

Tomasz TRAPKO\*  
Politechnika Wroclawska

## BADANIE NOŚNOŚCI SŁUPÓW ŻELBETOWYCH WZMACNIANYCH TAŚMAMI I MATAMI Z WŁÓKIEN WĘGLOWYCH

**Streszczenie.** W referacie przedstawiono wyniki badań doświadczalnych nośności słupów żelbetowych wzmocnianych taśmami i matami z włókien węglowych. Celem przeprowadzonego eksperymentu było określenie wpływu sposobu wzmocnienia na nośność i cechy odkształcalności elementów oraz określenie zależności między intensywnością wzmocnienia zewnętrznego a nośnością elementu. W referacie przedstawiono również opis mechanizmu zniszczenia tego typu elementów.

## RESEARCH ON LOAD CARRYING CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS STRENGTHENED WITH CFRP STRIPS AND WRAPS

**Summary.** The paper presents results research on load carrying capacity of reinforced concrete columns strengthened with CFRP strips and wraps. The first objective of this research was to determine the influence of the type of reinforcement on load carrying capacity and deformation of the tested elements. The second objective was to determine relation between the intensity of external reinforcement and load carrying capacity of the elements. Damage mechanisms of strengthened elements are also described.

### 1. Wprowadzenie

Wzmocnianie konstrukcji żelbetowych stanowi jedną z trudniejszych i bardziej odpowiedzialnych dziedzin inżynierii budowlanej. Wymaga ono zawsze indywidualnego potraktowania przez doświadczonego konstruktora, a zastosowana metoda wzmocnienia powinna zapewniać zapas bezpieczeństwa i gwarantować niezawodność w czasie. Przeważnie potrzebę wzmocniania konstrukcji żelbetowych budowli determinują jednocześnie: zwiększony poziom obciążeń stałych i zmiennych, które mają być bezpiecznie przenoszone przez konstrukcję oraz zły stan techniczny obiektu.

---

\* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Mieczysław Kamiński.

Stosowane powszechnie sposoby wzmocnienia elementów konstrukcyjnych przez zwiększanie przekroju poprzecznego lub zmianę schematu statycznego konstrukcji niosą za sobą wiele trudności i ograniczeń w ich stosowaniu, dlatego zaczęto poszukiwać nowych, alternatywnych rozwiązań. Metoda wzmocnienia żelbetowych elementów konstrukcyjnych przez doklejanie do nich materiałów kompozytowych – taśm, mat i kształtek z włókien węglowych jest nowością w światowej inżynierii budowlanej. Przeprowadzone obszernie testy, badania i analizy modelowe pozwoliły na zastosowanie tej metody w praktyce. Sprawdzenie systemu w teorii, badaniach laboratoryjnych i praktyce inżynierskiej na naturalnych obiektach pozwoliło na opracowanie algorytmów projektowania tego rodzaju wzmocnień oraz wytycznych technologicznych.

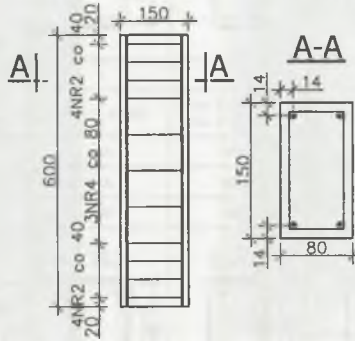
Na coraz szersze zastosowanie materiałów z włókien węglowych we wzmocnianiu konstrukcji budowlanych mają wpływ przede wszystkim ich właściwości wytrzymałościowe, duża trwałość, znaczna wytrzymałość zmęczeniowa. Dodatkowymi atutami są: łatwość wykonania wzmocnienia, krótki czas realizacji, brak ograniczeń wymiarowych, łatwość w manewrowaniu lekkimi materiałami. Jedyną zasadniczą wadą jest jeszcze stosunkowo wysoki koszt całego systemu. Elementy wzmocniające nie zwiększają w sposób istotny wymiarów konstrukcji, a więc nie wpływają na funkcjonalność i estetykę obiektu.

Wzrost zainteresowania, łatwość aplikacji i konkurencyjność tego typu wzmocnień stosowanych do elementów zginanych i ścinanych pozwolił na wysunięcie kolejnej propozycji wykorzystania kompozytów węglowych do wzmocnienia elementów ściskanych. W Instytucie Budownictwa Politechniki Wrocławskiej podjęto badania mające na celu wykazanie skuteczności wzmocnienia ściskanych słupów żelbetowych podłużnymi odcinkami taśm z włókien węglowych oraz poprzecznymi obejmami z maty z włókien węglowych. Celem podjętych badań jest również poznanie wpływu smukłości i mimośrodu na cechy odkształcalnościowe i wytrzymałościowe, określenie zależności między intensywnością wzmocnienia a nośnością elementu oraz opis mechanizmu zniszczenia tego typu elementów.

## 2. Opis badań

Przedmiotem badań były modele słupków (w skali ok. 1:5) o przekroju poprzecznym 80x150 mm i wysokości 600 mm. Zbrojenie podłużne wykonano w postaci czterech prętów o średnicy  $\varnothing 8$  ze stali A-II gatunku 18G2, zbrojenie poprzeczne w postaci strzemion o średnicy  $\varnothing 3$  ze stali A-I gatunku St3SX. Rozstaw strzemion zagęszczono przy końcach elementu do

40 mm na odcinku 150 mm równym długości dłuższego boku przekroju poprzecznego słupka (rys. 1). Elementy wykonano z betonu o średniej wytrzymałości na ściskanie  $f_{cm}=40,8$  MPa (zgniatanie sześciu próbek sześciennych o wymiarach 150x150x150 mm; odchylenie standardowe  $s=2,7$  MPa [2]).



Rys. 1. Badane słupki żelbetowe  
Fig. 1. Reinforced concrete columns tested

Przy realizacji zamierzonych celów przebadano dwie serie elementów: pierwsza seria oznaczona literą „a” składała się z pięciu słupków o różnej intensywności wzmocnienia podłużnymi taśmami z włókien węglowych, druga seria oznaczona literą „b” składała się z pięciu słupków o różnej intensywności wzmocnienia podłużnymi taśmami z włókien węglowych i zewnętrznymi obejmami z maty z włókien węglowych (rys. 2). Obejmy zewnętrzne rozmieszczono na tych samych poziomach co strzemiona stalowe. Intensywność wzmocnienia słupów charakteryzuje stopień wzmocnienia  $\rho_w=A_c/A_L$ , wyrażający stosunek pola powierzchni przekroju betonu w elemencie  $A_c$  do pola powierzchni taśmy z włókien węglowych  $A_L$ .

Dodatkowo zbadano dwa elementy bez wzmocnienia (słupki kontrolne – S1a i S1b) w celu określenia ich rzeczywistej nośności i mechanizmu zniszczenia.

Do wykonania wzmocnień wykorzystano: taśmy Sika CarboDur M1214 o grubości  $h = 1,4$  mm i szerokości dostosowywanej do pożądanej intensywności wzmocnienia, klej do taśm – Sikadur 30, preparat do czyszczenia i aktywacji kompozytów węglowych – Sika Colma Reiniger, matę SikaWrap Hex 230C i impregnat epoksydowy do mat – Sikadur 330. Wzmocnienia wykonano przestrzegając wszystkich reżimów technologicznych. Między innymi sprawdzono (zgodnie z zaleceniami firmy Sika Poland) sposób sklejenia taśmy z elementem przez opukanie taśmy w celu wykrycia porów powietrza pod kompozytem. Sprawdzone w ten sposób połączenie uznano za prawidłowe.



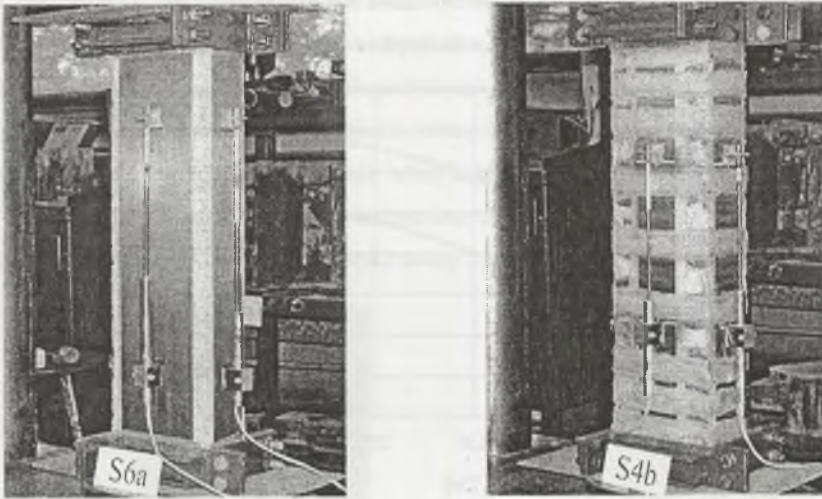
	S6a	S5a	S4a	S3a	S2a
liczba elementów	1	1	1	1	1
Przekrój taśm [mm]	120x1,4 – 2 szt. 60x1,4 – 2 szt.	90x1,4 – 2 szt. 60x1,4 – 2 szt.	60x1,4 – 4 szt.	60x1,4 – 2 szt. 30x1,4 – 2 szt.	30x1,4 – 4 szt.
Powierzchnia taśm [cm <sup>2</sup> ]	5,04	4,20	3,36	2,52	1,68
intensywność wzmocnienia [X]	4,20	3,50	2,80	2,10	1,40
	S6b	S5b	S4b	S3b	S2b
liczba elementów	1	1	1	1	1
Przekrój strzemiem [mm]	25x0,13	25x0,13	25x0,13	25x0,13	25x0,13

Rys. 2. Elementy serii „a” i „b”  
Fig. 2. Elements of series „a” and „b”

Wzmocnienia słupków dokonano bez ich wstępnego obciążenia. Autor zdaje sobie sprawę, że w praktyce wzmocnianie polega na podnoszeniu nośności elementów konstrukcji tak, aby mogły one przenosić obciążenia na poziomie wyższym od pierwotnie przekazywanych i jedynie odciążonych na czas aplikacji systemu. Jednak w badaniach chodziło przede wszystkim o rozpoznanie zjawisk zachodzących w słupach przy różnie skonstruowanym wzmocnieniu.

Badane elementy poddano doraźnemu ścisaniu osiowemu. Obciążenie przykładano skokowo zgodnie z zaleceniami normy [3]. Dla obydwu serii i słupków kontrolnych zrealizowano ten sam program badań, składający się z sześciu cykli obciążeń wstępnych (do poziomu ok. 1/3÷1/2 nośności granicznej) i siódmego cyklu obciążenia elementu do zniszczenia. Odkształcenia podłużne elementu mierzono za pomocą czujników indukcyjnych o dokładności 0,001 mm.

Strefy przypodporowe słupków zabezpieczono dodatkowymi obejmami stalowymi w celu wyeliminowania przypadku zniszczenia ze względu na docisk tłoków prasy (rys. 3).



Rys. 3. Elementy na stanowisku badawczym  
Fig. 3. Elements during testing

### 3. Wyniki badań

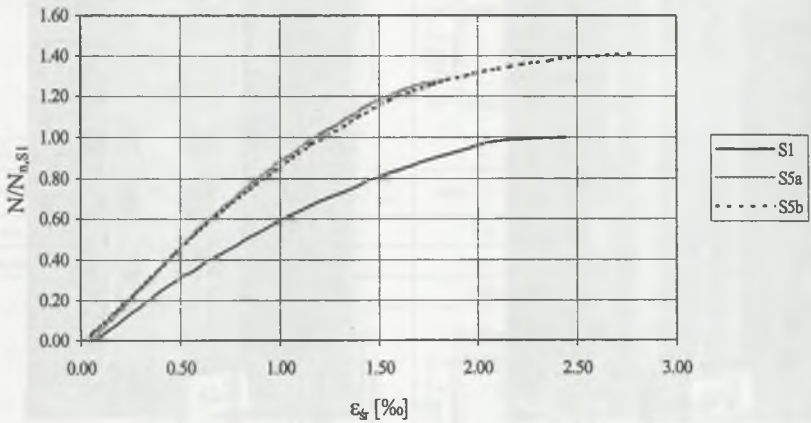
Po przebadaniu wszystkich elementów obydwu serii na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że nośność słupów o intensywności wzmocnienia podłużnego 1,40% i 2,10% nie dała zadowalających rezultatów, dlatego elementy te nie są brane pod uwagę w analizie wyników.

Nośność graniczna badanych słupów odpowiada sile niszczącej zarejestrowanej podczas ich ściskania.  $N_{n,S1}$  oznaczona średnią nośność graniczną dwóch słupków kontrolnych.

Na rys. 4 i 5 przedstawiono wybrane wykresy, porównujące średnie wartości odkształceń podłużnych  $\epsilon_{sr}$  w funkcji stosunku przykładanego obciążenia  $N$  do średniej nośności granicznej słupków kontrolnych  $N_{n,S1}$ .

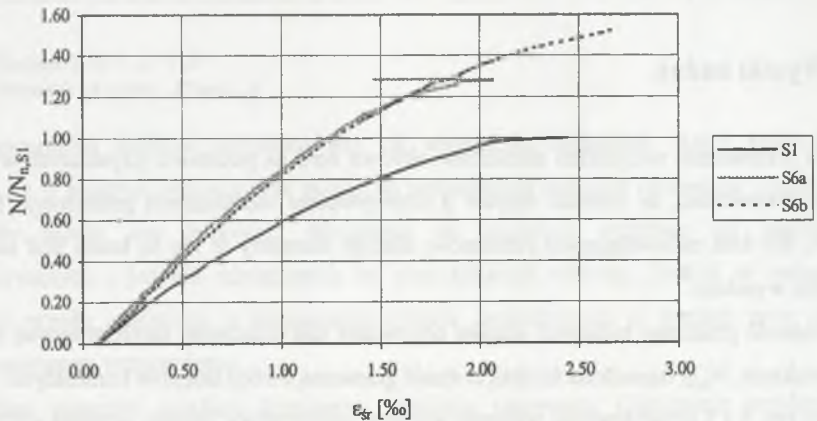
Na rys. 4 przedstawiono wykresy grupy elementów typu S5, natomiast na rys. 5 wykresy grupy elementów typu S6 w obydwu przypadkach porównując je z wykresem średnich odkształceń podłużnych  $\epsilon_{sr}$  słupków kontrolnych. Jak widać na rys. 5 i 6, zastosowanie wzmocnienia przez doklejenie podłużnych odcinków taśmy z włókien węglowych poprawia cechy odkształcalnościowe i nośność elementów, odpowiednio dla elementu S5a o 28% i S6a o 30% w stosunku do słupków kontrolnych. Zastosowanie dodatkowego wzmocnienia poprzecznego w postaci obejm z maty z włókien węglowych zapobiega gwałtownemu

odspajaniu się taśmy od elementu i dodatkowo podnosi nośność elementów, odpowiednio dla elementu S5b o 41% i S6b o 53% w stosunku do słupków kontrolnych.



Rys. 4. Zależność  $N/N_{n,S1}$ -  $\epsilon_{sr}$  dla słupów: S1, S5a, S5b

Fig. 4.  $N/N_{n,S1}$  versus  $\epsilon_{sr}$  for columns: S1, S5a, S5b



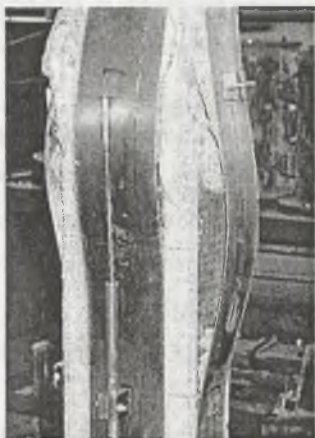
Rys. 5. Zależność  $N/N_{n,S1}$ -  $\epsilon_{sr}$  dla słupów: S1, S6a, S6b

Fig. 5.  $N/N_{n,S1}$  versus  $\epsilon_{sr}$  for columns: S1, S6a, S6b

Średnie odkształcenia elementów wzmocnionych na poziomie średniej nośności granicznej elementów kontrolnych są ok. 50% mniejsze od średnich odkształceń podłużnych słupków bez wzmocnienia. Widoczne na rys. 5 zaburzenia wykresu S6a wynikają z procesu destrukcji zespolenia taśmy ze słupkiem, co w konsekwencji spowodowało odklejenie się części taśmy na pewnym odcinku.



Obserwacja mechanizmu zniszczenia, a także późniejsza inwentaryzacja słupków pozwoliła stwierdzić, że zniszczenie elementów serii „a” nastąpiło wskutek odspojenia się taśmy na pewnym odcinku i natychmiastowego zniszczenia betonu i uplastycznienia stali (rys. 6). Zaobserwowano, że odspojenie taśmy następowało w trojaki sposób: odspojenie taśmy z klejem i betonem, odspojenie taśmy z klejem, odspojenie samej taśmy. Jak widać, w przypadku elementów ściskanych wzmacnianych taśmami z włókien węglowych najslabsze ogniwa wzmocnienia występują na styku taśmy z klejem oraz kompozytu z otuliną betonową.



Rys. 6. Obraz zniszczenia elementów serii „a” i „b”  
Fig. 6. Damaged elements of series „a” and „b”

Zniszczenie elementów serii „b” następowało wskutek zerwania kilku obejm i natychmiastowego odspojenia się taśmy, zniszczenia betonu i uplastycznienia stali (rys. 6). Rozerwanie obejm poprzedzone było zawsze odgłosami pęknięcia włókien węglowych. Podobne efekty akustyczne zaobserwowano podczas próby wytrzymałości na rozciąganie maty z włókien węglowych zatopionej w żywicy epoksydowej.

#### 4. Podsumowanie

Otrzymane wyniki badań uzasadniają celowość podjętych zagadnień. Pozwalają one stwierdzić, że zastosowanie kompozytowych taśm węglowych do wzmacniania elementów ściskanych podnosi ich nośność graniczną, co jest wynikiem zmniejszenia przyrostu odkształceń podłużnych w stosunku do elementów kontrolnych przy jednakowych przyrostach siły podłużnej. Zastosowanie dodatkowych obejm zewnętrznych z maty z

włókien węglowych zapobiega odspajaniu się taśmy od elementu aż do momentu rozerwania maty, co jest równoznaczne ze zniszczeniem elementu.

Wyniki badań pozwalają na stwierdzenia, że w przypadku elementów wzmocnionych jedynie podłużnymi odcinkami taśm CFRP zniszczenie następowało w wyniku destrukcji połączenia na styku kompozytu z klejem lub na skutek oderwania się od elementu taśmy wraz z otuliną betonową. Elementy wzmocnione podłużnymi odcinkami taśmy CFRP i dodatkowymi obejmami z maty z włókien węglowych niszczyły się wskutek rozerwania się kilku opasek, po czym następowało odspojenie taśmy z otuliną betonową. W tym przypadku wartością determinującą nośność elementu są graniczne odkształcenia poprzeczne obejm z maty z włókien węglowych zatopionych w żywicy epoksydowej.

W kolejnym etapie autor zamierza dokładnie przeanalizować wpływ poszczególnych składników wzmocnienia – intensywność wzmocnienia podłużnego, zewnętrzne obejm z maty lub całkowite kilkukrotne owinięcie matą - na nośność elementów w skali naturalnej.

## LITERATURA

1. Kmita A., Kubiak J.: Badania konstrukcji betonowych. Przewodnik do ćwiczeń laboratoryjnych. Politechnika Wroclawska, Wrocław 1993.
2. Nagrodzka-Godycka K.: Badanie właściwości betonu i żelbetu w warunkach laboratoryjnych. Arkady, Warszawa 1999.
3. PN-73/B-06281 - Prefabrykaty budowlane z betonu. Metody badań wytrzymałościowych.

Recenzent: Prof. dr inż. Wojciech Radomski

## Abstract

This paper presents the problem of strengthening of reinforced concrete structures. There was showed results of experimental research load carrying capacity and deformation of the tested elements as well as description the damage mechanism reinforced concrete columns strenghtened with CFRP strips and wraps. Results of studies confirmed that the subject was worth investigating.