

Tomasz Nowak

Wzmacnianie drewnianych konstrukcji zabytkowych przy użyciu taśm węglowych

1. Wstęp

Specyfika zabytkowych konstrukcji sprawia, że ciągle jeszcze, do ich naprawy i wzmacniania, dość rzadko wykorzystywane są nowoczesne materiały i zaawansowane technologie.

Zainteresowanie kompozytami wynika z dwóch podstawowych przesłanek: pierwsza – to ich dobre parametry wytrzymałościowe, druga – to mały ciężar. Z jednoczesną kombinacją tych cech mamy do czynienia w zasadzie tylko w przypadku kompozytów, stąd rosnące w ostatnich latach ich wykorzystanie w konstrukcjach, gdzie ma to pierwszorzędne znaczenie.

Materiały kompozytowe (Fibre Reinforced Plastics) są najogólniej mówiąc tworzywami sztucznymi, zbrojonymi różnego rodzaju włóknami. Najczęściej spotykane kompozyty to:

- zbrojone włóknami węglowymi (CFRP – Carbon Fibre Reinforced Plastic),
- zbrojone włóknami szklanymi (GFRP – Glass Fibre Reinforced Plastic),
- zbrojone włóknami aramidowymi (AFRP – Aramid Fibre Reinforced Plastic).

Element nośny kompozytu stanowią włókna o bardzo małej średnicy (zazwyczaj od 2 do 16 μm), natomiast osnowa (matryca) służy jako spoiwo łączące włókna. W kompozytach włóknistych jako osnowy stosuje się przede wszystkim żywice polimerowe i epoksydowe. Matryca zapewnia rozdział obciążenia zewnętrznego pomiędzy włókna, chroni je przed uszkodzeniami mechanicznymi oraz niekorzystnym działaniem środowiska.

Podstawowym powodem stosowania włókien jest to, że ich struktura krystaliczna jest znacznie doskonalsza, a po drugie – statystyczna liczba de-

fektów sieci krystalicznej we włóknie o znikomo małej objętości jest znacznie mniejsza niż w dużej objętości tego samego materiału. Na przykład, wytrzymałość na rozciąganie stali konstrukcyjnych wynosi ok. 0,2-0,7 GPa, tymczasem wytrzymałość cienkich włókien stalowych wynosi ok. 4 GPa.

W pracy przedstawiono koncepcję zastosowania taśm węglowych CFRP do wzmacniania zginanych belek drewnianych w obiektach zabytkowych.

2. Koncepcja wzmocnienia

Prezentowana koncepcja wzmocnienia odpowiada znanej i stosowanej w Polsce metodzie polegającej na przyklejaniu stalowych płaskowników lub blach do elementów konstrukcji [11], [12], [14]. Zastosowanie materiałów kompozytowych ma jednak wiele przewag.

Zalety wzmocnień taśmami zbrojonymi włóknami węglowymi uwidaczniają się zwłaszcza w konserwacji zabytków. Głównie chodzi tu właściwie o stosunek wagi i rozmiarów do uzyskiwanych wytrzymałości. Taśmy można ponadto łatwo „ukryć” w przekroju tak, że zachowany jest pierwotny wygląd elementu. Z badań przeprowadzonych pod kierunkiem Martina [18] wynika, iż ukrycie taśm wewnątrz przekroju zwiększa wytrzymałość badanych belek z drewna klejonego warstwowo podczas próby ogniowej o 44% w stosunku do belek wzmocnionych zbrojeniem zewnętrznym. Ponadto przewodność cieplna kompozytów jest znacznie mniejsza niż stali, co jednocześnie sprawia, że ich odporność ogniowa jest większa.

W myśl „Karty Weneckiej” działanie na zabytku ma na celu zachowanie i ujawnienie historycznej

i estetycznej wartości obiektu oraz polega na poszanowaniu dawnej substancji i elementów stanowiących autentyczne dokumenty przeszłości. Dopuszcza się jednak wzmacnianie obiektów zabytkowych przy zastosowaniu nowoczesnych technik konserwatorskich, budowlanych i inżynierskich [24].

Doktryny konserwatorskie opowiadają się za utrzymaniem każdej konstrukcji zabytkowego obiektu, w tym również drewnianych układów ściennych, stropów i wieżb dachowych tak długo, jak tylko jest możliwe bezpieczne użytkowanie tych konstrukcji.



Rys. 1. Przykład pręta z poważnymi pęknięciami [1]

Rys. 2. Wzmocnienie pręta za pomocą poprzecznie przyklejonych taśm CFRP [1]

W konstrukcjach drewnianych najłatwiej destrukcji ulegają stropy drewniane. One też najczęściej wymagają naprawy i wzmocnienia. Stropy te często są zastępowane nowymi rozwiązaniami technicznymi w postaci np. stropów na belkach stalowych lub stropów żelbetowych. W przeważającej liczbie przypadków decyzje o likwidacji tradycyjnych rozwiązań konstrukcyjnych są zbyt pochopne – demontuje się belki, które po wzmocnieniu mogłyby spełniać wymagania związane z nową funkcją obiektu. To samo dotyczy obiektów całkowicie drewnianych, gdzie nagminnie wymieniane są elementy na nowe, wprowadzając też z drewna, ale bez podejmowania próby ich naprawy i wzmocnienia.

Wzmocnianie konstrukcji drewnianych przy użyciu taśm węglowych CFRP jest zagadnieniem stosunkowo nowym i słabo rozpoznany. Po raz pierwszy zastosowano taśmy węglowe w konstrukcji drewnianej w 1991 roku do wzmocnienia zabytkowego drewnianego mostu w Sins w Szwajcarii [7]. Mimo upływu 12 lat od tego czasu zastosowań omawianych taśm w konstrukcjach drewnianych nie ma zbyt wiele.

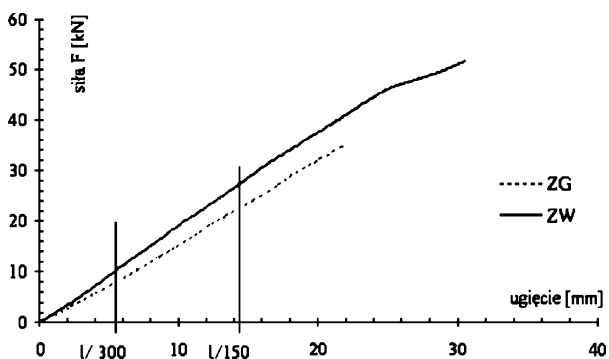
W Polsce pierwsze próby dotyczą wzmocnienia najwyższej w Europie (110,7 m) drewnianej wieży w Gliwicach [1]. Stwierdzono, że najczę-

ściej występującymi uszkodzeniami w elementach konstrukcji wieży były podłużne pęknięcia drewna wzdłuż włókien – rys. 1. Metoda wzmocnienia polegała na doklejeniu odcinków taśm CFRP prostopadle do osi prętów drewnianych – rys. 2.

Prawdopodobne jest jednak zastosowanie taśm na szerszą skalę przy odpowiedniej popularyzacji tematu oraz obniżaniu cen przez producentów, np.: w samej tylko Australii istnieje 10000 drewnianych mostów oraz wiele starych drewnianych budynków, z których część już w najbliższym czasie będzie wymagała wzmocnienia [7], [9]. W Polsce liczbę obiektów drewnianych o istotnej wartości historycznej szacuje się na ponad 4 tysiące. Samych tylko kościołów drewnianych zachowanych w stanie umożliwiającym remont jest ok. 1000.

Dopiero w latach dziewięćdziesiątych przeprowadzono pierwsze badania z zastosowaniem taśm węglowych do wzmocniania elementów drewnianych [2], [3], [4], [5], [6], [7], [16], [18], [21], [22], [23].

Także w Polsce zostały podjęte takie próby na Politechnice Wrocławskiej [12], Śląskiej [5], [6] oraz Poznańskiej [15], [20]. W badaniach opisanych w [5] taśmy zostały doklezione do spodu belki. Stwierdzono wzrost nośności przy ugięciu równym $l/150$ o około 20% – rys. 3. W modelach wzmocnionych pierwsze oznaki zniszczenia następowały w górnej części modelu, zaś w niewzmocnionych w dolnej części (rozciąganej), zazwyczaj w bezpośrednim sąsiedztwie wad drewna, np. sęków. Dodatkowo przeprowadzono badanie na rozciąganie drewna wzmocnionego taśmami CFRP. Średnie naprężenie ścinające na długości próbki dla bazy pomiarowej 250 mm wynosiło 4 MPa. Na rys. 4 przedstawiono wykres naprężeń w taśmie. Zniszczenie próbki następowało poprzez odspojenie się taśmy od drewna, poprzez ścięcie warstwy powierzchniowej drewna lub poprzez odspojenie się kleju od taśmy. Podjęto także próbę wzmocnienia słupów drewnia-



Rys. 3. Zależność ugięcia od siły F (ZG – belki niewzmocnione, ZW – belki wzmocnione), [5]

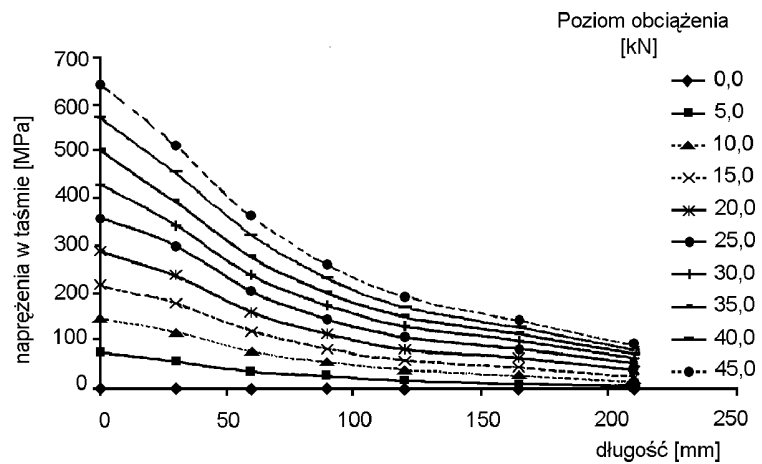
nych za pomocą mat z włókien węglowych, jednak na podstawie przeprowadzonych badań nie stwierdzono skuteczności tego działania. Należałoby przeprowadzić badania na smuklejszych próbkach, kiedy większy moment bezwładności redukuje wpływ wyboczenia.

Koncepcja odtworzenia nośności osłabionej strefy rozciąganej zamodelowanej za pomocą rozciągnięcia włókien rozciąganych prostopadłe do osi belki przedstawiono w [15] i [20] w dwóch układach z taśmami klejonymi pionowo (rys. 5) i poziomo (rys. 6). Jednocześnie podjęto próbę optymalizacji długości zakotwienia połączenie „taśma-drewno”. W przypadku badanych belek można uznać, że wzmocnienie osłabionej strefy rozciąganej pozwoliło na odtworzenie pełnej nośności belek na zginanie.

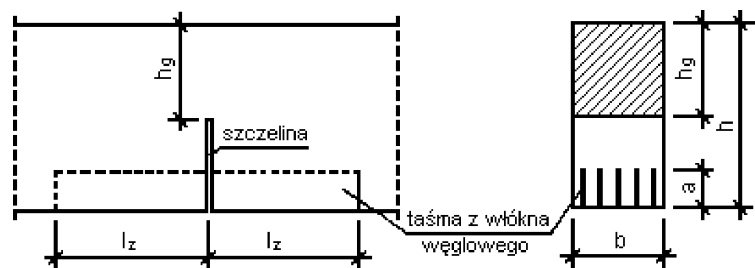
W [9] stwierdzono, że przyklejenie taśm do górnej i dolnej powierzchni belki (rys. 7) pozwala zwiększyć nośność belki o 100% przy jednoczesnym wzroście sztywności o 40% – rys. 7.

W [4] przedstawiono koncepcję wzmocnienia klejonych belek drewnianych z taśmami węglowymi wklejonymi w przekrój podczas procesu produkcyjnego. Decydujące znaczenie przy tym rozwiązaniu miała estetyka belki oraz jej większa odporność ogniowa.

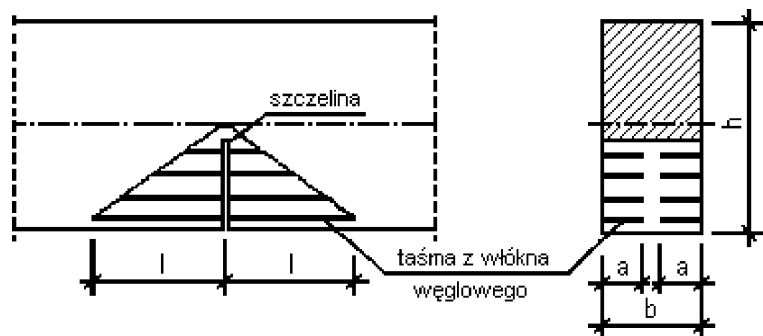
Najczęściej stosowany sposób doklejenia taśm przedstawiony na rysunku 8 – [2], [3], [5], [21], [23] – jest nie do zaakceptowania ze względów konserwatorskich. W obiektach zabytkowych często mamy do czynienia z bogatym wystrojem stropów, dlatego właściwszym rozwiązaniem jest „wtopienie” taśm w przekrój drewniany – rys. 11. Pozwala to na wykorzystanie tej metody w pracach konserwatorskich. Ogranicza to również możliwość delaminacji połączenia klejowego „taśma-drewno”, [13]. Wstępne badania belek z tak wklejonymi taśmami przeprowadzono w 2001 r. w Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej w programie pod kierunkiem naukowym dr. hab. inż. J. Jasieński [12].



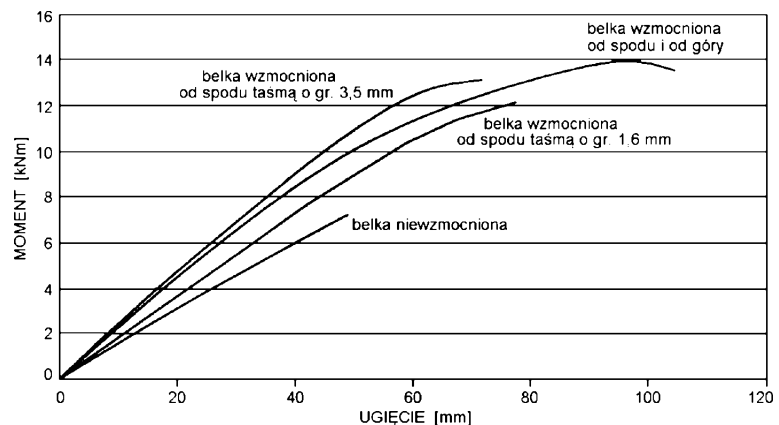
Rys. 4. Rozkład naprężeń na długości taśmy, [5]



Rys. 5. Konstrukcja belek próbnych wzmocnionych taśmami CFRP w układzie pionowym, [20]

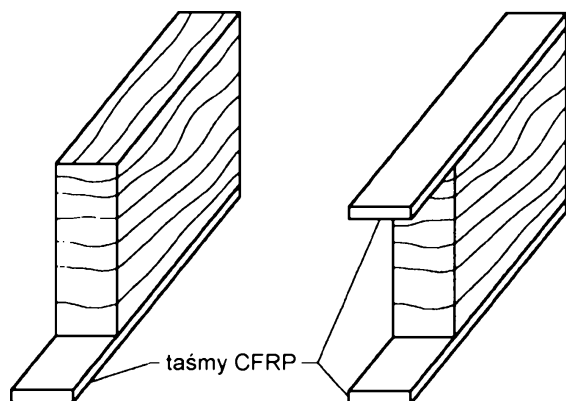


Rys. 6. Konstrukcja belek próbnych wzmocnionych taśmami CFRP w układzie poziomym, [20]



Rys. 7. Zależność ugięcie – moment zginający w środku rozpiętości badanych belek [9]

Sprężone taśmy kompozytowe z włóknami węglowymi (CFRP) otwierają nowe możliwości wzmocnienia istniejących konstrukcji. Dzięki sprężeniu przyklejane taśmy CFRP włączają się do



Rys. 8. Sposób przyklejenia taśm CFRP [9]

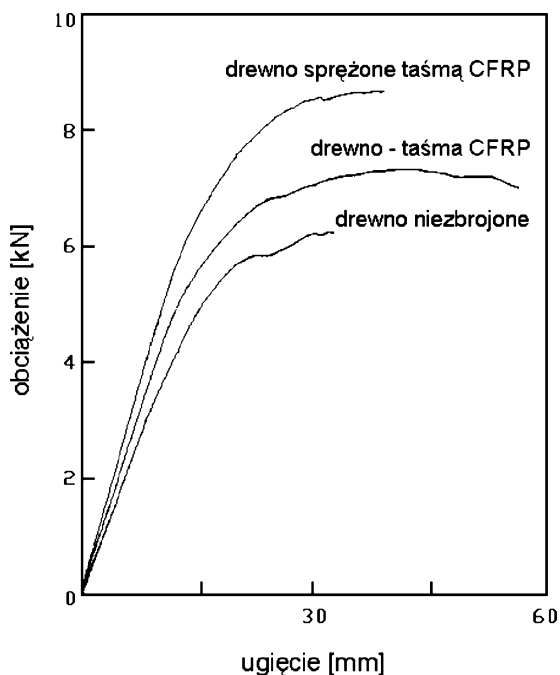
przenoszenia obciążeń w konstrukcji już od początkowych faz działania obciążenia oraz powodują redukcję naprężeń w istniejącym przekroju. Zakotwienia przejmują znaczną część siły rozwarstwiającej i zdecydowanie zmniejszają naprężenia ścinające w spoinie [17].

Dotychczas, przy wzmocnianiu, bardzo duża wytrzymałość na rozciąganie taśm kompozytowych CFRP wykorzystywana była tylko w niewielkim stopniu. Wstępne sprężenie taśm pozwala na znaczne wykorzystanie ich nośności, a przez to zwiększenie efektywności ekonomicznej wzmocnienia.

Elementem dodatkowym efektu sprężania jest wprowadzenie do konstrukcji naprężeń wstępnych ściskających w taki sposób, by w czasie eksploatacji redukcji w konstrukcji ulegały naprężenia rozciągające. Zwiększenie nośności następuje tu przez wprowadzenie stanu naprężeń przeciwnego do spodziewanego w eksploatacji oraz likwidacji wpływu wad drewna w strefie naprężeń rozciągających przez uprzednie sprężenie tych stref. Naturalne wady drewna bardziej obniżają wytrzymałość drewna pracującego na rozciąganie (nawet o 100%) niż na ściskanie.

Pierwsze próby wzmocniania belek drewnianych sprężonymi taśmami wę-

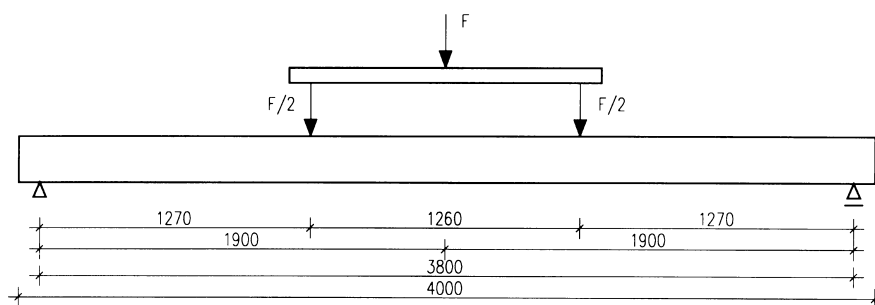
glowymi przeprowadzone zostały w 1992 roku [23]. Badania jednoznacznie wskazują na zasadność ta-



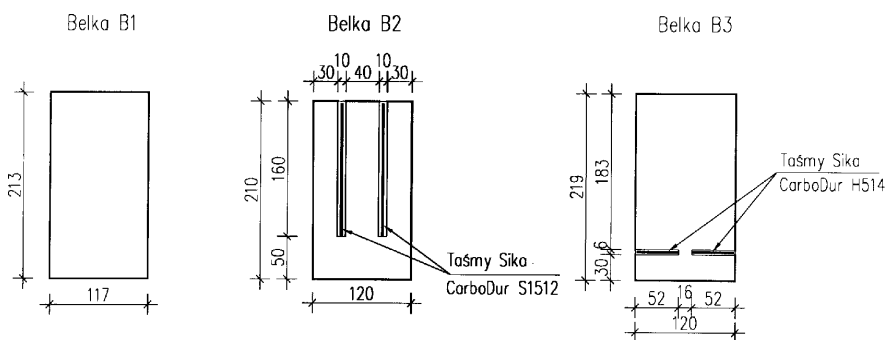
Rys. 9. Zależność ugięcie-obciążenie (przekrój środkowy) dla belek z drewna niezbrojonego, zbrojonego i sprężonego [22]

kiego rozwiązania – znaczący wzrost nośności i sztywności (rys. 9).

W Stanach Zjednoczonych w okresie 1993-1995 zastosowano taśmy FRP na ponad stu kład-



Rys. 10. Schemat stanowiska badawczego



Rys. 11. Przekroje poprzeczne badanych belek

kach dla pieszych i mostach drewnianych przeznaczonych do lekkiego transportu. W sierpniu 1995 skonstruowano pierwszy most (Lighthouse Bridge) dla ciężkiego transportu kołowego z użyciem FRP [22]. Następnie powstało wiele innych mostów drewnianych, m.in. The Pattagumpus Bridge (1997) oraz The West Seboeis Stream Bridge (1998).

W badaniach długotrwałych zespolonego stropu drewniano-żelbetowego wzmocnionego za pomocą taśm CFRP zaobserwowano wahania ugięć w cyklu rocznym, związane z naturalnymi zmianami wilgotności [6].

Wyniki z cytowanych badań dostarczają wiele interesujących informacji w kreowaniu, zastosowaniu

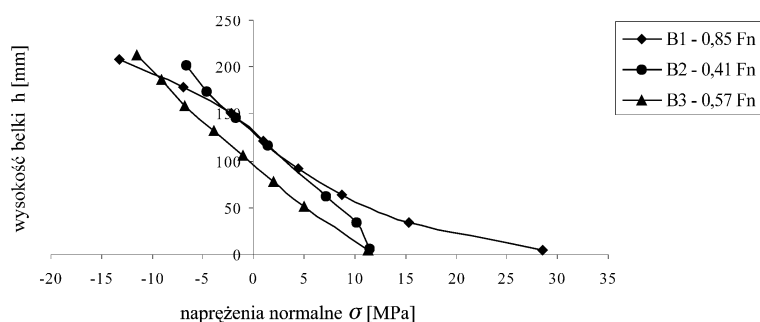
taśm CFRP w konserwacji i wzmocnianiu zabytków budownictwa drewnianego.

3. Cel i zakres badań własnych

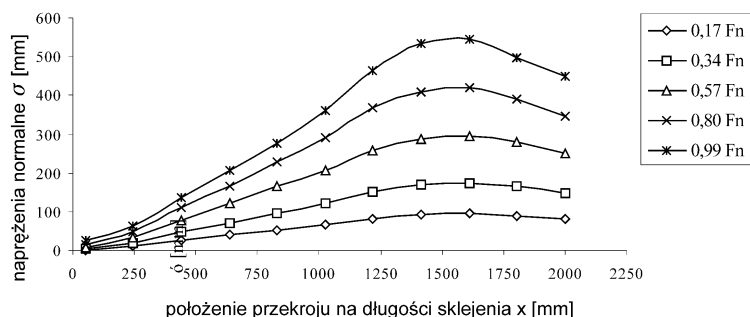
Celem głównym realizowanych badań było oszacowanie redukcji odkształceń oraz wzrostu nośności zginanych belek drewnianych wzmocnionych taśmami węglowymi CFRP. Elementami badanymi były jednoprzęsłowe belki wykonane z ok. stuletniego drewna sosnowego o schemacie statycznym jak na rys. 10. Belka świadkowa (niewzmocniona), belka wzmocniona taśmami Sika CarboDur S1512 oraz belka wzmocniona taśmami Sika CarboDur H514. Rozpiętość belek w osiach podpór wynosiła 3,80 m.

Wymiary przekrojów poprzecznych poszczególnych belek oraz sposób ich wzmocnienia pokazano na rys. 11. Grubości poszczególnych taśm wynosiły odpowiednio 1,2 mm oraz 1,4 mm. Do wklejania taśm użyto kleju na bazie żywicy epoksydowej o następującym składzie:

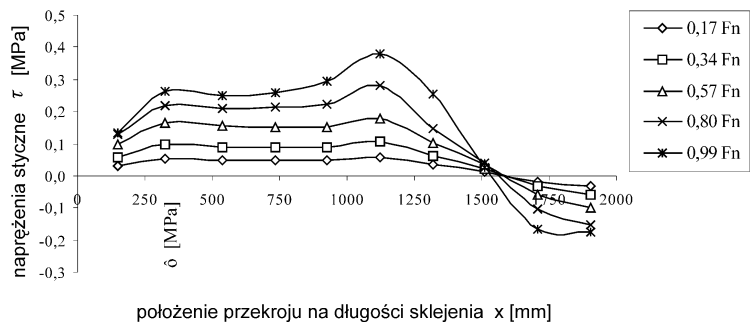
- Epidian 5 – 100 cz. w.
- cement 32,5 – 185 cz. w.
- utwardzacz Z-1 – 11 cz. w.
- ftalan dwubutyli – 5 cz. w.



Rys. 12. Naprężenia normalne w drewnie, $F=30$ kN



Rys. 13. Naprężenia normalne w taśmie – belka B3



Rys. 14. Naprężenia styczne w spoinie – belka B3

4. Wyniki zrealizowanych badań

Wartości odkształceń drewna, przy takim samym obciążeniu w odpowiadających sobie przekrojach, były znacznie mniejsze w belkach wzmocnionych taśmami węglowymi od odkształceń belki świadkowej. Wartości ugięć w środku rozpiętości belek przy obciążeniu 30 kN wynosiły dla belek B1, B2, B3 odpowiednio: 40,63 mm; 20,06 mm; 28,54 mm. Wartości ugięć w zależności od siły obciążającej przedstawiono na rys. 12.

Wzrost nośności dla belek zginanych B2 i B3 w stosunku do belki świadkowej B1 wyniósł odpowiednio 108% i 50%. Obciążenie jakie przeniosły odpowiednio belki B1, B2, B3 wyniosło: 35,1, 73,1, 52,7 kN. Na rys. 12 przedstawiono naprężenia normalne w drewnie przy sile obciążającej $F = 30$ kN.

Wyniki przeprowadzonych badań świadczą o niskim stopniu wykorzystania nośności taśmy. Maksymalna wartość naprężeń normalnych w taśmie belki B2 to 516,6 MPa (przy wytrzymałości taśmy na rozciąganie 1300 MPa), a w belce B3 – 590,4 MPa (przy wytrzymałości 2800 MPa). Istnieje zatem możliwość użycia taśm o mniejszej wytrzymałości bądź o mniejszym przekroju, tak aby lepiej została wykorzystana ich nośność. Wykres naprężeń normalnych w taśmie w belce B3 przedstawiono na rys. 13, zaś naprężeń stycznych w spoinie na rys. 14.

W belce B2 uzyskano obraz zniszczenia poprzez rozwarstwianie drewna belki w strefie rozciąganej. W belce B3 nastąpiło natomiast wyraźne rozwarstwienie na styku drewna i taśmy, w strefie przyskleinowej, od strony drewna. Wystąpiła też nieciągłość spoiny. Obrazy zniszczenia belek przedstawiono na rys. 15.

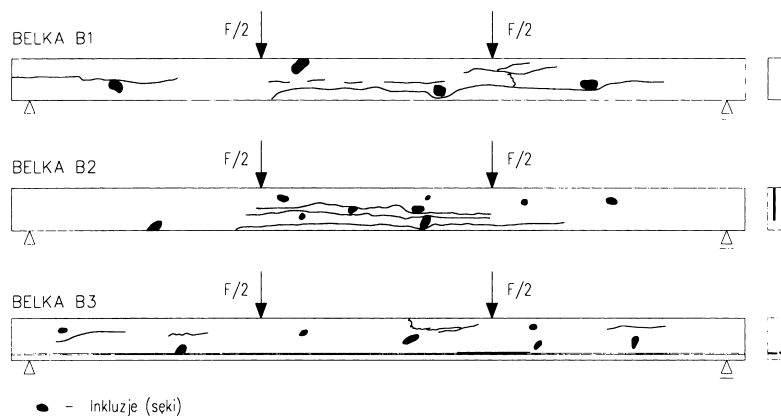
Wklejenie w przekrój belki taśm węglowych w znacznym stopniu ograniczyło wpływ nierównomierności usłojenia i inkluzji na nośność belki oraz rzutowało na obraz jej zniszczenia. Własności mechaniczne drewna w kierunku prostopadłym do kierunku obciążania zostały „ujednolicone”. Z punktu widzenia teorii niezawodności model zniszczenia badanych połączeń powinien przybierać postać modelu szeregowego, tzn. o nośności przekroju po wzmocnieniu decydować powinno jego najsłabsze ogniwo. Przekrój zespolony „drewno-CFRP” jest przekrojem znacznie doskonalszym niż przekrój litego drewna na skutek wprowadzenia taśmy węglowej „uciągającej” nierównomierną strukturę drewna. Stąd najsłabszego ogniwa w łańcuchu należy szukać tu w strefach przyskleinowych w drewnie, co potwierdzają badania. Istnieje jednak możliwość modyfikacji struktury powierzchni np. poprzez impregnację, co niewątpliwie powinno poprawić ich nośność.

Szczególną uwagę należy zwrócić na staranność wykonania spoiny klejowej. W belce B3 nastąpiło wyraźne rozwarstwienie na skutek nieciągłości spoiny.

5. Podsumowanie

Temat wzmocnienia konstrukcji drewnianych przy użyciu nowoczesnych technologii jest w Polsce i na świecie ciągle stosunkowo słabo rozpoznany. Dopiero w ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania tą tematyką. Świadczą o tym kongresy światowe poświęcone konstrukcjom drewnianym – Montreux 1998 i Lahti 2001.

Badania podmiotowej metody jednoznacznie wskazują na przydatność taśm węglowych do wzmocnienia konstrukcji drewnianych. Wartości ugięcia belek i naprężeń w drewnie zostały poważ-



Rys. 15. Przebieg zarysowań w zginanych belkach

nie zredukowane, zaś nośność belek wzrosła nawet ponad 100%.

Potrzebne są kolejne badania ukierunkowane w szczególności na:

- wytrzymałość połączeń typu „CFRP – drewno”,
- nośność i odkształcalność belek drewnianych po wzmocnieniu z użyciem CFRP,
- ugięcia pełzające w czasie,
- wpływy ograniczające możliwości stosowania technologii (temperatura, wilgotność, stopień strukturalnej destrukcji drewna historycznego, etc.).

Konieczne są również studia teoretyczne pozwalające na opracowanie metod szacowania nośności i sztywności belek po wzmocnieniu, zwłaszcza w oparciu o modelowanie numeryczne (MES).

Tradycyjne modele matematyczne bazujące na metodzie zastępczych charakterystyk przekroju bądź równości ugięć elementu wzmocnianego i wzmocniającego nie dają zadowalających rezultatów. Proponowane dotychczas sposoby określania dystrybucji naprężeń w [3] i [19] dla przekroju zginanego elementu zespolonego z reguły okazują się nieprzydatne ze względu na stopień skomplikowania oraz trudności z określeniem warunków brzegowych. Występuje również konieczność określenia jednostkowych wytrzymałości stosowanych połączeń klejowych.

Wydaje się, że pewne możliwości tworzyć tu będą modele oparte na zależnościach przestrzennych wychodzących z bryły naprężeń możliwej do wyznaczenia w badaniach połączeń „drewno-CFRP” [12]. Znane są już próby stworzenia modelu przy zastosowaniu Metody Elementów Skończonych [10]. W obydwu przypadkach zasadniczym proble-

mem jest prawidłowe dobranie funkcji określającej rozkład naprężeń stycznych w połączeniu.

Literatura

1. Ajdukiewicz A.: Rehabilitation of the Highest Wooden Tower in Poland. *Structure Engineering International*, 3/2000.
2. Becker S., Rippin T.: Entwicklung eines Bemessungsverfahrens für Verbundquerschnitte aus Brettschichtholz und faserverstärkten Kunststoffen. Diplomarbeit, FH Wiesbaden, 1999.
3. Bergmeister K., Luggin W.: Innovative strengthening of timber structures using Carbon Fibres. *Innovative Wooden Structures and Bridges Conference*, Lahti, 2001.
4. Blass H. J., Romani M.: Tragfähigkeitsuntersuchungen an Verbundträgern aus BS-Holz und Faserverbundkunststoff-Lamellen. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 59, 2001.
5. Brol J.: Wzmacnianie elementów drewnianych taśmami lub matami z włókien węglowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Budownictwo*, z. 93, Gliwice, 2001.
6. Brol J.: Wzmacnianie zespolonych stropów drewniano-żelbetowych polimerami zbrojonymi włóknami węglowymi. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Budownictwo*, z. 95, Gliwice, 2002.
7. Crews K., Greenland A., Bakkos S.: Application of advanced Fibre Reinforcement Plastic composites to structural timber. *5-th World Conference on Timber Engineering*, Montreux, Switzerland, 1998.
8. Dagher H.J., Lindyberg R., Abdel-Magid B.: Three FRP-reinforced glulam demonstration projects in the USA. *5-th World Conference on Timber Engineering*, Montreux, Switzerland, 1998.
9. Greenland A., Crews K., Bakkos S.: Enhancing timber structures with advanced Fibre Reinforced Plastic composite reinforcements. *5-th World Conference on Timber Engineering*, Montreux, Switzerland, 1998.
10. Guan Z.W.: Structural behaviour of glued bolt joints using FRP. *5th World Conference on Timber Engineering*, Montreux, Switzerland, 1998.
11. Jasięko J.: Opracowanie metod wzmacniania konstrukcji drewnianych przy zastosowaniu żywic syntetycznych. Raport Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, seria SPR 15/1989, Wrocław, 1989.
12. Jasięko J.: Połączenia klejowe w rehabilitacji i wzmacnianiu zginanych belek drewnianych. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław, 2002.
13. Kowal Z.: Delaminacyjna niestateczność powłok kompozytowych na elementach metalowych. *IX International Conference on Metal Structures*, Kraków, 1995.
14. Leijten A.J.M.: Balkkop restauratie met ingelijmde staalplaten. Rapport 25-87-8/5-LV-6, TU Delft, Netherlands, 1987.
15. Lis Z., Rapp P.: Odworzenie nośności osłabionej strefy rozciąganej w zginanych belkach drewnianych za taśm z włókien węglowych. *Konferencja Naukowa, Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych*, Szczecin, 2002.
16. Luggin W., Bergmeister K.: Carbon Fibre Reinforced and prestressed timber Beams. *2nd Int. PhD Symposium in Civil Engineering*, Budapest, 1998.
17. Łagoda M.: Możliwość wzmacniania konstrukcji mostowych sprężonymi taśmami kompozytowymi. *Konferencja Naukowo-Techniczna, Awarie Budowlane*, Szczecin – Międzyzdroje, 2003.
18. Martin, Z., Tingley, D.A.: Fire resistance of FRP reinforced glulam beams. *World Conference on Timber Engineering*, Whistler Resort, British Columbia, Canada, 2000.
19. Plenzler R.: Redystrybucja naprężeń w zginanych elementach zespolonych z drewna i płyty pilśniowej. *Konferencja Naukowa, Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych*, Szczecin-Świnoujście, 1999.
20. Rapp P, Lis Z.: Odworzenie nośności osłabionej strefy rozciąganej w zginanych belkach drewnianych za pomocą zbrojenia rozproszonego z włókien węglowych. *Konferencja Naukowo-Techniczna, Remo 2002*, Wrocław – Zamek Kliczków, 2002.
21. Siebler A., Vafakish Homae A.: Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern aus Brettschichtholz und Carbonfaserverstärkten Kunststoffen. *Forschungsarbeit FH, Wiesbaden*, 1999.
22. Tingley D. A., Gai. C.: FRP reinforced glulam performance: a case study of the Lighthouse Bridge. *5-th World Conference on Timber Engineering*, Montreux, Switzerland, 1998.
23. Triantafillou T., Deskovic, N.: Prestressed FRP Sheets as External Reinforcement of Wood Members. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 118 (5), 1992.
24. Żaboklicki A.: Rehabilitacja drewnianych konstrukcji w zabytkowych obiektach architektury i budownictwa. *Konferencja Naukowo-Techniczna; Konserwacja, wzmacnianie i modernizacja budowlanych obiektów historycznych i współczesnych*, Kielce, 2001.