

dr inż. Marta Kałuża*

Wybór odpowiedniej metody wzmocnienia konstrukcji żelbetowych kompozytami

Selection the proper method of strengthening reinforced structures using FRP materials

W wyniku nieuniknionego zużycia istniejących konstrukcji budowlanych, zmian sposobu ich użytkowania bądź niejednokrotnie błędów projektowych i wykonawczych pojawia się konieczność wzmocnienia elementów konstrukcyjnych. Problem ten dotyczy najczęściej elementów zginanych, a szczególnie uciążliwy staje się w przypadku zginanych belek i płyt żelbetowych.

Przez lata podstawowym sposobem wzmocnienia było wprowadzenie do konstrukcji dodatkowego zbrojenia zewnętrznego w postaci kotwionych, klejonych lub naklejanych prętów bądź płaskowników stalowych. Technika ta często była zawodna, sposób wbudowania dodatkowego zbrojenia pracochłonny, a samo wzmocnienie wymagało dodatkowych zabezpieczeń antykorozyjnych i częstej konserwacji. Z tego powodu, wraz z rozwojem inżynierii materiałowej, zaczęto stosować lekkie, niemetaliczne materiały kompozytowe w postaci laminatów epoksydowych zbrojonych włóknami szklanymi, aramidowymi bądź węglowymi.

Najbardziej popularnymi i uniwersalnymi włóknami wykorzystywanymi w kompozytach stosowanych w budownictwie są włókna węglowe zatopione w żywicy epoksydowej (CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer*). Charakteryzują się one dużą wytrzymałością na rozciąganie, sięgającą prawie 6000 MPa, ograniczoną odkształcalnością (maksymalne odkształcenia w chwili zerwania wynoszą 2,3%), a także wysokim modułem sprężystości (350 – 700 GPa) [1]. Kompozyty CFRP wytwarzane są w postaci taśm, mat i kształtek, których właściwości mechaniczne i wymiary są różnicowane i dostosowane do wzmocniania zginanych belek

bądź płyt, a także ściskanych i zginanych słupów.

Obecnie stosowane są dwie podstawowe metody wzmocniania żelbetowych konstrukcji materiałami kompozytowymi: **bierna** (zewnętrzne dozbrojenie elementu kompozytami) i **czynna** (wprowadzenie do układu dodatkowych sił sprężających za pomocą naciągniętych kompozytów). Podstawowym problemem pozostaje pytanie, którą metodę wzmocniania uznać za bardziej właściwą i efektywną w przypadku konkretnej konstrukcji wymagającej poprawy nośności bądź sztywności.

Wzmocnienie bierne

Ten typ wzmocnienia polega na pasywnym dozbrojeniu materiałem kompozytowym rozciąganej strefy elementu. Współpraca pomiędzy wzmocnionym elementem i kompozytem rozpoczyna się jednak dopiero po przyroście odkształceń konstrukcji, np. w wyniku przyłożenia dodatkowych obciążeń stałych (warstwy wykonane po wzmocnieniu), użytkowych bądź termicznych. W związku z tym, **podstawowym warunkiem efektywności metody biernej jest maksymalne odciążenie konstrukcji przed jej wzmocnieniem**. Metoda ta jest więc tym skuteczniejsza, im większy jest przyrost obciążeń w stosunku do obciążenia, które działało w chwili wzmocnienia. **W konstrukcjach o pomijalnym ciężarze własnym, np. belkach podsuwnicowych, korzyści uzyskane przy biernym wzmocnieniu będą znaczne. Natomiast w przypadku elementów, w których ciężar własny jest dominującym obciążeniem, takich jak np. masywne konstrukcje pod maszyny, bierne wzmocnienie staje się całkowicie nieefektywne.** Odkształcenia, jakie powstaną w takiej konstrukcji po jej wzmocnieniu, będą stosunkowo małe, a zatem

siły przenoszone przez kompozyt, który charakteryzuje się liniową zależnością $\sigma - \epsilon$, będą także nieznaczne, co odpowiada niewielkiemu wykorzystaniu stosunkowo drogiego materiału.

Oczekiwanym efektem zastosowania biernego wzmocnienia w zginanym elemencie żelbetowym jest przede wszystkim poprawa warunków stanu granicznego nośności. Zwiększenie sztywności przekroju, a zatem poprawa warunków użytkowości jest pomijalna ze względu na niewielkie wymiary laminatu (grubość taśm i mat to ok. 1 mm) w stosunku do pola przekroju elementu żelbetowego oraz pasywne (bierne) doklejenie kompozytu. Podstawową potrzebą projektanta, na której skupia się on przy planowaniu wzmocnienia, jest zwykle zwiększenie nośności elementu na zginanie. W prawidłowo zaprojektowanych belkach wyczerpanie nominalnej nośności na zginanie następuje jednocześnie z wyczerpaniem nośności na ścinanie, dlatego też zwiększenie obciążeń działających na element musi być rozważane zarówno w aspekcie nośności elementu na zginanie, jak i na ścinanie. Idealnym rozwiązaniem jest więc przyklejenie sztywnych taśm kompozytowych w strefie rozciąganej (przeważnie na płaskiej dolnej powierzchni belki) jako wzmocnienia na zginanie, a dodatkowo wprowadzenie giętych mat kompozytowych, zwiększających nośność strefy przypodporowej.

Najczęściej laminat CFRP jest przyklejany za pomocą żywicy epoksydowej bezpośrednio na powierzchni wzmocnianego elementu (fotografia 1); dotyczy to zarówno taśm, jak i mat kompozytowych. Czasami, z uwagi na brak możliwości zwiększenia przekroju poprzecznego wzmocnianego elementu, stosuje się taśmy klejane w specjalnie wykonane bruzdy. Takie usytuowanie do-

* Politechnika Śląska



Fot. 1. Biernie wzmocnienie wieloprzęsłowej płyty żelbetowej

zbrojenia zapobiega przedwczesnej jego delaminacji, ale może spowodować uszkodzenie strzemion w belkach lub zbrojenia rozdzielczego w płytach. Grubość otuliny zbrojenia w typowej konstrukcji wynosi $20 \div 30$ mm, natomiast minimalna głębokość wcięcia, w które wklejana będzie taśma – aż 50 mm. Ten rodzaj wzmocnienia wymaga zatem dokładnej analizy technicznych możliwości jego wykonania.

W przyklejanych laminatach przekazanie siły z taśmy CFRP na wzmocnianą konstrukcję następuje w sposób przyczepnościowy, dlatego też beton powinien mieć dużą wytrzymałość na odrywanie, a także istotne jest właściwe przygotowanie podłoża. Dodatkowo, jak wynika z badań laboratoryjnych [2], zniszczenie biernie wzmocnionego elementu następuje najczęściej wskutek delaminacji kompozytu, rozpoczynającej się od swobodnych końców taśmy. Aby temu zapobiec, a także umożliwić zastosowanie kompozytów w konstrukcjach, w których beton nie ma wystarczającej wytrzymałości bądź jest zanieczyszczony (np. zaolejenie powierzchni), wprowadza się dodatkowe kotwienie końców taśm. W przypadku silnie korozyjnego środowiska lub konieczności wzmocnienia także strefy podporowej belki zakotwienie takie wykonuje się z węglowych mat kompozytowych, którymi owija się wolny koniec elementu. Najodpowiedniejsze jest wprowadzenie maty w ścisłaną strefę przekroju, co zapewnia jej właściwe zakotwienie. Innym sposobem kotwienia taśm jest zastosowanie stalowych płyt kotwiących mocowanych do elementu za pomocą śrub (fotografia 2). Ten typ zakotwienia jest uniwersalny i może być stosowany zarówno w płytach, jak i w belkach. Dodatkowo jest to bardzo dobre rozwiązanie tam, gdzie nie można zachować

wymaganej długości zakotwienia laminatu, np. w miejscu kolizji taśmy z otworem we wzmocnianym elemencie.

Ważnym zagadnieniem związanym z możliwością stosowania wzmocnienia biernego jest ograniczenie efektywności i skuteczności metody, wynikające z nośności ściskanej strefy elementu żelbetowego. Mimo iż fakt ten zdaje się być oczywisty, wielu projektantów niestety o nim zapomina. Planując zwiększenie nośności belki, należy rozważyć potencjalne sposoby jej zniszczenia – uplastycznienie zbrojenia bądź zmiążdżenie ściskanej strefy betonu. Pierwszemu z nich łatwo zapobiec, wprowadzając dodatkowe zbrojenie (np. doklejony kompozyt). Drugiego sposobu trudniej uniknąć, gdyż wzmocnienie ściskanej strefy betonu wymaga jej rozbudowania z zapewnieniem pełnej współpracy nowego i istniejącego betonu. Tym samym, **zwiększenie nośności na zginanie elementu przez zastosowanie taśm CFRP limitowane jest rzeczywistą nośnością strefy ściskanej**. Uzyskanie dużej efektywności wzmocnienia biernego jest możliwe tylko w belkach, w których istnieje odpowiednio wysoki zapas nośności w strefie ściskanej (np. belki teowe w stropie monolitycznym). W przypadku prefabrykowanych belek o przekroju prostokątnym, bądź teowym z niewielkimi półkami, metoda ta jest najczęściej mało skuteczna i należy szukać innego sposobu kompleksowego wzmocnienia zarówno strefy rozciąganej, jak i ściskanej. W takiej sytuacji najodpowiedniejsze wydaje się być wzmocnienie czynne elementu przez sprężenie zewnętrzne.



Fot. 2. Mechaniczne zakotwienie taśm CFRP, wzmocniających płytę stropową

Wzmocnienie czynne

Jest to stosunkowo nowa metoda (systemowe rozwiązania pojawiły się w Polsce zaledwie kilka lat temu), która polega na zewnętrznym sprężeniu konstrukcji laminatem CFRP z wykorzystaniem niezależnych urządzeń naciągowych, mocowanych bezpośrednio do wzmocnianego elementu (fotografia 3). Podczas



Fot. 3. Proces naciągu taśm CFRP podczas czynnego wzmocnienia

naciągu kompozytu wprowadzane są do elementu, przez zakotwienia czynne i biernie, dodatkowe siły ściskające zmieniające rozkład sił wewnętrznych w konstrukcji. Pozwala to na pełną współpracę laminatu i wzmocnianego elementu w przenoszeniu obciążeń już w momencie wykonywania wzmocnienia. W związku z tym **podstawową zaletą czynnego systemu wzmocnienia jest zapewnienie współudziału taśmy w przenoszeniu zarówno ciężaru własnego konstrukcji (na etapie sprężenia), jak i obciążeń długotrwałych (podczas użytkowania wzmocnionego elementu)**. Tym samym wykonanie tego typu zabiegu nie wymaga, często nierealnego w praktyce, odciążania konstrukcji. Dodatkowo, wstępne naprężenie taśmy (wprowadzenie odkształceń wstępnych) powoduje znacznie lepsze wykorzystanie jej parametrów wytrzymałościowych, co ma uzasadnienie ekonomiczne. Wartość odkształceń taśmy mierzona w trakcie zniszczenia wzmocnianego elementu jest zbliżona do wartości granicznych, przy których następuje zerwanie kompozytu. Nie obserwujemy tego w przypadku biernych wzmocnień, gdzie, jak wskazują badania, poziom wyężenia taśmy w chwili jej delaminacji (a więc zniszczenia elementu) nie przekracza 50%.

Jak wcześniej wspomniano, sprężenie zewnętrzne (dodatkowe ścisłanie strefy rozciąganej) w przypadku elementów zginanych polega na wprowadzeniu do układu odwrotnego momentu zginającego, który częściowo „odciąża” już wyężoną konstrukcję. Prowadzi to w konsekwencji do poprawy zarówno nośności, jak i sztywności wzmocnionej konstrukcji. Oczekiwany wzrost nośności na zginanie wstępnie sprężonego ele-

mentu jest większy niż w przypadku zastosowania biernego wzmocnienia, gdyż oprócz zwiększenia nośności strefy rozciąganej przez wprowadzenie dodatkowego zbrojenia (kompozytu), uzyskujemy także realny wzrost nośności ściskanej strefy betonu. Wstępne sprężenie pozwala bowiem na redukcję naprężeń ściskających w tej strefie, co w konsekwencji umożliwia dołożenie dodatkowego obciążenia, aż do uzyskania granicznej nośności strefy ściskanej. Odnotowany w badaniach wzrost nośności sprężonych elementów wynosił 50 – 200%. Bardzo ważne jest jednak, aby w trakcie projektowania wzmocnienia czynnego przyjąć potencjalnie bezpieczny sposób zniszczenia elementu, a więc zmiążdżenie betonu. Możliwość zwiększenia nośności ściskanej strefy betonu może doprowadzić do przekroczenia granicznych odkształceń w laminacie, co jest jednoznaczne z zerwaniem naprężonych taśm. Taki sposób zniszczenia jest niepożądany z uwagi na wysokie zagrożenie bezpieczeństwa konstrukcji i ludzi przebywających w jej pobliżu. Charakteryzuje się on gwałtownym przebiegiem, a dodatkowo nie ostrzega przed zbliżającym się niebezpieczeństwem.

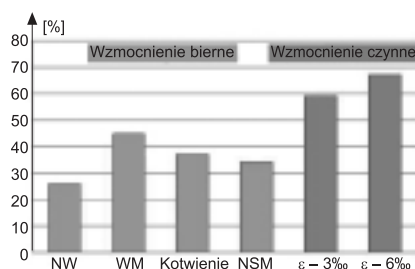
Najistotniejszym jednak pozytywnym efektem wzmocnienia czynnego, niemożliwym do uzyskania w przypadku biernego klejenia kompozytów, jest poprawa właściwości użytkowych konstrukcji. Zewnętrzne sprężenie elementu powoduje znaczną redukcję jego ugięcia i zmniejszenie szerokości rozwarcia już istniejących rys, a w skrajnym przypadku prowadzi do zapewnienia przekrojom zarysowanym zamknięcia powstałych rys.

W przypadku wstępnego sprężenia, zakotwienia pełnią bardzo ważną rolę, dlatego też wprowadzenie stalowych blach kotwiących na obydwu końcach laminatu jest obligatoryjne. Podczas realizacji naciągu przytrzymują one taśmę i umożliwiają przekazanie siły sprężającej na element, natomiast podczas użytkowania wzmocnionego elementu zapobiegają przedwczesnej delaminacji, która najczęściej rozpoczyna się od końca taśmy. Dodatkową zaletą stosowania zakotwień jest możliwość uzyskania bezprzyczepnościowego systemu czynnego wzmocnienia (taśma przytrzymana jest tylko w zakotwieniach), a także zapewnienie bezpiecznej pracy wzmocnionego elementu w sytuacji, gdy przyczepność pomiędzy taśmą i elementem zostanie

zerwana, np. z powodu mechanicznego uszkodzenia bądź w przypadku, gdy delaminacja rozpocznie się w przeszle elementu zginanego. Prawidłowe założenie blach kotwiących jest zatem bardzo istotne, gdyż **bezpieczeństwo całej wzmocnionej konstrukcji zależy m.in. od poprawności i odpowiedniej stabilności zakotwienia.** Niestety, w przypadku silnie zbrojonych elementów, gdzie zagęszczenie zbrojenia jest bardzo duże, może okazać się to niemożliwe, z uwagi na ryzyko uszkodzenia zbrojenia. Wówczas zaleca się zastosowanie biernego wzmocnienia, jeżeli oczywiście będzie ono odpowiednio skuteczne. Podczas naciągu kompozytu bardzo ważną jest precyzja, gdyż nieosiowy naciąg taśmy skutkuje jej rozszczepieniem na pojedyncze włókna, co całkowicie ją dyskwalifikuje do dalszego stosowania, natomiast nieumyślne zerwanie taśmy może prowadzić do zagrożenia życia osoby obsługującej prasę naciągową. Tym samym skuteczne i bezpieczne wykonanie czynnego wzmocnienia zależy głównie od doświadczenia wykonawcy, wyposażonego w specjalistyczny osprzęt.

Skuteczność biernej i czynnej metody wzmacniania

Przeprowadzono wiele badań laboratoryjnych, których celem było porównanie skuteczności różnych systemów biernego i czynnego wzmacniania materiałami FRP. Przykładowe wyniki [3] przedstawiono na rysunku. Pokazuje on procentowy przyrost nośności na zginanie uzyskany przy wzmocnieniu nowo projektowanych żelbetonowych belek. Wymiary belek wynosiły odpowiednio: długość 9,00 m, wysokość 0,55 m i szerokość 0,25 m. Do wzmocnienia wykorzystano taśmy zbrojone włóknami węglowymi (CFRP) i zastosowano różne techniki biernego wzmocnienia (NW – klejona taśma niskomodułowa; WM – klejona taśma wysokomodułowa, KOTWIE-



Porównanie przyrostu nośności na zginanie belek wzmocnionych różnymi metodami za pomocą materiałów CFRP

NIE – wprowadzenie zakotwień w postaci blach stalowych, NSM – wklejanie taśm we wcześniej wykonane bruzdy), a także różną intensywność naciągu taśmy podczas czynnego wzmocnienia ($\epsilon = 3\text{‰}$ i $\epsilon = 6\text{‰}$, tzn. wstępne odkształcenie taśmy 3‰ bądź 6‰). W prawie wszystkich przypadkach belki wzmocniono przy użyciu identycznej taśmy kompozytowej o przekroju poprzecznym $90 \times 1,4$ mm. Wyjątek stanowiła belka wzmocniona metodą NSM (Near Surface Mounted), gdzie zastosowano 4 mniejsze taśmy szerokości 50 mm i grubości 1,2 mm każda.

Jak wynika z badań, przyrost nośności na zginanie biernie wzmocnionych belek wyniósł od 26% do 45% (w zależności od zastosowanej metody), podczas gdy czynne wzmocnienie skutkuje ponad 60% wzrostem nośności. Wśród biernych systemów wzmacniania najefektywniejsze okazało się przyklejenie wysokomodułowej taśmy węglowej, co wynika ze stosunkowo szybkiego wciągnięcia jej do współpracy ze wzmacnianym elementem. Wprowadzenie zakotwień, a także zastosowanie wklejanych taśm było w tym przypadku mniej skuteczne, ale nadal wzrost nośności tak wzmocnionych belek był większy niż w przypadku przyklejenia niskomodułowej taśmy. Efektywność czynnego wzmacniania, jak wskazują badania [3], zależy od poziomu wstępnego sprężenia – im wyższy poziom wprowadzonych początkowych odkształceń, tym większy przyrost nośności (a także sztywności) zginanych belek.

Podsumowanie

Laminaty kompozytowe stały się w ostatnich latach bardzo popularnym materiałem do naprawy i wzmocnienia konstrukcji. Początkowo stosowano je do wykonywania wzmocnień biernych, natomiast wraz z rozwojem technologii sprężania również jako materiał do czynnego wzmacniania konstrukcji.

Wybór odpowiedniej metody musi być poprzedzony dokładną analizą stanu technicznego konstrukcji i możliwości technicznych wykonania wzmocnienia kompozytami, a także oceną zaistniałego problemu (niewystarczająca nośność konstrukcji na zginanie lub ścinanie, bądź poprawa warunków stanu granicznego użytkownika).

(dokończenie na str. 81)