

Wzmacnianie konstrukcji mostowych kompozytami wstępnie sprężonymi, cz. 2



■ dr hab. inż. Marek Łagoda, prof. IBDiM i prof. PL, Instytut Badawczy Dróg i Mostów w Warszawie; Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Dróg i Mostów, Politechnika Lubelska

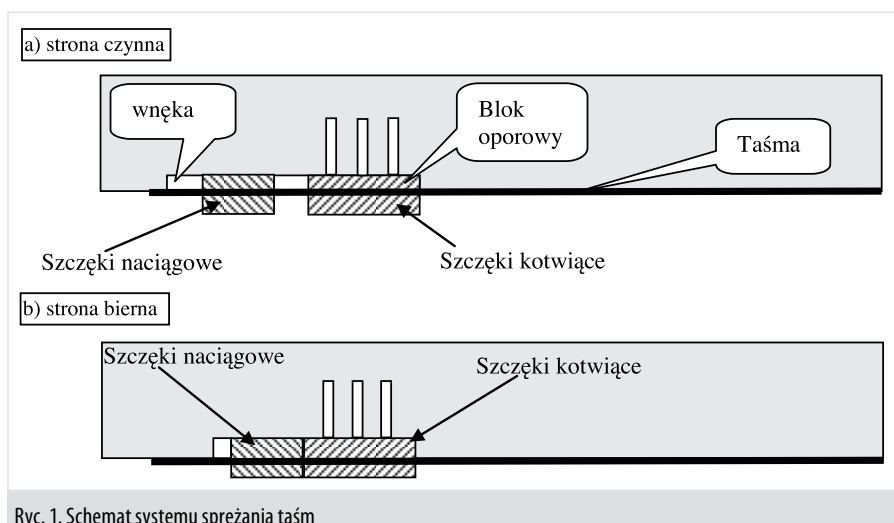
Tekst jest kontynuacją artykułu opublikowanego w poprzednim numerze „Nowoczesnego Budownictwa Inżynieryjnego”, w którym przedstawiono możliwości wzmacniania konstrukcji mostowych za pomocą wstępnie naprężonych taśm kompozytowych, skatalogowano problemy związane z opracowaniem technologii systemów wstępnego naciągu i kotwienia taśm CFRP oraz opisano projektowy stan równowagi konstrukcji zginanej przy wzmacnieniu za pomocą sprężenia taśmami. W tej części artykułu autor omówił systemy wzmacniania konstrukcji powstałych w Polsce i przedstawił korzyści płynące ze stosowania metody wstępnego naprężania taśm CFRP do wzmacniania mostów.

1. System IBDiM

Biorąc pod uwagę doświadczenia zdobyte za granicą podczas pierwszych aplikacji taśm sprężonych oraz przede wszystkim warunki krajowe i rozważania teoretyczne, podjęto w Polsce udaną próbę wzmacnienia za pomocą naprężonych taśm kompozytowych dźwigara z betonu sprężonego. System sprężania został opracowany przez autora niniejszego artykułu w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów we współpracy z SIKA Poland Sp. z o.o. Roboczo nazwano go systemem IBDiM. Został pomysły jako uniwersalny, dostosowany do zróżnicowanych pod względem materiału i kształtu konstrukcji wzmacnianych. Uwzględniono w nim również różne możliwości wywoływania sił sprężających.

System sprężania taśm kompozytowych różni się od innych tym, że do napinania taśm mogą być użyte dowolne urządzenia wywołujące siły, np. typowe naciągarki, siłowniki, prasy, podnośniki, cylindry hydrauliczne. Założono, że w zależności od użytego sprzętu napinającego, szczęki naciągowe kotwiące końce taśm po stronie czynnej mogą być ciągnięte lub pchane. Oprócz schematycznie pokazanych na rycinie 1 elementów potrzebne jest oparcie dla urządzenia napinającego taśmę. Oparcie to może być usytuowane za szczękami naciagowymi lub przed nimi. Jeżeli zostanie użyta np. naciągarka, to opór znajdzie się za szczękami, natomiast w przypadku np. siłownika oparcie umieścimy przed nimi.

Rozwiązanie wszystkich trudności związanych z warunkami technicznymi systemu sprężania taśm kompozytowych nie było łatwym zadaniem. Taśmy zbrojone włóknami węglowymi charakteryzują się bardzo niską wytrzymałością w kierunku prostopadłym do włókien oraz praktycznie nie mogą przenosić momentów zginających we wszystkich płaszczyznach. Ponadto współczynniki tarcia między taśmą a innymi trwałymi materiałami konstrukcyjnymi charakteryzują się niewielkimi wartościami. Istotnych problemów nastrocza rozwiązanie zagadnień związanych z zakotwieniem.



Ryc. 1. Schemat systemu sprężania taśm

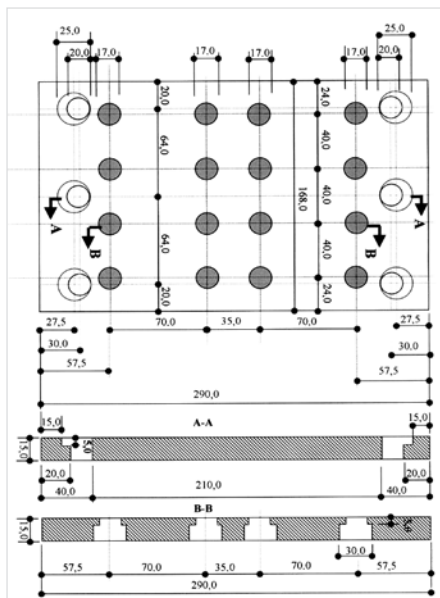
Założono, że w strefie zakotwienia każdej taśmy należy wykonać wnękę, potrzebną do umieszczenia płaskiego bloku oporowego oraz umożliwiającą lokalizację szczęk naciagowych na odpowiednim poziomie i miejscu. W pierwszej kolejności we wnękę znajdzie się blok oporowy, który jest kotwiony w konstrukcji wzmacnianej w taki sposób, aby tworzył z powierzchnią elementu konstrukcji wzmacnianej jedną płaszczyznę (chodzi o płaszczyznę, do której przyklejona jest taśma). Po zakończonym procesie naprężania i kotwienia taśm szczęki naciągowe są po obu stronach (czynnej i biernej) demontowane, a końcówki taśmy przyklejane do konstrukcji po uprzednim wypełnieniu wnęk zaprawą klejową. Do pilotażowego zastosowania taśmy sprężonej w badanym dźwigarze wykorzystano dwie taśmy o szerokości 50 mm.

Blok oporowy jest płytą stalową, wykonaną z dowolnego gatunku stali konstrukcyjnej. Zadaniem bloku jest umożliwienie kotwienia na stałe naciągniętej taśmy kompozytowej. Jego konstrukcja jest zawsze dostosowana do konstrukcji wzmacnianej. Składa się z blachy stalowej, która za pomocą śrub lub sworzni jest trwale umocowana w betonie. Powierzchnia jej jednej strony z naciągniętymi taśmami kompozytowymi musi stanowić wspólną płaszczyznę z powierzchnią konstrukcji wzmacnianej, do której będą doklejone naciągnięte taśmy. System sprężania został zweryfikowany w laboratorium i posłużył już do wzmacniania wielu dźwigarów z betonu zbrojonego i sprężonego. Na rycinie 2 pokazano przykładową konstrukcję bloku użytego dla wzmacnianego dźwigara. Otwory pozostawione w bloku oporowym służą do umieszczenia w nich śrub sprężających do zamocowania szczęk kotwiących i bloku oporowego w konstrukcji wzmacnianej.

Zadaniem szczęk kotwiących jest utrzymywanie taśm w stanie naprężonym po zdemontowaniu szczęk naciagowych. Powierzchnia płyty bloku oporowego kontaktująca się z naprężoną taśmą musi być przed operacją sprężania przygoto-

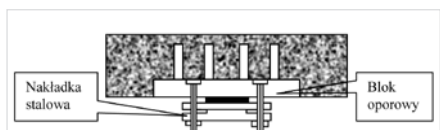
strukcyjnej. Zadaniem bloku jest umożliwienie kotwienia na stałe naciągniętej taśmy kompozytowej. Jego konstrukcja jest zawsze dostosowana do konstrukcji wzmacnianej. Składa się z blachy stalowej, która za pomocą śrub lub sworzni jest trwale umocowana w betonie. Powierzchnia jej jednej strony z naciągniętymi taśmami kompozytowymi musi stanowić wspólną płaszczyznę z powierzchnią konstrukcji wzmacnianej, do której będą doklejone naciągnięte taśmy. System sprężania został zweryfikowany w laboratorium i posłużył już do wzmacniania wielu dźwigarów z betonu zbrojonego i sprężonego. Na rycinie 2 pokazano przykładową konstrukcję bloku użytego dla wzmacnianego dźwigara. Otwory pozostawione w bloku oporowym służą do umieszczenia w nich śrub sprężających do zamocowania szczęk kotwiących i bloku oporowego w konstrukcji wzmacnianej.

Zadaniem szczęk kotwiących jest utrzymywanie taśm w stanie naprężonym po zdemontowaniu szczęk naciagowych. Powierzchnia płyty bloku oporowego kontaktująca się z naprężoną taśmą musi być przed operacją sprężania przygoto-



Ryc. 2. Konstrukcja przykładowego bloku oporowego dla dwóch taśm o szerokości 50 mm

wana przez opiaskowanie. Drugi główny element to stalowa nakładka, również z opiaskowaną powierzchnią, przylegającą do taśmy kompozytowej. Dobór odpowiedniej powierzchni i siły docisku wymagał żmudnych badań pod obciążeniem statycznym i zmiennym. W końcu spośród wielu konstrukcyjnych propozycji wybrano takie, które gwarantują dobre kotwienie i zapewniają montaż w jak najkrótszym czasie (ryc. 3). Z tego względu wyeliminowano dobre rozwiązania, ale montowane z użyciem kleju. Czas montażu jest tu niezwykle istotny z uwagi na to, że dopiero po jego zakończeniu można zwolnić szczęki naciągowe, a zatem i całą resztę aparatury oraz osprzętu sprężającego.

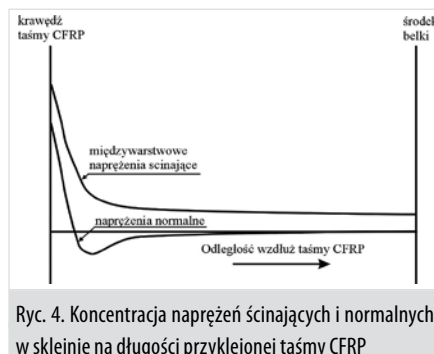


Ryc. 3. Przyjęte rozwiązanie szerek kotwiących

Wielkość szerek jest uzależniona od rodzaju taśmy kompozytowej. Dla taśmy o szerokości 50 mm konieczne jest dociśnięcie nakładki ośmioma śrubami klasy 10,9 o średnicy 16 mm. Nakładka stalowa składa się z dwóch płyt, wykonanych ze stali S355J2. Jedna, przylegająca do taśmy kompozytowej, jest płaska po obu stronach. Druga, zewnętrzna, ma w środkowej części na jednej płaszczyźnie zgrubienie. Chodzi o to, aby siła od śruby sprężającej, prostopadła do taśmy kompozytowej, wywoływała dociśnięcie równomiernie na całej powierzchni taśmy. Gdyby oddziaływanie śrub było

bezpośrednie na jedną tylko nakładkę, to kompozyt byłby nierówno dociśnięty, co z uwagi na jego właściwości powodowałoby pęknięcie i rozwarstwienie taśmy.

Kolejną poważną przeszkodą do dokonania jest naciąganie taśm kompozytowych w taki sposób, aby uniknąć koncentracji naprężeń, które mogłyby spowodować zniszczenie taśm (ryc. 4).



Ryc. 4. Koncentracja naprężeń ścinających i normalnych w skleinie na długości przyklejonej taśmy CFRP

Określenie wartości naprężeń na końcu taśm wymaga przeprowadzenia odpowiedniej analizy rozkładu sił wewnętrznych w skleinie. Przed opracowaniem systemu IBDiM analizowano odkształcenia przy założeniu, że element kompozytowy jest tylko rozciągany. W wyniku analizy uwzględniającej podstawy teorii sprężystości, przyjęcia modelu liniowego skleiny oraz następujących założeń: materiały (belka, element przyklejany i klej) są jednorodne, izotropowe oraz liniowo sprężyste, klej przenosi jedynie siły ścinające, grubość skleiny jest stała na całej powierzchni przylegania, szerokość połączenia jest stała na całej długości – otrzymano następujące zależności dla sił ścinających w skleinie:

a) przy pominięciu wpływ sił zginających

$$\tau(x) = \omega P_k(l) \frac{\cosh(\omega x)}{\sinh(\omega l)}, \quad (4)$$

gdzie:

$$\omega = \left[\frac{G}{s} \left(\frac{1}{E_k t} + \frac{1}{E_c h} \right) \right]^{1/2} \quad (5)$$

P_k – siła rozciągająca w kompozycie

G – moduł Kirchhoffa

E – moduł Younga

s – szerokość skleiny,

b) przyjmując stały na szerokości b_k rozkład naprężeń:

$$\tau(x) = \omega \frac{P_k(l) \cosh(\omega x)}{b_k \sinh(\omega l)} \quad (6)$$

c) z uwzględnieniem sił zginających (przy grubej skleinie):

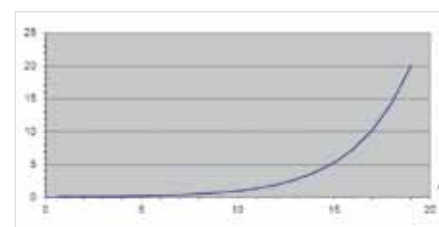
$$\tau(x) = \lambda_1 \frac{P_k(l) \cosh(\lambda x)}{b_k \sinh(\lambda l)} \quad (7)$$

gdzie:

$$\lambda_1 = \left[\frac{4G}{s} \left(\frac{1}{E_k t} + \frac{1}{E_c h} \right) \right]^{1/2} \quad (8)$$

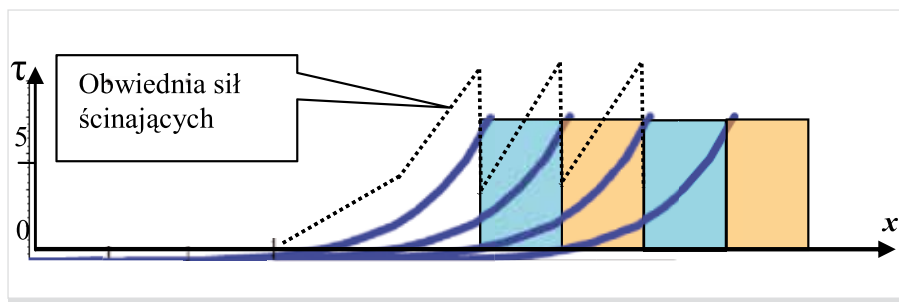
Przedstawione powyżej wyniki rozważań stanowią w zakresie liniowo sprężystym ściśle rozwiązanie stanu odkształceń i naprężeń w płaszczyźnie skleiny konstrukcji wzmacnianej przez doklejanie dodatkowego elementu kompozytowego. Rozważania te dają możliwość rozpoznania poziomu sił wewnętrznych działających w zespoleniu, zwłaszcza na końcach doklejonych elementów.

Jak wynika z analizy teoretycznej, na końcu taśmy rozciąganej (a więc wstępnie naprężonej) występuje znaczna, bardzo niekorzystna koncentracja naprężeń. Jest ona wprost proporcjonalna do wartości siły napinającej taśmę, co wynika z równania 4, którego wykres pokazano na rycinie 5.



Ryc. 5. Rozkład zależności naprężeń ścinających w odległości od środka taśmy

Rozciągnięcie taśmy w jednym cyklu do całkowitej wartości siły sprężającej, wymaganej do wzmocnienia konstrukcji, z uwagi na koncentrację naprężeń na jej końcu, stwarza zagrożenie zniszczenia taśmy. Natomiast można napinać sekwencyjnie taśmę, np. n krótkimi szczękami w czterech fazach, i wówczas koncentracja naprężeń zostaje rozłożona na suma-

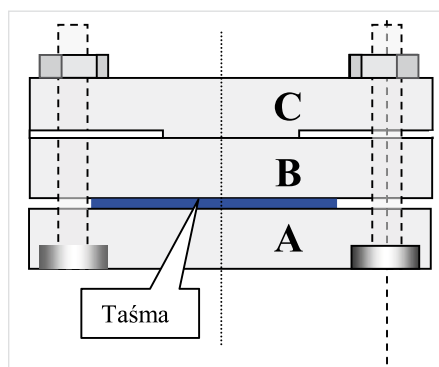
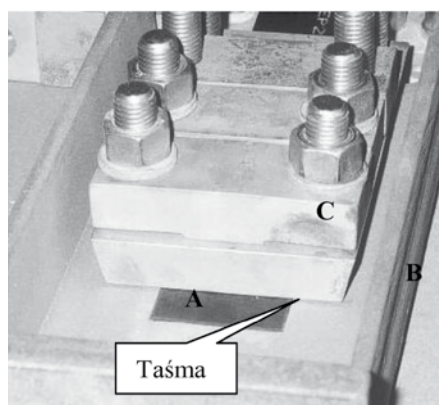


Ryc. 6. Zmniejszenie poziomów naprężeń przez podział strefy zakotwienia

ryczną długość szczęk naciagowych, a jej poziom jest n razy zmniejszony (ryc. 6).

Każdorazowo należy uwzględnić jeszcze naprężenia w innej płaszczyźnie (np. normalne), a to dodatkowo komplikuje zagadnienie. Aby zmniejszyć koncentrację naprężeń na końcu taśmy, zdecydowano się na przeprowadzenie sprężenia systemem IBDiM w kilku fazach, z kotwieniem krótkimi szczękami. Taśma jest napinana sekwencyjnie, tak że poziom naprężeń bywa kilkakrotnie zmniejszony. W praktyce przyjęto cztery krótkie szczęki i napinanie taśmy w czterech fazach.

W szczękach naciagowych blachy dociskowe zewnętrzne różnią się od blach w szczękach kotwiących tym, że są czterokrotnie węższe i dociska je tylko jedna para śrub sprężających. Równomierny rozkład naprężeń wywołanych dociskiem jest zapewniony odpowiednią konstrukcją szczęk naciagowych. Składają się one z dwóch płyt stalowych, klocków dociskowych i śrub sprężających z nakrętkami (ryc. 7).

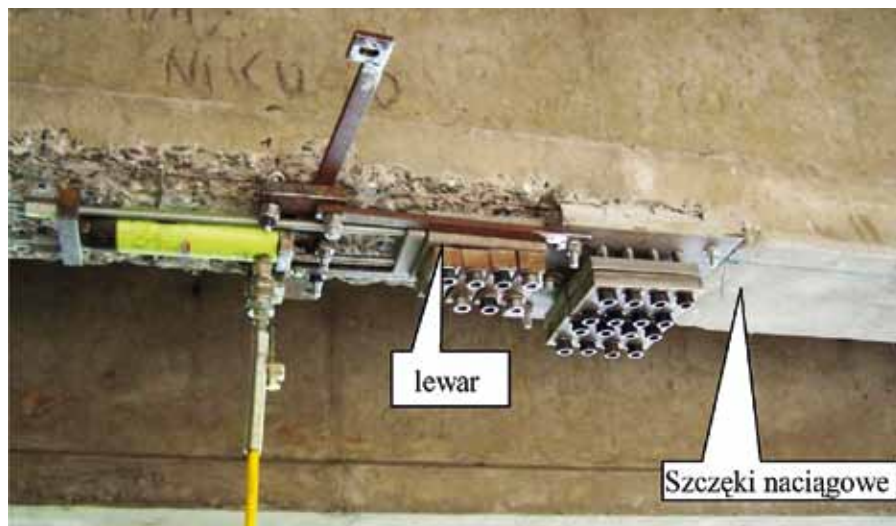


Ryc. 7. Szczęki naciagowe

Płyta A jest podstawą szczęki, na niej układa się taśmę kompozytową. Na taśmę z kolei położony jest element B, który jest dociśnięty klockami C. Klocki te są tak ukształtowane, aby docisk zrealizowany za pomocą śrub sprężających rozkładał się centralnie w sposób równomierny na taśmę kompozytową. Po sprężeniu taśmy i jej zakotwieniu do bloku oporowego za pomocą szczęki kotwiącej szczęki naciagowe mogą być zdemonstrowane i usunięte. Demontaż szczęk musi być przeprowadzany w ściśle określonej kolejności, aby równomiernie i stopniowo zmniejszać docisk taśmy. Elementy szczęk naciagowych mogą być używane wielokrotnie. Za każdym razem powierzchnie kontaktowe elementów A i B z taśmą kompozytową powinny być świeżo opiaskowane.

Podstawowymi czynnościami technologicznymi są:

1. Przygotowanie powierzchni betonu. Między blokami oporowymi w torze taśmy konstrukcję wzmacnianą smaruje się klejem.
2. Sekwencyjne mocowanie taśmy w szczękach naciagowych po obu jej stronach (biernej i czynnej).
3. Stopniowe naprężanie (w stronie czynnej) taśmy do uzyskania założonych wartości.



Ryc. 8. Zestaw elementów wstępnego naciągu taśm CFRP systemu IBDiM po stronie czynnej

4. Po naciągnięciu ostatecznym taśmę, przymocowanie jej (przy pomocy szczęki kotwiącej) do bloków oporowych.

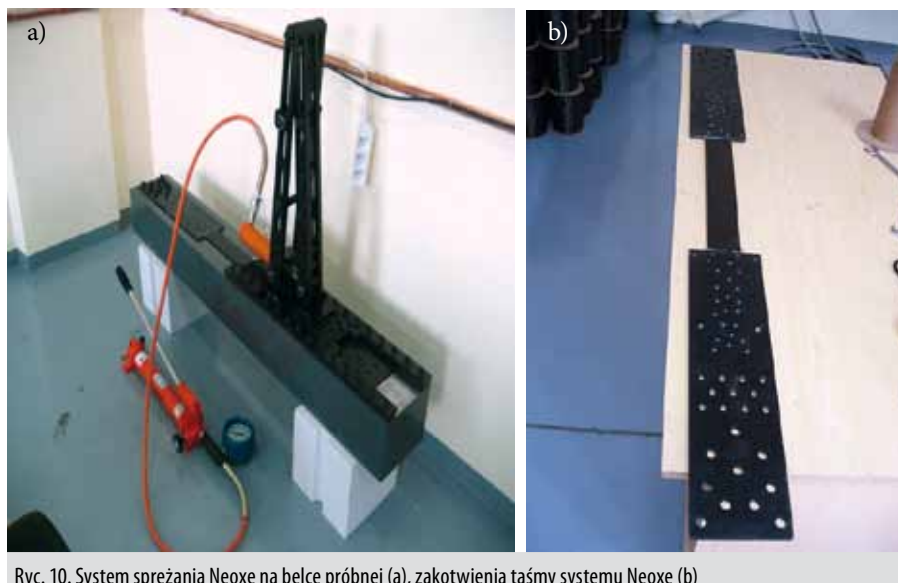
5. Przyklejenie wolnych końcówek taśm i zabezpieczenie taśm na całej ich długości.

Technologia wzmacniania sprężonymi taśmami CFRP z założenia nie jest skomplikowana, ale wymaga precyzyjnego, niemal perfekcyjnego wykonawstwa. Zwłaszcza blokowanie w szczękach naciagowych kotwiących oraz zwalnianie ze szczęk naciagowych i tymczasowych jest operacją niezwykle wrażliwą, decydującą o powodzeniu lub porażce przedsięwzięcia.

Napinanie taśm w szczękach naciagowych to najważniejsza czynność w procesie sprężania. Jej wykonanie przypada też na najtrudniejszy cykl operacji. Od odpowiednio dobranej siły naciągu i docisku zależy powodzenie procesu sprężania. W każdej chwili grozi rozwarstwienie taśmy i jej zniszczenie. Szczeka musi być bardzo starannie przesuwana w taki sposób, aby taśma była prowadzona równo, bez jej skręcania. Również docisk do taśmy musi być równomierny. W przeciwnym razie taśma zostanie zniszczona.



Ryc. 9. Wzmocnienie mostu betonowego wstępnie naprężonymi taśmami CFRP polskim systemem IBDiM



Ryc. 10. System sprężania Neoxe na belce próbnej (a), zakotwienia taśmy systemu Neoxe (b)

Na rycinie 8 pokazano elementy systemu IBDiM zainstalowane po stronie czynnej, gotowe do użycia. System IBDiM został pomyślnie zastosowany do wzmocnienia kilku konstrukcji, w tym mostów (ryc. 9).

2. System Neoxe

Ostatnio został opracowany przez firmę Neoxe drugi polski system wstępnego naciągu taśm CFRP. System Neoxe składa się z zakotwień taśmy (biernego i czynnego) oraz dostosowanego do nich układu sprężającego, w którego skład wchodzi: urządzenie naciągowe z zaczepami stałym i ruchomym, szyny prowadzące, kleszcze naciągowe oraz prasa hydrauliczna (ryc. 10).

Zakotwienia są wykonane z dwóch blach stalowych o grubości 2 mm oraz blachy dystansowej o grubości taśmy kompozytowej, powiększonej o dwie grubości kleju. Zakotwienie jest podzielone na dwa równe obszary: skrajny (obszar A) i wewnętrzny (obszar B). W obszarze A elementy zakotwienia są połączone przez spawanie na krawędziach blach. W tej części zakotwienia zostały wykonane otwory przelotowe $\varnothing 12,5$ mm do mocowania zakotwienia do podłoża betonowego oraz, w zakotwieniu czynnym, otwory gwintowane $\varnothing 10$ mm do mocowania zaczepu urządzenia naciągowego. W obszarze B zakotwienia pomiędzy blachy jest wklejona taśma kompozytowa za pomocą specjalnej polimerowej zaprawy klejowej. Skleina jest wzmocniona na całej powierzchni za pomocą metalowych nitów $\varnothing 4$ mm, łączących blachy zakotwienia i taśmę. Dodatkowo, w celu zwiększenia nośności zakotwienia, przy wyjściu poza krawędź blach stalowych taśma kompozytowa jest specjalnie

wzmocniona włóknami węglowymi. Zakotwienie o opisanej konstrukcji przenosi siłę sprężającą z taśmy na podłoże betonowe jednocześnie za pomocą skleiny, nitów i tarcia (ryc. 10b).

3. Podsumowanie

Sprężone taśmy kompozytowe z włóknami węglowymi (CFRP) zostają włączone do przenoszenia obciążeń stałych konstrukcji, redukują naprężenia w istniejącym zbrojeniu wewnętrznym oraz współdziałają z konstrukcją wzmocnianą przy przenoszeniu obciążeń zmiennych. Wstępne sprężenie CFRP ma bardzo pozytywny wpływ na efektywność wzmocniania elementów betonowych. Ten pozytywny wpływ dotyczy zarówno stanu granicznego użyteczności (deformacje, zarysowania), jak i stanu granicznego nośności. Silna redukcja ugięć i szerokości rozwarcia rys powoduje zwiększenie nośności i podwyższenie granicy użyteczności wzmocnianego elementu.

Wstępne naprężenie taśm kompozytowych daje wiele korzyści: zamyka rysy w konstrukcjach zarysowanych, zmniejsza ugięcia przez zwiększenie sztywności przekrojów i swoiste „podniesienie wykonawcze” spowodowane wstępnym sprężeniem konstrukcji betonowej, poprawia użyteczność i trwałość z powodu zmniejszenia zarysowań, podnosi nośność na ścinanie, ponieważ cały przekrój betonowy przenosi siły ścinające z uwagi na to, że beton jest niezarysowany (istniejące rysy są zamykane przez sprężenie), zmniejsza zużycie doklejanego materiału kompozytowego przy takim samym stopniu wzmocnienia jak taśmami nienaprzężonymi, z odpowiednim zakotwieniem sprężenie może powodować

wzrost ostatecznej nośności na zginanie również przez uniknięcie działania sił rozwarstwiających na końcach taśm i konsekwentnie usunięcie przyczyn powodujących delaminację, w przypadku wzmocnienia taśmami sprężonymi oś obojętna zostaje na niższym poziomie niż w przekrojach z taśmami nienaprzężonymi, co powoduje podniesienie skuteczności wzmocnienia, sprężenie taśm znacząco wpływa również, poprzez wstępne odciążenie, na zwiększenie zakresu obciążeń przenoszonych przez stal zbrojeniową.

Większość znanych alternatywnych technik wzmocniania, takich jak np. sprężenie zewnętrzne (gdzie ciągną są prowadzone poza obrysem konstrukcji), zwiększenie przekrojów czy zmiana schematów statycznych (np. dodatkowe podwieszenie czy podpora), powoduje wyraźną zmianę kształtu konstrukcji i jej wyglądu zewnętrznego. Jest to ingerencja mająca zazwyczaj negatywny wpływ na wygląd mostu. Wzmocnianie przez doklejanie zewnętrznego zbrojenia w maksymalnym stopniu zmniejsza te negatywne odczucia.

Literatura

- [1] Gutowski T., Łągoda G., Łągoda M.: *Polski system sprężania taśm kompozytowych*. XIII seminarium „Współczesne metody wzmocniania i przebudowy mostów”. Poznań 2003.
- [2] Łągoda M.: *Element Strengthening by Stressed Composite Strip an Example of Experimental Investigation*. „Archives of Civil Engineering” 2004, No. 4.
- [3] Siwowski T., Michałowski J., Błazewicz S.: *Nowy system sprężania taśm kompozytowych CFRP do wzmocniania konstrukcji żelbetonowych*. „Inżynieria i Budownictwo” 2010, nr 3.
- [4] Łągoda M.: *Wzmocnianie mostów przez doklejanie elementów*. Monografia 322. Seria Inżynieria Lądowa. Politechnika Krakowska. Kraków 2005.
- [5] S&P, Clever Reinforcement Company AG: *Design Guide: Fibre Reinforcement Polymer FRP*. Brunnen/CH 2000.

ARTYKUŁ OPACOWANY NA PODSTAWIE REFERATU WYGŁOSZONEGO NA KONFERENCJI ZAKŁADU KONSTRUKCJI SPRĘŻONYCH INSTYTUTU MATERIAŁÓW I KONSTRUKCJI BUDOWLANYCH WYDZIAŁU INŻYNIERII LĄDOWEJ POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ „KONSTRUKCJE SPRĘŻONE KS2012”, KRAKÓW, 21–23 MARCA 2012.