

WIT DERKOWSKI*

**PIERWSZE KRAJOWE ZASTOSOWANIE
WSTĘPNIE NAPRĘŻANYCH TAŚM KOMPOZYTOWYCH
DO WZMOCNIENIA KONSTRUKCJI HALI**

**THE FIRST IMPLEMENTATION IN POLAND
OF STRENGTHENING OF RC GILDERS
WITH PRE-TENSIONED COMPOSITE STRIPS**

Streszczenie

Prezentowany artykuł opisuje pierwszą w Polsce realizację wzmocnienia żelbetonowych belek konstrukcji nośnej dachu hali przemysłowej przez ich sprężenie taśmami kompozytowymi z włókien węglowych (CFRP). Podano opis konstrukcji budynku, wyniki badań stanu technicznego oraz sposób wzmocnienia. Skrótkowo przedstawiona została technologia wykonania wzmocnienia.

Słowa kluczowe: wzmocnienie, sprężenie, materiały kompozytowe, taśmy, CFRP

Abstract

The paper gives a detailed description of the first implementation in Poland of strengthening of a reinforced concrete structure by prestressing with CFRP strips. The strengthened beams were part of an industrial hall roof support structure. A description of the building structure, the results of monitoring its technical state and the methods used to strengthen it are included in the article.

Keywords: strengthening, posttensioning, composite materials, strips, CFRP

*Dr inż. Wit Derkowski, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Pierwsze wzmocnienie konstrukcji poprzez jej sprężenie zostało wykonane przez inż. Eugène'a Freyssineta w 1933 r. w trakcie remontu terminalu portu morskiego w Hawrze we Francji. Od tamtej pory technologia wzmocniania obiektów budowlanych stalowymi cięgnami sprężającymi bardzo się rozwinęła i wciąż w wielu przypadkach jest najlepszym sposobem zwiększenia lub przywrócenia pierwotnej nośności i trwałości konstrukcji.

Od połowy lat 90. do sprężania konstrukcji zaczęto stosować nowoczesne materiały kompozytowe wykonywane z polimeru i niemetalicznych włókien ciągłych (ang. FRP – *fibre reinforced plastics*). Liczne zalety materiałów kompozytowych [1] spowodowały, że nawet przy utrudnionym sposobie kotwienia cięgien zastosowanie tej technologii jest na świecie coraz powszechniejsze. Początkowo do sprężania używane były tylko liny z włókien węglowych lub aramidowych. W ostatnich latach do wzmocniania konstrukcji żelbetowych zaczęto stosować wstępnie naprężane taśmy z włókien węglowych (ang. CFRP – *carbon fibre reinforcement polymer*).

Zastosowanie wstępnie naprężanych taśm kompozytowych pozwala na wykonanie wzmocnienia w zasadzie bez zmiany wymiarów i ciężaru konstrukcji, przy czym w elementach zginanych lub rozciąganych pozwala na znaczące zwiększenie nośności. Wpływa również na stany graniczne użytkowości wzmocnianej konstrukcji, zmniejszając ugięcie oraz szerokość rozwarcia rys (w niektórych przypadkach całkowicie zamykając rysy), co zwiększa trwałość konstrukcji. Warto również zwrócić uwagę, że przy stosowaniu naprężanych taśm siła przekazywana jest na beton przede wszystkim przez specjalne zakotwienia, a nie więzy przyczepności na długości taśmy, a więc w tym przypadku jakość przygotowania powierzchni betonowej, której miarą może być wytrzymałość betonu na odrywanie, nie ma decydującego znaczenia. Kolejnym atutem tej technologii jest to, że taśmy są zbrojeniem aktywnym i przenoszą obciążenia od razu po ich naciągnięciu (bez konieczności wystąpienia dalszych odkształceń konstrukcji), a stopień ich wykorzystania jest nieporównywalnie większy w stosunku do taśm przyklejanych w sposób bierny.

Wciąż jednak technologia wzmocniania konstrukcji z użyciem wstępnie naprężanych taśm wymaga doskonalenia. Trudności nastęrcza fakt, iż kompozyty FRP pracują jednokierunkowo, tj. mają znikomą wytrzymałość w kierunku prostopadłym do włókien i właściwie nie przenoszą momentów zginających, a zatem nawet niewielkie niedokładności przy wprowadzaniu siły mogą prowadzić do przedwczesnego zerwania taśmy.

Pierwsza światowa aplikacja technologii wzmocniania konstrukcji przez jej sprężenie taśmami kompozytowymi odbyła się podczas wzmocniania mostu Lauter w Gomadingen w Niemczech, w październiku 1998 r., natomiast pierwsze krajowe zastosowanie, będące przedmiotem niniejszego artykułu, zostało wykonane w 2006 r.

2. Opis konstrukcji wzmocnianej hali

Przedmiotem opisywanego wzmocnienia były elementy konstrukcji nośnej parterowej hali przemysłowej znajdującej się na Śląsku. Podstawowy układ nośny obiektu stanowi przestrzenna, żelbetowa konstrukcja szkieletowa. Obiekt w rzucie poziomym jest prostokątem o wymiarach osiowych 80,00 m × 300,60 m. Główne podłużne osie konstrukcyjne, odpowiadające poprzecznemu rozstawowi słupów nośnych, rozmieszczone są w rozstawach 27,30 m (nawy skrajne: między osiami 1–2 oraz 3–4) i 25,40 m (nawa środkowa,

między osiami 2–3). Główne poprzeczne osie konstrukcyjne, odpowiadające rozstawowi podłużnemu słupów, rozmieszczone są w rozstawie 15,00 m (osie *E* do *J* oraz *K* do *P*). Dodatkowo, w połowie rozpiętości każdego pola zostały umieszczone pośrednie osie poprzeczne zmniejszające rozstaw osi w kierunku podłużnym do 7,50 m. W kierunku podłużnym hala została zdylatowana w połowie jej długości (pomiędzy osiami *J* i *K*).

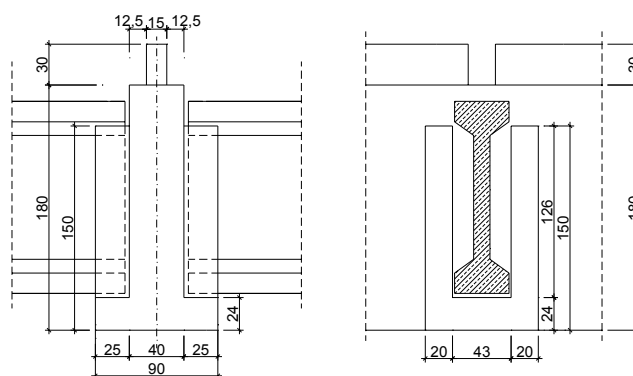
Całość konstrukcji nośnej dachu stanowią belkowe elementy prefabrykowane oparte przegubowo na żelbetowych słupach prefabrykowanych oraz, w przypadku belek poprzecznych umieszczonych w osiach pośrednich, na wspornikach korytkowych wykonanych w belkach podłużnych.

Rygle ram podłużnych (w osiach: 1, 2, 3 i 4) zostały wykonane jako żelbetowe, o prostokątnym przekroju poprzecznym, o wymiarach 40 cm × 180 cm. Na ryglach został ułożony nadbeton o wymiarach 15 cm × 30 cm, lecz nie ma on ciągłości wzdłuż całej długości belki. W środku rozpiętości belek wykonane zostały żelbetowe wsporniki korytkowe o wysięgu 25 cm, służące do oparcia pośrednich belek poprzecznych. Przekrój poprzeczny oraz widok rygła podłużnego w środku rozpiętości pokazano na ryc. 1. We wszystkich ryglach zostały wykonane po 4 otwory o średnicy 90 cm, ułożone symetrycznie względem środka.

Belki poprzeczne w nawach skrajnych wykonano w postaci dwuteowych dźwigarów strunobetonowych o wysokości 160 cm. W nawie środkowej umieszczono dwuspadkowe belki żelbetowe, o dwuteowym przekroju poprzecznym i zmiennej wysokości: od 160 cm przy podporach do 180 cm w środku rozpiętości.

Pokrycie dachowe stanowi blacha trapezowa wraz z warstwami izolacyjnymi oparta na podłużnych płatwiach stalowych.

W środkowej części nawy środkowej, wzdłuż całej długości hali, na belkach poprzecznych oparty został tunel wentylacyjny. Wewnątrz hali umieszczono instalację tryskaczową oraz wiele ciągów technologicznych w postaci instalacji rurowych. Część instalacji została podwieszona bezpośrednio lub pośrednio do belek nośnych konstrukcji dachu. Ponadto w nawie środkowej podwieszono płyty gipsowo-kartonowe maskujące instalację wentylacyjną oraz płyty wygłuszające hałas.



Ryc. 1. Belka podłużna w środku rozpiętości
Fig. 1. Longitudinal beam at the midspan

W trakcie inwentaryzacji przeprowadzonej przez zespół Zakładu Konstrukcji Sprężonych Politechniki Krakowskiej określono układ i wielkość panujących obciążeń oraz wy-

rynkowo zweryfikowano informacje dotyczące zbrojenia belek zawarte w istniejącej dokumentacji projektowej. Szczegółowy przegląd konstrukcji nośnej dachu wykazał:

- w belkach poprzecznych nawy środkowej, o rozpiętości 25,4 m:
 - obecność dużej liczby rys prostopadłych i ukośnych o rozwarości do 0,6 mm;
- w ryglach podłużnych, o rozpiętości 15,0 m:
 - obecność rys prostopadłych i ukośnych o rozwarości do 0,5 mm,
 - odrywanie wsporników korytkowych od belki – rysy o rozwarości do 1,0 mm,
 - rysy poziome i ukośne wsporników korytkowych o rozwarości do 0,4 mm.

Analizy statyczno-wytrzymałościowe belek wykonane dla aktualnie działających obciążeń, przy przyjęciu ilości i położenia zbrojenia na podstawie projektu, wykazały niedobór nośności na ścinanie w belkach podłużnych oraz niedobór nośności na zginanie i ścinanie w belkach poprzecznych nawy środkowej. Maksymalne wartości obliczeniowych sił przekrojowych wraz z wynikami obliczeń nośności przedstawiono w tabl. 1 (przekroczenia nośności zaznaczono czcionką pogrubioną).

Analiza dokumentacji projektowej wspornika korytkowego belki podłużnej wykazała m.in., że zbrojenie główne tych wsporników wykonano z prętów prostych, bez zachowania wymaganej długości zakotwienia.

Na podstawie przeprowadzonych analiz oraz zbadanego stanu technicznego stwierdzono, iż konstrukcja nośna hali znajduje się w stanie awaryjnym i dla zapewnienia dalszego bezpiecznego jej użytkowania konieczne jest pilne wzmocnienie wszystkich belek poprzecznych i podłużnych nawy środkowej przed okresem wzmożonych opadów śnieżnych.

Tablica 1

Wyniki obliczeń nośności

	M_{Sd} [kNm]	M_{Rd} [kNm]	M_{Sd}/M_{Rd} [-]	V_{Sd} [kN]	V_{Rd} [kN]	V_{Sd}/V_{Rd} [-]
Belka podłużna	3544	3643	0,98	573	343	1,67
Belka poprzeczna (nawa skrajna)	2360	2670	0,64	319	345	0,92
Belka poprzeczna (nawa środkowa)	2813	2262	1,24	353	215	1,64

3. Wzmocnienie rygli podłużnych

W niniejszym artykule szerzej omówione zostanie jedynie wzmocnienie belek podłużnych wstępnie naprężanymi taśmami kompozytowymi z włókien węglowych.

Projekt wzmocnienia rygli przewidywał ciśnieniowe wypełnienie wszystkich rys o rozwarości powyżej 0,2 mm żywicznym preparatem iniekcyjnym, a także:

- wzmocnienie na zginanie przez sprzężenie taśmami CFRP,
- podwieszenie wsporników korytkowych na prętach sprzężających Macalloy,
- wzmocnienie stref ścinania przez doklejenie mat CFRP.

Przeprowadzone analizy dla rygla podłużnego wykazały dwuprocentowy zapas nośności obliczeniowej na zginanie – patrz tabl. 1. Po uwzględnieniu dodatkowych obciążeń

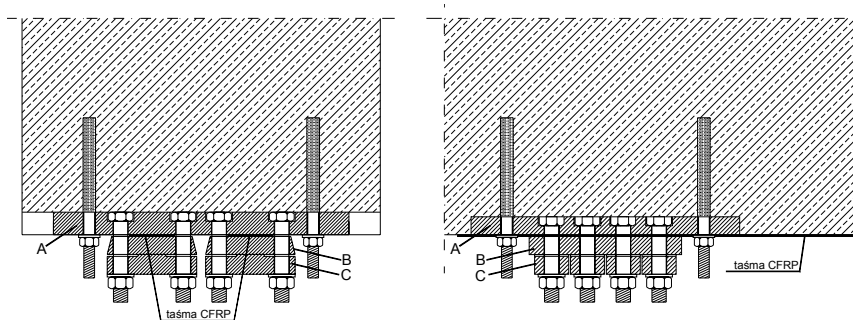
wynikających ze wzmocnienia pośredniej belki poprzecznej (ciężar kabli sprężających, zakotwień czynnych i biernych, dewiatorów) oraz z podwieszenia konstrukcji stalowej zabezpieczającej wsporniki korytkowe powstał ok. jednoprocenowy niedobór obliczeniowej nośności na zginanie. Mając na uwadze dotychczas powstałe uszkodzenia rygli (rysy o szerokości do 0,5 mm, odrywanie wsporników korytkowych) oraz niewielkie ich dociążenie, decyzja o konieczności wzmocnienia wszystkich rygli podłużnych w osiach 2 i 3 była w pełni uzasadniona.

Ze względu na stan uszkodzeń rygli, ich geometrię (wsporniki korytkowe w środku rozpiętości), a także znaczną liczbę rurociągów i innych instalacji biegnących w bezpośrednim sąsiedztwie belek oraz duże straty inwestora wynikające z każdego dnia wyłączenia produkcji, konieczne było opracowanie takiego sposobu wzmocnienia, który stosunkowo mało ingeruje w konstrukcję. Projekt wzmocnienia został opracowany przez autora.

Wszystkie belki zostały wzmocnione dwiema taśmami z włókien węglowych (CFRP) o przekroju poprzecznym $50 \times 1,2$ mm i długości 11,30 m. Każda z taśm została wstępnie naciągnięta siłą 60 kN. Przyjęto jednostronny naciąg taśm. Naciąg i kotwienie taśm zaprojektowano według „polskiego systemu sprężania” opracowanego przez dra hab. inż. Marka Łagodę i firmę SIKA Poland [2].

Aby odciążyć konstrukcję podczas wzmocniania, spuszczone z instalacji tryskaczowej oraz częściowo zdemontowano podwieszane do belek płyty wygłuszające. Ze względu na konieczność zapewnienia bezpieczeństwa hali do momentu podwieszenia wsporników korytkowych pośrednie belki poprzeczne podparto tymczasowymi słupami. Stalowe słupy tymczasowe zostały tak zaprojektowane, aby na czas wzmocniania możliwe było odciążenie rygli podłużnych przez wprowadzenie siły 100 kN do każdego słupa. Ostatecznie, w wyniku odciążenia, maksymalny obliczeniowy moment zginający został zmniejszony do 2110 kNm, tj. o 40% w stosunku do wartości ekstremalnej (uwzględniającej obciążenie śniegiem).

W wyniku zastosowanego wzmocnienia uzyskano wzrost nośności przekroju do wartości $M_{Rd, wzm} = 4085$ kNm.

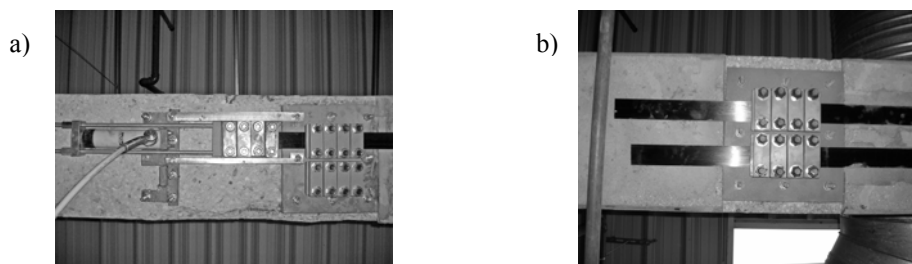


Ryc. 2. Przekrój poprzeczny i podłużny zakotwienia stałego
Fig. 2. Transverse and longitudinal cross-section of fixed anchor

W strefach zakotwień taśm zaprojektowano wnęki potrzebne do umieszczenia bloków oporowych, tak aby płyta podstawy zakotwienia tworzyła z powierzchnią dolną belki jedną płaszczyznę. Podstawa zakotwienia osadzona została na kleju i dodatkowo zamocowana do

belki ośmioma kotwami chemicznymi M12. Zakotwienia stałe taśm sprężających zostały indywidualnie zaprojektowane na potrzeby tego projektu – przekrój poprzeczny i podłużny zakotwienia stałego pokazano na ryc. 2.

Kotwienie taśmy wykonano przez jej dociśnięcie klockami „C” przez płytę pośrednią „B” do podstawy zakotwienia „A”. Docisk wytwarzany był przez dokręcanie śrub M16 kluczem dynamometrycznym. Taśma była stopniowo naprężana i sekwencyjnie mocowana (w 4 etapach) w zakotwieniu ruchomym od strony czynnej oraz w zakotwieniu stałym od strony biernej. Po wprowadzeniu docelowej wielkości siły taśma od strony czynnej została ostatecznie zamocowana w zakotwieniu stałym, a szczęki naciągowe (zakotwienie ruchome) zostały zdemonstrowane. Demontaż szczęk naciagowych odbywał się w ściśle określonej kolejności, tak aby stopniowo zmniejszać docisk taśmy. Ostatecznie luźne końcówki taśmy przyklejone zostały do konstrukcji. Na rycinie 3 przedstawiono widok zakotwienia czynnego w trakcie realizacji naciągu pierwszej taśmy oraz widok zakotwienia biernego po zakończeniu sprężania rygla. Naciąg taśm wykonał zespół IBDiM.



Ryc. 3. Widok zakotwienia czynnego a) i biernego b)
Fig. 3. View of live a) and fixed b) anchorage

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiona została pierwsza w Polsce realizacja wzmocnienia belek żelbetonowych z użyciem wstępnie naprężanych taśm kompozytowych z włókien węglowych (CFRP), będąca fragmentem kompleksowego wzmocnienia konstrukcji nośnej dachu hali przemysłowej. Zastosowana technologia sprężania taśmami kompozytowymi pozwoliła na znaczące zwiększenie nośności na zginanie oraz poprawę warunków stanów granicznych użyteczności, w stosunkowo szybkim czasie, z minimalną ingerencją w konstrukcję nośną i instalacje znajdujące się w hali.

W wyniku przeprowadzonego wzmocnienia każdego z rygli dachowych jedynie dwiema wstępnie naprężanymi taśmami, o szerokości 5 cm i grubości 1,2 mm, uzyskano wzrost obliczeniowej nośności na zginanie o 442 kNm, tj. o ok. 12%.

Literatura

- [1] Derkowski W., Zych T., *Nowoczesne materiały kompozytowe do wzmacniania konstrukcji budowlanych*, Czasopismo Techniczne z. 14-B/2004, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2004, 15-25.
- [2] Łagoda M., *Wzmacnianie mostów przez doklejanie elementów*, Monografia nr 322, seria: Inżynieria Lądowa, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2005.