

# Wzmacnianie konstrukcji mostowych kompozytami wstępnie sprężonymi, cz.1

■ 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

W tej części artykułu przedstawiono możliwości wzmacniania konstrukcji mostowych za pomocą wstępnie naprężonych taśm kompozytowych. Opisano problemy związane z opracowaniem technologii systemów wstępnego naciągu i kotwienia taśm CFRP. Pokazano projektowy stan równowagi konstrukcji zginanej przy wzmacnieniu za pomocą sprężenia taśmami. Druga część artykułu, która ukaże się w kolejnym numerze „Nowoczesnego Budownictwa Inżynierskiego”, będzie poświęcona systemom wzmacniania konstrukcji powstałym w Polsce oraz korzyściom płynącym z wybrania wstępnego naprężania taśm CFRP jako metody wzmacniania mostów.

## 1. Wstęp

Doświadczenia zdobyte przy wzmacnianiu mostów żelbetonowych potwierdzają efektywność stosowania klejenia zewnętrznego zbrojenia do powierzchni konstrukcji. Technologia klejenia, choć wymaga odpowiednich warunków (temperatura, wilgotność powietrza, czystość itp.), to jednak jest dość prosta i pozwala uzyskiwać wysoki stopień wzmacnienia konstrukcji. Taśmy przyklejane pełnią rolę dodatkowego zbrojenia konstrukcji betonowej. Wyjąwszy niewłaściwe przygotowanie i wykonanie połączeń, zniszczenie połączenia beton – klej – kompozyt na ogół dokonuje się w betonie. Każde połączenie jest łańcuchem ogniw o różnej niezawodności. W połączeniach kompozytu z betonem za pomocą kleju najslabszym ogniwem bywa zazwyczaj beton. Ponieważ nie można przekraczać równocześnie wartości granicznych odkształceń istniejących stalowych wkładek zbrojeniowych, w doklejonych taśmach praktycznie nie osiągamy odkształceń powyżej wartości 0,6%. Uzyskiwany efekt jest oczywiście z tego powodu niepełny. Tymczasem taśmy kompozytowe charakteryzują się bardzo dużym zakresem liniowych odkształceń sprężystych, przekraczających wartości 1,5%. Dopuszczalne wydłużenie przyklejonego elementu kompozytowego jest parametrem decydującym o sposobie jego wykorzystania oraz o opłacalności stosowania tego typu wzmacnienia. Stąd starania, by zastosować taśmy w postaci wstępnie sprężonej, które dodatkowo powodują zamknięcie rys lub zmniejszenie ich rozwartości podczas pracy konstrukcji.

Zastosowanie kompozytów w postaci cięgien sprężających obecnie jest już możliwe w praktyce inżynierskiej. Początkowo sprężanie wstępne ograniczało się do zastosowania splotów CFRP w postaci kabli zewnętrznych lub do podwieszania przeseł. Istotnych problemów nastroczało

rozwiązanie zagadnień związanych z kotwieniem materiałów kompozytowych, niska wytrzymałość FRP w kierunku prostopadłym do włókien oraz znikoma zdolność przenoszenia momentów zginających.

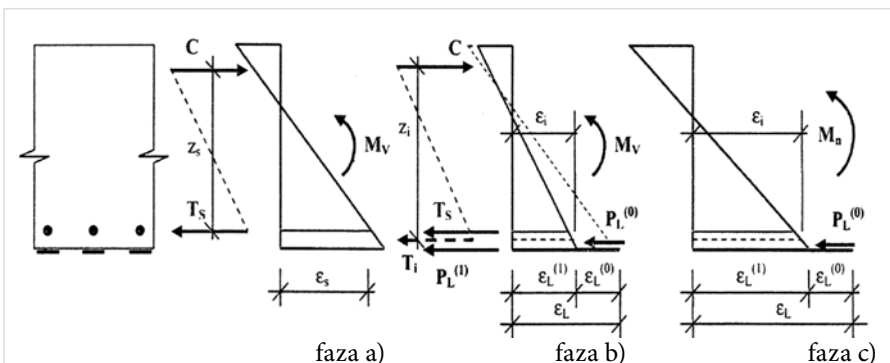
Biorąc pod uwagę właściwości fizyczne różnych rodzajów włókien oraz analizując pracę konstrukcji betonowych, do wzmacniania tychże najbardziej przydatne są taśmy kompozytowe z włóknami węglowymi. Dotychczas w świecie wzmocniono przyklejanymi, naprężonymi taśmami węglowymi wiele obiektów mostowych, m.in. w Niemczech, Szwajcarii, Wielkiej Brytanii i innych krajach, w tym i w Polsce. Pierwszym mostem wzmocnionym za pomocą wstępnie sprężonych taśm kompozytowych CFRP był most z betonu sprężonego Lauterbrücke koło Gomadingen w Badenii-Wirtembergii. Technika sprężania taśm kompozytowych wiąże się z koniecznością stosowania specjalnego sprzętu naciągowego i wymaga szczególnie starannego przestrzegania reżimu technologicznego. Początkowo wzmacnianie mostów było możliwe dzięki zastosowaniu opatentowanych, bardzo kosztownych, specjalnych urządzeń i systemów wstępnego naciągu i zewnętrznego kotwienia taśm CFRP. W celu zmniejszenia kosztów tych operacji w Polsce opracowano własne sys-

tem kotwienia i sprężania taśm kompozytowych [1, 2, 3].

## 2. Stan równowagi

Przy projektowaniu wzmocnienia elementu zginanego zakłada się w stanie granicznym nośności pełną współpracę istniejącego zbrojenia z przyklejonym kompozytem. Dla określenia odkształceń panujących w zbrojeniu istniejącym w fazie przyklejania kompozytów można przyjąć, że przekrój żelbetonowy (nie-wzmocniony) pracuje w stanie granicznym zarysowania. W ten sposób określa się punkt czasowy, w którym zaczyna się współpraca zbrojenia istniejącego z przyklejanym. Dla tych konstrukcji, w których nie dopuszcza się zarysowania, np. dla ustrojów z betonu sprężonego, należy przyjmować rzeczywisty stan konstrukcji tj. I fazę pracy betonu.

W każdym przypadku konieczne jest znalezienie odkształcenia początkowego, które powstaje w momencie, gdy do współpracy zostaje włączone wzmocnienie w postaci doklejonego elementu. Odkształcenie to jest wywołane działaniem momentu zginającego, działającego na przekrój poprzeczny w fazie wzmacniania (początkowego, np. wywołanego ciężarem własnym konstrukcji, częścią obciążeń stałych itp.). Oblicza się je z równowagi sił wewnętrznych w przekroju.



Ryc. 1. Wstępne naprężenie taśm – schemat sił i odkształceń

W przypadku wzmacniania konstrukcji z zastosowaniem taśm kompozytowych wstępnie naprężonych konieczne jest analizowanie stanu równowagi z uwzględnieniem trzech podstawowych faz pracy konstrukcji, a mianowicie:

- a) przed naprężeniem taśm,
- b) po naprężeniu taśm,
- c) po całkowitym obciążeniu konstrukcji wzmocnionej (po zwiększeniu obciążenia użytkowego).

Na rycinie 1 pokazano rozkład odkształceń i sił wewnętrznych w przekroju konstrukcji wzmocnionej wstępnie naprężonymi taśmami kompozytowymi. Podstawowe równania równowagi wyglądają następująco:

- a) przed naprężeniem

$$\left. \begin{aligned} T_s &= E_s \cdot A_s \cdot \varepsilon_s \\ M_v &= T_s \cdot z_s \end{aligned} \right\} (1)$$

- b) po naprężeniu taśm

$$\left. \begin{aligned} P_L &= P_L^{(0)} + P_L^{(1)} \\ P_L &= E_L \cdot A_L \cdot (\varepsilon_L^{(0)} + \varepsilon_L^{(1)}) \\ T_i &= E_s \cdot \left( A_s + \frac{E_L}{E_s} \cdot A_L \right) \cdot \varepsilon_i \\ M_v &= T_i \cdot z_i \end{aligned} \right\} (2)$$

- c) po obciążeniu

$$M_n > M_v \quad (3)$$

gdzie:

$T_s$  – siła rozciągająca w stali przed naprężeniem taśm

$z_s$  – ramię sił wewnętrznych przed naprężeniem taśm

$\varepsilon_s$  – odkształcenia w stali przed wzmocnieniem, przed naprężeniem taśm

$P_L^{(0)}$  – siła naprężająca taśmy

$P_L^{(1)}$  – siła w taśmie kompozytovej wywołana obciążeniem

$P_L$  – całkowita siła w taśmie

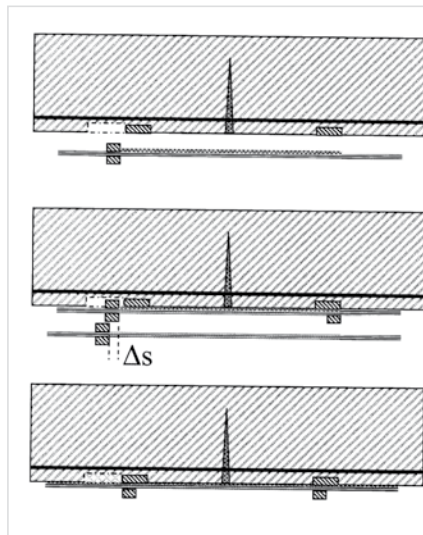
$\varepsilon_L^{(0)}$  – początkowe odkształcenie taśmy kompozytovej

$\varepsilon_L^{(1)}$  – odkształcenie taśmy kompozytovej od obciążenia

$\varepsilon_L$  – końcowe odkształcenie taśmy kompozytovej

$T_i$  – sumaryczna siła rozciągająca w wprowadzonym „zbrojeniu” po sprężeniu

$z_i$  – ramię sił wewnętrznych po naprężeniu taśm.



Ryc. 2. Schemat wzmacniania konstrukcji sprężonymi taśmami [4]

### 3. Najbardziej znane systemy europejskie

Pierwsze wzmocnienie konstrukcji mostu z zastosowaniem wstępnie naprężonych taśm CFRP było możliwe dzięki zastosowaniu patentu należącego do niemieckiej firmy konsultingowej Leonhardt, Andrä und Partner. Istota technologii wzmocnienia konstrukcji betonowej i kolejność prac jest pokazana na rycinie 2.

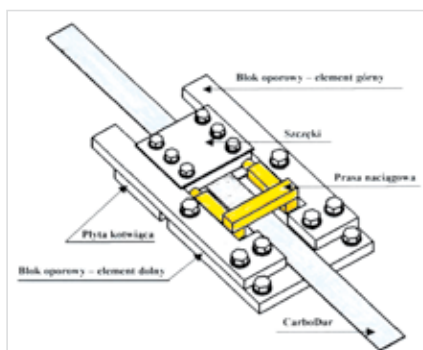
Urządzenie kotwiąco-sprężające użyte do wstępnego naciągu taśm CFRP (CarboDur) jest konstrukcją stalową, składającą się z zasadniczych trzech części (ryc. 3). Jedną z nich stanowi płyta kotwiąca, wbudowana w konstrukcję wzmocnianą. Służy do zakotwienia sprężonej taśmy. Druga część to blok oporowy, służący do naciągu taśmy. Składa się on z dwóch elementów. Element dolny jest zakotwiony w konstrukcji wzmocnianej, natomiast górny połączony jest czasowo z dolnym i po sprężeniu i zakotwieniu taśmy jest usuwany. Trzecia część to szczęki chwytające taśmę i mocujące ją do płyty kotwiącej po sprężeniu.

Bardzo istotnym elementem technologii sprężania jest miniaturowa prasa naciągowa. W październiku 1998 r. do wzmocnienia mostu Lauter użyto prasę

1. Iniekcja szczelin
2. Przygotowanie podłoża
3. Zakotwienie urządzenia sprężającego
4. Przyklejenie taśm
5. Instalacja urządzenia sprężającego
6. Sprężanie taśm
7. Utwardzenie kleju
8. Usunięcie urządzenia sprężającego
9. Przyklejenie nie sprężonych końcówek taśm

o sile naciągu do 100 kN. Taśmy zostały naciągnięte siłą 70 kN każda. Nieco zmodyfikowany system został wykorzystany w lipcu 1999 r. do wzmocnienia konstrukcji banku w Langen, a w 2001 r. wiaduktu w Stuttgarcie. Ulepszony system pozwala na wstępne sprężanie taśm CFRP do wartości odkształceń  $\varepsilon = 9\%$ .

W 1999 r. za pomocą naprężonych taśm kompozytowych z włóknami węglowymi wzmocniono w Europie kolejny tymczasowy, eksploatowany tylko przez kilka miesięcy w okresie przebudowy mostu przez Reuss w Szwajcarii. Przypadek ten jednak jest bardzo interesujący, stanowi bowiem pilotażowe wdrożenie nowego systemu zakotwienia i sprężenia taśm kompozytowych. System ten, przebadany laboratoryjnie, bazuje na idei zakotwienia końców taśm CFRP w głowicy, która po sprężeniu w sposób trwały połączona jest z konstrukcją wzmocnianą. (nazwa systemu *Stress-Head*). Na rycinie 4 pokazano zakotwienie systemowe z widokiem głowicy kotwiącej i bloku oporowego. Głowica, jak wykazały badania, umożliwia zakotwienie taśmy sprężonej siłą 500 kN do wartości odkształceń  $\varepsilon = 9,5\%$ .



Ryc. 3. Konstrukcja urządzenia kotwiąco-sprężającego [4]







Ryc. 4. Głowica kotwiąca i stalowy blok w systemie Stress-Head (CarboDur 60 x 2,4 mm), fot. M. Łagoda



Ryc. 5. Wiercenie otworu pod stalowy blok kotwiący i urządzenie naciągowe, fot. M. Łagoda



Ryc. 6. System sprężania S&P [5]

Zakotwienie głowicy wymaga specjalnego stalowego bloku, który jest lokowany w konstrukcji. W tym celu konieczne jest wywiercenie dość dużego otworu w konstrukcji wzmacnianej. Jest to poważny mankament tego systemu, gdyż nie zawsze istnieje możliwość umieszczenia bloku w konstrukcji. Wiercenie otworu pod blok i widok urządzenia gotowego do naciągania taśm pokazano na rycinie 5. Z wykorzystaniem tego systemu wzmocniono już kilka konstrukcji mostowych.

Na rycinie 6 pokazano inny, mechaniczny system naciągania taśm kompozytowych (system S&P – Stahlton). Firma S&P, we współpracy z firmami Stahlton i Iten, podjęła próbę opracowania własnego systemu sprężania. Pierwszy, udany prototyp został wykonany w 2000 r. [5].

System składa się z ruchomych i stałych szczęk kotwiących taśmy oraz specjalnej prasy hydraulicznej wywołującej siłę, wprowadzającej wstępne odkształcenie kompozytu. Szczęki kotwiące składają się z dwóch blach stalowych, których powierzchnie kontaktowe posmarowane są klejem i pomiędzy nimi znajduje się taśma kompozytowa. Blachy wraz z taśmą są skręcone śrubami sprężającymi i po stwardnieniu kleju są gotowe do użycia. Z uwagi na korozję stali obecnie trwają prace nad wdrożeniem szczęk wykonanych z tworzyw sztucznych.

System S&P pozwalał początkowo na wstępne sprężenie taśm CFRP do wartości odkształceń  $\epsilon = 4\%$ . Po pewnym czasie został na tyle poprawiony, że umożliwiał bezpieczne osiągnięcie war-

tości odkształceń wstępnych  $\epsilon = 6\%$  (ryc. 6). Podniesienie wartości wstępnego naprężenia taśm kompozytowych, np. do 8% lub więcej, przy zastosowaniu tego systemu w praktyce nastęrcza wiele problemów i jest trudne do zrealizowania.

Więcej informacji na temat związany ze wzmacnianiem konstrukcji mostowych (betonowych, stalowych, drewnianych i murowanych) materiałami kompozytowymi znajduje się w książce autora *Wzmacnianie konstrukcji mostowych polimerami kompozytowymi*, która niebawem będzie wydana przez PAN.



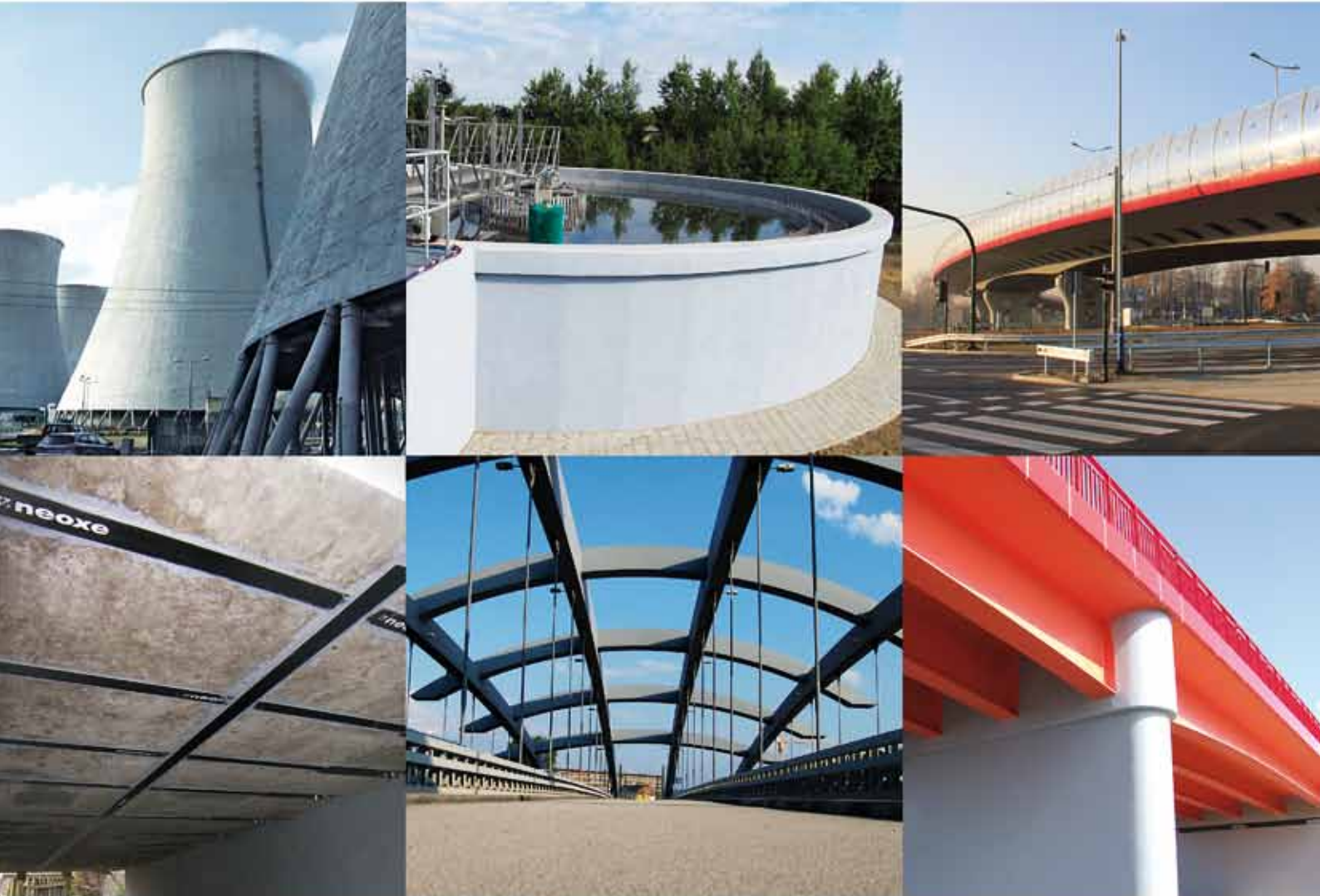
Wzmacnianie konstrukcji mostowych kompozytami polimerowymi - dr hab. inż. Marek Łagoda, prof. IBDiM i PL

## Literatura

- [1] Gutowski T., Łagoda G., Łagoda M.: *Polski system sprężania taśm kompozytowych*. XIII seminarium „Współczesne metody wzmacniania i przebudowy mostów”. Poznań 2003.
- [2] Łagoda 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 wzmacniania konstrukcji żelbetowych*. „Inżynieria i Budownictwo” 2010, nr 3.
- [4] Łagoda M.: *Wzmacnianie 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 OPRACOWANY 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.

# megachemie®



## Producent chemii budowlanej

Firma MEGACHEMIE jest producentem zaawansowanych, kompleksowych rozwiązań dla budownictwa komunikacyjnego i przemysłowego. Specjalistyczne technologie, które powstają w naszych zakładach produkcyjnych znajdują zastosowanie przy wznoszeniu i modernizacji najbardziej wymagających konstrukcji budowlanych: obiektów infrastruktury drogowej i kolejowej, chłodni energetycznych, kominów przemysłowych, zbiorników oczyszczalni ścieków i wielu innych. Ponad 10 letnie doświadczenie produkcyjne, ilość realizacji z udziałem materiałów MEGACHEMIE oraz referencje świadczą o wysokiej pozycji rynkowej spółki. Produkcja oferowanych przez MEGACHEMIE materiałów i systemów odbywa się w zakładach produkcyjnych zlokalizowanych na terenie Polski, co wpływa na pełną dostępność i krótki czas dostawy wyrobów.

## Oferta materiałowa MEGACHEMIE

- MEGAcrete - zestaw materiałów do naprawy betonu
- MEGAp Protect - zabezpieczenia antykorozyjne betonu i stali
- MEGAiso - powłoki impregnujące i izolacyjne
- MEGAdur - systemy posadzek przemysłowych i nawierzchni parkingowych
- MEGAflexy - poliuretanowe kity uszczelniające
- NEOXE - wzmocnienia konstrukcji przy pomocy taśm i mat z włókien węglowych