwiącymi

taśmy), a następnie zamocowano je za pomocą stalowej blachy kotwiącej o wymiarach 8x140x375 mm przy zastosowaniu 20 wkrętów do drewna o średnicy 6 mm. Wkręty osadzano na głębokość 70 mm. Po 24 godzinach wiązania kleju zdemontowano system sprężający, pozwalając belce na przejście obciążeń z napiętej taśmy (rys. 14 i 15).

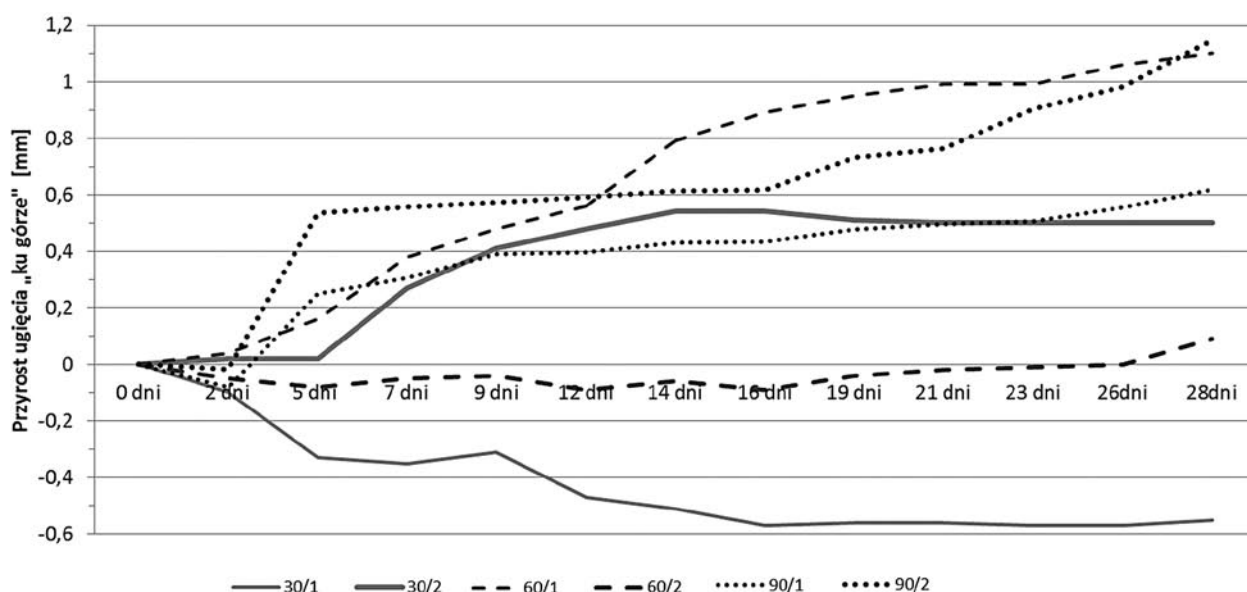
### 5.2. Ugięcia belek po sprężeniu

W efekcie sprężenia uzyskano wygięcie wszystkich belek ku górze, a jego wartość zależała od przyłożonej siły sprężającej. Dla belek sprężanych siłą 30 kN średnie wygięcie wynosiło 1,9 mm, dla sprężania siłą 60 kN – 3,8 mm, a dla sprężenia siłą 90 kN – 5,7 mm, co było bliskie wartości oszacowanej analitycznie.

Ugięcia belek bez obciążenia monitorowano w warunkach laboratoryjnych przez 28 dni. Do badań wytypowano po 2 belki z każdej serii sprężanej siłą 30, 60 oraz 90 kN.



**Rys. 16.** Pomiar zmian ugięć sprężonych belek w czasie za pomocą czujnika zegarowego



Rys. 17. Wykres zmian ugięcia w czasie dla belek wzmocnionych taśmami wstępnie napiętymi (wartość „0” to wartość bazowa)

Belki ułożono w pozycji poziomej (z taśmą u dołu), a następnie co 2 dni dokonywano odczytu ugięcia w środku rozpiętości. Pomiaru ugięcia dokonywano za pomocą czujników zegarowych o dokładności 0,001 mm. Widok stanowiska badawczego pokazano na rysunku 16.

Wykres przedstawiający zmiany ugięcia belek w czasie przedstawiono na rysunku 17. Wartość „zero” oznacza pozycję startową badań, a więc odwrotną strzałkę ugięcia każdej z belek, uzyskaną w wyniku sprężenia. Badane belki (z wyjątkiem belek oznaczonych 30/1 oraz 60/2) wykazały znaczący wzrost odwrotnej strzałki ugięcia. Największe zmiany zaobserwowano dla belek 60/1 oraz 90/2, które „uniósł” się o ponad 1 mm w ciągu miesiąca (więc nawet o około 20%). Zmiany zachodziły głównie do 14 dni, a następnie stabilizowały się.

Wzrost ugięć przypisać można pęczaniu drewna, natomiast zaobserwowany w dwóch belkach spadek mógł mieć swą przyczynę w niejednorodności drewna w strefie kotwienia taśm.

## 6. Podsumowanie

Stosowanie nowych technologii przy wzmocnianiu drewna litego okazuje się sensowne oraz uzasadnione, choć we wszystkich przytoczonych badaniach analizę otrzymanych wyników utrudnia niejednorodność materiałowa drewna.

W niniejszej pracy dowiedziono, że sprężenie elementów drewnianych jest możliwe technologicznie. Możliwe jest uzyskanie wstępnego „odwrotnego ugięcia” belki, które zmniejszy ugięcie pochodzące od obciążeń zewnętrznych. Ten efekt zostanie przebadany podczas czteropunktowego obciążania belek pod prasą. Uwagi i analizy wymaga stwierdzony efekt zmian ugięcia belki drewnianej od sprężania w czasie.

## Praca finansowana w ramach funduszu nauki Politechniki Lubelskiej – FN15/ILT/2019 i FNM15.2/ILT/2019.

### BIBLIOGRAFIA

- [1] Borri A., Corradi M., Grazini A., A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials, *Composites: Part B* 36 (2005), str. 143–153
- [2] Triantafyllou T., Deskovic N., Prestressed FRP sheets as external reinforcement of wood members, *Journal of Structural Engineering* 118/1992, str. 1270–1284
- [3] Masłowski E., Spiżewska D., *Wzmocnianie konstrukcji budowlanych*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 2000
- [4] Jasiołko J., *Połączenia klejowe w rehabilitacji i wzmocnianiu zginanych belek drewnianych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2002
- [5] Jasiołko J., *Opracowanie metod wzmocniania konstrukcji drewnianych przy zastosowaniu żywic syntetycznych. Etap I i II*, Raport Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1988
- [6] Peterson J., *Wood beams prestressed with bonded tension elements*, *Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 1965
- [7] Dziuba T., *Przegląd Pęczanie belki drewnianej sprężonej stalą*, I Sympozjum Naukowe Reologia drewna i konstrukcji drewnianych, Poznań-Zielonka, 1982, str. 151–162
- [8] Cyruliński Z., Drewnowski S., Marks W., *Zwiększenie nośności belek z drewna klejonego poprzez naprężanie ich cięgnami wzdłuż włókien*, *Materiały konferencyjne*, Wydawnictwo DNK, Sankt Petersburg, 2006
- [9] Hajnalka H., Racz I., Anandjiwala R. D., *Development of HEMP fibre reinforced polypropylene composites*, *Thermoplastic Composite Materials* 21/2008, str. 165–174
- [10] Nowak T., *Analiza pracy statycznej zginanych belek drewnianych wzmocnionych przy użyciu CFRP*, *Rozprawa doktorska*, Wrocław, 2007
- [11] Brol J., *Wzmocnianie zginanych belek z drewna klejonego taśmami GARP na etapie produkcji*, *Wiadomości Konserwatorskie*, 26/2009, str. 345–353
- [12] Grazide C., Ferrier E., Laurent M., *Rehabilitation of reinforced concrete structures using FRP and wood*, *Construction and Building Materials* 234 (2020) 117716
- [13] Karta techniczna taśmy CFRP, data pobrania: 17.06.2019, [https://www.sp-reinforcement.pl/sites/default/files/field\\_product\\_col\\_doc\\_file/c-laminates\\_polska\\_ver012019-low.pdf](https://www.sp-reinforcement.pl/sites/default/files/field_product_col_doc_file/c-laminates_polska_ver012019-low.pdf)
- [14] Karta techniczna kleju, data pobrania: 17.06.2019, <https://www.sp-reinforcement.pl/pl-PL/produkty/zywica-epoksydowa/sp-resin-220>