Wzmacnianie mostów materiałami kompozytowymi

Trzy ostatnie dekady przyniosły burzliwy rozwój wielu gałęzi przemysłu, w których wykorzystując inżynierię materiałową, stworzono nowe materiały o pożądanych przez konstruktorów cechach. Wśród tych materiałów najbardziej przydatne w budownictwie okazały się polimery zbrojone włóknami: aramidowymi (ARFP), szklanymi (GFRP) oraz węglowymi (CFRP).

Wstęp

Materiały kompozytowe (tj. polimer i włókno) charakteryzują się bardzo dużą wytrzymałością na rozciąganie, małą gęstością (3-4 razy mniejszą niż stal), bardzo dużą odpornością na korozję i zmęczenie, dużą sztywnością oraz małym współczynnikiem wydłużalności cieplnej. Doskonałe własności wytrzymałościowe, praktycznie „nieskończona” trwałość oraz łatwość w użyciu czynią je idealnym materiałem do zastosowań w konstrukcjach budowlanych, w tym także mostowych.
Zastosowanie materiałów kompozytowych w budownictwie mostowym można obecnie obserwować w następujących formach:

- pełne elementy konstrukcyjne (dźwigary, płyty pomostowe) wykonane z materiałów kompozytowych
- taśmy i maty kompozytowe do wzmacniania konstrukcji
- kompozytowe zbrojenie betonu w postaci prętów, strun oraz włókien rozproszonych
- kable sprężające oraz liny nośne wraz ze specjalnymi systemami zakotwień
- osłony kompozytowe do ochrony mostów przed korozją
- geokompozyty w konstrukcjach oporowych.

Przegląd współczesnych zastosowań materiałów kompozytowych w budownictwie mostowym przedstawiono m.in. w publikacjach [1], [2], [4]. W utrzymaniu mostów szerokie zastosowanie mają obecnie taśmy i maty kompozytowe do wzmacniania konstrukcji [9], [10]. Ich krótką charakterystykę, sposoby aplikacji, zalety i wady oraz przykłady zastosowań opisano w niniejszym artykule, bazując głównie na własnych doświadczeniach autora z 20-letniej praktyki w projektowaniu, badaniach i realizacji wzmocnień obiektów mostowych za pomocą materiałów kompozytowych CFRP.

Charakterystyka materiałów kompozytowych do wzmacniania mostów

Coraz szersze stosowanie materiałów kompozytowych do wzmacniania mostów jest spowodowane następującymi ich cechami:

- wytrzymałością na rozciąganie kilkakrotnie większą od stali konstrukcyjnej
- blisko czterokrotnie mniejszym ciężarem jednostkowym w porównaniu ze stalą
- wysoką trwałością, wynikającą z dużej odporności na czynniki agresywne oraz wysokiej wytrzymałości zmęczeniowej
- łatwością montażu i scalania z elementami istniejącymi
- dużą prostotą i łatwością w projektowaniu wzmocnień
- niskimi nakładami na utrzymanie elementów z kompozytów.

Jak już wspomniano, obecnie w materiałach kompozytowych stosuje się głównie trzy rodzaje włókien: szklane, węglowe i aramidowe. Do wzmacniania konstrukcji stosuje się powszechnie materiały kompozytowe z włóknami węglowymi. Surowiec do produkcji tych włókien jest dostępny prawie w nieograniczonej ilości. Produkuje się je z czystego chemicznie węgla, poddając go działaniu wysokiej temperatury. Ostateczne cechy mechaniczne włókien są modyfikowane przez kolejną obróbkę cieplną w temperaturach od 1300 do 3000°C. Włókna są czarne, twarde i sztywne, odporne na działanie większości agresywnych czynników chemicznych. W materiałach kompozytowych włókna wtopione są w matrycę polimerową. Z tak powstałego materiału wytwarzane są taśmy, maty, kable oraz pręty. Proces ich produkcji to pultruzja polegająca na przeciąganiu włókien przez zbiornik z żywicą polimerową (epoksydową,

winylową, poliestrową itp.) do momentu jej polimeryzacji. Włókna są ciągłe i mają układ równoległy. Cechy mechaniczne produkowanych elementów (tj. wytrzymałość i moduł sprężystości) można dobrać, ustalając odpowiednią zawartość włókien oraz recepturę mieszanki polimerowej. Kompozyty są odporne na kruche pęknięcia, dlatego pojedyncza wada włókna nie prowadzi do pęknięcia całego elementu.

Taśmy kompozytowe wykonuje się najczęściej z włókien węglowych wtopionych w matrycę epoksydową. Włókna ułożone są jednokierunkowo, przez co taśma jest ciałem anizotropowym, tj. swoje niezwykle korzystne właściwości mechaniczne wykazuje tylko w kierunku równoległym do włókien.

Na coraz szersze zastosowanie taśm kompozytowych we wzmacnianiu konstrukcji budowlanych mają wpływ przede wszystkim ich doskonałe właściwości wytrzymałościowe, wysoka trwałość oraz łatwość wykonania wzmocnienia. Wytrzymałość na rozciąganie taśm CFRP oscyluje w przedziale 2600-3200 N/mm2 w zależności od przekroju taśmy, stopnia zawartości włókien oraz modułu sprężystości podłużnej. Moduł ten przyjmuje wartości w przedziale 160-350 GPa, co pozwala na dobór odpowiedniej sprężystości taśm w zależności od warunków pracy wzmacnianego przekroju. Wysoka wytrzymałość zmęczeniowa (ponad 12 mln cykli bez objawów zmęczenia) oraz doskonała odporność korozyjna bez konieczności zabezpieczenia powierzchniowego czynią wzmocnienie taśmami kompozytowymi trwałym i niezawodnym. Elementy wzmacniające są prawie niewidoczne, nie zwiększają wymiarów konstrukcji, przez co zostają zachowane walory estetyczne obiektu. Dzięki możliwości stosowania dowolnej długości taśm nie występuje konieczność ich łączenia, przez co unika się karbów konstrukcyjnych. Również stosowanie więcej niż jednej warstwy jest możliwe bez obniżenia trwałości i niezawodności wzmocnienia.

Bardzo dużą zaletą tej technologii jest łatwość wykonania wzmocnienia. Taśmy CFRP przyklejane są do stref rozciąganych przekroju betonowego specjalnym klejem, zapewniającym współpracę mechaniczną i fizyczną taśmy z betonem. Mają one niewielki ciężar, do ich przyklejania nie jest potrzebny specjalny sprzęt poza szpachlą do nakładania kleju i wałkiem dociskowym. Dzięki konfekcjonowaniu taśm w rolkach ich transport i składowanie na budowie jest bardzo proste. Taśmy przed zastosowaniem nie wymagają żadnej obróbki wstępnej oprócz pocięcia za pomocą np. piłki do metalu na odcinki projektowanej długości. Niska pracochłonność oraz krótki czas wykonania czynią ten system wzmocnienia konkurencyjnym także pod względem ekonomicznym. Wśród nielicznych wad taśm kompozytowych wymienia się brak tzw. rezerwy plastycznej, podatność na lokalne nierówności podłoża oraz stosunkowo wysoką cenę zakupu. Dwie pierwsze wady można wyeliminować na etapie projektowania i wykonawstwa. Natomiast biorąc pod uwagę koszty eksploatacji wzmocnionego obiektu całkowity koszt zastosowania systemu wzmocnienia taśmami CFRP także nie odbiega od innych, bardziej tradycyjnych rozwiązań.

Innym, szeroko stosowanym materiałem kompozytowym do wzmacniania mostów są maty (tkaniny) wykonane z włókien węglowych i nasycone żywicą epoksydową. Maty mają ogólnie znane cechy kompozytów: dużą wytrzymałość, wysoką trwałość i łatwość zastosowania. Oprócz ww. cech wytrzymałościowych maty bardzo dobrze przenoszą siły ścinające (poprzeczne), przez co znacznie zwiększają wytrzymałość na ścinanie wzmacnianego elementu. Element owinięty matą ma ponadto zwiększoną wytrzymałość na wstrząsy sejsmiczne (zdolność absorpcji drgań). W pewnych warunkach można również doprowadzić do sprężenia maty poprzez wykonanie iniekcji wysokociśnieniowej pod jej powierzchnię. W takich przypadkach efektywność wzmocnienia jest jeszcze większa, poprzez wytworzenie „płaszcza” wzmacniającego. W obiektach mostowych maty najczęściej stosowane są do wzmacniania słupów i oczepów zniszczonych podpór oraz do wzmacniania stref ścinanych i rozciąganych belek głównych. Przykładowe parametry wytrzymałościowe stosowanych mat kompozytowych:

- masa włókien węglowych: 400 g/m^2
- gęstość: 2,1 g/cm^3
- wytrzymałość na rozciąganie: 0,2 N/mm^2
- wydłużenie przy zerwaniu: 0,4%
- siła niszcząca przy rozciąganiu: 420 kN
- moduł Younga: 640 GPa
- grubość do wymiarowania: 0,19 mm
- teoretyczny przekrój: 190 mm^2.

Główną zaletą technologii wzmacniania za pomocą mat kompozytowych jest łatwość jej zastosowania na obiekcie. Przed przyklejeniem maty powierzchnia betonu wymaga reprofilacji i wstępnej impregnacji. Nasączoną matę przykleja się do wzmacnianej powierzchni jak tapetę, dociskając wałkiem gumowym. Po przyklejeniu na matę nakłada się zewnętrzną powłokę zabezpieczającą, nadając przy tym naprawianej powierzchni odpowiedni kolor, fakturę i wykończenie architektoniczne. Mata wraz z powłoką zewnętrzną tworzą lekki laminat o wysokiej wytrzymałości, wzmacniający element i chroniący go przed środowiskiem korozyjnym. Kolejną zaletą tej technologii jest możliwość zachowania kształtu wzmacnianego elementu, a także możliwość wzmocnienia elementów o bardzo skomplikowanych kształtach (np. wzmocnienie obwodowe ośmiokątnych kolumn). W takich przypadkach w narożach lub przy ostrych krawędziach maty kotwi się dodatkowo do betonu za pomocą kołków, wstrzeliwanych w beton. Zakotwienie zabezpiecza także maty przed nadmiernymi odkształceniami termicznymi.

Alternatywą dla mat we wzmacnianiu belek na ścinanie są, wdrożone do stosowania w ciągu ostatnich lat, kształtki kompozytowe CFRP. Mają one formę wąskiego płaskownika w kształcie litery L. Dłuższe ramię kształtki kotwi się w strefie ściskanej betonu (płycie). Właściwości materiałowe są analogiczne jak dla taśm. Kolejnym sposobem wzmacniania na ścinanie jest wklejanie wąskich płaskowników w otulinę betonu, tzw. technologia NSMR (near surface mounted reinforcement). Wprawdzie alternatywne obie technologie mają swoje specyficzne zalety, to jednak nie upowszechniły się we wzmacnianiu mostów betonowych w Polsce jak taśmy i maty.

Sposoby wzmacniania mostów taśmami i matami CFRP

W Polsce pierwszy most wzmocniono za pomocą taśm kompozytowych w 1997 r. Rok później, w wyniku zastosowania zamiennej technologii wzmocnienia, wdrożono po raz pierwszy w Polsce maty kompozytowe do wzmocnienia mostu, łącząc efektywnie ich współpracę z taśmami CFRP. Od tego czasu przez kolejne kilka lat zespół badawczo-projektowy pod kierunkiem autora wdrożył tą nowatorską wówczas technologię do wzmocnienia kilkunastu obiektów mostowych, uzyskując w każdym przypadku efektywny, skuteczny i szybki w realizacji sposób wzmocnienia mostów. Najważniejsze z tych realizacji krótko przedstawiono poniżej. Szerszy opis każdej z nich można znaleźć w cytowanej literaturze.

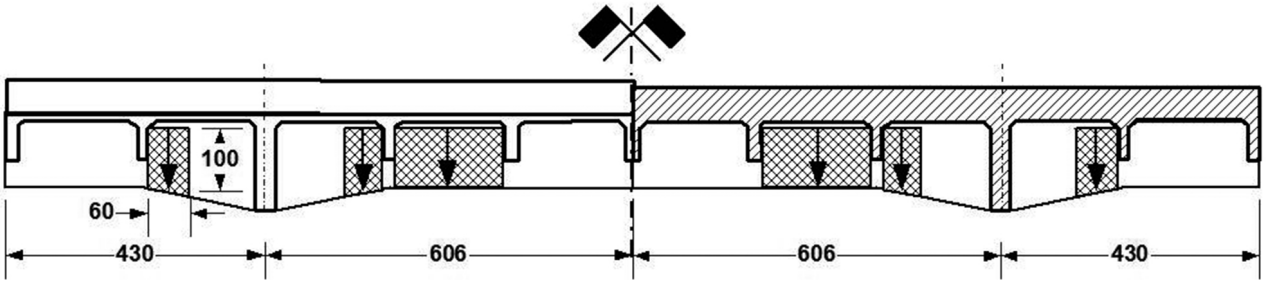
Pierwszym obiektem w Polsce wzmocnionym taśmami CFRP był most na rzece Wiar w Przemyślu [13]. Jest to obiekt żelbetowy, belkowy, o schemacie statycznym belki wspornikowej o parabolicznie zmiennej wysokości konstrukcyjnej i rozpiętościach teoretycznych przęseł 10,85+31,00+10,85 m. W przekroju poprzecznym mostu są 4 belki główne o szerokości 0,50 m i zmiennej wysokości od 1,80 m (w środku rozpiętości) do 2,80 m (nad podporami) w rozstawie poprzecznym 2,50 m. Aktualna nośność mostu została uznana przez administratora mostu za niedostateczną ze względu na przygraniczny charakter drogi oraz dominujący na moście ruch pojazdów ciężarowych. Dlatego przystąpiono do remontu i wzmocnienia obiektu. Ponieważ przekroczenie naprężeń w stali zbrojeniowej było stosunkowo nieduże (około 25%), a wzmocnienie było wymagane tylko w strefie środkowej belek przęsła nurtowego, zdecydowano się na zastosowanie nowej technologii wzmacniania, polegającej na przyklejeniu do dolnej powierzchni belek taśm CFRP (fot. 1).

Pierwszym obiektem w Polsce, do wzmocnienia którego zastosowano maty kompozytowe, jest most przez Kanał Bystry w Augustowie [9]. Został on wybudowany pod koniec lat czterdziestych jako pięciodźwigarowa konstrukcja żelbetowa, monolityczna. Ustrój nośny mostu ma schemat statyczny belki swobodnie podpartej dwuwspornikowej, o rozpiętości teoretycznej 12,12 m i długości całkowitej 20,70 m. Konstrukcja nośna mostu składa się z pięciu belek głównych w rozstawie co 1,60 m o średniej wysokości 0,92 m, podwyższonej nad podporami do 1,32 m oraz szerokości 0,36 m. Podstawowym celem modernizacji mostu było wzmocnienie ustroju nośnego. Ze względu na znaczną pracochłonność zaprojektowanej technologii oraz wymagany bardzo krótki czas wykonania robót, inwestor zdecydował się na rozwiązanie zamienne, polegające na zastąpieniu płaskowników stalowych taśmami i matami kompozytowymi. O zmianie technologii wzmocnienia na droższą, lecz znacznie szybszą w realizacji zadecydowały tzw. koszty społeczne

remontu (skrócenie do minimum uciążliwego objazdu), do tej pory niebrane pod uwagę w wycenach realizacji inwestycji. Wzmocnienie belek na zginanie wykonano za pomocą taśm kompozytowych. Wzmocnienie na ścinanie wykonano za pomocą mat kompozytowych. Wzmocnieniem objęto boczne powierzchnie belek głównych na odcinkach, gdzie istniejące zbrojenie na ścinanie (tj. pręty odgięte i strzemiona) było niewystarczające do przeniesienia sił poprzecznych od projektowanych obciążeń po modernizacji obiektu.

Fot. 1. Wzmocnienie przęsła nurtowego mostu w Przemyślu taśmami CFRP

Wzmocnienie polegało na przyklejeniu na każdej belce w strefach przypodporowych arkuszy mat kompozytowych o wymiarach średnich 1,00x0,60 m. Schemat rozmieszczenia mat wzmacniających na belkach ustroju nośnego pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia mat wzmacniających na belkach mostu w Augustowie

Przedstawione powyżej dwa pierwsze krajowe wdrożenia materiałów kompozytowych CFRP do wzmocnienia mostów pozwoliły na szczegółowe rozpoznanie metod projektowania oraz technologii wykonania systemu. Umożliwiło to znaczne upowszechnienie tej metody wzmacniania mostów. Z roku na rok pojawiały się kolejne przykłady zastosowania kompozytów, już nie tylko do wzmacniania belek, lecz również wielu innych elementów konstrukcyjnych mostów. Ciekawym przykładem może być kompleksowe wzmocnienie filarów

wiaduktu w centrum Rzeszowa [9]. Powodem wzmocnienia były bardzo duże uszkodzenia korozyjne betonu i stali zbrojeniowej we wszystkich elementach filara, tj. słupach i oczepie. Do wzmocnienia słupów filara zastosowano kompleksowo system materiałów kompozytowych, ze względu na ich doskonałe właściwości wytrzymałościowe, wysoką trwałość oraz łatwość i szybkość aplikacji na skomplikowanych przekrojach. Dla przywrócenia odpowiedniej nośności filarów zaprojektowano następujące elementy wzmocnienia: przyklejenie taśm kompozytowych wzdłuż głównych prętów zbrojeniowych słupów, w ilości rekompensującej utratę powierzchni zbrojenia wskutek korozji, przyklejenie mat kompozytowych jako dodatkowego zbrojenia obwodowego, uzupełniających i wzmacniających istniejące strzemiona oraz przyklejenie mat kompozytowych jako dodatkowego zbrojenia na ścinanie w najsłabszych częściach oczepów filara. Wzmocnienie słupa filara taśmami i matami CFRP pokazano na fot. 2.

Fot. 2. Wzmocnienie taśmami i matami CFRP słupa filara wiaduktu w Rzeszowie: wzmocnienie taśmami (po lewej), wzmocnienie matami (po prawej)

Obecnie technologia wzmacniania mostów betonowych taśmami i matami kompozytowymi jest powszechna. Typowy sposób wzmacniania mostów betonowych to wzmacnianie belek taśmami na zginanie oraz jednocześnie matami na ścinanie. Znane są metody projektowania wzmocnień, dostępne na polskim rynku są wszystkie niezbędne materiały (taśmy, maty, kleje), a także są opracowane specyfikacje techniczne wykonania i kontroli jakości. Po blisko 10 latach stosowania tej technologii o wzmacniania mostów betonowych rozpoczęto także pierwsze próby wdrażania jej do wzmacniania mostów stalowych. Pierwsze polskie zastosowanie taśm do lokalnego wzmocnienia prętów kratownicy stalowej miało miejsce w 2007 r. na moście przez Wisłę w Chełmie [5]. Taśmy kompozytowe zastąpiły konwencjonalną technologię wzmocnienia – dodatkowe nakładki stalowe. Nowa technologia umożliwiła znacząco szybsze wykonanie robót, gdyż uniknięto konieczności usuwania lub wymiany nitów w konstrukcji stalowej. Strefy rozciągane obu pasów kratownicy zostały wzmocnione taśmami kompozytowymi o długości 15-20 m. Od czasu pierwszego wdrożenia liczne istniejące mosty stalowe zostały wzmocnione tą technologią (fot. 3).

Fot. 3. Typowy stalowy most belkowy wzmocniony taśmami kompozytowymi

Zwiększenie efektywności wzmocnienia przez wstępne naprężanie taśm CFRP

Wyniki badań naukowych oraz próbnych obciążeń wzmocnionych obiektów wykazały, że efektywność wzmocnienia za pomocą przyklejanych biernie taśm kompozytowych jest ograniczona z powodu przedwczesnego odspajania taśmy od podłoża, bez pełnego wykorzystania wytrzymałości kompozytu. Liczne badania wykazały, że jedynie 30-35% wytrzymałości na rozciąganie kompozytu CFRP może być zmobilizowane w stanie granicznym nośności, ponieważ wytrzymałość skleiny jest niewystarczająca do pełnego wykorzystania wytrzymałości na rozciąganie taśmy CFRP. Osiągany efekt wzmocnienia jest zatem niewspółmierny do możliwości kompozytu CFRP.

Efektywność wzmocnienia może zostać znacznie zwiększona przez wstępne naprężenie taśm przed ich przyklejeniem do podłoża. Wstępne naprężenie taśm pozwala na bardziej efektywne wykorzystanie wytrzymałości na rozciąganie materiału kompozytowego oraz zdecydowanie poprawia stan użytkowalności elementu, przez zmniejszenie ugięcia oraz zamknięcie istniejących i opóźnienie powstawania nowych rys w betonie, co wpływa na wzrost trwałości elementów żelbetowych. Kotwienie sprężonych taśm podnosi dodatkowo nośność graniczną elementów.

Główne konstrukcyjne zalety technologii wzmacniania naprężonymi taśmami CFRP elementów betonowych są następujące:

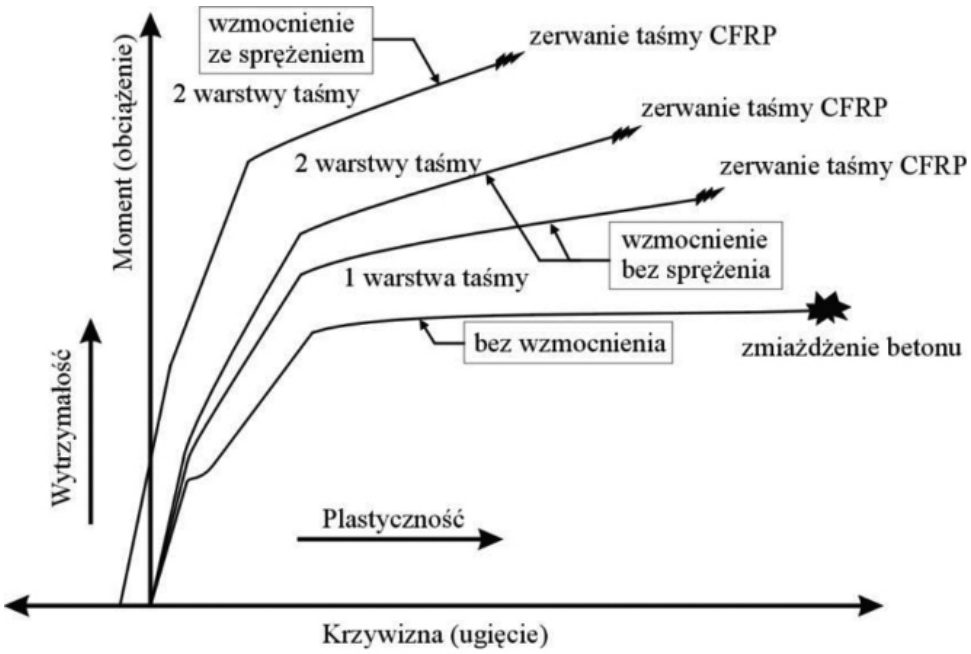
- zwiększenie nośności elementu na zginanie – naprężenie taśm podwyższa poziom obciążenia, przy którym dochodzi do uplastycznienia stali zbrojeniowej w elemencie
- zwiększenie nośności elementu na ścinanie – powiększenie niezarysowanej części betonu, biorącej udział w przenoszeniu ścinania
- zwiększenie efektywności konstrukcyjnej wzmocnienia – ze względu na obniżenie położenia osi obojętnej przekroju wzmocnionego naprężoną taśmą CFRP większy przekrój betonu przenosi ściskanie oraz ten sam zakres wzmocnienia elementu można osiągnąć za pomocą mniejszego przekroju (liczby) taśm CFRP (od 30 do 50% mniej)
- zwiększenie nośności granicznej elementu – przez wyeliminowanie postaci zniszczenia spowodowanej oderwaniem taśmy na jej końcach oraz w przekrojach zarysowanych (tylko w przypadku zakotwienia taśm)

■ wzrost poziomu bezpieczeństwa – postać zniszczenia elementu wzmocnionego taśmą sprężoną jest bardziej plastyczna

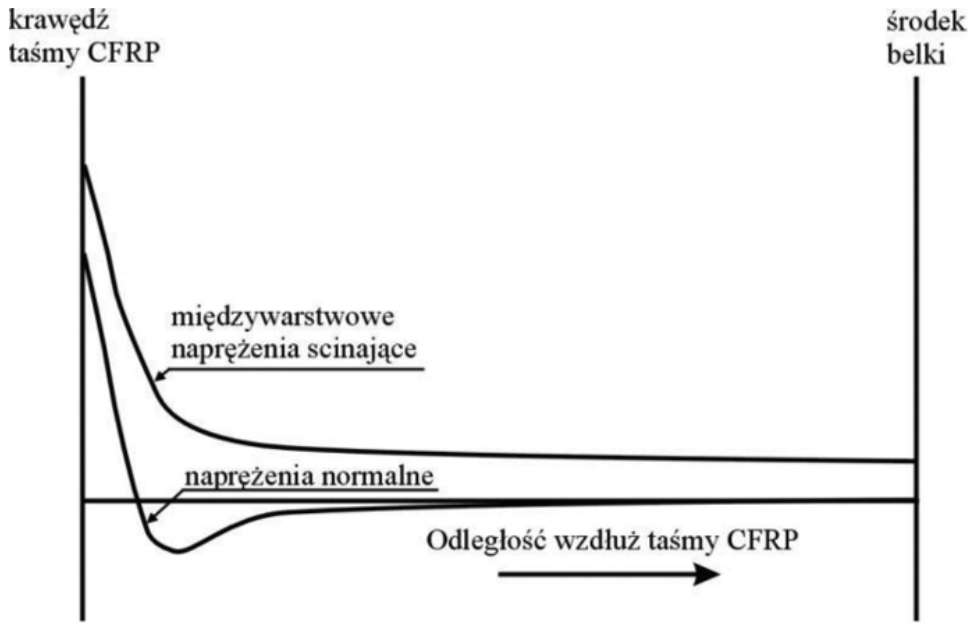
■ znacząca redukcja liczby i rozwartości rys w fazie obciążenia użytkowego

■ zwiększenie sztywności elementu w fazie obciążenia użytkowego – mniejsze są ugięcia, korzystniejsza jest morfologia rys w betonie

■ podniesienie trwałości elementu – zamknięcie rys występujących przed wzmocnieniem, zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej poprzez redukcję naprężeń w stali zbrojeniowej.



Rys. 2. Zależność krzywizny (ugięcia) od momentu (obciążenia) przy czteropunktowym zginaniu typowej belki żelbetowej: niewzmocnionej, wzmocnionej biernymi taśmami CFRP oraz wzmocnionej wstępnie naprężonymi taśmami CFRP o tym samym przekroju



Rys. 3. Międzywarstwowe naprężenia ścinające w skleinie oraz naprężenia normalne (odrywające) w betonie nad taśmą

Na rys. 2 pokazano przykładowe wykresy zależności krzywizny (ugięcia) od momentu (obciążenia) przy czteropunktowym zginaniu typowej belki żelbetowej: niewzmocnionej, wzmocnionej biernymi taśmami CFRP oraz wzmocnionej wstępnie naprężonymi taśmami CFRP o tym samym przekroju. Załamania na wykresach wskazują kolejne fazy zniszczenia belki: zarysowanie betonu, uplastycznienie stali zbrojeniowej oraz nośność graniczną (zerwanie taśmy lub zmiażdżenie betonu). Obciążenie rysujące dla belki wzmocnionej biernie taśmami CFRP jest prawie takie samo jak dla belki niewzmocnionej, podczas gdy w przypadku belki wzmocnionej taśmami naprężonymi obciążenie to jest ponad dwukrotnie większe. Podobnie jest w przypadku nośności belki ze względu na uplastycznienie stali zbrojeniowej. Po przyklejeniu taśm wstępnie naprężonych w porównaniu z belką niewzmocnioną następuje około 50% zwiększenie obciążenia uplastyczniającego stal, natomiast w porównaniu z belką wzmocnioną za pomocą taśm biernych – zwiększenie o około 25%. Wstępne naprężenie taśm przed ich przyklejeniem znacząco wpływa także na postać zniszczenia belki. Naprężona taśma ściskając dolne włókna belki zginanej, powoduje zamknięcie oraz zmniejszenie liczby i rozwartości rys inicjujących zniszczenie przy ścinaniu. W rezultacie powierzchnia zniszczenia belki przesuwa się w dół, pojawiając się zazwyczaj na powierzchni skleina/taśma CFRP lub w dolnych włóknach betonu, co zwiększa nośność graniczną elementu.

Oprócz tych niewątpliwych zalet, istnieje także kilka trudności związanych ze stosowaniem taśm naprężonych do wzmacniania elementów żelbetowych. W systemie wzmocnienia za pomocą taśm naprężonych w chwili zwolnienia naciągu i przekazywania siły naprężającej na beton pojawiają się wysokie międzywarstwowe naprężenia ścinające w skleinie oraz naprężenia normalne (odrywające) w betonie nad taśmą (rys. 3). Gdy siła naprężająca jest zbyt duża, następuje zniszczenie wzmocnienia przez odspojenie końców taśmy od powierzchni betonu i/lub przez delaminację. Jeżeli końce taśmy nie są zakotwione w betonie, jest ona odrywana od betonu już przy sprężeniu na poziomie 5-6% f_{Lu}, podczas gdy racjonalne wykorzystanie taśm CFRP wymaga naprężenia na poziomie min. 50% f_{Lu}. Dlatego w większości systemów wzmocnienia elementów żelbetowych za pomocą naprężonych taśm CFRP stosuje się specjalne zakotwienia mechaniczne na końcach taśm. W ciągu ostatnich 10 lat powstało na świecie kilka różnych systemów czynnego wzmacniania konstrukcji za pomocą wstępnie naprężonych taśm CFRP. Systemy różnią się metodami naprężania taśmy oraz sposobami przekazywania siły naprężającej taśmę na wzmacnianą konstrukcję. Większość systemów zakłada przekazywanie siły naprężającej na element przez skleinę, łączącą taśmę i beton. Aby zapobiec delaminacji stosuje się specjalne zakotwienia mechaniczne na końcach taśm (fot. 4). Stalowe bloki kotwiące muszą zapewniać skuteczną stabilizację naprężonej i przyklejonej

taśmy (bez strat siły sprężającej) oraz jej kotwienie bez zniszczenia włókien kompozytu przez nadmierny docisk. Skuteczność wzmocnienia zależna jest od wytrzymałości betonu na odrywanie i ścinanie, co w przypadku mostów istniejących (tylko takie są wzmacniane) może być znaczącym ograniczeniem metody.

Fot. 4. Zakotwienia mechaniczne na końcach wstępnie naprężonych taśm CFRP

Podsumowanie

Wzmacnianie istniejących mostów jest skutecznym sposobem przedłużenia ich życia technicznego i cenną alternatywą dla ich całkowitej wymiany. Każdy system wzmocnienia, który oferuje podniesienie nośności krytycznego elementu w granicach 30-50%, pozwala nie tylko na przywrócenie pierwotnej nośności użytkowej mostu, lecz na jej podwyższenie. Ten przyrost nośności może być także wykorzystany do przeprowadzenia efektywnej modernizacji obiektu, np. poprzez jego poszerzenie lub wymianę (instalację) wyposażenia (np. dodanie kap chodnikowych). Może to oznaczać, że możliwość wzmocnienia obiektu poprzez zastosowanie skutecznej technologii pozwoli na relatywnie korzystną cenowo modernizację obiektu zamiast jego wymiany. Wśród nowoczesnych technologii wzmacniania mostów betonowych stosowanie systemów wzmacniania materiałami kompozytowymi jest obecnie jedną z najbardziej rozpowszechnionych metod w świecie.

W bieżącym roku mija 20 lat od pierwszego w kraju zastosowania materiałów kompozytowych do wzmocnienia mostu w Przemyślu [13] i Augustowie [9]. W tym okresie wzmocniono w Polsce za pomocą materiałów kompozytowych już kilkadziesiąt obiektów mostowych. Przykłady takich realizacji bez problemu można znaleźć w czasopismach technicznych czy materiałach z licznych konferencji branżowych. Także polskie środowisko naukowe szeroko zajmuje się badaniami różnych aspektów tej technologii wzmocnienia, nie tylko w odniesieniu do konstrukcji betonowych, lecz również stalowych, drewnianych czy murowanych. Świadczy to o niesłabnącym zainteresowaniu środowiska budowlanego (w tym mostowego) stosowaniem materiałów kompozytowych w bieżącym utrzymaniu i rehabilitacji istniejących konstrukcji budowlanych. Generuje to dalszy rozwój tej technologii, prowadzący do eliminacji stwierdzonych wad, zmniejszenia ceny stosowania materiałów, zwiększenia efektywności wykorzystania kompozytów oraz rozszerzenia zakresu ich

wykorzystania w budownictwie.

Obserwując rozwój technologii wzmacniania mostów materiałami kompozytowymi można sądzić, że już wkrótce większość realizacji takich wzmocnień będzie wykonywana z zastosowaniem wstępnego naprężenia taśm CFRP. Naprężenie taśm powoduje bowiem nie tylko znaczące zwiększenie nośności elementu/obiektu betonowego, ale również poprawia warunki jego użytkowalności, zwłaszcza w odniesieniu do ugięć i szerokości rozwarcia rys, oraz zwiększa trwałość wzmocnienia. Ponadto metoda czynnego wzmocnienia pozwala lepiej wykorzystać stosunkowo drogi materiał, co umożliwia zmniejszenie liczby taśm na danym obiekcie, a przez to znaczące obniżenie kosztów wzmocnienia. Jest rzeczą znamienną, że podobnie jak 20 lat temu, także obecnie polskie środowisko mostowe jest liderem (nie tylko na rynku krajowym) w opracowywaniu i wdrażaniu tej nowej technologii. Warto podkreślić, że wśród kilku stosowanych na świecie systemów naprężania taśm kompozytowych, trzy z nich zostały opracowane i wdrożone na mostach po raz pierwszy w Polsce [3], [6], [11].

dr hab. inż. Tomasz Siwowski
prof. PRz Politechnika Rzeszowska

Literatura

1. Keller T., Use of fibre reinforced polymers in bridge construction. IABSE SED 7, 2003.
2. Kotynia R., Przyczepnościowe metody wzmacniania konstrukcji żelbetowych przy użyciu naprężonych kompozytów polimerowych. Przegląd Budowlany, nr 7-8, 2015.
3. Kotynia R., Michels J., Staśkiewicz M., Czaderski C., Motavalli M., The Polish-Swiss team demonstrate the first application of prestressed CFRP laminates with gradient anchorage for strengthening post-tensioned concrete bridge. FRP International, No.3, 2013.
4. Łagoda M., Wzmacnianie konstrukcji mostowych kompozytami polimerowymi. Studia z zakresu inżynierii. IPPT i KILiW, Polska Akademia Nauk, Warszawa, 2012.
5. Łagoda G., Łagoda M., Strengthening steel bridge across Vistula River in Poland. The Proceedings of the 33rd IABSE Symposium on Sustainable Infrastructure Environment Friendly, Safe and Resource Efficient. Bangkok, Thailand, 2009.
6. Łagoda M., Biskup M., Wzmacnianie mostów wstępnie sprężonymi taśmami kompozytowymi. Materiały Budowlane, nr 4, 2007.
7. Paśko P., Siwowski T., Wzmocnienie mostu stalowego wstępnie naprężonymi taśmami CFRP. Mosty, nr 3, 2016.
8. Paśko P., Piątek B., Siwowski T., Badania zakotwień w systemie wzmacniania sprężonymi taśmami CFRP. Budownictwo i Architektura, nr 3, 2014.
9. Siwowski T., Materiały kompozytowe CFRP stosowane we wzmacnianiu mostów betonowych. Mosty, nr 4, 2012.
10. Siwowski T., Sprężone taśmy CFRP. Wzmacnianie mostów betonowych. Mosty, nr 5, 2012.
11. Siwowski T., Michałowski J., Błażewicz S., Nowy system sprężania taśm kompozytowych CFRP do wzmacniania konstrukcji żelbetowych. Inżynieria i Budownictwo, nr 3, 2010.
12. Siwowski T., Piątek B., Research on the new bridge strengthening system with prestressed CFRP strips. The Proceedings of the International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2014). Tokyo, Japan, 2014.
13. Siwowski T., Radomski W., Pierwsze krajowe zastosowanie taśm kompozytowych do wzmocnienia mostu. Inżynieria i Budownictwo, nr 7, 1998.
14. Siwowski T., Żółtowski P., Strengthening bridges with prestressed CFRP strips. Selected Scientific Papers – Journal of Civil Engineering, Issue 1, 2013.