

Materiały kompozytowe w budownictwie ¹

cz. I

Janusz German
Katedra Wytrzymałości Materiałów
Instytut Mechaniki Budowli Politechniki Krakowskiej

Specyfika konstrukcji budowlanych sprawia, że budownictwo ogólne jest dość konserwatywne, jeśli chodzi o wykorzystywanie nowoczesnych, zaawansowanych technologicznie materiałów. Na wspomnianą specyfikę składają się takie czynniki jak: możliwie najniższe koszty budowli, prostota procesu ich wznoszenia, łatwość wytwarzania materiałów budowlanych itd. Z konstrukcyjnego punktu widzenia istotnym czynnikiem jest to, że w dużym stopniu przekroje elementów nośnych wykonywane są jako lite, bądź grubościennie. Wszystkie wymienione wymagania mogą z powodzeniem być spełnione przez klasyczne materiały budowlane: beton, stal, drewno i cegłę. Nie pojawia się zatem w naturalny, niewymuszony „modami” sposób, potrzeba wykorzystywania materiałów zaawansowanych technologicznie, jak przykładowo – kompozyty. Nie oznacza to jednak, że materiały kompozytowe są zupełnie nieobecne w budownictwie. Pomijając ich stosowanie w elementach wykończeniowych czy dekoracyjnych, trzeba pamiętać o zastosowaniach konstrukcyjnych materiałów kompozytowych, szczególnie w przypadku elementów o małych grubościach ścianek, jak np. rury, zbiorniki itp.

Celem niniejszego artykułu jest przybliżenie Czytelnikom podstawowej wiedzy o kompozytach – nazywanych przez wielu „materiałami XXI wieku”, o celowości ich stosowania i wreszcie o ich wykorzystywaniu w budownictwie, a ściślej budownictwie przemysłowym.

PODSTAWOWE INFORMACJE O MATERIAŁACH KOMPOZYTOWYCH

Pojęcie **materiał kompozytowy** (łac. *compositus* = złożony) oznacza materiał, który jest zbudowany z co najmniej dwóch różnych składników, przy czym ich połączenie zachodzi na poziomie makroskopowym. W tym znaczeniu nie są materiałami kompozytowymi np. stopy metali, które w skali mikroskopowej tworzą kompozycję wielu składników, ale w obrazie makroskopowym zachowują się jak typowe materiały jednorodne.

Zapisy historyczne wskazują, że kompozyty stosowano już w starożytności. Wiadomo z przekazów, że Izraelici (od XIII w. p.n.e.) przy wznoszeniu swoich domów wykorzystywali bloki z mieszanki błotnej wzmocnionej słomą i końską sierścią, a Egipcjanie (od ok. 3600 lat p.n.e.) znali już sklejkę drewnianą. W średniowieczu wykonywano miecze i tarcze składające się z warstw różnych materiałów, aby zapewnić im jak największą trwałość i wytrzymałość.

Powstanie i rozwój nowoczesnych materiałów kompozytowych wiąże się nierozdzielnie z rozwojem technologii wytwarzania włókien sztucznych. Początek przypada na okres II wojny światowej, kiedy to powstały włókna szklane. Dalszy rozwój związany jest z włóknami

¹ Niniejszy artykuł ukazał się w: *Kalejdoskop Budowlany, PWB, Warszawa, nr 6, str. 14-17, czerwiec 2000*

węglowymi - najpierw tzw. niskomodulowymi (o niskim module sprężystości podłużnej) powstałymi w latach 50-tych, a potem wysokomodulowymi (lata 60-te). Kolejny etap rozwoju kompozytów spowodowało pojawienie się włókien aramidowych, znanych pod nazwą handlową Kevlar.

Zainteresowanie kompozytami wynika z dwóch podstawowych przesłanek: pierwsza - to ich doskonałe parametry mechaniczne i wytrzymałościowe, a druga - to mały ciężar właściwy. Z jednoczesną kombinacją tych cech mamy do czynienia w zasadzie tylko w przypadku kompozytów, stąd gwałtownie rosnące w ostatnich latach ich wykorzystanie w konstrukcjach, dla pracy których ta kombinacja ma pierwszorzędne znaczenie. Są to przede wszystkim konstrukcje lotnicze, samochodowe, a także sprzęt sportowy (łódzie, narty, rakiety tenisowe, rowery). Wspólną cechą wszystkich wymienionych zastosowań kompozytów jest to, że dotyczą one konstrukcji cienkościennych, dla których kompozyty już w chwili obecnej wydają się być materiałem o podstawowym znaczeniu.

Większość materiałów kompozytowych jest zbudowana z dwóch faz - fazy ciągłej zwanej **osnową** (matrycą), otaczającej fazę drugą, tzw. fazę **rozproszoną**, zwaną także **zbrojeniem**. Wypadkowe własności kompozytu są zależne od własności faz składowych, ich ilości w ogólnej objętości kompozytu, sposobu rozmieszczenia fazy rozproszonej w osnowie, a także cech geometrycznych fazy rozproszonej.

W zależności od rodzaju fazy rozproszonej materiały kompozytowe można podzielić na kompozyty zbrojone cząstkami, zbrojone dyspersyjnie oraz zbrojone włóknami.

Kompozyty zbrojone cząstkami i dyspersyjnie

Kompozyty **zbrojone cząstkami** to takie, w których w przenoszeniu obciążeń zewnętrznych uczestniczy zarówno osnowa, jak i faza rozproszona w postaci cząsteczek. Ich sztywność i twardość jest większa od sztywności i twardości otaczającej je osnowy. Mechanizm wzmocnienia kompozytu przez cząstki polega na ograniczaniu przez nie odkształceń matrycy w obszarze położonym w pobliżu powierzchni każdej cząstki. Tak więc, aby wzmocnienie było efektywne, cząstek powinno być odpowiednio dużo (z reguły powyżej 20% objętości kompozytu, niekiedy nawet 90%), powinny one być w miarę równomiernie rozłożone w kompozycie, mieć mniej więcej te same wymiary we wszystkich kierunkach i być stosunkowo małe.

Powszechnie stosowanym kompozytem tego typu jest beton, w którym fazą ciągłą jest cement, a fazą rozproszoną kruszywo. To, że opis teoretyczny konstrukcji betonowych opiera się na założeniu, iż beton jest materiałem izotropowym i jednorodnym (za taki uważany jest również w powszechnej opinii inżynierów) wynika jedynie z trudności z opisem betonu na gruncie mechaniki kompozytów. Nie zmienia to jednakże faktu, że do pewnego stopnia „nieświadomie”, budownictwo było prekursorem stosowania materiałów kompozytowych, a biorąc wagowo jest największym ich konsumentem!

Kompozyty zbrojone **dyspersyjnie** zbudowane są z metalowej osnowy, wzmocnionej bardzo drobnymi cząstkami ceramicznymi lub metalicznymi o średnicy ok. $0.01\div 0.1\ \mu\text{m}$ w ilości do ok. 15% objętości kompozytu. Tym co odróżnia je od kompozytów zbrojonych cząstkami jest odmienny mechanizm wzmocnienia kompozytu. W przypadku zbrojenia dyspersyjnego wzmocnienie zachodzi na poziomie mikroskopowym (atomowym lub molekularnym) i polega na utrudnianiu przez rozproszone cząstki ruchu dyslokacji w osnowie. Obciążenie zewnętrzne przenoszone jest w zdecydowanej większości przez osnowę, tak więc zbrojenie dyspersyjne nie poprawia znacząco cech mechanicznych i wytrzymałościowych kompozytu w umiarkowanych temperaturach. Wpływ wzmocnienia jest natomiast wyraźny w wysokich temperaturach, sięgających 80% temperatury topnienia. Nawet niewielki udział cząstek

dyspersyjnych znacznie poprawia np. odporność na pełzanie kompozytu w porównaniu z odpornością materiału osnowy. Ma to znaczenie przede wszystkim w konstrukcjach pracujących pod dużym obciążeniem w wysokiej temperaturze.

Kompozyty zbrojone włóknami

Kompozyty zbrojone **włóknami** to kompozyty, w których w charakterze fazy wzmacniającej wykorzystywane są różnego rodzaju włókna – stanowią one element nośny, natomiast osnowa służy jako spoiwo łączące włókna. Osnowa zapewnia rozdział obciążenia zewnętrznego pomiędzy włókna, a także chroni je przed czynnikami zewnętrznymi. W niewielkim natomiast stopniu uczestniczy w przenoszeniu obciążeń zewnętrznych. Kompozyty włókniste są najbardziej efektywnymi spośród materiałów kompozytowych, w tym sensie, że wykazują najlepsze własności mechaniczne i wytrzymałościowe przy najmniejszym ciężarze właściwym. Jediną ich wadą w porównaniu z kompozytami zbrojonymi cząstkami lub dyspersyjnie jest cena, z reguły wyższa. W kompozytach włóknistych jako osnowy stosuje się metale i żywice polimerowe.

Podstawowe znaczenie praktyczne mają jednak w tej chwili kompozyty włókniste o osnowach polimerowych (żywice termoplastyczne i termoutwardzalne), zbrojonych włóknami głównie węglowymi, grafitowymi, szklanymi, boronowymi i aramidowymi. Wykorzystywane są najczęściej i produkowane w największej ilości. Decydują o tym ich bardzo dobre parametry techniczne, ale również stosunkowo proste metody wytwarzania i względnie niska cena.

Makroskopowe zachowanie się kompozytu zależy w wyraźny sposób od jego budowy mikroskopowej, a w szczególności od orientacji włókien, ich rozmieszczenia w przekroju kompozytu i jednorodności własności włókna. Budowa mikroskopowa zależy z kolei bezpośrednio od procesu technologicznego, a w zasadzie od zachowania ścisłych rygorów produkcyjnych i kontroli jakości. Jednak najściślejsze nawet zachowanie tych rygorów nie jest w stanie wyeliminować takich niepożądanych efektów, jak nadmierne zagęszczenie włókien w pewnych rejonach i ich brak w innych, czy zmiany przekroju włókna (tym częściej występujące, im większa jest długość włókna). Makroskopowo mierzalnym skutkiem tych, w zasadzie nieuniknionych, defektów jest duży rozrzut wartości tak modułów sprężystości, jak i charakterystyk wytrzymałościowych uzyskanych dla tego samego kompozytu. Identyczne badania dwóch makroskopowo identycznych próbek mogą dać różnice od kilkunastu do stu kilkudziesięciu procent! Każdy inżynier-konstruktor musi zatem przy projektowaniu elementów kompozytowych podchodzić z dużą rezerwą do podanych w specyfikacjach charakterystyk materiałowych. Warto dodać, że w niektórych państwach istnieją obecnie specjalne procedury (np. w USA procedura MIL-HDBK-5B) określające w oparciu o metody statystyczne wartości charakterystyk materiałowych, zalecane jako miarodajne przy projektowaniu.

Typy i własności włókien

Podstawowy powód stosowania włókien wynika z ich dużej sztywności i wytrzymałości, wielokrotnie większych od wartości odpowiednich charakterystyk dla materiału włókna, ale wyznaczonych na podstawie badań materiału w postaci masowej. Dla przykładu - wytrzymałość na rozciąganie stali konstrukcyjnych jest rzędu 0.2-0.7 GPa, tymczasem wytrzymałość cienkich włókien stalowych wynosi ok. 4 GPa. Ta wyraźna różnica na korzyść włókien wynika stąd, że struktura krystaliczna włókna jest znacznie doskonalsza (kryształy żelaza są ułożone wzdłuż osi włókna), a po drugie - statystyczna ilość defektów sieci krystalicznej we włóknie o znikomo małej objętości jest znacznie mniejsza niż w dużej objętości tego samego materiału. Większość włókien stosowanych w kompozytach ma średnice w granicach 2-16 μm .

Istotnym wskaźnikiem efektywności włókna są tzw. wytrzymałość właściwa i moduł właściwy (wyrażające się w jednostkach długości) tzn. stosunki odpowiednio wytrzymałości na rozciąganie i modułu sprężystości do ciężaru właściwego materiału włókna. Czym wartości tych wskaźników są większe tym włókno jest bardziej efektywne.

Obecnie, najczęściej stosowanymi w kompozytach włóknami są włókna szklane, grafitowe (węglowe) i organiczne, a w mniejszym zakresie ceramiczne i boronowe. Ze względu na wielość odmian tych włókien trudno jest podać całościowe i wyczerpujące zestawienie ich własności. Niektóre z nich przedstawiono w tabeli 1.1 oraz w symbolicznie w tabeli 1.2 (czym większa liczba znaków „+”, tym silniej manifestuje się dana cecha). Przedstawimy obecnie skrótowe informacje o podstawowych włóknach, tzn. włóknach szklanych, grafitowych i organicznych.

Włókna szklane są najstarszymi, najtańszymi i najczęściej stosowanymi włóknami używanymi do zbrojenia kompozytów. Stosowane są szeroko w przemyśle samochodowym, lotnictwie, elektronice, szkutnictwie, elektrotechnice, budownictwie przemysłowym i in. Istnieją dwa podstawowe typy włókien szklanych - E i S. Pierwszy z nich ma gorsze własności mechaniczne (sprężyste, wytrzymałościowe, zmęczeniowe, udarowościowe, termiczne, reologiczne), ale znacznie niższą cenę niż typ S, stworzony z przeznaczeniem dla zastosowań militarnych. W chwili obecnej nadal znacznie częściej stosuje się włókna typu E.

Włókna grafitowe pojawiły się na rynku w latach 50-tych. Większością parametrów przewyższają włókna szklane, są jednak od nich znacznie droższe. Można wyróżnić trzy grupy tych włókien, a mianowicie włókna wysokowytrzymałe, wysokomodułowe i ultrawysokomodułowe. Najczęściej stosowane włókna grafitowe znane są pod nazwami handlowymi Toray T300 i AS.

Włókna węglowe są również włóknami grafitowymi, ale o mniej uporządkowanej strukturze. Obok obszarów o strukturze właściwej dla krystalicznego grafitu, występują obszary o zaburzonej sieci krystalicznej, a nawet obszary całkowicie jej pozbawione. W porównaniu z włóknami grafitowymi mają one gorsze własności mechaniczne, są natomiast od nich tańsze.

Włókna organiczne, takie jak bawełna, juta i sizal wykorzystywane są do zbrojenia kompozytów od dawna. Zakres ich stosowania był jednak bardzo ograniczony ze względu na bardzo niskie parametry mechaniczne. Dopiero pojawienie się włókien aramidowych spowodowało ich szerokie wykorzystywanie w produkcji lotniczej, samochodowej, a przede wszystkim sprzętu sportowego (narty, łodzie wyczynowe, sprzęt golfowy). Nazwy handlowe tych włókien to Nomex, Kevlar, Kevlar 29 i Kevlar 49. Włókna aramidowe są generalnie rzecz biorąc najlepsze pod względem własności mechanicznych, ale jednocześnie najdroższe. Z tego powodu są one często używane łącznie z włóknami grafitowymi lub szklanymi typu E, tak, aby uzyskać kompromis między parametrami mechanicznymi i rozsądną ceną.

Typy i własności osnów

Osnowa pełni w kompozycie rolę spoiwa dla włókien, umożliwiając powiązanie włókien w elementy powierzchniowe, stanowiące podstawę do wytwarzania elementów konstrukcyjnych. Osnowa stanowi także powłokę ochronną włókien. W pewnym stopniu uczestniczy ona również w przenoszeniu obciążeń, jakim poddany jest kompozyt. Zasadniczo jednak osnowa ma mały wpływ na charakterystyki sztywnościowe i wytrzymałościowe kompozytu. W stosunku do włókien - moduł sprężystości, jak i wytrzymałość na rozciąganie matrycy są mniejsze o mniej więcej 2 rzędy wielkości. Podstawowe klasy matryc to **żywice termoutwardzalne** i **żywice termoplastyczne**. Źródłem takiego podziału są różne procesy chemiczne i technologiczne, w wyniku których uzyskuje się żywice. Rzutują one głównie na własności użytkowe, związane z właściwościami fizyko-chemicznymi żywic, takimi jak

odporność na media agresywne (w tym także wodę), nie mają natomiast większego wpływu na gęstości, moduły sprężystości i wytrzymałości na rozciąganie.

Tym co odróżnia żywice termoplastyczne od termoutwardzalnych w obrazie makroskopowym jest ich zachowanie się przy ogrzewaniu i chłodzeniu.

PARAMETR	RODZAJ WŁÓKNA				
	szklane E	szklane S	grafitowe	Kevlar 49	boron
Średnica [μm]	16	16	7 - 8	12	100 - 200
Ciężar właściwy ρ [kN/m^3]	25.0 - 25.5	24.5	13.8 - 18.6	14.1	25.5
Wytrzymałość na rozciąganie S [GPa]	1.7 - 3.5	2.5 - 4.8	1.7 - 2.8	2.3 - 3.6	3.5
Wytrzymałość właściwa S/ ρ [km]	68 - 136	103 - 197	123 - 163	161 - 257	135
Moduł Younga E [GPa]	72	86	230 - 250	120 - 125	400 - 410
Moduł właściwy E/ ρ [$\text{km} \times 10^3$]	2.8	3.5	12.4 - 18.1	8.5	16.0

TABELA 1.1. Własności wybranych włókien.

CECHA	RODZAJ WŁÓKNA		
	szklane	grafitowe	aramidowe (Kevlar)
Najniższa cena	+++	++	+
Wytrzymałość właściwa	++	++	+++
Moduł właściwy	+	+++	++
Odporność na pełzanie	+	+++	++
Odporność na rozszerzalność cieplną	+	++	+++
Odporność zmęczeniowa	+	++	+++
Odporność udarowa	+++	+	++
Odporność chemiczna	+	+	+

TABELA 1.2. Ogólna charakterystyka porównawcza podstawowych grup włókien.

Tworzywa termoplastyczne poddane ogrzewaniu mięknią, a chłodzone twardnieją. Proces ten jest w pełni odwracalny i powtarzalny w zakresie temperatur ograniczonym temperaturą topnienia. Tworzywa termoutwardzalne poddane ogrzewaniu ulegają trwałemu utwardzeniu i kolejne cykle ogrzewanie-chłodzenie nie powodują ani ich mięknięcia, ani powtórnego twardnienia. Są one twardsze i bardziej wytrzymałe, choć także bardziej kruche niż tworzywa termoplastyczne. Ważną ich zaletą z punktu widzenia zastosowań jest stabilność narzuconego, początkowego kształtu. Najczęściej obecnie stosowaną w kompozytach żywicą jest należąca do klasy tworzyw termoutwardzalnych **żywica epoksydowa**, występująca pod wieloma nazwami handlowymi np. Narmco 2387, Vicotex 171-174 i in. Często stosowane są również, głównie z powodu niższej ceny, żywice poliestrowe – np. Polimal 109. Podstawowe parametry wybranych typów żywic zebrano w tabeli 1.3.

ŻYWICA		PARAMETR		
Rodzaj	Typ	Ciężar właściwy [kN/m ³]	Moduł Younga [GPa]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]
epoksydowa	termoutwardzalna	10.8 - 13.7	2.1 - 5.5	40 - 85
fenolowa	termoutwardzalna	11.8 - 13.7	2.7 - 4.1	35 - 60
poliestrowa	termoutwardzalna	10.8 - 13.7	1.3 - 4.1	40 - 85
nylonowa	termoplastyczna	10.8	1.3 - 3.5	55 - 90
poliwęglanowa	termoplastyczna	11.8	2.1 - 3.5	55 - 70
polietylenowa	termoplastyczna	8.8 - 9.8	0.7 - 1.4	20 - 35

TABELA 1.3. Własności żywic w temperaturze pokojowej

BUDOWA KOMPOZYTU

Warstwa

Podstawowym elementem składowym kompozytu jest pojedyncza **warstwa**, zwana także **laminą**. Tworzą ją włókna połączone między sobą żywicą. Włókna, stanowiące 40÷70% objętości warstwy, są zasadniczym elementem nośnym warstwy, a osnowa oprócz funkcji spoiwa pełni także rolę osłony dla włókien i zapewnia dystrybucję obciążenia między poszczególne włókna. Układ włókien w warstwie może przyjmować bardzo różne formy, różna może też być ich postać – włókna mogą być cięte lub ciągłe. Z punktu widzenia cech wytrzymałościowych kompozytu bardziej efektywne są włókna ciągłe, długie, przebiegające w warstwie w jednym kierunku. Warstwa o takim układzie włókien nosi nazwę **warstwy o włóknach jednokierunkowych**. Ten typ warstw jest stosowany w elementach konstrukcyjnych najczęściej.

Laminat

Laminat to zbiór warstw (lamin) ułożonych jedna na drugiej i połączonych trwale ze sobą w procesie laminacji tą samą żywicą, z której wykonana jest osnowa. Z reguły kierunki, wzdłuż których przebiegają włókna są różne dla poszczególnych warstw (część grup warstw), dzięki czemu możliwe jest optymalne wykorzystanie własności laminatu we wszystkich kierunkach i co się z tym wiąże - przy dowolnie działających obciążeniach.

W zdecydowanej większości zastosowań poszczególne warstwy lub ich grupy różnią się między sobą wyłącznie orientacją włókien, nie różnią się natomiast materiałem (jedynie w bardzo specjalnych sytuacjach łączy się warstwy z różnych materiałów, tworząc tzw. laminaty hybrydowe – ich przykładem są np. płyty „sandwichowe”). Podając zatem nazwę laminatu wystarczy określić rodzaj włókien i matrycy np. grafit/epoksyd, szkło/epoksyd itp. W literaturze anglosaskiej powszechnie używa się dla określenia laminatów nazw skrótowych - np. laminat o żywicy polimerowej zbrojonej włóknami węglowymi określa się jako **CFRP** – (*Carbon Fibers Reinforced Polymeric matrix*), zaś laminat o żywicy polimerowej zbrojonej włóknami szklanymi - jako **GFRP** (*Glass Fibers Reinforced Polymeric matrix*), lub krócej **GRP**. Podane powyżej skróty używane są często także w naszym kraju, warto zatem znać ich znaczenie.

Sposób ułożenia warstw (orientację włókien) w laminacie określa się za pomocą **kodu** podającego kąty pod jakimi przebiegają włókna w każdej warstwie w przyjętym układzie odniesienia oraz ilość warstw o danej orientacji.

Najczęściej stosowane są laminaty symetryczne tzn. takie, w których warstwy są rozłożone

symetrycznie wzg. płaszczyzny środkowej (tzw. symetria geometryczna) i dodatkowo warstwy symetryczne „geometrycznie” wykonane są z tego samego materiału (tzw. symetria materiałowa). Przyczyną szerokiego wykorzystywania laminatów symetrycznych jest to, że nie występuje w nich, znane inżynierom konstruktorom, tzw. sprzężenie stanu tarczowego i giętnego. Dzięki temu elementy konstrukcyjne nie ulegają np. efektowi samoistnego zwichrzenia po zakończeniu procesu laminacji, a elementy poddane działaniu obciążenia wyłącznie rozciągającego nie są równocześnie zginane – co występuje w laminatach niesymetrycznych. Szersze omówienie tego interesującego zagadnienia wymaga jednak wejścia na grunt mechaniki kompozytów, co wykracza poza ramy niniejszego artykułu, z założenia popularyzatorskiego, nie zaś naukowego. Nie bez znaczenia są również względy obliczeniowe - obliczenia wytrzymałościowe laminatów symetrycznych są dużo prostsze niż niesymetrycznych.