

Marta KAŁUŻA\*  
Politechnika Śląska

## WYBRANE PROBLEMY WZMACNIANIA KONSTRUKCJI ŻELBETOWYCH SPRĘŻAJĄCYMI TAŚMAMI Z WŁÓKIEN WĘGLOWYCH

**Streszczenie.** Czynne (aktywne) wzmacnianie jest coraz powszechniej stosowaną metodą zwiększania nośności i trwałości istniejących obiektów budowlanych. W artykule opisano podstawowe problemy wzmocnień realizowanych poprzez sprężenie konstrukcji taśmami z włókien węglowych (CFRP), a w szczególności zagadnienie bezpiecznego sposobu przekazania siły z naciągniętego ciągu na konstrukcję.

## SELECTED PROBLEMS OF STRENGTHENING OF RC STRUCTURES USING PRESTRESSING CFRP LAMINATES

**Summary.** The active strengthening is a commonly used method of increasing the load capacity and durability of existing structures. This paper describes the basic problems of elements which are post-tensioned using the externally bonded stressed Carbon Fibre Reinforced Polymers (CFRP) – laminates. The problem of a safe transfer of prestressing force from CFRP strip to the strengthened element has been presented.

### 1. Wprowadzenie

Konstrukcje betonowe, wobec narażenia na działanie szkodliwych czynników środowiskowych, częste zmiany sposobu ich użytkowania (co pociąga za sobą zmiany obciążeń użytkowych), a także modyfikacje związane z wprowadzaniem nowych norm projektowych, niejednokrotnie wymagają wzmocnienia. Problem ten dotyczy praktycznie wszystkich elementów konstrukcyjnych, a szczególnie uciążliwy staje się w przypadku zginanych belek. Przez lata podstawowym sposobem wzmocnienia żelbetowych belek było wprowadzenie do konstrukcji dodatkowego zbrojenia zewnętrznego w postaci zespolonych z

---

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

elementem prętów lub płaskowników stalowych. Pręty takie mogą być zastosowane jako wzmocnienie bierne (bez wstępnego naciągu) lub czynne – po wstępnym naciągu.

Jednym z problemów użytkowych związanych ze wspomnianym wyżej sposobem wzmocnienia konstrukcji jest korozja cięgien wykonanych ze stali węglowej. Alternatywnym rozwiązaniem jest tutaj wykonanie zbrojenia zewnętrznego z włókien niemetalicznych – węglowych, szklanych lub aramidowych. Charakteryzują się one dużą wytrzymałością na rozciąganie przy jednoczesnym wysokim współczynniku Younga (włókna węglowe), a także wysoką odpornością na czynniki korozyjne. Jedyną istotną ich wadą jest niewielka odporność na ogień i wysoką temperaturę. Najlepsze parametry mechaniczne wykazują laminaty z włókien węglowych zatopionych w matrycy żywicznej (CFRP). Z uwagi na charakterystykę nośności i sztywności taśmy te, zastosowane jako zbrojenie bierne, mogą być wykorzystane do około 50% nośności, stąd technicznie i ekonomicznie uzasadnione jest zastosowanie ich do sprężania istniejącej konstrukcji. Wzmocnienie takie jest znacznie efektywniejsze, co przedstawiono m.in. w [1].

## **2. Wybrane problemy sprężania zewnętrznymi cięgnami niemetalicznymi**

Sprężenie zewnętrzne, jako podstawowy rodzaj wzmocnienia czynnego istniejącej konstrukcji, niesie za sobą wiele problemów natury technicznej. Niejednokrotnie brak jest danych dotyczących wzmocnianej konstrukcji – zarówno materiałowych (właściwości betonu i stali), jak i konstrukcyjnych (sposób i intensywność zbrojenia). Często utrudnione jest określenie stanu technicznego obiektu (niedostępne fragmenty) oraz brak jest danych dotyczących historii użytkowania obiektu, a zatem możliwości wystąpienia przeciążeń. Niezależnie od wyżej wymienionych istotnym problemem jest dobór i realizacja sprężenia, a w szczególności odpowiednie zakotwienie cięgien niemetalicznych.

Zagadnienie to nie jest zbyt szeroko opisywane w dostępnej literaturze. Prekursorami w tej dziedzinie byli Saadathanesh i Ehsani [2], których badania dotyczyły pośredniego sprężania elementów taśmami z włókien szklanych (GFRP). Polegały one na wstępnym wygięciu (odwrotna strzałka ugięcia) belki żelbetowej, a następnie przyklejeniu na jej powierzchni taśm GFRP. Sprężenie realizowano przez usunięcie siłowników wymuszających ujemną strzałkę ugięcia – powrót belki do pierwotnego kształtu wywoływał naciąg taśm. Podstawową wadą tej metody było uzyskanie niewielkiej siły sprężającej w taśmach, a zatem

niska ich efektywność. Ponadto praktycznie niemożliwe było zastosowanie jej w warunkach istniejącej konstrukcji.

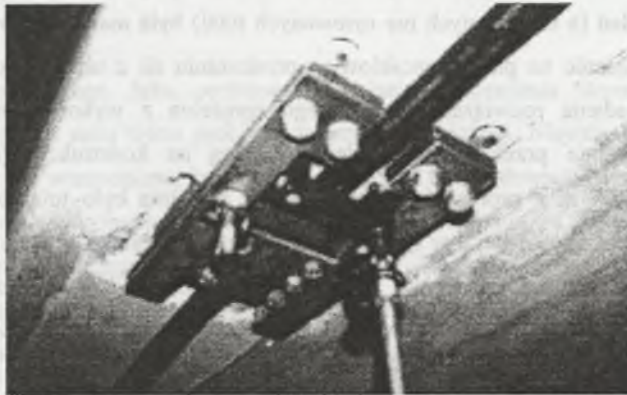
Zupełnie odmienne technicznie rozwiązanie zaproponował Deuring [3]. Metoda polegała na naciągu taśm CFRP w specjalnej ramie stalowej, niezależnej od wzmacnianej konstrukcji, a następnie doklejaniu ich do żelbetowej belki. Wieloetapowe usuwanie ramy powodowało stopniowe przekazywanie siły sprężającej na belkę. System ten posiadał jednak wyraźne ograniczenia fizyczne. W momencie gdy naprężenia ścinające na styku taśm z betonem przekraczały wytrzymałość betonu na ścinanie, następowało gwałtowne rozwarstwienie między otuliną zbrojenia połączoną z laminatem a resztą przekroju żelbetowego. Drugą wadą metody było ograniczenie w stosowaniu jej *in situ* ze względu na rozmiary ramy stalowej.

W cytowanych wyżej badaniach naciągnięte taśmy łączono z elementami żelbetowymi na całej długości w sposób przyczepnościowy (istnieje tu analogia do typowych konstrukcji strunobetonowych). Zniszczenie następowało wskutek ścięcia betonu w otulinie między taśmą sprężającą a zbrojeniem głównym. Dokładny model zniszczenia styku taśmy z betonem przedstawili D. Kim i W. Sebastian w pracy [4]. Opisane w niej badania objęły 6 belek i pozwoliły na opracowanie dwóch modeli zniszczenia związanych z utratą przyczepności taśm na skutek pojawiania się rys prostopadłych lub rys ukośnych. Jednym z wniosków płynących z opisanych badań (a także innych nie cytowanych tutaj) była mała efektywność rozwiązań bazujących wyłącznie na przyczepnościowym przekazaniu sił z taśm na konstrukcję. Stąd pojawiły się badania rozwiązań zewnętrznego sprężenia z wykorzystaniem elementów kotwiących, lokalnie przekazujących siłę sprężającą na konstrukcję (analogicznie do kablobetonu). Jednym z problemów wymagających zbadania było tutaj przekazanie sił z ciągien na elementy kotwiące, a w tym mechanizmu zniszczenia zakotwień. Zacytować tutaj można pracę Kerstensa, Bennenka i Campa [5], opisującą system kotwienia klinami stożkowymi. W pracy [6] zaprezentowano dokładny mechanizm zniszczenia w zakotwieniu taśm FRP oraz przedstawiono procedurę obliczeniową, pozwalającą na oszacowanie obciążenia niszczącego strefę zakotwienia przy wzmacnianiu elementów taśmami FRP. Prawidłowość obliczeń potwierdzono serią badań 26 niezarysowanych wcześniej żelbetowych belek.

Cytowane badania stanowiły materiał doświadczalny, pozwalający na opracowanie, opisanych w dalszej części referatu, dostępnych już na rynku systemowych rozwiązań kotwienia sprężających taśm CFRP.

### 3. Przegląd systemów zakotwienia

System kotwienia oparty na zakotwieniu biernym na jednym końcu cięgna i zakotwieniu czynnym po drugiej stronie, gdzie realizowany jest naciąg, zaprezentowany został w 1999 r. przez zespół H. P. Andrä, G. König, M. Maier jako system LeobaLCII [1], [7]. Jak w każdej tego typu konstrukcji rozwiązania wymagały dwa problemy: przekazanie siły sprężającej z cięgna na blok kotwiący oraz dalej z bloku kotwiącego na konstrukcję żelbetową. W pierwszym przypadku trudność sprowadzała się do ujednocnienia naprężeń między elementami bloku kotwiącego a taśmą z włókien. Z uwagi na wyraźną anizotropię taśm oraz relatywnie niską wytrzymałość na ścinanie matrycy żywicznej spajającej poszczególne włókna węglowe stosunkowo niewielka niejednorodność naprężeń w poszczególnych włóknach powodowała wzajemne ich ścięcie, a w efekcie rozwarstwienie taśm. W ekstremalnym przypadku powodowało to przeciążenie najsilniej obciążonych włókien i zniszczenie taśmy. Problem jednolitego obciążenia taśm rozwiązano poprzez płaskie ich ukształtowanie oraz zastosowanie odpowiednio sztywnych płytek kotwiących z dodatkową warstwą kleju na styku taśmy z zakotwieniem. Rozwiązanie to pokazano na rys. 1.

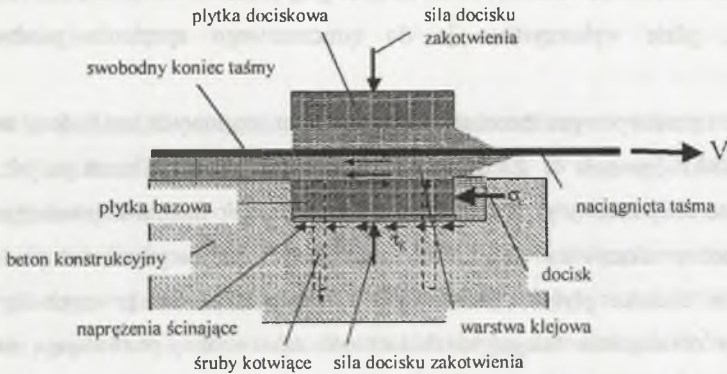


Rys. 1. Realizacja naciągu w zakotwieniu czynnym systemu LeobaLCII  
Fig. 1. The stressing operation in the live anchor of the LeobaLCII system

Rysunek 2 schematycznie wyjaśnia zasadę przekazania sił z bloku kotwiącego na element żelbetowy. Wykorzystano tutaj docisk między czołem elementu kotwiącego a betonem otuliny (w odpowiednio wyfrezowanym gnieździe) oraz siły tarcia na styku elementu kotwiącego z betonem. Zakotwienie projektowane jest tak, aby nie dopuścić do przeciążenia

betonu w sąsiedztwie elementu kotwiącego, a w efekcie do jego zarysowania. Dodatkowo, w trakcie kotwienia taśma na całej długości jest przyklejana do wzmacnianego elementu.

System ten po raz pierwszy zastosowano w 1998 r. przy naprawie sprężonego 4-przęsłowego Luterbridge w Gomadingen, w Niemczech [1].



Rys. 2. Schemat przekazania siły sprężającej z taśmy CFRP na wzmacniany element  
Fig. 2. Diagram of transfer of the prestressing force from CFRP strip to the strengthened element

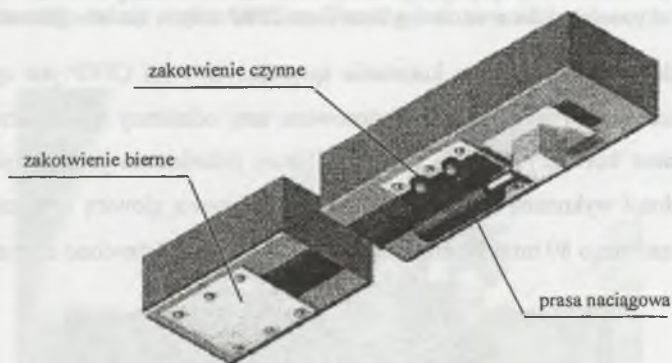
Kolejnym dostępnym sposobem kotwienia sprężających taśm CFRP jest opracowany w Szwajcarii system StressHead (SH) [8]. Zastosowano tutaj odmienny sposób przekazania sił z taśmy na element kotwiący. Taśma z obydwu stron zakończona jest eliptyczną głowicą kotwiącą w całości wykonaną z włókien węglowych. Typową głowicę o wymiarach obrysu przekroju poprzecznego 80 mm×60 mm i długości 110 mm przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Głowica wraz z blokiem kotwiącym systemu zakotwień StressHead (SH)  
Fig. 3. The head and the anchor of StressHead system

Siła sprężająca przekazywana jest z głowicy na dwuczęściowy stalowy element kotwiący przez bezpośredni docisk. Blok kotwiący zamocowany jest do konstrukcji betonowej śrubami, a dodatkowo przekazuje naprężenia poprzez docisk do czoła wyfrezowanego gniazda. Podobnie jak w poprzednim rozwiązaniu taśma jest przyklejona do elementu żelbetowego. Pierwsze testowe zastosowanie SH miało miejsce przy przebudowie mostu nad rzeką Reuss w Niemczech, gdzie wykorzystano je do tymczasowego sprężenia przebudowywanej konstrukcji.

Kolejnym prototypowym sposobem kotwienia taśm węglowych jest badany we Freiburgu [9] system S&P (rysunek 4). Zarówno w przypadku zakotwienia biernego, jak i czynnego wykorzystano tutaj stalowe płytki kotwione mechanicznie do betonu konstrukcyjnego. Siły w zakotwieniach przekazywane są poprzez styk taśmy z powierzchnią betonu i płyty przy odpowiednim docisku płyty i zastosowaniu warstwy kleju. Po pewnych modyfikacjach pierwotnego rozwiązania osiągnięto skuteczność zakotwienia, pozwalającą na uzyskanie odkształcalności taśmy CFRP w granicy 1%.



Rys. 4. Zakotwienie biernie i czynne systemu S&P

Fig. 4. Live and dead anchor of the S&P system

We wszystkich opisanych systemach do naciągu taśm stosowano odpowiednio zaprojektowane prasy hydrauliczne, dostosowane do specyficznej geometrii rozwiązania.

Niezależnie od przedstawionych wyżej rozwiązań systemowych testowane były także autorskie propozycje systemów kotwienia taśm CFRP. Na uwagę zasługują tutaj badania R. El-Hacha, R. G. Wight, M. F. Greena [10], porównujące skuteczność trzech typów głowicy w całości wykonanych z CFRP, a różniących się kształtem. Jako najwłaściwsze określono płaskie zakończenie cięgna, pozwalające na częściowe wyeliminowanie efektu koncentracji

naprężeń w taśmie w pobliżu zakotwienia. Ponadto, badaniami objęto zachowanie się elementów sprężonych CFRP z symulacją narażenia ich na działanie różnych temperatur w okresie czasu rzędu 50 lat.

#### 4. Podsumowanie

Wśród wielu problemów dotyczących sprężania niemetalicznymi taśmami jednym z podstawowych jest bezpieczne przekazanie sił sprężających z cięgien na wzmacnianą konstrukcję żelbetową. Wstępnie testowane rozwiązania czysto przyczepnościowe nie zdały egzaminu, groziły bowiem gwałtownym zniszczeniem w obrębie otuliny betonowej między zbrojeniem głównym elementu i sprężającymi taśmami. Jako rozwiązanie znacznie bezpieczniejsze pojawiła się idea zastosowania lokalnego kotwienia końców taśm w głowicach mechanicznie stabilizowanych do konstrukcji, z pozostawieniem klejenia na całej długości jako dodatkowego wzmocnienia. W artykule przedstawiono dostępne obecnie rozwiązania systemowe, pokrótce omawiając zasady ich działania.

W cytowanych opracowaniach istnieje pewna luka w zakresie badań efektywności wzmocnienia konstrukcji sprężanych taśmami z CFRP. Jako podstawowe czynniki wymagające rozpoznania wymienić tutaj należy intensywność naciągu taśm oraz pierwotną nośność konstrukcji, ograniczającą możliwość wprowadzania zbyt dużych sił sprężających. Sposób oceny efektywności sprężenia będzie jednym z elementów pracy doktorskiej autorki artykułu. Analizowany będzie m.in. odpowiedni dobór parametrów naciągu, zapewniający efektywny stopień wykorzystania mechanicznych właściwości włókien węglowych, przy jednoczesnym wyeliminowaniu ryzyka uszkodzenia samych taśm lub wzmacnianych elementów. Towarzyszyć temu będzie opracowanie podstawowej procedury numerycznej, pozwalającej na ocenę skuteczności przewidywanych wzmocnień.

#### LITERATURA

1. Andrä H.-P., Maier M.: Post-strengthening of RC Structures with Externally Bonded Prestressed CFRP Strips. 16<sup>th</sup> Congress of IABSE, Luzern, wrzesień 2000.

2. Saadatmanesh H., Ehsani M.: RC Beam Strengthened with GFRP Plates: Part I: Experimental Study. *Journal of Structural Engineering*, V. 117, No. 11, 1991, 3417-3433.
3. Deuring M.: Verstärkten von Stahlbeton mit gespannten Faserverbundwerkstoffen. Bericht Nr 224 EMPA, Dübendorf 1993.
4. Kim D., Sebastian W.: Parametrical study of bond failure in concrete beams externally strengthened with fiber reinforced polymer plates. *Magazine of Concrete Research*, V. 54, Nr 1, 2002, 47-59.
5. Kerstens J., Bennenk W., Camp J.: Prestressing with Carbon Composite Rods: A Numerical Method for Developing Reusable Prestressing System. *ACI Structural Journal* V. 95, Nr 1, 1998, 43-50.
6. El-Mihilmy M. T., Tedesco J. W.: Prediction of Anchorage Failure for Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber-Reinforced Polymer Plates. *ACI Structural Journal* V. 98, Nr 3, 2001, 301-314.
7. Andrä H.-P., König G., Maier M.: Einsatz vorgespannter Kohlefaser-Lamellen als Oberflächenspannglieder. *Beton- und Stahlbetonbau*, Heft 12, 2001, 737-747.
8. Schweigler G., Berset T.: The use of prestressed CFRP-Laminates as post-strengthening. 16<sup>th</sup> Congress of IABSE, Luzern, wrzesień 2000.
9. Suter R., Jungo D.: Vorgespannte CKF-Lamellen zur Verstärkung von Bauwerken. *Beton- und Stahlbetonbau*, Heft 5, 2001, 350-358.
10. El-Hacha R., Wight R. G., Green M. F.: Innovative System for Prestressing Fiber-Reinforced Polymer Sheets. *ACI Structural Journal* V. 100, Nr 3, 2003, 305-313.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Wojciech Radomski