ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2001
Seria: BUDOWNICTWO z. 93 Nr kol. 1514

Janusz BROL*
Politechnika Śląska

# WZMACNIANIE ELEMENTÓW DREWNIANYCH TAŚMAMI LUB MATAMI Z WŁÓKIEN WĘGLOWYCH

**Streszczenie**. Referat przedstawia wyniki badań laboratoryjnych wzmocnień elementów drewnianych za pomocą kompozytów z włóknami węglowymi. Badania przeprowadzono dla przypadków obciążenia elementów, jak zginanie, rozciąganie, ściskanie i ścinanie. Ponadto wzięto pod uwagę, niektóre nietypowe przypadki, jak na przykład poprzeczne wzmocnienie podłużnie spękanych elementów.

# STRENGTHENING OF WOODEN MEMBERS WITH STRIPS OR MATS FROM CARBON FIBRES

**Summary.** The paper presents results of laboratory tests of wooden members strengthening with carbon fiber composites. The tests were undertaken for the basic cases of members looking, like bending, tension, compression and shear. Besides, some not typical cases were considered, for instance transversal strengthening of members with longitudinal splitting.

## 1. Wprowadzenie

Rewaloryzacje obiektów zawierających dachy i stropy o konstrukcji drewnianej, wzmacnianie innych rodzajów konstrukcji (np. konstrukcje przekryć obiektów zabytkowych, zwłaszcza sakralnych) to współcześnie powszechnie spotykane w kraju problemy budownictwa. Wzmacnianie elementów drewnianych metodami tradycyjnymi w wielu przypadkach koliduje z zaleceniami konserwatorów. Zaistniała więc potrzeba poszukiwania nowych rozwiązań konstrukcyjnych umożliwiających wykonywanie wzmocnień tych elementów, nie zmieniających kształtu lub estetyki konstrukcji, a jednocześnie skutecznych. Chodzi tu zarówno o zabezpieczenie elementów wykazujących skutki naturalnego zużycia, jak też o przypadki koniecznego zwiększenia nośności lub ograniczenia ugięć.

---

* Opiekun naukowy: Prof. dr inż. Andrzej Ajdukiewicz.

Obecnie, od kilku lat, coraz popularniejsze jest wykorzystywanie taśm z włókien węglowych do wzmacniania konstrukcji budowlanych. Prowadzone badania wzmocnień z zastosowaniem taśm z włókien węglowych dotyczą głównie konstrukcji żelbetowych.

Praktycznie nie są rozpoznane możliwości i skuteczność wzmacniania taśmami i matami z włókien węglowych konstrukcji drewnianych. Bardzo nieliczne badania były na ten temat prowadzone w Szwajcarii w nawiązaniu do konkretnych obiektów, np. naprawy po pożarze mostu drewnianego w Lucernie. Rozwiązania takie powinny umożliwiać wykonywanie wzmocnień elementów zagrożonych, szczególnie tam, gdzie wykonywanie wzmocnień w sposób tradycyjny jest niemożliwe lub co najmniej niewłaściwe. Należy dodać, iż wzmacnianie taśmami lub matami z włókien węglowych praktycznie nie powoduje zwiększenia gabarytów przekroju i możliwe jest łatwe zakrycie (zamaskowanie) takich wzmocnień. Jest to bardzo istotne w przypadku elementów widocznych (np. odkrytych belek stropowych w obiektach zabytkowych).

## 2. Opis badań i uzyskane wyniki z badań

### 2.1. Badania pomocnicze

Badania te dotyczyły określenia cech wytrzymałościowych materiałów użytych do wykonania modeli badawczych: drewna, taśm i mat z włókien węglowych.

W celu ograniczenia czynników zmiennych wszystkie modele badawcze w poszczególnych grupach były wykonane z drewna tej samej klasy, pochodzącego z tego samego źródła. Wyniki badania cech wytrzymałościowych drewna przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Wyniki badania cech wytrzymałościowych drewna

| | |
|---|---|
| Średnia wytrzymałość drewna na ściskanie | $\sigma_{śr} = \sum \sigma / n = 65{,}266\ MPa$ |
| Odchylenie standardowe | $s_0 = \sqrt{\sum (\sigma_i - \sigma_{śr})^2 / (n-1)} = 3{,}22\ MPa$ |
| Wytrzymałość charakterystyczna na ściskanie | $R_c = 59{,}917\ MPa$ |
| Średni moduł sprężystości otrzymany z badań | $E_{śr} = 8{,}9\ GPa$ |
| Wytrzymałość drewna na zginanie statyczne | $R_{gz} = 71{,}6\ MPa$ |
| Liczebność prób | po 6 próbek |

Wyniki badań taśm i mat z włókien węglowych obejmujące wyznaczenie modułu Young'a przy rozciąganiu, oraz wyznaczenie wytrzymałości na rozciąganie przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2

Wyniki badań taśm i mat z włókien węglowych

| | $R_e$ [Mpa] | E [Gpa] | Liczba prób |
|---|---|---|---|
| Taśma Sika CarboDur M1214 | 2517,3 | 225,4 ( przy rozciąganiu) | 3 |
| | - | 239,9 (przy ściskaniu) | 2 |
| Taśma Sika CarboDur S512 | 3212 | 173,52 | 3 |
| Mata SikaWrap | - | 223,43 | 6 |

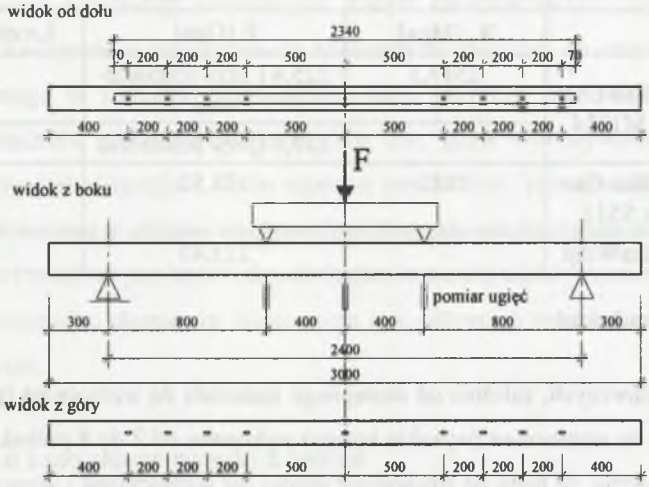
## 2.2. Badania zasadnicze

W seriach badawczych, zależnie od dostępnego materiału do wzmocnień (próbki drewna), jak i materiałów do wzmocnień (wysokie koszty) wykonano od 2 do 8 próbek w każdej serii, przy ogólnej zasadzie, że bada się równolegle próbki nie wzmocnione i wzmocnione. Do pomiaru odkształceń wykorzystano tensometry elektrooporowe, a do pomiaru przemieszczeń czujniki indukcyjne.

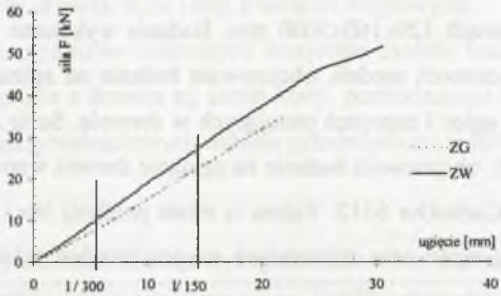
**Badanie na zginanie** wzmocnień taśmami z włókien węglowych drewna przeprowadzono na modelach o wymiarach 120x160x3000 mm. Badania wykonano w dwóch seriach. Seria ZG, składająca się z czterech modeli, obejmowała badanie na zginanie drewna nie wzmocnionego, z pomiarem ugięć i naprężeń panujących w drewnie. Seria ZW, składająca się również z czterech modeli, obejmowała badanie na zginanie drewna wzmocnionego taśmą z włókien węglowych SikaCarboDur S512. Taśma ta miała przekrój 50x1,2 mm. W trakcie badań dokonywano pomiaru ugięć oraz odkształceń na powierzchni taśmy i drewna. Na rys. 1 przedstawiono schemat badania modeli, rozmieszczenie tensometrów oraz czujników indukcyjnych dla modeli badawczych serii ZW.

Badania serii ZG były traktowane jako świadki dla badań serii ZW. Schemat badania dla modeli belek nie wzmocnionych serii ZG był taki, jak dla serii ZW. Rozmieszczenie czujników indukcyjnych było analogiczne do rozmieszczenia dla serii ZW. Tensometry na drewnie były rozmieszczone tylko w środku rozpiętości na górnej i dolnej powierzchni belek.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono istotny wzrost nośności modeli wzmocnionych w stosunku do modeli nie wzmocnionych. Na rys. 2 przedstawiono wartości średnie dla serii ZG i ZW.




Rys. 1. Schemat badania modeli ZW
Fig. 1. Scheme of testing for models ZW




Rys. 2. Wykres zależność ugięcia od siły F - wyniki średnie w serii
Fig. 2. Relation displacement / load F – mean results in the series

Analizując zależność maksymalnego ugięcia elementu od obciążenia F stwierdzono wzrost nośności przy ugięciu równym l/150 o około 20%. W tablicy 3 przedstawiono średnie wytrzymałość modeli serii ZG i ZW na zginanie statyczne wraz z odchyleniem standardowym

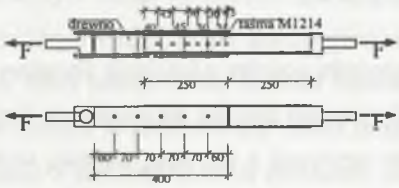
Tablica 3

Średnia wytrzymałość modeli ZG i ZW

| Seria badawcza | ZG | ZW |
|---|---|---|
| Średnia wytrzymałość na zginanie $R_{zg}$ [MPa] | 58,01 | 76,17 |
| Odchylenie standardowe [MPa] | 12,16 | 4,83 |

W trakcie badań zaobserwowano zróżnicowanie postaci zniszczenia modeli. Zniszczenie modeli nie wzmocnionych serii ZG następowało poprzez pęknięcie włókien drewna w dolnej części elementu (włókna rozciągane). Zniszczenie następowało zazwyczaj w bezpośrednim sąsiedztwie wad drewna, np. sęków. W modelach elementów wzmocnionych serii ZW pierwsze oznaki zniszczenia (rozczepienie słojów) następowały w górnej części modelu, a dalej następowały pierwsze pęknięcia włókien dolnych - skrajnych, w narożach belki. Taśma z włókien węglowych w dalszym ciągu pracowała, model przenosił obciążenie. Zniszczenie modelu następowało w wyniku odspojeniu się taśmy lub poprzez ścięcie drewna wzdłuż włókien nad taśmą.

**Badanie na rozciąganie** drewna wzmocnionego taśmami z włókien węglowych przeprowadzono na modelach o wymiarach 60x60x400 mm. W badaniu skupiono się głównie na określeniu skuteczności przekazania się sił rozciągających z drewna na taśmę. Do badań wykorzystano taśmę SikaCarboDur 1214 o standardowej szerokości 120 mm i grubości 1,4 mm. Taśmę tę do badań ścięto do szerokości 50 mm. Taśmy z włókien węglowych były przyklejone (w celu zachowania osiowości) do dwóch przeciwległych płaszczyzn bocznych równoległych do włókien drewna. Do dwóch pozostałych płaszczyzn bocznych modelu przykręcono płaskowniki stalowe, poprzez które realizowano siłę rozciągającą. Drugi koniec taśm z włókien węglowych był przyklejony do elementu stalowego. Elementy stalowe, poprzez które realizowano siły rozciągające, były przegubowo połączone z głowicami maszyny wytrzymałościowej. Na rys. 12 przedstawiono schemat badania modelu o bazie pomiarowej 250 mm. Badania przeprowadzono na ośmiu modelach. W trakcie badania mierzono odkształcenia na długości taśmy oraz maksymalną siłę zrywającą połączenie.




Rys. 3. Schemat badania na rozciąganie
Fig. 3. Scheme of testing at tension

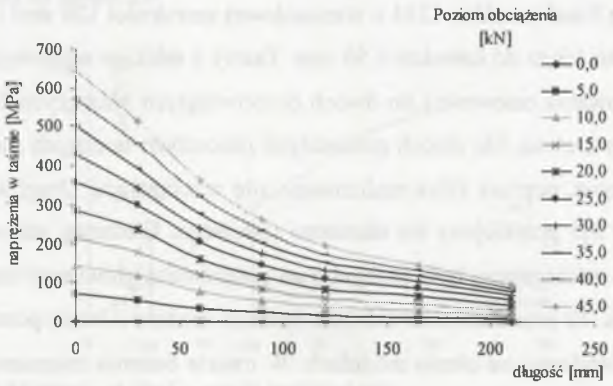
W tablicy 4 przedstawiono wyniki badań na zerwanie połączenia przy założeniu długości przyklejenia taśmy 2x250 mm (powierzchnia kontaktu z drewnem 25000 mm$^2$).

Na rysunku 4 przedstawiono typowy wykres naprężeń w taśmie o długości bazy pomiarowej 250 mm.

Tablica 4

Wyniki badań na zerwanie połączenia

| Model | Siła zrywająca połączenie [kN] | Średnie naprężenia ścinające [MPa] |
|---|---|---|
| ROZ1 | 106 | 4,24 |
| ROZ2 | 96 | 3,84 |
| ROZ3 | 97 | 3,88 |
| ROZ4 | 98 | 3,92 |
| ROZ5 | 95 | 3,8 |
| ROZ6 | 103 | 4,12 |
| ROZ7 | 105 | 4,2 |
| ROZ8 | 105 | 4,2 |
| Średnia | 100,625 | 4,025 |
| Odchylenie stand. | 4,56 | 0,18 |

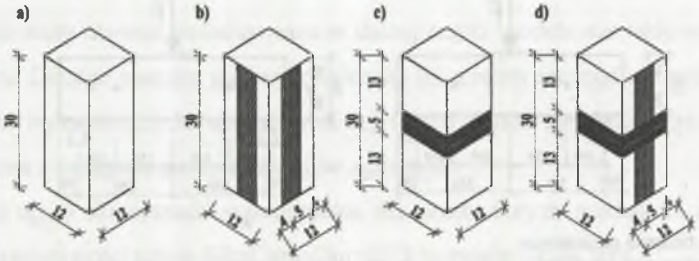



Rys. 4. Rozkład naprężeń na długości taśmy
Fig. 4. Distribution of stresses along the strip

Zniszczenie próbki następowało poprzez odspojenie się taśmy od drewna, poprzez ścięcie warstwy powierzchniowej drewna lub poprzez odspojenie się kleju od taśmy. Odspojenie się taśmy od kleju następowało zazwyczaj z pierwszą warstwą włókien. Średnie naprężenia na długości próbki dla bazy pomiarowej 250 mm wynosiło 4 MPa. Trudno jednak do czegokol-

wiek porównać te wartości. W kartach producenta nie ma danych o przyczepności wykorzystywanego kleju do drewna (są tylko dane dotyczące stali i betonu), niemniej jednak przyczepność kleju do drewna jest stosunkowo duża. Przyczepność tą można porównać, co zaobserwowano w trakcie badania, do przyczepności kleju do włókna węglowego.

Celem **badania na ściskanie** było określenie skuteczności wzmacniania taśmami i matami z włókien węglowych bez uwzględnienia wpływu wyboczenia. W badaniach wykorzystano taśmy SikaCarboDur M1214 o grubości 1,4 mm oraz maty SikaWrap Hex – 230C. Badania przeprowadzono na próbkach o wymiarach 120x120x300 mm, w czterech seriach po 6 próbek (w każdej serii dwie próbki z tensometrycznym pomiarem odkształceń). Widok modeli badawczych pokazano na rys 5, a uśrednione wyniki badań przedstawiono w tablicy 5:




Rys. 5. Widok modeli badawczych przy ściskaniu: a) model SD, b) model SWW, c) model SMM, d) model SWM

Fig. 5. View of models in tests at compression: a) model SD, b) model SWW, c) model SMM, d) model SWM

Tablica 5

Uśrednione wyniki badań na ściskanie

| Seria | Naprężenie [MPa] | Odch. stand. [MPa] |
|---|---|---|
| SD - drewno nie wzmocnione | 37,52 | 8,20 |
| SWW – cztery taśmy wzdłuż włókien | 38,11 | 3,31 |
| SMM - opaska z maty w połowie wysokości próbki. | 39,66 | 6,25 |
| SWM - dwie taśmy wzdłuż włókien + opaska | 38,82 | 6,86 |

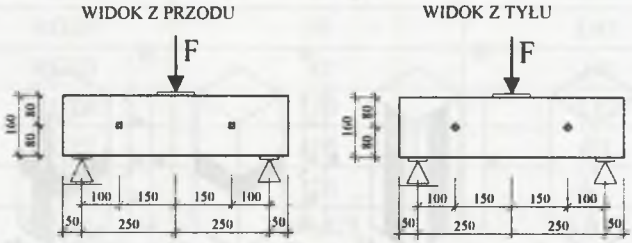
Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że w krótkich próbkach wzmocnienie nie jest skuteczne. O rzeczywistym wzmocnieniu słupów ściskanych można by wnioskować dopiero ze smukłych próbek, kiedy podwyższony moment bezwładności redukuje wpływ wyboczenia. Te badania nie wchodziły w zrealizowany zakres programu badań. W każdej serii badawczej badano dwa modele z tensometrycznym pomiarem odkształceń. Badania z wyko-

rzystaniem tensometrycznych pomiarów odkształceń wykonano, by móc porównać wyniki z modeli numerycznych i umożliwić kalibracje tych modeli.

**Badanie na ścinanie** w poprzek włókien drewna przeprowadzono w trzech seriach, na modelach o wymiarach 120x160x300 mm i schemacie badawczym pokazanym na rys 6.

- SCD – składająca się z 4 modeli nie wzmocnionych,
- SCM-I – dwa modele wzmocnione poprzez owinięcie ich 1x matą,
- SCM-II – dwa modele wzmocnione poprzez owinięcie ich 2 razy matą.

Tak mała ilość modeli badawczych wynikała z bardzo wysokiego kosztu maty. Uśrednione wyniki badań na ścinanie przedstawiono w tablicy 6.




Rys. 6. Schemat badania na ścinanie
Fig. 6. Scheme of testing for shear

Tablica 6
Uśrednione wyniki badań na ściskanie

| Seria | Siła niszcząca [kN] |
|---|---|
| SCD | 109,53 |
| SCM I 1 | 118,10 |
| SCM-II 2 | 137,85 |

Przy tak małej liczbie prób trudno ocenić rzeczywisty (statystyczny) wzrost nośności na ścinanie przy tak wykonanym wzmocnieniu. Niemniej jednak ujawnił się wzrost nośności na ścinanie. Dla modeli pojedynczo owiniętych średni wzrost nośności wynosił 8%, a dla podwójnego owinięcia średni wzrost wyniósł 26%.

## 3. Wnioski

Przeprowadzone badania miały na celu opracowanie zasad technologii i obliczania wzmocnień konstrukcji drewnianych za pomocą taśm lub mat z włókien węglowych.

Wzmacnianie taśmami lub matami z włókien węglowych praktycznie nie powoduje zwiększenia gabarytów przekroju i możliwe jest łatwe zakrycie (zamaskowanie) takich wzmocnień. Jest to bardzo istotne w przypadku elementów widocznych (np. odkrytych belek stropowych w obiektach zabytkowych). Dlatego w badaniach główny nacisk położono na dopracowanie tej metody wzmocnień. Nie bez znaczenia jest także prostota i krótki czas wykonania wzmocnienia. Cała technologia wzmocnienia sprowadza się do usunięcia zanieczyszczeń powierzchni drewna i przyklejenia taśmy lub maty, a następnie - w razie potrzeby - zamaskowania. Najlepiej, jeżeli w czasie wzmacniania konstrukcja jest odciążona. Podkreślić należy, że wzmocnienie elementów zginanych taśmami węglowymi bardzo zmniejsza rozrzut wyników związany z wadami drewna. W próbkach zginanych odchylenie standardowe w badanych seriach spadło z około 12% do 4,8%. Dodatkowo w trakcie badań zauważono, że dzięki przyklejonej taśmie wady drewna zlokalizowane w dolnej części modelu nie wpływają istotnie na wynik pomiaru. Dlatego zasadne jest wykorzystanie tej metody szczególnie tam, gdzie z powodów błędów wykonawczych, wad drewna czy też na skutek niewłaściwego użytkowania została osłabiona rozciągana strefa przekrojów zginanych.

W zakresie ugięć skuteczność wzmocnienia dla przebadanych modeli na zginanie przy zastosowaniu pojedynczej taśmy SikaCarboDur S512 wynosiła około 20%.

W zakresie rozciągań badanie dotyczyło skuteczności współpracy drewna z naklejonymi taśmami. Stwierdzono, że decydujące znaczenie ma adhezja na długości około 50 mm od końca taśmy (czyli na odcinku równym jej szerokości), a średnie naprężenia ścinające między taśmą a drewnem (w próbce o bazie pomiarowej 250 mm) wynosiły około 4 MPa (siła zrywająca połączenie o długości 250 mm wynosiła około 50 kN) .

W zakresie ściskania badano jedynie krępe próbki wzmocnione na dwóch lub na czterech płaszczyznach taśmami (lub taśmami i matami). Wzmacniając elementy ściskane poprzecznie do włókien za pomocą wykonanych opasek z maty, zauważono dużą różnicę w średnich (stycznych i promieniowych) odkształceniach poziomych. Pomierzone odkształcenia w przypadku wykonania opaski wynosiły zaledwie 20% odkształceń średnich dla elementów nie wzmacnianych. Wzmacnianie konstrukcji poprzez wykonanie opasek z maty można zalecać przy naprawie silnie spękanych podłużnie elementów ściskanych, kiedy chcemy zabezpieczyć element przed podłużnym spękaniem drewna. Zjawisko takie jest niebezpieczne w elementach szczególnie wytężonych, gdzie dążymy do wyeliminowania możliwości wystąpienia lokalnej utraty stateczności przez zmniejszenie długości wyboczeniowych oddzielonych od

siebie pęknięciami fragmentów pręta. Wzmacnianie taką metodą jest bardzo proste do wykonania i praktycznie nie zwiększa przekroju słupa. Sama grubość wzmocnienia wynosi około 1,5 mm. W przebadanych modelach maksymalne (wyznaczone na podstawie odkształceń, przy podwójnym owinięciu) naprężenia w macie wynosiły niewiele ponad 100 MPa, co stanowi zaledwie kilka procent nośności maty. Przy zastosowaniu wzmocnienia w postaci przyklejonych do pobocznic elementu drewnianego taśm z włókien węglowych stwierdzono, że w krótkich próbkach samo wzmocnienie podłużne nie jest skuteczne. O rzeczywistym wzmocnieniu słupów ściskanych można by wnioskować dopiero na podstawie badań smukłych próbek, kiedy podwyższony moment bezwładności redukuje wpływ wyboczenia. Te badania nie wchodziły w zakres programu.

Wzmocnienie elementów ścinanych wykonano poprzez owinięcie elementu badawczego matą węglową SikaWrap Hex 230C. Modele wzmocnione poprzez jednokrotne owinięcie wykazywały średni wzrost nośności około 8%, natomiast próbki owinięte dwa razy wykazały średni wzrost na poziomie 26%. Wartości te są średnimi z dwóch próbek w serii i nie mogą być miarodajne przy poprawnym określaniu skuteczności takiego rozwiązania.

Wzmocnienie poprzez owinięcie matą elementu (z zachowaniem prostopadłości kierunku włókien zastosowanych materiałów) skutecznie uniemożliwia rozwarstwienie się włókien w momencie zniszczenia. Zniszczenie następuje poprzez zerwanie się włókien. W trakcie analizy badań laboratoryjnych i analizy numerycznej uznano, iż korzystniejsze będzie wzmacnianie na ścinanie poprzez naklejenie maty pod kątem 45 stopni do kierunku włókien drewna.

Równolegle z przedstawionymi badaniami podjęto próby numerycznych obliczeń skuteczności wzmocnień drewna. Wyniki doświadczeń pozwoliły na uzyskanie cech fizycznych wprowadzonych do analiz numerycznych. Wyniki tych analiz nie są tu przedstawione.

Recenzent: Dr hab. inż. Maria Kamińska, prof. PŁ

**Abstract**

In order to seek for an effective and easy in applying method of retrofitting and strengthening of existing timber structures some laboratory tests were carried out on a set of models. The tests were undertaken for the basic cases of members looking, like bending, tension, compression and shear. Besides, some not typical cases were considered, for instance transversal strengthening of members with longitudinal splitting.