

Przyczepnościowe metody wzmocniania konstrukcji żelbetowych przy użyciu naprężonych kompozytów polimerowych

KS2015

Dr hab. inż. Renata Kotynia, Politechnika Łódzka

1. Wprowadzenie

Rys historyczny – o wzmocnieniach biernych

Materiały kompozytowe funkcjonują w budownictwie od tysiącleci, bo już w starożytności znano materiały o niejednorodnej strukturze, złożone z dwóch lub więcej składników różniących się właściwościami. Na ogół jeden z nich stanowiło lepszycze, które gwarantowało spójność, elastyczność, twardość i wytrzymałość na ściskanie, zaś drugi składnik materiałowy był odpowiedzialny za większość pozostałych właściwości mechanicznych kompozytu. Określenie materiałów kompozytowych związane z technologią kompozytów polimerowych, popularnie zwanych *fiber reinforced polymer (FRP)*, przyjęto w światowym przemyśle około 100 lat temu, najpierw w dziedzinie chemii (lata 30.), później elektroniki, a z biegiem czasu, gdy materiały kompozytowe zrewolucjonizowały przemysł lotniczy (lata 40.), stoczniowy, elektryczny i transportowy (lata 50.), przyszedł czas również na budownictwo.

Pierwsze zastosowania materiałów kompozytowych w budownictwie odnotowano w latach 50., nie wiązało się ono jednak z użyciem tego materiału do wzmocnień elementów konstrukcyjnych. Były to elementy używane jako architektoniczne dodatki zabytkowych elementów wykończeń elewacji, sztukaterii, kopuł i paneli ściennych. Dopiero lata 80. przyniosły pierwsze zastosowania kompozytów w budownictwie, związane zarówno ze wzmocnianiem konstrukcji, jak i użyciem samodzielnych elementów konstrukcyjnych, w całości lub w części wykonanych z materiałów kompozytowych.

Pionierskie badania doświadczalne żelbetowych belek wzmocnionych materiałami kompozytowymi w postaci taśm z włókien węglowych CFRP zapoczątkował Meier w szwajcarskim instytucie badawczym EMPA w Zurychu w 1992 roku [1]. Wyniki tych badań upowszechniły materiały kompozytowe w zastosowaniach budowlanych i uruchomiły kolejne programy badawcze podejmowane w ośrodkach naukowych na całym świecie. Większość z nich dotyczyła statycznych badań elementów konstrukcji wzmocnionych na zginanie i ścinanie przy użyciu taśm z włókien węglowych, szklanych i aramidowych,

przyklejanych na zewnętrznej powierzchni tych elementów (oryginalna nazwa angielska *externally bonded reinforcement – EBR*).

Jednocześnie z rozwojem badań doświadczalnych odnotowano szereg aplikacji na rzeczywistych obiektach mostowych, w budynkach przemysłowych i użyteczności publicznej. Tam, gdzie koszt związany z zamknięciem budynku na czas wykonywania wzmocnienia przekraczał wartość wzmocnienia przy użyciu kompozytów FRP, opłacalne stało się zastępowanie tradycyjnych technik wzmocnień innowacyjnymi sposobami wzmocnień przy użyciu lekkich, odpornych na korozję oraz łatwych w montażu tych właśnie kompozytów.

Pierwsze światowe wzmocnienie przy użyciu taśm z włóknami węglowymi przyklejanymi w sposób bierny do powierzchni konstrukcji żelbetowej wykonano na żelbetowym moście Ibach w okolicy Lucerny w roku 1991 [2]. Do kolejnych aplikacji kompozytów węglowych w Europie należały: drewniany most w pobliżu Sins (Szwajcaria), 1992 r., budynki użyteczności publicznej oraz elektrownie atomowe.

Pierwsze krajowe użycie taśm kompozytowych miało miejsce przy wzmocnianiu mostu przez rzekę Wiar w Przemyślu w 1997 [3]. Przez kolejne dziesięć lat liczba aplikacji stopniowo rosła osiągając obecnie liczbę ponad 150.

Jednym ze sposobów zwiększenia efektywności wzmocnienia biernego elementów żelbetowych jest wklejenie zbrojenia kompozytowego w betonową otulinę (popularnie zwane *near surface mounted reinforcement – NSMR*). Takie rozwiązanie, dzięki lepszej przyczepności kompozytu do betonu, znacząco zwiększa stopień wykorzystania wytrzymałości tego materiału na rozciąganie – z 30 – 35% (wzmocnienia EBR) do nawet 80% (wzmocnienia NSMR). Ta technologia wzmocniania wymaga jednak odpowiedniej grubości betonowej otuliny, aby można było w niej umieścić wklejone pionowo taśmy lub pręty kompozytowe. Odnotowano już pierwsze zastosowania techniki NSMR głównie w Stanach Zjednoczonych, gdzie chętnie używane są do tego celu pręty o przekroju kołowym włóknami szklanymi lub węglowymi oraz w Europie, przy użyciu głównie taśm o przekroju prostokątnym.

Wiele badań doświadczalnych przeprowadzonych na zginanych żelbetonowych elementach wzmocnionych kompozytami wykazało dość niską efektywność tej techniki, spowodowaną zniszczeniem elementu na skutek nagłego odspojenia kompozytu od powierzchni betonu, zainicjowanego przez typowe dla zginania rysy w środkowej części elementu. Badania wykazały, że efektywność biernego wzmocnienia na zginanie zależy od wielu czynników, takich jak: rodzaj, wymiary przekroju poprzecznego zbrojenia kompozytowego, odległość jego końców od podpory, układ podłużnego i poprzecznego zbrojenia stalowego oraz rozkład momentów zginających i sił poprzecznych w elemencie. Mimo że wzmocnienie konstrukcji przy użyciu biernych kompozytów zwiększa jej nośność, to warunki użytkowalności pozostają na tym samym poziomie (tzn. moment rysujący i ugięcia od obciążeń użytkowych). W celu zwiększenia wpływu wzmocnienia na stan graniczny użytkowalności oraz poziom wykorzystania wytrzymałości kompozytu na rozciąganie, zaproponowano wstępne jego naprężenie.

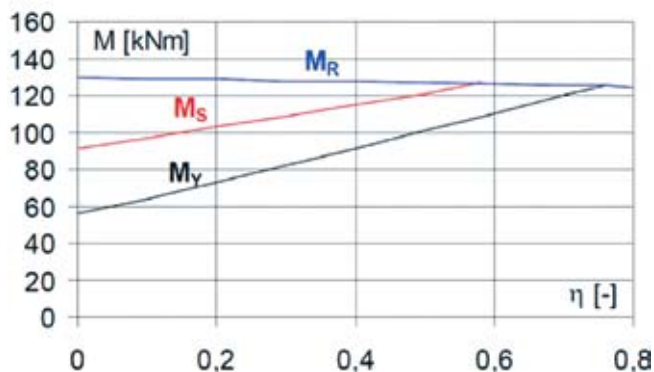
Technologiczny postęp

– o wzmocnieniach czynnych

Pierwsza wzmianka dotycząca zastosowania włókien szklanych w stanie naprężonym pochodzi z roku 1963 [4], w której Freyssinet jako pierwszy wspominał o możliwości naprężania polimerów z włókien szklanych: „... *Some day, glass fibres or plastics will be used as tendons for prestressing. This idea was first mentioned by Freyssinet in 1938...*”.

Pierwsze badania belek wzmocnionych naprężonymi taśmami z włókien węglowych, wykonane w EMPA [5, 6], wykazały znacznie wyższą efektywność takiego czynnego wzmocnienia niż biernego i zapoczątkowały nowy kierunek badań z zastosowaniem naprężonych kompozytów, zwłaszcza w obiektach mostowych [7, 8, 9, 10, 11].

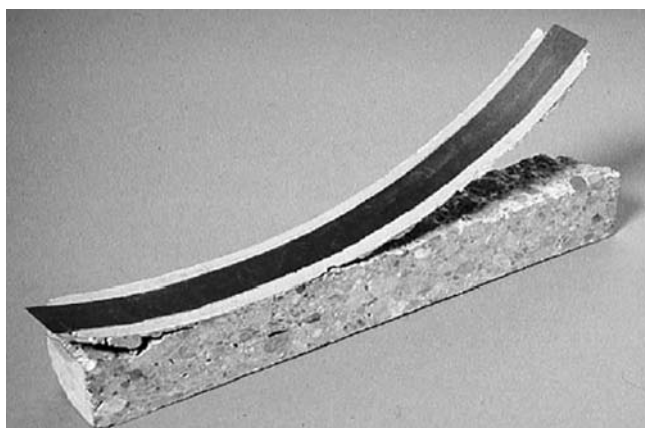
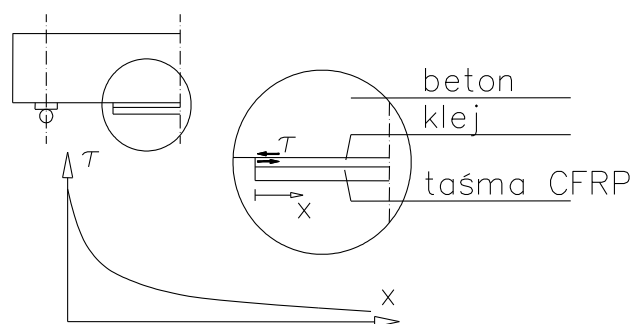
Pozwoliło to zmniejszyć ugięcia wzmocnianych elementów, zmniejszyć rozwarście rys, ograniczyć naprężenia w stalowym zbrojeniu podłużnym, zmniejszyć odkształcenia żelbetowego elementu oraz znacząco zwiększyć jego sztywność i nośność. Pierwsze badania żelbetonowych belek wzmocnionych naprężonymi taśmami z włókien węglowych, przeprowadzone w EMPA [1], potwierdziły dużą efektywność takiego wzmocnienia. Zalety wzmocnień czynnych zostały potwierdzone w wielu badaniach doświadczalnych, które określiły minimalny poziom wstępnego naprężenia kompozytu jako 25% jego wytrzymałości na rozciąganie [12, 1]. W przypadku wstępnego naprężenia powyżej 70% wytrzymałości włókien na rozciąganie, obserwowano zniszczenie badanych elementów na skutek zerwania włókien. Natomiast przy poziomym naprężeniu nie przekraczającym 60% wytrzymałości na rozciąganie, do zniszczenia dochodziło najczęściej przez odspojenie kompozytu od powierzchni betonu (rys. 1) [1]. Najbardziej efektywny poziom naprężenia kompozytu CFRP określono, jako



Rys. 1. Wpływ naprężenia taśmy na nośność wzmocnionej, żelbetonowej belki o przekroju teowym; $\eta_t = \epsilon_{ts}/\epsilon_{tu}$ – stopień naprężenia, M_R , M_S – nośność na zginanie odpowiednio przy zerwaniu taśmy i jej odspojeniu, M_V – moment zginający odpowiadający uplastycznieniu zbrojenia zwykłego [1]

50–60% jego wytrzymałości na rozciąganie, co zapewnia niemal jednoczesne uzyskanie odspojenia i zerwania włókien tego zbrojenia.

Z czynnym sposobem wzmocniania wiążą się dwa zasadnicze problemy: sposób naprężenia i przekazanie siły rozciągającej taśmą na konstrukcję poddaną wzmocnieniu. Ze względu na obecność dużych naprężeń stycznych między naprężoną taśmą a betonowym podłożem, może dojść do nagłego odspojenia końca taśmy od powierzchni betonu (rys. 2).



Rys. 2. Rozkład naprężeń stycznych na końcu taśmy i odspojenie wstępnie naprężonej taśmy nie zakotwionej na końcach [3]

Aby zapobiec takiemu mechanizmowi zniszczenia, opracowano jak dotąd kilka sposobów kotwienia, które można podzielić na te, które wymagają użycia systemów kotwiących i system bez zakotwień, ze stopniową redukcją siły sprężającej na długości taśmy. Zagadnienie zakotwienia wstępnie naprężonych taśm jest obecnie podstawą wielu prac badawczych, mających na celu wdrożenia tej niewątpliwie najbardziej efektywnej techniki wzmocnień w praktyce inżynierskiej.

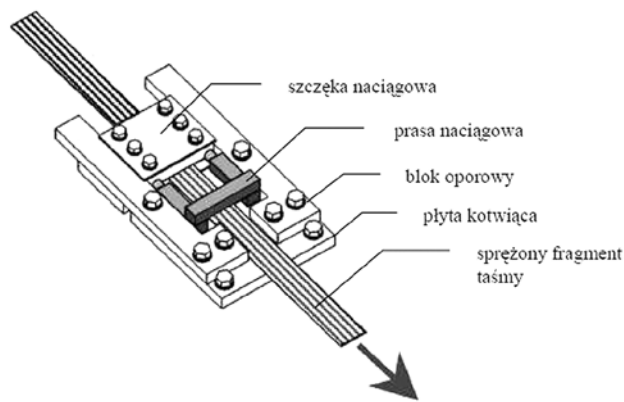
Liczba obiektów wzmocnionych naprężonymi materiałami kompozytowymi jest stosunkowo niewielka. Pierwsza tego typu realizacja miała miejsce na niemieckim moście Lauter w Gomadingen w 1998 roku, a kolejne w budynkach użyteczności publicznej [14], przemysłowych [15] i obiektach mostowych [17].

2. Rodzaje systemów kotwiąco-sprężających typu EBR

Jednym z pierwszych sposobów wprowadzania naprężenia w taśmie kompozytowej było wstępne „odwrotne” wygięcie wzmocnianego elementu, które miało na celu zmniejszenie ugięcia w przęśle i odkształceń betonu w rozciąganej strefie przekroju elementu. Taśmę lub matę przyklejano do powierzchni betonu, a po zwolnieniu odwrotnego wygięcia elementu kompozyt przejmował siły rozciągające odpowiadające części ciężaru własnego tego elementu. Ta metoda ze względu na niską skuteczność spowodowaną problemami wykonawczymi związanymi z wprowadzaniem znacznych sił do wzmocnianej konstrukcji i tymczasową redukcją obciążeń stałych, nie zyskała powszechnego uznania. Dopiero zastosowanie zewnętrznego systemu sprężającego, mocowanego do powierzchni betonu na końcach kompozytu, umożliwiło kontrolowane wprowadzanie siły sprężającej w kompozycie. Siłę sprężającą wprowadza się do taśmy przy użyciu siłownika hydraulicznego montowanego do stalowej ramy systemu sprężająco-kotwiącego, przesuwającego element kotwiący wraz z końcem naprężanej taśmy.

2.1. System SIKA CARBODUR LEOBA (SIKA LC II) [15]

Taśma przyklejona do wzmocnianej konstrukcji na całej swej długości, kotwiona jest w specjalnych stalowych blokach kotwiących. System LEOBA umożliwia kotwienie taśm sprężonych siłą wywołującą odkształcenie taśmy do 9,0%. Blok kotwiący składa się z dwóch zasadniczych elementów: płyty kotwiącej przymocowanej do wzmocnianej konstrukcji oraz elementu dociskowego (szczęki), mocującego naciągniętą taśmę do płyty kotwiącej za pomocą śrub. Dodatkowo, tylko na czas sprężania, na taśmie mocowane są szczęki naciągowe, a bezpośrednio za zakotwieniem montowany jest blok oporowy dokręcany do płyty stalowej trwale zakotwionej do wzmocnianej konstrukcji. Naciąg taśmy wywołany jest poprzez prasę hydrauliczną o bardzo małych

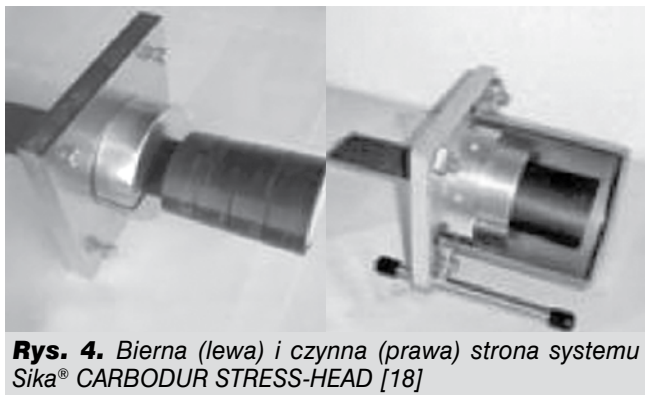


Rys. 3.
Czynna strona systemu kotwiąco-sprężającego Sika® LEOBA CarboDur® SLC II [15]

rozmiarach opierającą się o blok oporowy. Schemat bloku kotwiąco-sprężającego pokazano na rysunku 3. Zasadniczą zaletą tego systemu jest wysoki stopień wstępnego naprężania taśmy i szybki czas realizacji wzmocnienia zapewniony bardzo małymi wymiarami prasy naciągowej. Mankamentem natomiast jest konieczność wykonania wnęk pod płyty kotwiące, co w wypadku otuliny betonowej o małej grubości może stanowić kłopot. Pozostawienie stalowych elementów kotwiących trwale połączonych ze wzmocnianą konstrukcją w trakcie jej użytkowania obniża walory estetyczne obiektu po wzmocnieniu oraz może być przyczyną korozji płyt kotwiących, a więc obniża jej trwałość.

2.2. System SIKA CARBODUR STRESS-HEAD [18]

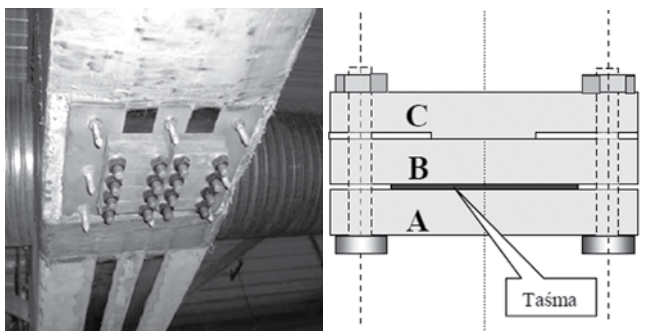
Jest to system do sprężania i kotwienia taśm CFRP, które mogą być montowane jako przyklejone lub nieprzyklejone do powierzchni betonu na odcinku między zakotwieniami do powierzchni wzmocnianego elementu. Zakotwienia stanowią specjalnie głowice Stress-Head (rys. 4), które umożliwiają kotwienie naprężonych taśm. Oba końce taśmy przeznaczonej do sprężania są fabrycznie zatapiane w kompozytowych głowicach, co gwarantuje jednakową pełną odporność korozyjną takiego rozwiązania. Głowice kompozytowe opierają się na specjalnych stalowych blokach mocowanych do wzmocnianej konstrukcji poprzez masywny stalowy blok kotwiący. Mimo wysokiej skuteczności systemu kotwiącego (przy naprężeniu taśm do poziomu odkształceń 9,5%), mankamentem jest konieczność głębokiego zakotwienia bloków kotwiących w istniejącej konstrukcji.



Rys. 4. Bierna (lewa) i czynna (prawa) strona systemu Sika® CARBODUR STRESS-HEAD [18]

2.3. System IBDiM [19]

Podstawą działania pierwszego polskiego systemu sprężania taśm kompozytowych jest system Sika® LEOBA CarboDur® SLC II. System został opracowany przez Łagodę i firmę Sika Polska [19]. Naciąg taśm kompozytowych w tym zmodernizowanym systemie może być wykonywany przy użyciu dowolnego urządzenia przekazującego siłę sprężającą (naciągarka, prasa, cylindry hydrauliczne).



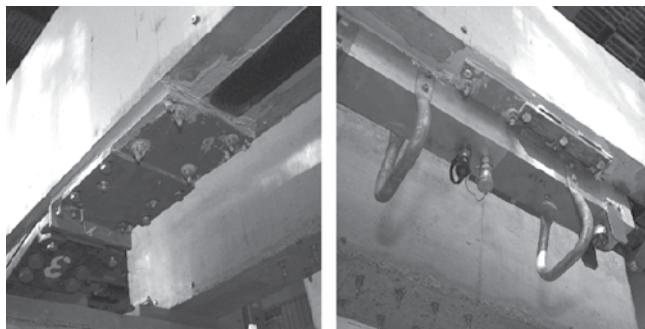
Rys. 5. Zakotwienie systemu IBDiM [19]

W zależności od użytego sprzętu szczęki kotwiące po stronie czynnej mogą być ciągnięte lub pchane. W strefie zakotwienia każdej taśmy należy wykonać wnękę potrzebną do umieszczenia bloku oporowego. W pierwszej kolejności we wnękę umieszcza się blok oporowy w taki sposób, aby tworzył z powierzchnią wzmacnianego elementu jedną płaszczyznę. Między blokami oporowymi w śladzie taśmy umieszcza się cienką warstwę kleju. Stopniowo naprężana taśma mocowana jest w szczękach naciągowych od strony biernej i czynnej. Równomierny docisk taśmy w szczękach naciągowych zapewnia odpowiednia ich konstrukcja, zbudowana z dwóch stalowych płyt, klocków dociskowych i śrub sprężających (rys. 5). Po osiągnięciu docelowej wartości siły naciągu, taśma mocowana jest do bloków oporowych, a szczęki naciągowe zostają zdemontowane jednocześnie po czynnej i biernej stronie zakotwienia.

2.4. System BBR-Stahlton [20]

Współpraca szwajcarskich firm Stahlton, S&P Clever Reinforcement i IteM zaowocowała powstaniem systemu

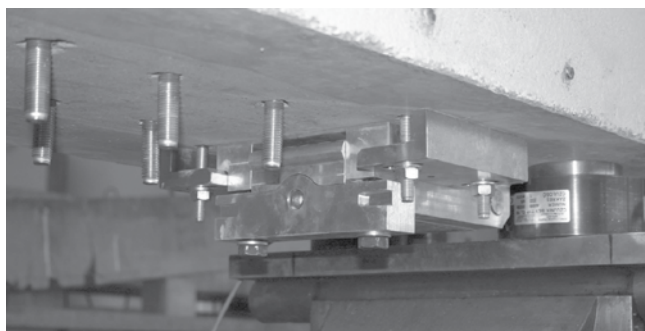
sprężająco-kotwiącego BBR-Stahlton zbudowanego ze stalowych płaskich blach kotwiących mocowanych do betonu przy użyciu śrub i kleju oraz niezależnego modułu naciągowego (rys. 6). Wprowadzenie pochylonych szczęk kotwiących pozwoliło naprężyć kompozyty do wyższych poziomów odkształceń.



Rys. 6. Zakotwienie bierne (strona lewa) i czynna (strona prawa) systemu BBR-Stahlton [20]

2.5. System S&P [21]

W systemie S&P taśma kompozytowa mocowana jest na elemencie poprzez stalowe płyty przykręcane śrubami do powierzchni betonu (rys. 7). Zakotwienie bierne stanowi płyta kotwiona na stałe do podłoża betonowe-



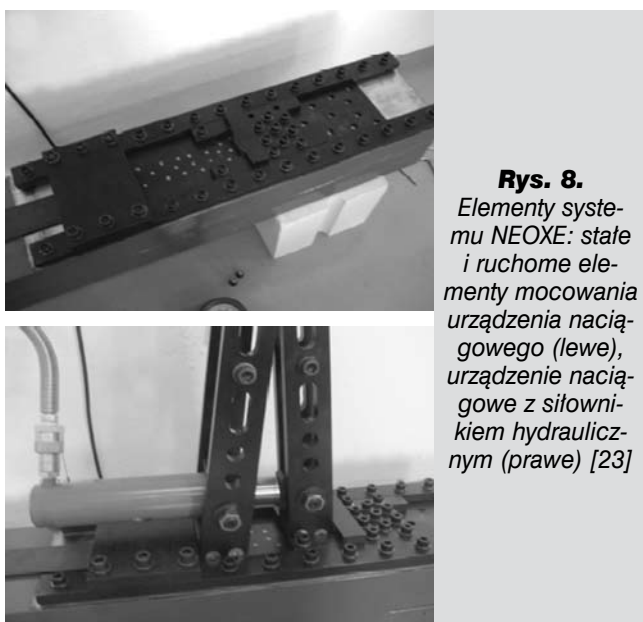
Rys. 7. Bierna (górną) i czynna (dolną) strona systemu S&P [22]

go, natomiast zakotwienie czynne składa się z ruchomego zakotwienia taśmy oraz z siłownika hydraulicznego, mocowanego na płycie pośredniej. Taśma pokryta warstwą kleju umieszczana jest w szczękach bloków kotwiących, a następnie naciągana do maksymalnego poziomu odkształcenia 6‰. Następnie taśma dodatkowo jest mocowana do powierzchni betonu stalowymi płytami

dociskowymi przykręcanymi za pomocą śrub. Po zakończeniu sprężania stalowe płyty dociskowe pozostają na stałe zakotwione na wzmacnianym elemencie, natomiast bloki kotwiące czynny i bierny oraz blok oporowy z siłownikiem hydraulicznym są demontowane. Podobnie, jak w poprzednich systemach mankamentem są pozostawione na stałe stalowe elementy kotwiące.

2.6. System sprężania NEOXE [23]

Podobnie jak poprzednie systemy, składa się z zakotwienia biernego i czynnego oraz układu sprężającego, złożonego z urządzenia naciągowego z zaczepami stałym i ruchomym, szyn prowadzących, kleszczy naciągowych i prasy hydraulicznej. Płyty kotwiące wykonane są ze stalowych blach oraz umieszczonych między nimi blach dystansowych. Blachy kotwiące dostosowane są do grubości i szerokości zastosowanej taśmy. Wyróżnione są dwa równe obszary zakotwienia: skrajny i we-



Rys. 8. Elementy systemu NEOXE: stałe i ruchome elementy mocowania urządzenia naciągowego (lewe), urządzenie naciągowe z siłownikiem hydraulicznym (prawe) [23]

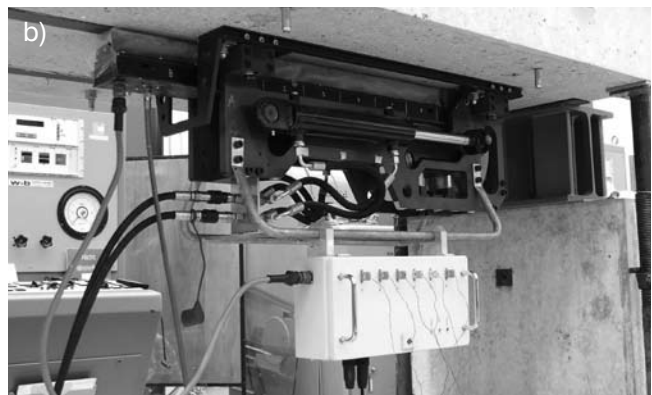
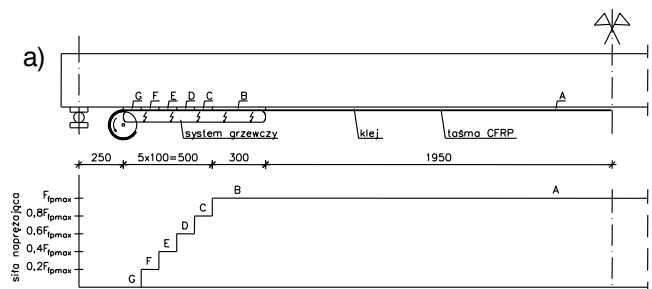
wewnętrzny. W obszarze skrajnym elementy zakotwienia połączone techniką spawania na krawędziach blach. W tej części zakotwienia znajdują się przelotowe otwory służące do mocowania zakotwienia do betonowego podłoża. W zakotwieniu czynnym znajdują się otwory gwintowane służące do mocowania urządzenia naciągowego. W obszarze wewnętrznym zakotwienia taśma kompozytowa wklejona jest między blachy przy użyciu zaprawy klejowej. Dodatkowo skleina wzmocniona jest na całej powierzchni za pomocą metalowych nitów łączących blachy taśmę z blachami kotwiącymi. Zakotwienie tego typu przenosi siłę sprężającą z taśmy na podłoże wzmacnianego elementu za pomocą skleiny, nitów oraz tarcia (rys. 8).

Urządzenie naciągowe służące do naprężania kompozytu przymocowane jest do powierzchni betonu przy użyciu szyn prowadzących usytuowanych po obu stronach czynnego zakotwienia. Do obu części urządzenia

naciągowego za pomocą uchwytów mocowane są kleszcze naciągowe wraz z ręczną prasą hydrauliczną.

2.7. Bezkotwowy system sprężający opracowany w laboratorium EMPA [24]

Wadą systemów kotwiących trwale połączonych ze wzmacnianą konstrukcją jest wrażliwość na korozję pozostawionych na stałe stalowych elementów na powierzchni wzmacnianej konstrukcji. Pierwszy jak dotąd na świecie bezkotwowy system sprężający zaproponowano w Laboratorium Badawczym EMPA w Zurychu [24]. Polegał on na stopniowym zmniejszaniu siły naciągu taśmy na jej długości, co zrealizowano symetrycznie dzieląc wzmacniany odcinek na sekcje o stopniowo zmiennej sile wstępnego naprężenia. Dzięki takiemu rozkładowi siły naciągu w taśmie, naprężenia styczne na styku taśmy i betonowego podłoża stopniowo maleją



Rys. 9. Bezkotwowy system naprężania ze stopniową redukcją siły naciągu w taśmie: a) schemat naprężania taśmy FRP, b) system nagrzewania taśmy, c) widok poduszki dociskowej [25]

aż do zera w miejscu końca taśmy (rys. 9). Taki system sprężenia eliminuje niebezpieczeństwo odspojenia końców kompozytu, a tym samym nie wymaga stosowania kotew, jak to było konieczne w poprzednio wymienionych metodach sprężania czynnego.

W bezkrotowym systemie sprężającym [25], jako pierwszy zostaje naciągnięty i przyklejony środkowy odcinek taśmy „A”, na którym siła naciągu ma największą wartość (rys. 9a). W celu przyspieszenia wiązania zaprawy klejowej, nagrzewa się przyklejony odcinek taśmy za pomocą przestawnego urządzenia grzewczego (patrz rys. 9b), co pozwala skrócić czas wiązania kleju z 3 dni do 2 godzin (w temperaturze +25°C). Po związaniu zaprawy klejowej na odcinku „A”, taśma zostaje naprężona na obu odcinkach „B” ze zmniejszoną siłą naciągu. Na odcinkach „C” siła naciągu zostaje zredukowana do zera i taśma w sposób bierny zostaje przyklejona do powierzchni elementu. Taśmy naciągane są na specjalnych kołach naciągowych zamocowanych tymczasowo do spodu wzmacnianej konstrukcji.



Rys. 10. Bezkrotowy system naprężania ze stopniową redukcją siły naciągu w taśmie: a) w laboratorium Empa, b) na moście w Szczercowskiej Wsi [26]

Późniejszą modyfikacją systemu gradientowego stanowiło rozdelenie urządzenia sprężającego i systemu grzewczego. Do sprężania wykorzystuje się typowy system sprężający S&P z pominięciem stalowych blach kotwiących, a przestawne urządzenie grzewcze mocuje się odrębnej stalowej ramy usytuowanej na dolnej powierzchni wzmacnianego elementu. System ten

użyto do wzmocnienia kablobetonowych dźwigarów w ramach Polsko-Szwajcarskiego Projektu Tulcoempa, a następnie użyto do pierwszego na świecie wzmocnienia istniejącej konstrukcji mostu w Szczercowskiej Wsi (rys. 10) [26].

2.8. Bezkrotowy system sprężający

Tenroc Technologies [27]

Kolejny system umożliwiający bezkrotową aplikację taśm kompozytowych został zaproponowany przez szwedzką firmę Tenroc Technologies (rys. 11). System ten wykorzystuje specjalistyczne wielosegmentowe urządzenia naciągowe do wprowadzenia stopniowo zmiennej siły sprężającej. Urządzenie naciągowe połączone jest z kompozytową taśmą osobno na każdym segmencie, dzięki czemu segmenty mają ograniczony przesuw względem siebie i zmienny na różnych segmentach. Najmniejszy przesuw taśmy realizowany jest na skrajnym, a największy – wewnętrznym (bliższym środka rozpiętości) odcinku taśmy. System naciągowy i kotwiący demontowany jest po całkowitym związaniu kleju.

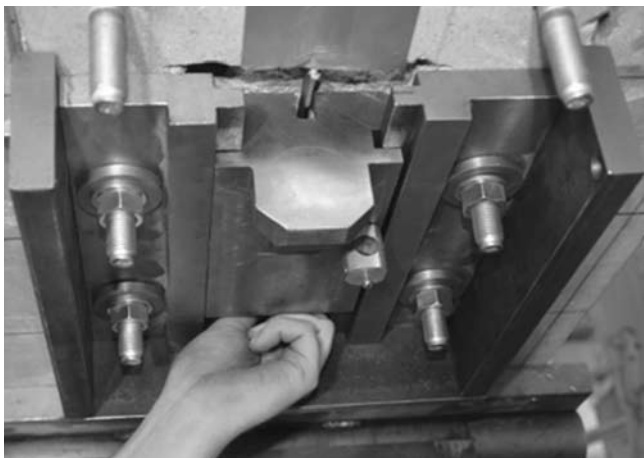
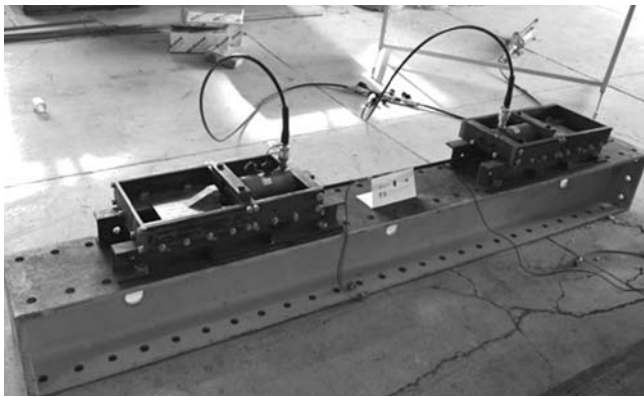


Rys. 11. Bezkrotowy system naprężania Tenroc podczas wzmocniania mostu przez rzekę River Nossan w Szwecji [27]

2.9. Systemy kotwiąco-sprężające typu NSM [30]

Mimo większej trudności wykonania wzmocnienia NSMR jego efektywność jest znacznie wyższa niż wzmocnień powierzchniowych EBR. Taśmy wklejone w betonową otulinę wykazują lepsze warunki przyczepności do betonu w porównaniu z taśmami przyklejonymi na powierzchni, dzięki czemu przenoszą wyższe siły rozciągające, co bezpośrednio wpływa na wyższą nośność wzmocnionego przekroju. Naprężenie kompozytów polimerowych wklejonych w bruzdy wykonane w betonowej otulinie jest znacznie bardziej kłopotliwe niż naprężenie taśm przyklejonych na zewnętrznej powierzchni. Nie opracowano jak dotąd żadnych komercyjnych systemów sprężenia taśm wklejonych w pozycji pionowej, a dotychczasowe badania żelbetonowych elementów wzmocnionych na zginanie tą metodą dotyczyły systemów sprężających kotwionych poza końcami wzmacnianych elementów [28] lub niezwiązanych bezpośrednio

z podłożem wzmocnianego elementu [29]. Jedyną jak dotąd skuteczną sposobem wzmocnienia naprężonymi taśmami CFRP wklejanymi w betonową otulinę, umożliwiającą mocowanie systemu sprężającego bezpośrednio na powierzchni wzmocnianego elementu zaproponowano w Katedrze Budownictwa Betowego Politechniki Łódzkiej [30].



Rys. 12. Bezkontaktowy system sprężający typu NSM [ZP nr 407898, 30]

3. Wnioski z analizy efektywności wzmocnienia żelbetonowych elementów wzmocnionych naprężonymi kompozytami w świetle badań doświadczalnych

Dotychczasowe badania doświadczalne prowadzone w ośrodkach badawczo-naukowych na całym świecie potwierdzają bardzo wysoką skuteczność wzmocnienia żelbetonowych elementów na zginanie przy użyciu wstępnie naprężonych kompozytów z włóknami węglowymi.

Aby analiza wyników była obiektywna, wprowadzono podstawowy podział elementów badawczych na dwie grupy, uwarunkowany sposobem zniszczenia elementów. Pierwsza grupa obejmuje elementy, które uległy zniszczeniu wskutek odspojenia zbrojenia kompozytowego (określany powszechnie *intermediate crack debonding* – ICD), a druga – znacznie mniej liczna, obejmuje elementy, w których doszło do zerwania zbrojenia

kompozytowego w środkowej części elementu (*rupture* – R). Zniszczenie pierwszej grupy elementów świadczy o braku pełnej skuteczności zastosowanych zakotwień, które po odspojeniu taśmy w końcowej fazie zniszczenia wysuwają się ze szczęk kotwiących. Elementy, które zniszczyły się w sposób nietypowy dla zginania (np. w wyniku ścinania), oraz elementy, które uległy zniszczeniu przez zmiżdżenie betonu w ścisanej strefie przekroju (*concrete crushing* – CC) lub odspojenie nieskutecznie zakotwionych końców kompozytu (*end debonding* – ED, *concrete cover separation* – CCS, *anchorage failure* – A), zostały wyłączone z dalszej analizy.

Baza danych [31] obejmuje wyniki elementów z opisem odpowiadających im parametrów zmiennych, do których należą: wymiary elementu (b , h), charakterystyka wytrzymałościowa betonu (f_{ck}), stali (f_{yk} , E_s) i kompozytu (f_{tu} , E_f), pole powierzchni zbrojenia stalowego (A_s) i kompozytowego (A_f) wraz z odpowiadającymi im stopniami zbrojenia (ρ_s , ρ_f), sprowadzony stopień zbrojenia kompozytowego ($\rho_{f,eq}$), odkształcenie wstępnie naprężonego kompozytu (ε_{fp}), odkształcenie kompozytu w chwili zniszczenia elementu ($\varepsilon_{f,test}$), mechanizm zniszczenia wzmocnionego elementu, stopień wzmocnienia w odniesieniu do nośności ($\eta_u = (M_u - M_{u0})/M_{u0}$) oraz zarysowania elementu ($\eta_{cr} = (M_{cr} - M_{cr0})/M_{cr0}$) (gdzie: M_u , M_{u0} , M_{cr} , M_{cr0} oznaczają odpowiednio momenty niszczące element wzmocniony i niewzmocniony oraz momenty odpowiadające zarysowaniu elementu wzmocnionego i niewzmocnionego).

Aby w analizie wzmocnionych elementów wyeliminować wpływ różnic modułów sprężystości, wprowadzono parametr sprowadzonego stopnia zbrojenia kompozytowego ($\rho_{f,eq} = \rho_f \times (E_f/E_s)$), gdzie ρ_f oznacza stopień zbrojenia kompozytowego $\rho_f = A_f/(b \cdot d_f)$; d_f – wysokość użyteczna przekroju do środka ciężkości zbrojenia kompozytowego).

Wyniki badań wykazały stopień wzmocnienia belek sięgający 183% ($\eta_u = 1,83$) w badaniach [32] do wartości aż 234% ($\eta_u = 2,34$) w badaniach [20]. W żelbetonowych płytach wzmocnionych tą metodą stopień wzmocnienia sięgał 119% ($\eta_u = 1,34$) w badaniach [33]. Badania jednoznacznie wykazują, że przy najbardziej powszechnym sposobie zniszczenia, jakim było odspojenie kompozytów od powierzchni betonu i ostateczne jego wysunięcie z blach kotwiących, widoczny jest wpływ stopnia istniejącego zbrojenia zwykłego na efektywność (stopień) wzmocnienia, która maleje wraz ze wzrostem tego parametru (stopnia zbrojenia podłużnego ρ_s). Niemniej jednak nawet przy wysokim stopniu zbrojenia zwykłego ($\rho_s = 0,89\%$), stopień wzmocnienia był satysfakcjonujący ($\eta_u = 0,59$), co już przy niskim stopniu zbrojenia ($\rho_s = 0,44\%$) skutkowało bardzo wysokim stopniem wzmocnienia ($\eta_u = 1,55$). Jednocześnie wzrost stopnia zbrojenia kompozytowego powodował wyższy stopień wzmocnienia. Z przeprowadzonej analizy wynika, że największy

wpływ na stopień bezkrotowego wzmocnienia elementów żelbetowych miał poziom wstępnego naprężenia kompozytu CFRP na efektywność wzmocnienia elementów, co nie ma znaczenia na nośność elementów wzmocnionych skutecznie kotwionymi taśmami/ matami, w których o zniszczeniu elementu decyduje wytrzymałość zbrojenia kompozytowego na rozciąganie. W przeciwieństwie do stanu granicznego zniszczenia, poziom wstępnego naprężania kompozytu bardzo korzystnie wpływa na pracę wzmocnionego elementu w stanie granicznym użyteczności, co potwierdza ponad czterokrotnie większy przyrost stopnia wzmocnienia elementów przy ich zarysowaniu niż odpowiadający przyrost osiągnięty przy zniszczeniu. Badania żelbetowych płyt wzmocnionych przy użyciu naprężonych taśm z włóknami węglowymi przeprowadzone na Katedrze Budownictwa Betonowego PŁ wykazały wysoką skuteczność sprężenia nawet w wypadku silnie wytężonych elementów przed wzmocnieniem odpowiadającym 75% obciążenia niszczonego elementu niewzmocnionego.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Meier U., Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites. *Construction and Building Materials*, 9 (6), s. 341-351, 1995a
- [2] Meier U., Nachträgliche Verstärkung von Bauwerken mit CFK-Lamellen, SIA/EMPA Dokumentation D 0128, Editor: Swiss Society of Engineers and Architects (SIA), Zürich, Switzerland, 1995b
- [3] Siwowski T., Radomski W., Pierwsze krajowe zastosowanie taśm kompozytowych do wzmocnienia mostu. *Inżynieria i Budownictwo*, nr 7, s. 382 – 388, 1998
- [4] Leonhardt F., Walther R., Schubversuche an Plattenbalken mit unterschiedlicher Scubbewehrung, DAfSt, Heft 156, 963
- [5] Meier U., Deuring M., Meier H., Schwegler G., Strengthening of structures with advanced composites. alternate materials for the reinforcement and prestressing of concrete, J.L. Clarke, editor, Blackie Academic and Professional, Glasgow, 1993
- [6] Deuring M., Brandversuche an nachträglich verstärkten tragern aus beton. Research Report EMPA No. 148'795, Dübendorf: Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, 1994
- [7] Triantafillou T.C., Deskovic N., Innovative Prestressing with FRP Sheets: Mechanics of Short-Term Behavior, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 117 (7), s. 1652-1672, 1991
- [8] Wight R.G., Strengthening concrete beams with prestressed fiber reinforced polymer sheets, Ph.D. Thesis, Queen's University, Kingston, 1998
- [9] Hollaway L.C., Leeming M.B., Strengthening of reinforced concrete structures using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering. CRC Press, England, 199.
- [10] El-Hacha R., Prestressed CFRP sheets for strengthening concrete beams at room and low temperatures, Ph.D. Thesis, Queen's University, Department of Civil Engineering, Kingston, Ontario, Canada, ss. 525, 2000
- [11] Wight R.G., Green M.F., Erki M.A., Strengthening concrete beams with prestressed FRP sheets, *Journal of Composites for Construction* (ASCE), Vol. 5, No. 4, pp. 214-220, 2001
- [12] Triantafillou T.C., Plevris N., Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fiber-composite materials. *Materials and Structures Journal*, Vol. 25, s. 201-211, 1992
- [13] Stöcklin I., Meier U., Strengthening of concrete structures with prestressed and gradually anchored CFRP strips. Proc. 6th Int. Symp. FRP Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS-6, K. H. Tan ed., World Scientific, Singapore, s. 1321-1330, 2003
- [14] Andrä H. P., König G., Maier M., First applications of CFRP ten-

- dons in Germany, IABSE Symposium Melbourne, Australia, CD, 2002
- [15] Sika®CarboDur® CFRP, Structural Strengthening with Prestressed Sika®CarboDur® CFRP Plate – materiały informacyjne, 2004
- [16] Schwegler G., Verstärken, Mauerwerk mit Hochleistungsfaserverbundwerkstoffen, Dissertation, EMPA – Bericht Nr 229, 1994
- [17] Schwegler G., Breset T., Methods for Strengthening Reinforced Concrete Structures. Proc. of IABSE Symposium, Melbourne, Australia, 2002
- [18] Post-strengthening of a motorway bridge with prestressed CFRP strips., Special print from issue 22/2002 tec21. T. Berset, G. Schwegler, L. Trausch, 2002
- [19] Łagoda M., Zalecenia dotyczące wzmocniania konstrukcji mostowych przez przyklejanie zbrojenia zewnętrznego. IBDIM. Warszawa, 2002
- [20] Kałuża M., Ajdukiewicz A., Comparison of behaviour of concrete beams with passive and active strengthening by means of CFRP strips. *Architecture Civil Engineering Environment*, Vol. 1 (2), s. 51–64, 2008
- [21] S&P Reinforcement, Materiały informacyjne, karty techniczne, 2011
- [22] Kotynia R., Lasek K., Staśkiewicz M., Flexural Behavior of Preloaded RC Slabs Strengthened with Prestressed CFRP Laminates, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 18, No. 3, Special Issue: 10th Anniversary of IIFC, May/June 2014, A4013004
- [23] Siwowski T., Michałowski J., Błażewicz S., Nowy system sprężania taśm kompozytowych CFRP do wzmocniania mostów, *Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej Awarie Budowlane XXIV, Szczecin-Międzyzdroje*, s. 947-960, maj 2009
- [24] Stöcklin I., Meier U., Strengthening of concrete structures with prestressed and gradually anchored CFRP strips. Proc. 6th Int. Symp. FRP Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS-6, K. H. Tan ed., World Scientific, Singapore, s. 1321-1330, 2003
- [25] Kotynia R., Walendziak R., Stoecklin I., Meier U., RC Slabs Strengthened with Prestressed and Gradually Anchored CFRP Strips under Monotonic and Cycling Loading, *J. of Composites for Construction*, Nr 4-5, 168-180, 2011
- [26] Kotynia R., Michels J., Staśkiewicz M., Czaderski C., Motavalli M., Pionierskie wzmocnienie kablobetonowych dźwigarów przy użyciu naprężonych taśm kompozytowych kotwionych metodą gradientową w moście przez rzekę Pilnię w Szczercowskiej Wsi", *Konferencja Dni Betonu*, s. 203-210, Wiśla 13-15.10.2014
- [27] <http://www.tenroc.se/>
- [28] Nordin H., and Taljsten B., Concrete Beams Strengthened with Prestressed Near Surface Mounted CFRP, *Journal of Composites for Construction*, 10 (1):60-8, 2006
- [29] Barros J.A.O., Pre-stress Technique for the Flexural Strengthening with NSM-CFRP Strips, Proc. Ninth Int. Sym. on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, Sydney, Australia, 2009
- [30] Kotynia R., Lasek K., System kotwiąco-sprężający do naciągu płaskowników, zwłaszcza taśm kompozytowych klejanych w przypowierzchniową otulinę elementów budowlanych o przekroju prostokątnym kompozytowych i stalowych klejanych w betonową otulinę. Zgłoszenie Patentowe, Nr 407898, 2014
- [31] Kotynia R., Staśkiewicz M., Analiza efektywności wzmocnień żelbetowych elementów zginanych za pomocą wstępnie naprężonych kompozytów CFRP. W: 59 Konferencja Naukowa KILiW PAN oraz KN PZITB Krynica 2013 – pt. „Budownictwo na obszarach wiejskich nauka, praktyka, perspektywy”, Lublin – Krynica, s. 131-138, 15-20 września 2013
- [32] Kim Y., Shi C., Green M., Ductility and cracking behavior of prestressed concrete beams strengthened with prestressed CFRP sheets. *Journal of Composites for Construction*, Vol. 12 Issue 3, 274-283, 2008
- [33] Przygocka M., Lasek K., Kotynia R., Strengthening of RC Slabs with Prestressed and Passive Near Surface Mounted CFRP Strip-Experimental Tests. W: 8th International Conference AMCM 2014 pt. Analytical Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures, Wrocław, Poland, s. 208-209, 16-18 June 2014