

Maciej MAJOR, Izabela MAJOR
Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa

KOMPOZYTY W BUDOWNICTWIE ZRÓWNOWAŻONYM - PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ I PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ

Przedstawiono materiały kompozytowe, które znalazły zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, a ich wynalezienie stało się punktem przełomowym w wielu dziedzinach życia. Opisano rodzaje włókien stosowanych do zbrojenia materiałów kompozytowych. Zaprezentowano również wykorzystanie kompozytów w budownictwie mostowym jako materiału konstrukcyjnego.

Słowa kluczowe: kompozyty, włókna, mosty kompozytowe

WPROWADZENIE

Znaczący rozwój inżynierii materiałowej na przestrzeni kilku dekad spowodował, że w wielu gałęziach przemysłu mogły zajść ogromne zmiany, przyczyniając się do powstania nowych materiałów, które stały się idealnymi zamiennikami dla dotychczas stosowanych materiałów. Stworzenie materiałów kompozytowych stanowi przełom w wielu dziedzinach przemysłu, a ograniczenia związane z dotychczasowymi rozwiązaniami materiałowymi czy konstrukcyjnymi przestały praktycznie istnieć.

1. MATERIAŁY KOMPOZYTOWE

Kompozytem nazywa się materiał niejednorodny, powstały w wyniku połączenia, co najmniej dwóch lub więcej komponentów (zwanych fazami), których właściwości wzajemnie się uzupełniają. Każdy kompozyt, jako że składa się z co najmniej dwóch składników, musi być skonstruowany tak, by jeden z tych składników pełnił funkcję lepiszcza, a drugi był komponentem konstrukcyjnym. Lepiszczce w kompozycie zapewnia mu twardość, odporność na ściskanie, elastyczność oraz spójność. Komponent konstrukcyjny odpowiedzialny jest za pozostałe własności mechaniczne całego kompozytu. Kompozyty, zwłaszcza w budownictwie, zostały wynalezione jako alternatywa dla dotychczasowych sposobów wzmacniania konstrukcji (np. wzmocnienie konstrukcji betonowych poprzez blachy stalowe) czy produktów, poprawiając ich właściwości wytrzymałościowe i mechaniczne [1, 2].

Do głównych zalet materiałów kompozytowych należy zaliczyć:

- a) wysoką wytrzymałość mechaniczną i sztywność,
- b) wysoką odporność na zmęczenie materiału,
- c) wysoką odporność na korozję,
- d) bardzo dobre właściwości tłumienia drgań,
- e) odporność na pękanie,
- f) odporność na ścieranie,
- g) mały ciężar właściwy,
- h) łatwość montażu i scalania z innymi materiałami,
- i) niskie nakłady na utrzymanie elementów konstrukcji z zastosowanym wzmocnieniem materiałami kompozytowymi.

Do wad kompozytów należy zaliczyć:

- a) wysokie koszty wytworzenia,
- b) często skomplikowana i trudna technologia wytwarzania,
- c) trudne łączenie elementów ze sobą (kompozytów nie można spawać ani zgrzewać),
- d) trudne przetwórstwo,
- e) znikoma ciągliwość i duża kruchość,
- f) praktycznie brak możliwości naprawy kompozytu.

Gałęziami przemysłu, w których materiały kompozytowe znalazły największe zastosowanie są:

- a) budownictwo mostowe,
- b) przemysł lotniczy,
- c) technika kosmiczna,
- d) budowa statków, okrętów, jachtów,
- e) siłownie wiatrowe,
- f) elementy platform wiertniczych (eksploatacja ropy i gazu z dna morskiego),
- g) elementy samochodów,
- h) medycyna (implanty),
- i) zbiorniki przemysłowe (m.in. do przechowywania chemikaliów),
- j) sprzęt sportowy (rowery, rakietki tenisowe).

Materiały kompozytowe w swej budowie składają się z dwóch faz - fazy ciągłej zwanej osnową (matrycą) oraz fazy rozproszonej, zwanej również zbrojeniem. W zależności od rodzaju fazy rozproszonej kompozyty można podzielić na:

- a) zbrojone cząstkami,
- b) zbrojone dyspersyjnie,
- c) zbrojone włóknami.

1.1. Kompozyty zbrojone cząstkami

Są to takie materiały, w których zarówno osnowa, jak i faza rozproszona (w postaci cząsteczek) bierze udział w przenoszeniu obciążeń zewnętrznych. Cząsteczki posiadają znacznie większą sztywność i twardość od osnowy, przez co wzmocnie-

nie kompozytu przez cząstki polega na ograniczeniu przez nie odkształceń osnowy w obszarze położonym w pobliżu powierzchni każdej cząstki. Najbardziej znanym tego typu kompozytem jest beton, w którym cement traktowany jest jako faza ciągła, a kruszywo stanowi fazę rozproszoną [1].

1.2. Kompozyty zbrojone dyspersyjnie

Kompozyty te składają się z metalowej osnowy, która wzmocniona jest drobnymi cząstkami (ceramicznymi lub metalicznymi) w ilości do ~15% objętości kompozytu. Wzmocnienie kompozytu zbrojonego dyspersyjnie polega na utrudnianiu przez rozproszone cząstki ruchu dyslokacji w osnowie. W takim kompozycie większa część obciążeń zewnętrznych przenoszona jest przez osnowę, a co za tym idzie, zbrojenie dyspersyjne nie wpływa znacząco na poprawę cech mechanicznych i wytrzymałościowych kompozytu (w umiarkowanych temperaturach). Sytuacja ta zmienia się w przypadku zmiany temperatury (sięgającej nawet 80% temperatury topnienia), wówczas zauważalny jest wyraźny wzrost wzmocnienia [1].

1.3. Kompozyty zbrojone włóknami

Tego rodzaju kompozyty są najlepszymi spośród dostępnych kompozytów ze względu na ich doskonałe właściwości mechaniczne i wytrzymałościowe, zachowując jednocześnie najmniejszy ciężar właściwy. Przy tego typu kompozytach fazą wzmacniającą są różnego rodzaju włókna, które stanowią element nośny. Osnowa służy jako spoiwo łączące włókna, która bierze jedynie niewielki udział w przeniesieniu obciążeń zewnętrznych. Zadaniem osnowy jest rozdzielenie obciążenia zewnętrznego pomiędzy włókna, chroniąc je jednocześnie przed czynnikami zewnętrznymi. Osnowę w tego typu kompozytach najczęściej stanowią żywice termoplastyczne i termoutwardzalne, a zbrojenie wykonane jest z włókien węglowych, grafitowych, szklanych, boronowych czy aramidowych. Kompozyty zbrojone włóknami są obecnie najczęściej wykorzystywanymi kompozytami spośród wszystkich dostępnych [1].

2. RODZAJE WŁÓKIEN

Włókna służące do zbrojenia kompozytów możemy podzielić ze względu na sposób ich wytworzenia. Wyróżniamy tutaj włókna:

- a) naturalne - mineralne, roślinne,
- b) sztuczne - szklane, węglowe, stalowe.

Do budowy kompozytów najczęściej wykorzystuje się włókna szklane, grafitowe (węglowe), organiczne, ceramiczne, a także boronowe. Na efektywność włókien wpływa wytrzymałość właściwa (stosunek wytrzymałości na rozciąganie do ciężaru właściwego materiału włókna) i moduł właściwy (moduł sprężystości do ciężaru właściwego materiału włókna). Im wartości tych wskaźników są większe, tym włókno jest bardziej efektywne [2].

2.1. Włókna szklane

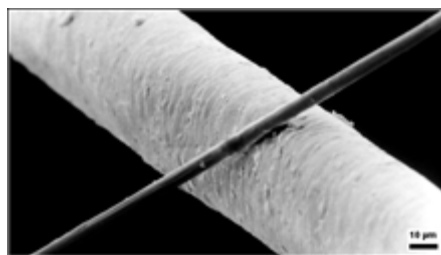
Włókna szklane otrzymywane są ze szkła wodnego, a także ze stopionego szkła. Obecnie są najpopularniejszym rodzajem włókien stosowanych przy produkcji kompozytów. Są jednymi z najstarszych i najtańszych włókien stosowanych do ich zbrojenia. Najczęściej wykorzystywane są w budownictwie przemysłowym, w przemyśle samochodowym, lotnictwie, elektrotechnice i elektronice.

2.2. Włókna grafitowe

Włókna te posiadają znacznie lepsze parametry od włókien szklanych, jednak ze względu na znacznie wyższe koszty produkcji nie są tak masowo stosowane. Wyróżnić można trzy podstawowe grupy włókien grafitowych: wysokowytrzymałe, wysokomodułowe oraz ultrawysokomodułowe.

2.3. Włókna węglowe

Włókna węglowe ze względu na swoją budowę (składają się prawie wyłącznie z grafitu) zyskują m.in. takie właściwości, jak odporność chemiczną czy nietopliwość, jednocześnie będąc materiałem o gorszych własnościach mechanicznych niż włókna grafitowe. Są natomiast zdecydowanie od nich tańsze. Włókna węglowe (rys. 1), zwane również włóknami karbonizowanymi znalazły szereg zastosowań, począwszy od przemysłu, gdzie zostały wykorzystane jako zbrojenie laminatów opartych na żywicach epoksydowych wysokiej jakości, poprzez przemysł energetyczny (łopaty elektrowni wiatrowych), lotniczy (śmigła, komponenty wzmacniające strukturę kadłuba i skrzydeł), w produkcji jachtów (wzmocnienie żagli), kończąc na przemyśle sportowym, gdzie włókna węglowe wykorzystywane są przy produkcji ram rowerów, łuków sportowych czy bolidów Formuły 1.



Rys. 1. Włókno węglowe - porównanie włosa ludzkiego (jasny) i pojedynczej nici włókna węglowego [3]

2.4. Włókna organiczne

Włóknami organicznymi są surowce naturalne, które największe zastosowanie znalazły w przemyśle włókienniczym. Włókna naturalne podzielić można na:

- a) włókna pochodzenia roślinnego (celulozowe) - np. bawełna, konopie, len, juta, sizal, drewno,
- b) włókna pochodzenia zwierzęcego (białkowe) - np. sierść, włosy, wełna, jedwab naturalny,
- c) włókna mineralne występujące naturalnie - np. azbest.

3. TYP I WŁASNOŚCI OSNÓW

Aby włókna mogły spełnić w kompozytach swoją rolę, muszą być ze sobą w jakiś sposób połączone. Do tego celu wykorzystuje się osnowę, która pełni rolę spoiwa, tworząc tym samym z włóknami podstawowy materiał do wytwarzania konkretnych elementów konstrukcyjnych. Osnowa w kompozycie pełni rolę ochronną dla włókien. Choć nie wpływa na charakterystyki sztywnościowe i wytrzymałościowe kompozytu, w pewnym stopniu bierze udział w przenoszeniu obciążeń, jakim poddawany jest kompozyt. Jako osnowę najczęściej wykorzystuje się żywice termoutwardzalne oraz żywice termoplastyczne.

Żywice termoplastyczne - są poddawane procesowi ogrzewania, w czasie którego miękną, chłodzone natomiast twardnieją. Cykle ogrzewania i chłodzenia mogą być wielokrotnie powtarzane, nie powodując utraty właściwości żywic.

Żywice termoutwardzalne - raz poddane procesowi ogrzewania ulegają trwałemu utwardzeniu, a następne cykle ogrzewanie-chłodzenie nie wpływają na zmianę ich twardości. Żywice termoutwardzalne są twardsze i bardziej wytrzymałe od żywic termoplastycznych, ale charakteryzują się większą kruchością [1].

4. LAMINATY

Laminatem nazywamy pojedynczą warstwę materiału, która jest podstawową składową każdego kompozytu. Laminat stworzony jest z włókien, które są ze sobą połączone za pomocą tych samych żywic, z której wykonana jest osnowa. Najczęściej wykorzystywanymi laminatami są te syntetyczne, a więc takie, w których warstwy są rozłożone symetrycznie względem płaszczyzny środkowej, a ponadto warstwy wykonane są z tego samego materiału (tzw. symetria materiałowa). Laminaty symetryczne posiadają bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe, przez co elementy konstrukcyjne, które są wykonane z tych laminatów znacznie rzadziej ulegają np. samoistnemu zwichrzeniu po zakończeniu procesu laminacji [1].

5. WYKORZYSTANIE KOMPOZYTÓW W BUDOWNICTWIE

5.1. Wzmacnianie konstrukcji mostowych kompozytami

Kompozyty w budownictwie mostowym stały się już rzeczą powszechną i często stosowaną. Z powodzeniem zastąpiły tradycyjne do tej pory metody wzmacniania

elementów betonowych poprzez stosowanie blach stalowych. Rozwiązanie to nie było doskonałe przede wszystkim ze względu na szybko pogarszające się warunki połączeń obu materiałów (beton + blachy stalowe) w wyniku korozji stali. Wykonanie takich połączeń wymagało ponadto użycia ciężkiego sprzętu, co nierzadko wiązało się z utrudnieniami. Dlatego też kompozyty, które charakteryzują się wysoką wytrzymałością na rozciąganie, odpornością na korozję, bardzo wysoką wartością odkształceń granicznych czy choćby możliwością aplikacji ich w różnych warunkach szybko stały się standardowym rozwiązaniem materiałowym przy niejednej inwestycji mostowej.

Najczęściej stosowanym kompozytem wykorzystywanym przy konstrukcjach mostowych jest tworzywo sztuczne zbrojone różnego rodzaju włóknami (oznaczane jako FRP), głównie włóknami węglowymi (CFRP), szklanymi (GFRP) czy aramidowymi (AFRP). W kompozytach stosowanych w budownictwie mostowym jako matrycę (osnowę) najczęściej wykorzystuje się żywice epoksydowe, poliestrowe oraz fenolowe. Chroni ona włókna przed uszkodzeniami mechanicznymi, zapewnia równomierny rozkład obciążeń na poszczególne włókna, a ponadto chroni włókna przed korozją środowiskową.

Głównymi zaletami kompozytów typu FRP są:

- a) bardzo wysoka wytrzymałość na rozciąganie,
- b) bardzo wysoka wartość odkształceń granicznych,
- c) bardzo dobre właściwości zmęczeniowe,
- d) niewielki ciężar,
- e) odporność na działanie czynników korozyjnych,
- f) nieograniczone wymiary geometryczne,
- g) łatwość aplikacji, nawet w trudno dostępnych miejscach, oraz w różnych warunkach,
- h) mała grubość warstwy naprawczej,
- i) możliwość wstępnego sprężania.

Do wad kompozytów typu FRP należy zaliczyć:

- a) koszty wykonania i zakupu materiału kompozytowego,
- b) niska odporność na wysokie temperatury zarówno kompozytów, jak i warstw klejowych łączących je z elementami betonowymi,
- c) brak zakresu plastycznego ich pracy - zniszczenie następuje w sposób gwałtowny, bez żadnych oznak sygnalizujących zniszczenie.

Materiały kompozytowe typu CFRP, a więc z zastosowaniem włókien węglowych są najczęściej wykorzystywaną grupą kompozytów zbrojonych włóknami. Sprawdzają się zwłaszcza gdy potrzeba jest przedłużenia dalszej eksploatacji obiektów przy niezadawalającym ich aktualnym stanie technicznym, spowodowanym m.in. złą eksploatacją (brakiem konserwacji), wiekiem konstrukcji czy niszczącym działaniem czynników atmosferycznych (wiatr, słona woda) [4]. Wzmocnienie elementów mostowych (betonowych) poprzez zastosowanie kompozytów pozwala w znacznym stopniu poprawiać nośność na zginanie konstrukcji (taśmy lub maty o jednokierunkowym ułożeniu włókien) i ścinanie (maty, kształtowniki

kątowe). Zwiększają również nośność elementów ściskanych konstrukcji mostowych (oczepy, podpory).

5.2. Konstrukcje mostowe z kompozytów

Liderami wykorzystywania materiałów kompozytowych przy budowie mostów są takie kraje, jak Japonia, USA, Kanada, Chiny, Turcja, Francja, Dania, Wielka Brytania, Włochy oraz Niemcy. Najczęściej stosuje się dwie metody budowy mostów z udziałem zbrojenia kompozytowego. Pierwsza to metoda tradycyjna - stosuje się w niej pręty kompozytowe podobne do stalowych, z których konstruuje się kosze i siatki na placu budowy. Druga z metod to wytwarzanie w warunkach fabrycznych gotowych prefabrykowanych kompozytowych modułów, które po przewiezieniu na plac budowy są montowane jako gotowy obiekt.

W Polsce kompozyty w budownictwie mostowym są dopiero nowinką, która po raz pierwszy zostanie zastosowana przy budowie mostu drogowego, realizowanego w ramach projektu badawczego Com bridge. Obiekt ma powstać w miejscowości Błażowa pod Rzeszowem, a generalnym wykonawcą będzie konsorcjum kierowane przez Mostostal Warszawa przy udziale Politechniki Rzeszowskiej, Politechniki Warszawskiej oraz firmy Promost Consulting z Rzeszowa. Projektowany most ma być największym na świecie tego typu obiektem pod względem rozpiętości przęsła. Planuje się, by konstrukcja mostu mogła być eksploatowana bez dodatkowych nakładów pieniężnych przez 50-75 lat.

Nowo projektowany most, który zastąpi już istniejący most znajdujący się w bardzo złym stanie technicznym, zostanie wykonany z kompozytów włóknistych o osnowie polimerowej. Będą to włókna węglowe i szklane otoczone żywicą epoksydową. Zastosowanie takiego rodzaju kompozytu pozwala uzyskać konstrukcję lżejszą oraz bardziej wytrzymałą. Projektowany most będzie posiadać konstrukcję płytowo-belkową. Płyta z betonu lekkiego zbrojonego kompozytami zostanie zespolona z czterema dźwigarami kompozytowymi.

Cały projekt, obejmujący prace badawcze, budowę obiektu oraz badanie parametrów eksploatacyjnych wyceniono na ok. 10 mln zł, co jest kwotą nie małą, porównując koszty budowy mostów metodą tradycyjną, jednak metoda ta pozwala na budowę w krótszym czasie, a późniejsze koszty utrzymania są zdecydowanie niższe [5].

6. MATERIAŁY PRZEKŁADKOWE (SANDWICHOWE)

Materiały przekładkowe to bardzo ważna grupa produktów wykonywanych z kompozytów, które znalazły zastosowanie w wielu branżach, począwszy od budownictwa poprzez branżę reklamową, drukarską, przemysłową czy inną. Materiały przekładkowe, zwane również sandwichowymi, to kompozytowe płyty, w których na przemian układana jest warstwa różnych materiałów. Najczęściej konstrukcję stanowią dwie warstwy zewnętrzne laminatu o małej grubości

(1,5÷4 mm) przedzielone warstwą pianki lub płyty recyklatowej. Grubość kompozytu przekładkowego uzależniona jest od rodzaju konstrukcji, jaki chce się uzyskać. Zastosowanie tego typu materiałów pozwala nadać konstrukcji odpowiednią sztywność oraz wytrzymałość mechaniczną przy jednoczesnym dość niskim ciężarze samej warstwy przekładkowej. Stosowanie przekładek jako elementu konstrukcyjnego pozwala uzyskać schemat konstrukcji, na który działają jedynie siły rozciągające i ściskające. Na wartość sił działających w konstrukcji wpływ ma grubość laminatu - im jest on grubszy, tym wartość sił ściskających i rozciągających działających na konstrukcję jest mniejsza.

Konstrukcje wykonane z laminatów przekładkowych (sandwichowych) pozwalają w znaczny sposób ograniczyć koszty oraz charakteryzują się dużą trwałością dzięki wysokiej odporności na czynniki atmosferyczne i chemiczne [6].

PODSUMOWANIE

Materiały kompozytowe to produkt, który z pewnością zasługuje na miano wynalazku XXI wieku. Pozwoliły stworzyć praktycznie nieograniczone możliwości w zakresie kształtowania konstrukcji inżynierskich, ale również przedmiotów codziennego użytku. Materiały kompozytowe stały się produktem nieodzownym w życiu wielu z nas, ułatwiając lub polepszając standardy życia.

LITERATURA

- [1] German J., Materiały kompozytowe w budownictwie, Cz. I, Kalejdoskop budowlany, PWB, Warszawa 2000, 6, 14-17.
- [2] Boczkowska A., Kapuściński J., Lindemann Z., Witemberg-Perzyk D., Wojciechowski S., Kompozyty, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [3] http://pl.wikipedia.org/wiki/W%C5%82%C3%B3kno_w%C4%99glowe
- [4] Jankowiak I., Efektywność wzmacniania materiałami kompozytowymi żelbetowych belek mostowych, rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 2010.
- [5] <http://pzipb.com.pl/mostostal-warszawa-zbuduje-most-z-kompozytow/>
- [6] Izbicka J., Michalski J., Kompozyty, laminaty, tworzywa stosowane w technice, Prace Instytutu Elektrotechniki 2006, zeszyt 228.

COMPOSITES IN SUSTAINABLE CIVIL ENGINEERING - REVIEW OF SOLUTIONS AND EXAMPLES OF APPLICATION

Paper presents the composite materials that are used in many industries, and their invention has become a turning point in many areas of life. The article contains a description of the types of fibers using for the reinforcement of composite materials. The use of composites in bridge construction as a construction material was presented.

Keywords: composites, fibers, composite bridges