

ROZDZIAŁ 1

ROZDZIAŁ 1

WPROWADZENIE

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. I tak, 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.) stosowali 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 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, rakietki tenisowe, rowery). Najbardziej spektakularnym przykładem wykorzystania kompozytów (w formie tzw. laminatów poprzecznych o matrycy epoksydowej, zbrojonej włóknami węglowymi), jest samolot eksperymentalny Voyager, firmy Hercules, który pokonał trasę dookoła świata, o długości 40 tys. km bez dodatkowych tankowań paliwa. Trzeba jednak dodać, że pomijając małe samoloty sportowe (w tym szybowce), jest to jedyna znana konstrukcja o całkowicie kompozytowej budowie. Zasadniczo firmy lotnicze stosują kompozyty do produkcji pojedynczych elementów samolotów np. stateczników, a przy wprowadzaniu do produkcji nowych elementów kierują się daleko posuniętą ostrożnością - pomne tarapatów finansowych firmy Rolls-Royce, spowodowanych projektem produkcyjnym łopatek turbin do silników odrzutowych, przeznaczonych dla samolotów Lockheed. Coraz szerzej stosuje się nowoczesne kompozyty przy produkcji nadwozi samochodowych - w klasie samochodów sportowych stanowią one już standard. Największym odbiorcą materiałów kompozytowych jest w chwili obecnej przemysł artykułów sportowych i rekreacyjnych, który zużywa ponad połowę produkcji kompozytów.

1.1. Podstawowe informacje o materiałach kompozytowych

Większość materiałów kompozytowych jest zbudowana z dwóch faz - fazy ciągłej zwanej **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 matrycy, a także cech geometrycznych fazy rozproszonej.

W zależności od rodzaju fazy rozproszonej materiały kompozytowe można podzielić na kompozyty:

- ◆ zbrojone cząstkami
- ◆ zbrojone dyspersyjnie
- ◆ zbrojone włóknami.

1.1.1. Kompozyty zbrojone cząstkami i dyspersyjnie

Kompozyty **zbrojone cząstkami** (niekiedy stosowany jest termin "zbrojone dużymi cząstkami"), to takie kompozyty, w których w przenoszeniu obciążeń zewnętrznych uczestniczy zarówno matryca, jak i faza rozproszona w postaci cząsteczek. Ich sztywność i twardość jest większa od sztywności i twardości otaczającej je matrycy. 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 (ok. 1 μm). Powszechnie stosowanym kompozytem tego typu jest beton, w którym fazą ciągłą jest cement, a fazą rozproszoną kruszywo. Innym przykładem odwołującym się do powszechnych zastosowań są wyroby oponiarskie. Dodając w procesie wulkanizacji gumy odpowiednią ilość sadzy (15 - 30% objętości), składającej się z niemal kulistych cząsteczek węgla o średnicy 20 - 50 nm, uzyskuje się kompozyt o doskonałych parametrach wytrzymałościowych i sprężystych, a także o dużej odporności na rozrywanie, ścieranie i czynniki chemiczne, stosowany do produkcji opon. Przykładem kompozytów wzmocnionych cząstkami, najbardziej zaawansowanych technologicznie, są spieki ceramiczno-metalowe - tzw. **cermety** - tzn. kompozyty zbudowane z metalowej matrycy wzmocnionej cząstkami z materiałów ceramicznych. Najczęściej stosowanym spośród nich jest węgiel spiekany, składający się z matrycy kobaltowej lub niklowej zbrojonej cząstkami ceramicznymi z węgla wolframu lub węgla tytanu w ilości ok. 90% objętości kompozytu. Cermety znalazły szerokie zastosowanie przy produkcji najwyższej jakości narzędzi tnących.

Kompozyty zbrojone **dyspersyjnie** zbudowane są z metalowej matrycy, wzmocnionej bardzo drobnymi cząstkami ceramicznymi lub metalicznymi o średnicy ok. 0.01 - 0.1 μm 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 matrycy. Obciążenie zewnętrzne przenoszone jest w zdecydowanej większości przez matrycę, 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 pęcznienie kompozytu w porównaniu z odpornością materiału matrycy.

1.1.2. Kompozyty zbrojone włóknami

Kompozyty zbrojone **włóknami** to kompozyty, w których w charakterze fazy wzmacniającej wykorzystywane są różnego rodzaju włókna. Podstawowym elementem nośnym w tych kompozytach są włókna, natomiast matryca służy jako spoiwo łączące włókna, zapewnia rozdział obciążenia zewnętrznego między włókna, a także chroni je przed czynnikami zewnętrznymi. W niewielkim natomiast stopniu uczestniczy matryca w przenoszeniu obciążeń zewnętrznych. Kompozyty zbrojone włóknami (**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 ich cena, z reguły wyższa. W kompozytach włóknistych jako matryce stosuje się metale i żywice polimerowe.

Najczęściej stosowanymi matrycami metalowymi są matryce aluminiowe, miedziane, magnezowe, tytanowe oraz wykonane ze stopów aluminium. Do ich zbrojenia używa się włókien węglowych, boronowych, borsicowych (włókna boronowe w osłonie z węgliku krzemu) i metalowych (wolfram). Kompozyty o metalowych matrycach wykazują bardzo dobre własności mechaniczno-wytrzymałościowe w wysokich temperaturach, co sprawia, że są one przedmiotem dużego zainteresowania ze strony przemysłu lotniczego. Dla przykładu - kompozyty o matrycy wykonanej z tzw. super-stopów czyli stopów na bazie niklu i kobaltu, zbrojonej włóknami wolframu, charakteryzujące się dużą odpornością na pełzanie i pękanie w wysokich temperaturach wykorzystywane są do produkcji turbin silników lotniczych.

Podstawowe znaczenie praktyczne mają jednak w tej chwili kompozyty włókniste o matrycach 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. Rozważania tego i wszystkich następnym rozdziałach skryptu będą dotyczyły tej właśnie klasy kompozytów.

Niezależnie od rodzaju matrycy i włókien, wszystkie kompozyty włókniste mają pewne wspólne cechy, z których najważniejsze to:

- ◆ wyraźna zależność własności mechanicznych od procesu technologicznego produkcji kompozytu,
- ◆ duży rozrzut wartości charakterystyk mechanicznych (sztywnościowych i wytrzymałościowych) dla tego samego kompozytu,
- ◆ zależność charakterystyk mechanicznych (sztywnościowych i wytrzymałościowych) od budowy geometrycznej kompozytu.

Ostatnie zagadnienie będzie szczegółowo analizowane w dalszych rozdziałach, pierwsze jest domeną technologii i wykracza poza ramy tego skryptu, natomiast drugie wymaga krótkiego komentarza, z uwagi na jego znaczenie dla inżyniera konstruktora.

Makroskopowe zachowanie się kompozytu zależy w oczywisty sposób od jego budowy mikroskopowej, a w szczególności od położenia geometrycznego (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 najściślej 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 charakterystyk materiałowych, którymi dysponuje. Istnieją obecnie specjalne procedury (w USA - procedura MIL-HDBK-5B) określające w oparciu o metody statystyczne wartości charakterystyk materiałowych, zalecane jako miarodajne przy projektowaniu.

W dalszej części rozdziału omówione zostaną w zarysie, typy i najważniejsze cechy tworzących kompozyt składników tzn. matryc i włókien.

1.2. 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 ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$). Wyjątek stanowią włókna boronowe o średnicy od 100 do 200 μm . Standardowe badanie włókien obejmuje wyłącznie wyznaczenie modułu sprężystości i wytrzymałości na rozciąganie. Wyniki pomiarowe są jednak obciążone dużą zmiennością, gdyż w przeciwieństwie do pomiaru łatwo i z dużą dokładnością mierzalnej siły zrywającej włókno, pomiar przekroju włókna (niezbędny do określenia naprężenia) nie jest prosty, a co więcej przekrój może się zmieniać na długości włókna. Wspomniany rozrzut wartości charakterystyk podstawowych włókien znajduje odbicie w tabeli 1.1, w której zestawiono wyniki podane w 3 różnych źródłach.

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. Przykładowo - jeżeli mamy dwa różne włókna A i B, a wytrzymałość właściwa wynosi dla włókna A 100 jednostek, dla włókna B 200 jednostek, to zerwanie włókna B pod jego ciężarem własnym nastąpi przy długości włókna dwukrotnie większej niż w przypadku A.

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 symbolicznie w tabeli 1.2. Poniżej podane zostały jedynie podstawowe informacje o 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 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.

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*	24.4	13.8	-	25.2
	25.5**	-	17.2	14.1	25.5
	25.5***	24.5	18.6	14.1	-
Wytrzymałość na rozciąganie S [GPa]	3.4	4.8	1.7	-	3.4
	3.5	-	2.8	3.6	3.5
	1.7	2.5	2.48	2.3	-
Wytrzymałość właściwa S/ ρ [km]	136	197	123	-	135
	135	-	163	257	135
	68	103	133	161	-
Moduł Younga E [GPa]	72	86	250	-	400
	72	-	230	120	410
	72	87	230	124	-
Moduł właściwy E/ ρ [$\text{km} \times 10^3$]	2.9	3.5	18.1	-	15.9
	2.8	-	13.4	8.5	16.1
	2.8	3.6	12.4	8.8	-

* Jones [6] ** Tsai, Hahn [8] *** Delaware Encyclopedia...[1]

TABELA 1.1. Własności wybranych włókien.

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

TABELA 1.2. Ogólna charakterystyka porównawcza podstawowych grup włókien.

1.3. Typy i własności matryc

Matryca pełni w kompozycie rolę spoiwa dla włókien, umożliwiając powiązanie włókien w elementy powierzchniowe, stanowiące podstawę do wytwarzania elementów konstrukcyjnych. Matryca stanowi także powłokę ochronną włókien. W pewnym stopniu uczestniczy ona również w przenoszeniu obciążeń, jakim poddany jest kompozyt. Zasadniczo jednak matryca 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 na własności fizyko-chemiczne żywic, takie 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. Tworzywa termoplastyczne poddane ogrzewaniu mięknią, a chłodzone twardnieją. Proces ten jest w pełni odwracalny i powtarzalny w zakresie temperatur, którego górną granicą jest temperatura topnienia. Tworzywa termoutwardzalne poddane ogrzewaniu ulegają trwałemu utwardzeniu i kolejne cykle ogrzewanie-chłodzenie nie powodują ani ich mięknięcia, ani powtórznego 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. Podstawowe parametry wybranych 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

1.4. Budowa kompozytu

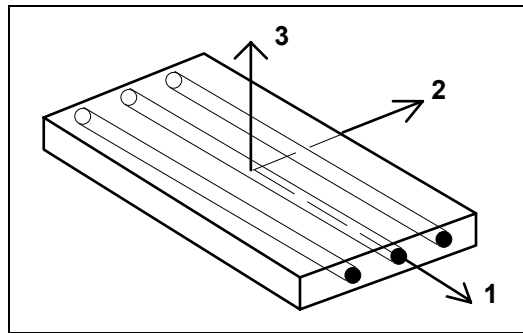
1.4.1. Warstwa

Podstawowym elementem składowym kompozytu jest pojedyncza **warstwa**, zwana także **laminą**. Tworzą ją włókna połączone między sobą żywicą. Włókna są zasadniczym elementem nośnym warstwy, a matryca 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. W dalszych rozważaniach ograniczymy się do specjalnego typu włókien, a mianowicie ciągłych, długich włókien przebiegających w warstwie w jednym kierunku. Taka warstwa nosi nazwę warstwy o **włóknach jednokierunkowych**. Ten typ warstw jest stosowany w elementach konstrukcyjnych najczęściej (rys. 1.1).

Konfiguracja geometryczna warstwy względem przyjętego układu odniesienia przedstawiona na rys. 1.1 nosi nazwę **konfiguracji osiowej** (ang. *on-axis*), a osie (1, 2, 3) **głównych osi**

materiałowych, tzn. takich, że oś "1" przebiega w kierunku włókien, oś "2" prostopadle do kierunku włókien, a oś "3" jest prostopadła do płaszczyzny (1, 2), czyli zarazem płaszczyzny warstwy. Należy tu podkreślić, że w materiałach izotropowych określenie "główne osie materiałowe" nie ma swojego odpowiednika, jak również i to, że termin "główne osie" nie ma nic wspólnego z głównymi osiami tensorów naprężeń czy odkształceń.

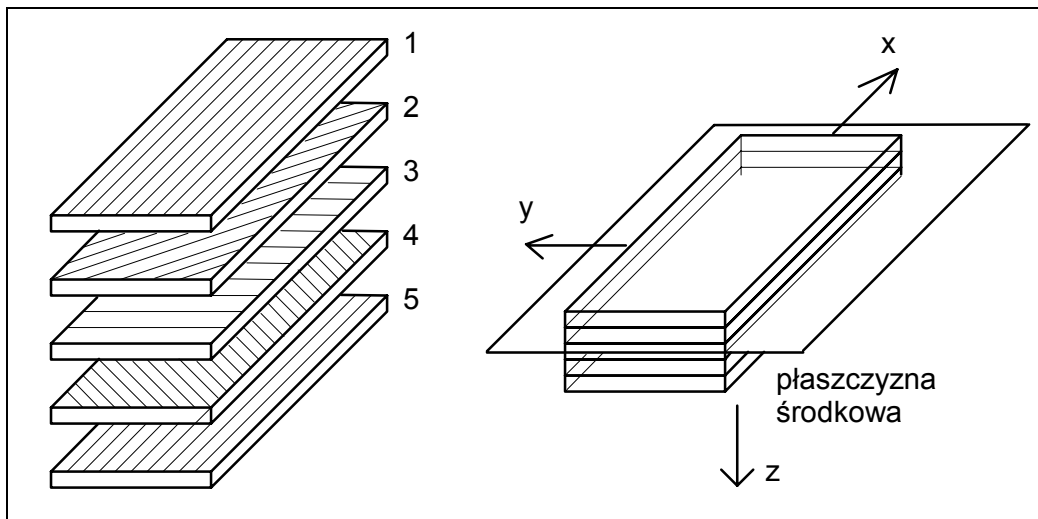
Każdy inny układ współrzędnych, powstały poprzez obrót układu (1, 2, 3) wokół osi "3" będziemy nazywać **układem nieosiowym**, lub alternatywnie - konfigurację laminatu w takim układzie nazwiemy **konfiguracją nieosiową** (ang. *off-axis*). Jak to będzie pokazane w dalszych rozdziałach, wymienione konfiguracje odgrywają w mechanice kompozytów podstawowe znaczenie.



Rys. 1.1. Warstwa z włóknami jednokierunkowymi

1.4.2. Laminat

Laminat to zbiór warstw (lamin) ułożonych jedna na drugiej i połączonych trwale ze sobą. Z reguły główne osie materiałowe poszczególnych warstw (częściej grup warstw) obrócone są względem układu odniesienia (x, y, z) (obróć wokół osi z) przyjętego dla laminatu, tak więc w układzie (x, y, z) warstwy przyjmują konfigurację nieosiową. Budowę laminatu pokazano na rys. 1.2.



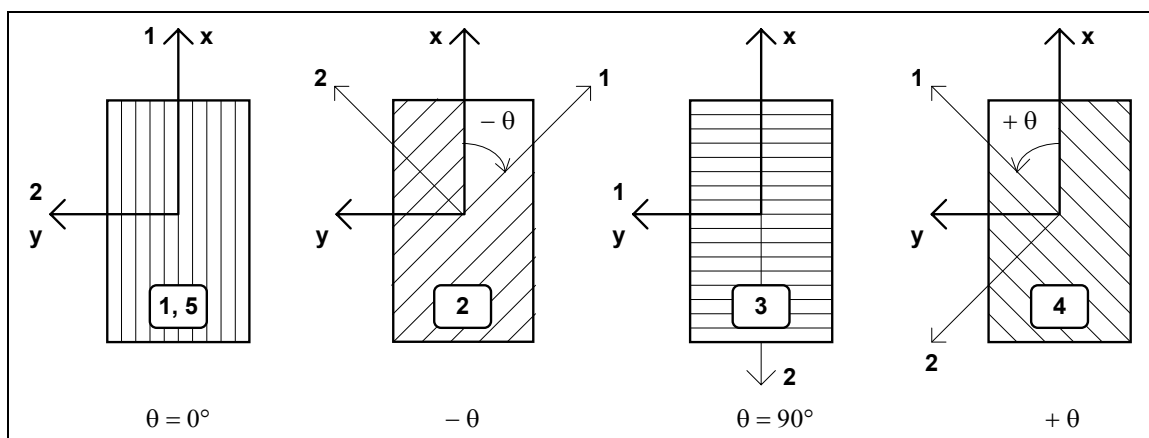
Rys. 1.2. Budowa laminatu warstwowego.

W przypadku, gdy włókna w poszczególnych warstwach przebiegają w tym samym kierunku tzn. warstwy są jednokierunkowo zbrojone, laminat utworzony z takich warstw określa się nazwą **kompozytu laminatowego jednokierunkowo zbrojonego włóknami**.

W zdecydowanej większości zastosowań poszczególne warstwy lub ich grupy różnią się między sobą jedynie orientacją włókien, nie różnią się natomiast materiałem (jedynie w bardzo specjalnych sytuacjach łączą się warstwy z różnych materiałów, tworząc tzw. laminaty hybrydowe). 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*). Inne parametry warstwy, jak np. objętościowy udział włókien w warstwie, czy sposób ich ułożenia nie są podawane w nazwie laminatu, podobnie jak nie zawiera ona informacji o charakterystykach wytrzymałościowych czy sztywnościowych. Warstwy są połączone tą samą żywicą, z której wykonana jest matryca.

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. Dla zilustrowania tego wykorzystamy laminat o budowie jak na rys. 1.2. W jego prawej części pokazano 5 warstw o identycznej grubości tworzących laminat o łącznej grubości t . W płaszczyźnie środkowej (czyli płaszczyźnie równooddalonej od górnej i dolnej powierzchni laminatu) umieszczono układ współrzędnych (x, y, z) - układ odniesienia wspólny dla wszystkich warstw. Na rys. 1.3 przedstawiono ponownie warstwy składowe z określeniem dla każdej z nich układu głównych osi materiałowych $(1, 2)$ (przyjmuje się, że kierunek osi "1" pokrywa się z kierunkiem włókien) oraz kąta charakteryzującego orientację warstwy w przyjętym układzie odniesienia.



Rys. 1.3. Orientacja kątowa warstw laminatu

W omawianym przykładzie napotykamy, idąc od góry (tzn. od warstwy 1 do warstwy 5) kolejno warstwy o orientacji 0° , $- \theta$, 90° , $+ \theta$, 0° . Kod laminatu ma zatem postać $[0/-\theta/90/+\theta/0]$. Należy tu zauważyć, że obowiązuje umowa co do znaku kąta. Za dodatni kąt θ uważa się kąt przeciwny do ruchu wskazówek zegara idąc od osi x do osi głównej 1.

Bardzo często stosowane są laminaty symetryczne tzn. takie, w których warstwy są rozłożone symetrycznie wzg. płaszczyzny środkowej (symetria geometryczna) i dodatkowo warstwy symetryczne wykonane są z tego samego materiału (symetria materiałowa). Przykładowo układ warstw w takim laminacie może być następujący : $0, 0, 0, 90, 90, 45, -45, -45, -45, -45, -45, 45, 90, 90, 0, 0, 0$. Kod tego laminatu można zapisać na 3 sposoby, a mianowicie: $[0_3/90_2/45/-45_3]_s$, gdzie indeks s oznacza symetrię, lub $[0_3/90_2/45/-45_3/-45_3/45/90_2/0_3]_T$, lub też $[0_3/90_2/45/-45_6/ 45/90_2/0_3]_T$, gdzie indeks T oznacza cały laminat.

1.4.3. Wytwarzanie kompozytów włóknistych

Składniki tworzące kompozyt tzn. włókna i matryce mogą mieć bardzo różne formy wyjściowe - występują na rynku zarówno jako materiały samoistne, jak i w formie gotowych lamin. Do tej ostatniej grupy zaliczają się taśmy jednokierunkowo zbrojone tzw. wstępnie impregnowane, określane w literaturze anglosaskiej terminem "**prepreg**" (**preimpregnated**). Technologia wytwarzania kompozytów włóknistych wykracza poza ramy tego skryptu. Tu ograniczymy się do skrótowego przedstawienia wybranych metod wytwarzania kompozytów, zarówno ze składników w formie samoistnej (żywica, włókna), jak i wstępnie połączonych (taśmy prepreg).

◆ **Metoda kontaktowa**

Jest to najprostsza, niemal "chałupnicza", ręczna metoda wytwarzania kompozytów włóknistych. Wykorzystuje się ją do produkcji elementów powierzchniowych w pojedynczych egzemplarzach lub krótkich seriach (np. prototypowe modele karoserii samochodowych, spoilery, baseny ogrodowe itp.), od których nie jest wymagana duża wytrzymałość i trwałość, ani też jednorodność kolejnych wytworzonych elementów. Zamiast pojedynczych włókien stosuje się wykonane z nich maty i tkaniny, które przycina się tak, aby pozwalały odwzorować kształt produkowanego elementu. Kolejne warstwy tkaniny nasącza się żywicą poliestrową lub epoksydową i układa na sobie w odpowiedniej formie, (gipsowej, drewnianej, metalowej lub laminatowej) umożliwiającej uzyskanie pożądanego kształtu. Po nałożeniu każdej warstwy należy odprowadzić nadmiar żywicy przy pomocy wałka. Forma musi być powleczone substancją uniemożliwiającą wyciek żywicy, a po jej utwardzeniu oddzielenie wytwarzanego elementu od formy. O jakości produktu finalnego decydują przede wszystkim jakość formy oraz kwalifikacje producenta.

◆ **Metoda natryskowa**

Metoda natryskowa jest w pewnym sensie udoskonaloną i zmechanizowaną odmianą metody kontaktowej. Ręczne formowanie elementu kompozytowego zastąpiono w niej formowaniem przy użyciu specjalnego pistoletu, umożliwiającego jednoczesne nanoszenie na formę zarówno żywicy, jak i włókien. Te ostatnie mają postać taśm składających się z wielu pojedynczych włókien, połączonych specjalnym lepiszczem i pociętych na krótkie pasemka (tzw. cięty roving). Połączone z pistoletem urządzenie dozujące podaje w odpowiednich proporcjach żywicę i włókna. Końcowym krokiem w procesie produkcji jest usunięcie nadmiaru żywicy i wyciśnięcie pęcherzy powietrza przy użyciu wałka. Metoda ta jest efektywniejsza i prostsza w stosowaniu od metody ręcznej, ale wykazuje te same wady. Elementy wytworzone tą metodą nie są jednorodne, mają stosunkowo małą wytrzymałość, a ich jakość jest trudna do przewidzenia.

◆ **Metoda ciąga wytwarzania prętów, rur i kształtowników (ang. *pultrusion*)**

Metody ciągle służą do zautomatyzowanej produkcji elementów konstrukcyjnych m.in. prętów rur i kształtowników o stałym przekroju poprzecznym. Długość otrzymanych tą metodą elementów może być w praktyce nieograniczona. Do zbrojenia matrycy wykorzystywane są taśmy składające się z wiązki wielu równoległych włókien połączonych ze sobą substancją lepiącą, nawiniętych na szpule (tzw. ciągły roving). Taśmy z rovingiem rozwijane są ze szpul i przepuszczane przez wannę wypełnioną żywicą termoutwardzalną, impregnującą włókna i pełniącą rolę matrycy. Nasycone żywicą taśmy rovingu przeciągane są przez stalowy tłocznik, który nadaje produkowanemu elementowi wstępny kształt, a jednocześnie kontroluje i reguluje właściwy skład kompozytu (tzn. odpowiedni udział włókien w ilości ok. 40-70% objętości). Uzyskany w ten sposób "półprodukt" przeciągany jest przez kolejny, bardzo precyzyjnie wykonany tłocznik, który nadaje ostateczny kształt przekroju poprzecznego. Układ grzewczy tego tłocznika inicjuje także proces utwardzania żywicy. Ostatnim ogniwem w urządzeniu do metody ciągłej produkcji kompozytów są przeciągarki, ciągnące pręt. Sterują one prędkością produkcji, która może sięgać kilkudziesięciu m/godz.

◆ **Metoda nawijania włókien (ang. *filament winding*)**

Metoda nawijania polega na ciągłym nawijaniu włókien na obracający się rdzeń o kształcie bryły obrotowej (walec, stożek itd.), tak aby uzyskać pożądaną ich układ geometryczny. W zależności od kierunku obrotu rdzenia i sposobu przesuwu tzw. sanek z bębniem z nawiniętym włókniem można przeprowadzać nawijanie obwodowe (ang. *circumferential winding*), śrubowe (ang. *helical winding*) i planetarne (ang. *polar winding*). Dla przykładu - jeśli rdzeń walcowy obraca się wokół swej osi podłużnej, a sanki z rovingiem poruszają się tak, że taśmy z włóknami nawinięte są na rdzeniu niemal prostopadle do osi jego obrotu, to mówimy o nawijaniu obwodowym. Konstrukcja sanek z rovingiem i urządzenia obracającego rdzeniem umożliwia zmianę prędkości przesuwu sanek i prędkości obrotowej rdzenia, a tym samym zmianę kąta nawijania w zakresie 5-85°, dzięki czemu można uzyskiwać zwoje śrubowe o dowolnym kącie nawinięcia. Nawinięcie o przeciwnych zwojach zapewnia ruch sanek "tam i z powrotem". Nawijanie obwodowe i śrubowe pozwala zbroić jedynie pobocznicę brył obrotowych. Można zatem uzyskać w ten sposób np. rury, ale nie można wyprodukować np. zbiornika ciśnieniowego. W tym ostatnim przypadku należy zastosować oprócz nawijania obwodowego i śrubowego nawijanie planetarne, umożliwiające nawijanie rovingu także na denka

rdzenia. Taśmy rovingu używanego w metodzie nawijania mogą być wstępnie nasycone żywicą. Przed nawinięciem na rdzeń muszą one być ogrzane, tak, aby żywica przeszła w stan płynny. Również rdzeń musi być ogrzewany podczas nawijania w celu zapewnienia dokładnego powiązania ze sobą kolejnych nawijanych warstw. Taka metoda uzyskiwania kompozytu nosi nazwę nawijania z nasyceniem włókien na sucho. Alternatywną metodą jest nasycanie włókien na mokro, polegające na przeciąganiu włókien przed ich nawinięciem na rdzeń przez wannę z płynną żywicą.

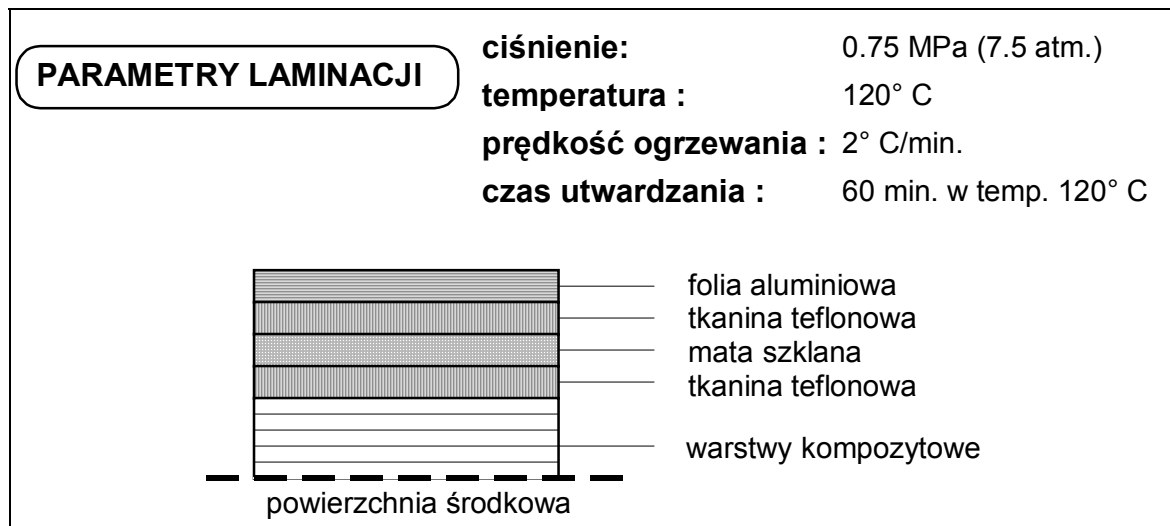
◆ Wytwarzanie kompozytów z taśm prepreg

Kompozyty wykonane z taśm prepreg należą w chwili obecnej do najczęściej stosowanych w produkcji elementów konstrukcyjnych, szczególnie takich, od których wymagane są wysokie parametry jakościowe. Zapewnia ją wysoka jakość "budulca" czyli taśm prepreg, wynikająca z regularnej budowy mikroskopowej, ściśle kontrolowanej przez producentów o światowej renomie (m.in. Du Pont, Ciba-Geigy). Dzięki temu kompozyty wykonane z takich taśm wyróżniają się małym rozrzutem wartości charakterystyk sprężysto-wytrzymałościowych. Taśmy "prepreg" mają szerokość kilkudziesięciu cm (np. szerokość taśmy NCHR 174B/37/132 - carbonT300/epoxy wynosi 30 cm), długość może być praktycznie dowolna, z reguły jest rzędu kilkudziesięciu metrów. Taśmy pokryte są obustronnie specjalnym, łatwo usuwalnym papierem woskowanym z zaznaczonym kierunkiem przebiegu włókien, umożliwiającym zwijanie taśmy w rolki bez ryzyka sklejenia się kolejnych zwojów. Okres przechowywania taśm "prepreg" i ich przydatności do wytwarzania kompozytów zależy od temperatury - przykładowo dla wspomnianych taśm NCHR wynosi on 30 dni w temperaturze pokojowej, 6 miesięcy w temp. +5°C i kilka lat w temp. poniżej -18°C.

Wykonanie kompozytu laminatowego zachodzi w dwóch podstawowych etapach. Pierwszy z nich polega na ułożeniu warstw w taki sposób, aby uzyskać kompozyt o żądanym kodzie. W dużej mierze odbywa się to "ręcznie", szczególnie gdy wykonuje się element o złożonym kształcie. Należy bowiem pamiętać, że kształt elementu odwzorowuje się już na tym etapie, aby w produkcie finalnym ograniczyć do minimum jego obróbkę mechaniczną i ilość odpadów powstałych w jej wyniku. Odpady bezpośrednio rzutują na cenę produktu finalnego, gdyż nie nadają się one do powtórnej przeróbki, tak jak ma to miejsce w przypadku odpadów metalowych, które po przetopieniu można ponownie wykorzystać. Uzyskany w wyniku ułożenia na sobie kolejnych warstw "stos" nie nadaje się do jakichkolwiek zastosowań ze względu na jego odkształcalność nawet pod ciężarem własnym oraz brak trwałego połączenia warstw.

Oba te efekty likwidowane są w drugim etapie wytwarzania laminatu - etapie laminacji, czyli trwałego łączenia warstw w sztywny element konstrukcyjny. Polega on na utwardzaniu (ang. *curing*) ułożonej sekwencji warstw, z zachowaniem odpowiednich parametrów dotyczących temperatury, ciśnienia i czasu wygrzewania. Wykorzystuje się w tym celu prasy z ogrzewanymi płytami, wyposażone w systemy umożliwiające sterowanie temperaturą i prędkością jej narastania. W celu zminimalizowania tzw. wytopów matrycy, a także zapobieżenia stąpieniu się warstw laminatu z powierzchnią płyt grzewczych, warstwy umieszcza się między specjalnymi okładzinami, tworzącymi strukturę "sandwiczową". Na rys. 1.4 pokazano przykładowo taką strukturę wraz z warunkami technologicznymi, jakie należy spełnić w celu uzyskania kompozytu laminatowego wykonanego z taśm "prepreg" VICOTEX NCHR 174B/37/132 (włókna węglowe/epoksydowa matryca).

Przedstawiono tu jedynie kilka wybranych metod wytwarzania kompozytów zbrojonych włóknami. Czytelnicy szczególnie zainteresowani technologią wytwarzania materiałów kompozytowych (a także ich składników, tzn. włókien i żywic), powinni sięgnąć do literatury specjalistycznej, dotyczącej technologicznych aspektów mechaniki kompozytów [np. Konsztowicz, K., *Kompozyty wzmacniane włóknami. Podstawy technologii*. Skrypt AGH].



Rys. 1.4. Parametry laminacji kompozytu z taśmy "prepreg" NCHR 174B/37/132.