

WPROWADZENIE

Definicja

Materiał kompozytowy (łac. *compositus* = złożony) - materiał zbudowany z co najmniej dwóch różnych składników, przy czym ich połączenie zachodzi na poziomie makroskopowym. W tym sensie 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.

Historia

- 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 nowoczesnych materiałów kompozytowych wiąże się z rozwojem technologii wytwarzania włókien sztucznych. Początek przypada na okres II wojny światowej (powstają włókna szklane). W latach 50-tych powstają włókna węglowe tzw. niskomodułowe (o niskim module sprężystości podłużnej), a w latach 60-tych wysokomodułowe. Kolejny etap rozwoju kompozytów spowodowało pojawienie się włókien aramidowych, znanych pod nazwą handlową Kevlar.

Walory kompozytów

- doskonałe parametry mechaniczne i wytrzymałościowe
- mały ciężar właściwy.

Główne zastosowania

"Kombinacja" powyższych cech występuje w zasadzie tylko w przypadku kompozytów, stąd gwałtownie rosnące w ostatnich latach ich wykorzystanie w konstrukcjach, dla pracy których ma ona pierwszorzędne znaczenie. Są to wszelkiego typu konstrukcje cienkościennie, a przede wszystkim:

- **konstrukcje lotnicze**. Samolot eksperymentalny Voyager firmy Hercules (laminat epoksyd/włókno węglowe) pokonał trasę dookoła świata bez międzylądowań. Pomijając małe samoloty sportowe (w tym szybowce) jest to jedyna znana konstrukcja o całkowicie kompozytowej budowie. Firmy lotnicze stosują kompozyty do produkcji pojedynczych elementów samolotów np. stateczników, a przy wprowadzaniu do produkcji nowych elementów kierują się daleko posuniętą ostrożnością - pomne kłopotów finansowych firmy Rolls-Royce, spowodowanych projektem produkcyjnym łopatek turbin do silników odrzutowych.
- **konstrukcje samochodowe** (nadwozia samochodowe, spoilery itp.).
- **konstrukcje budowlane** (np. rury, zbiorniki ciśnieniowe, osadniki, studzienki itp.)
- **sprzęt sportowy** (łódzie, narty, rakietki tenisowe, rowery) – ok. 60% wykorzystania kompozytów.

PODSTAWOWE INFORMACJE O MATERIAŁACH KOMPOZYTOWYCH

Składniki

- Fazy ciągłej zwanej **osnową (matrycą)**
- Fazę **rozproszoną**, zwaną także **zbrojeniem**, otoczona osnową.

Wypadkowe własności kompozytu są zależne od własności faz składowych, ich udziału objętościowego,, 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
- ◆ zbrojone włóknami.

Kompozyty zbrojone cząstkami i dyspersyjnie

- Kompozyty **zbrojone cząstkami** to takie kompozyty, w których obciążenie zewnętrzne przenoszone jest tak przez osnowę, jak i fazę rozproszoną w postaci cząsteczek o sztywności i twardości większej od sztywności i twardości osnowy. Mechanizm wzmocnienia polega na ograniczaniu przez cząstki odkształceń osnowy w obszarze położonym w pobliżu powierzchni każdej cząstki. Wzmocnienie jest efektywne, jeżeli cząstek jest odpowiednio dużo, tzn. powyżej 20% objętości kompozytu (niekiedy nawet 90%), są one w miarę równomiernie rozłożone w kompozycie i mają zbliżone wymiary we wszystkich kierunkach. Przykłady kompozytów tego typu to: beton, wyroby oponiarskie, spieki ceramiczno-metalowe, tzw. **cermety** (metalowa osnowa wzmocniona cząstkami ceramicznymi). Najczęściej stosowanym spośród nich jest węgiel spiekany, o osnowie kobaltowej lub niklowej zbrojonej cząstkami ceramicznymi z węgla wolframu lub tytanu w ilości ok. 90% objętości kompozytu. Cermety służą do 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. Wzmocnienie zachodzi na poziomie mikroskopowym (atomowym lub molekularnym) i polega na utrudnianiu przez rozproszone cząstki ruchu dyslokacji w matrycy. Obciążenie zewnętrzne przenosi głównie osnowa, zbrojenie dyspersyjne nie poprawia więc 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 kompozytu na pełzanie.

Kompozyty zbrojone włóknami (kompozyty włókniste)

- **Kompozyty zbrojone włóknami** to kompozyty, w których fazę wzmacniającą, służącą jako element nośny, stanowią różnego rodzaju włókna. Osnowa stanowi spoiwo łączące włókna, zapewnia rozdział obciążenia zewnętrznego między włókna, oraz chroni je przed czynnikami zewnętrznymi; w niewielkim natomiast stopniu uczestniczy w przenoszeniu obciążeń zewnętrznych.
- **kompozyty włókniste** są najbardziej efektywnymi spośród materiałów kompozytowych, tzn. wykazują najlepsze własności mechaniczne i wytrzymałościowe przy najmniejszym ciężarze właściwym. Jedyną ich wadą w porównaniu z kompozytami zbrojonymi cząstkami i dyspersyjnie jest cena, z reguły wyższa.
- **Osnowy** w kompozytach włóknistych są metalowe, a częściej z żywic polimerowych.
- Najczęściej stosowanymi **osnowami 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 węgla krzemu) i metalowych (wolfram). Kompozyty o metalowych osnowach wykazują bardzo dobre własności mechaniczno-wytrzymałościowe w wysokich temperaturach (dużą odpornością na pełzanie i pękanie) i są wykorzystywane do produkcji turbin silników lotniczych.
- Podstawowe znaczenie praktyczne mają kompozyty włókniste o **osnowach polimerowych** (żywice termoplastyczne i termoutwardzalne) zbrojonych włóknami węglowymi, grafitowymi, szklanymi, boronowymi i aramidowymi.

Typy i własności włókien

- **Powód stosowania włókien:** duża sztywność i wytrzymałość, wielokrotnie większa od wartości odpowiednich charakterystyk dla materiału w postaci masowej (np. wytrzymałość na rozciąganie typowych stali jest rzędu 0.2-0.7 GPa, zaś wytrzymałość cienkich włókien stalowych wynosi ok. 4 GPa).
- **Podstawowy wskaźnik efektywności włókna:** 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.
- **Najczęściej stosowane włókna:** włókna szklane, grafitowe, węglowe i organiczne.
 - ◆ **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, udarnościowe, 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.

PARAMETR	RODZAJ WŁÓKNA					
	szklane E	szklane S	grafitowe	Kevlar 49	boron	stal
Średnica [μm]	16	16	7 - 8	12	100 - 200	
Ciężar właściwy ρ [kN/m^3]	25 - 25.5	24.5	13.8 - 18.6	14.1	25.5	78.5
Wytrzymałość na rozciąganie S [GPa]	1.7 - 3.5	2.5 - 4.8	1.7 - 2.8	2.3 - 3.6	3.5	~ 4
Wytrzymałość właściwa S/ρ [km]	68 - 136	103 - 197	123 - 163	161 - 257	135	51
Moduł Younga E [GPa]	72	86	230 - 250	120 - 124	400 - 410	200
Moduł właściwy E/ρ [$\text{km} \times 10^3$]	2.8	3.5	12.4 - 18.1	8.5 - 8.8	16	2.6

TABELA 1. Własności wybranych włókien.

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

TABELA 2. Ogólna charakterystyka porównawcza podstawowych grup włókien.

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 także w przenoszeniu obciążeń. Zasadniczo jednak matryca ma mały wpływ na charakterystyki sztywnościowe i wytrzymałościowe kompozytu.
- Podstawowe klasy osnów to **żywice termoutwardzalne** i **żywice termoplastyczne**.
- **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 powtórnego twardnienia. Są one twardsze i bardziej wytrzymałe, choć także bardziej kruche niż tworzywa termoplastyczne. Ważną ich zaletą 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.

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

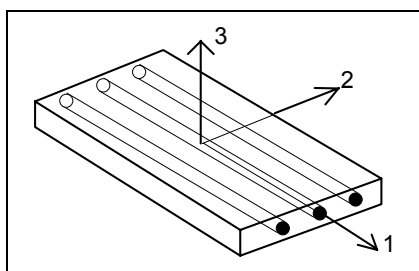
TABELA 3. Własności żywic w temperaturze pokojowej

BUDOWA KOMPOZYTU

Warstwa

Podstawowym elementem składowym kompozytu jest pojedyncza **warstwa**, zwana także **laminą**. Tworzą ją włókna połączone między sobą żywicą. Włókna są 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 np. ciągłe, długie włókna mogą przebiegać w warstwie w jednym kierunku – warstwa taka nosi nazwę warstwy **jednokierunkowej**.



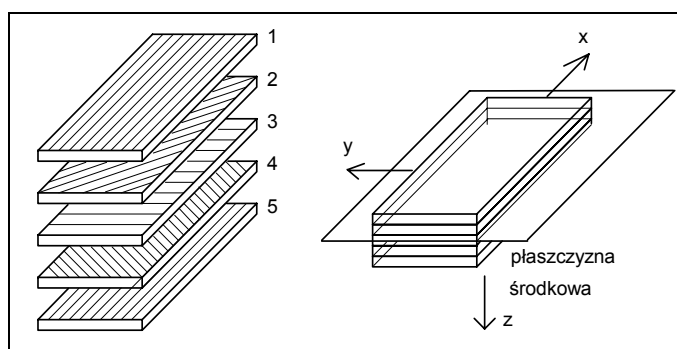
Rys. 1. Warstwa z włóknami jednokierunkowymi

Konfiguracja geometryczna warstwy względem przyjętego układu odniesienia przedstawiona na rys. 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" prostopadłe do kierunku włókien, a oś "3" jest prostopadła do płaszczyzny (1, 2), czyli zarazem płaszczyzny warstwy.

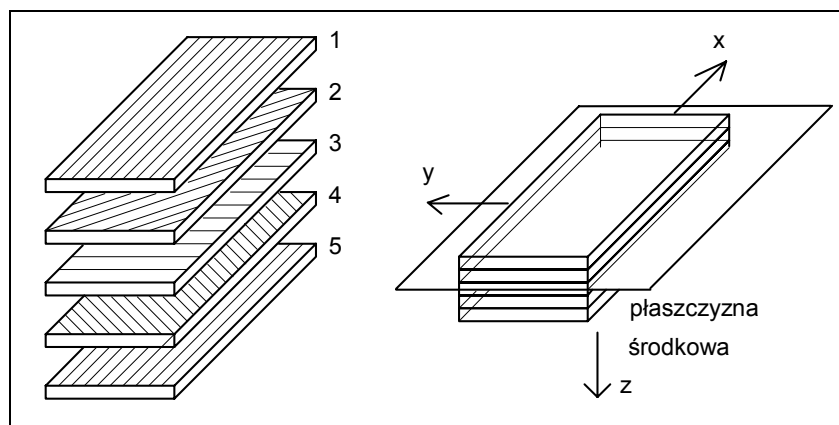
Każdy inny układ współrzędnych, powstały poprzez obrót układu (1, 2, 3) wokół osi "3" będziemy nazywać **układem nieosiowym**, lub alternatywnie - konfigurację laminatu w takim układzie nazwiemy **konfiguracją nieosiową** (ang. *off-axis*).

Laminat

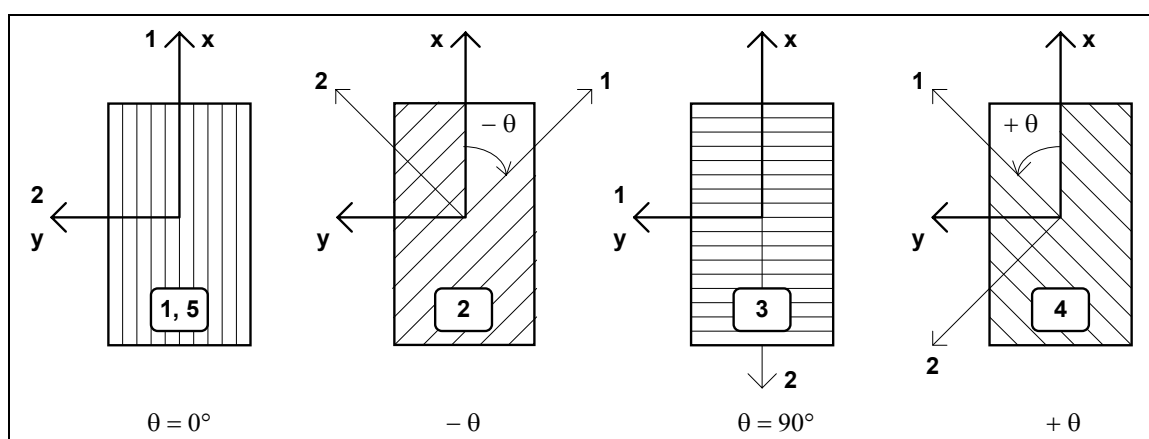
- **Laminat** to zbiór warstw (lamin) ułożonych jedna na drugiej i połączonych trwale ze sobą. Z reguły główne osie materiałowe poszczególnych warstw (częściej grup warstw) obrócone są względem układu odniesienia (x, y, z) (obróć wokół osi z) przyjętego dla laminatu, tak więc w układzie (x, y, z) warstwy przyjmują konfigurację nieosiową.
- Z reguły warstwy lub ich grupy różnią się między sobą jedynie orientacją włókien, nie różnią się natomiast materiałem (jedynie w bardzo specjalnych sytuacjach łączy 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. (np. **CFRP** - **C**arbon **F**ibers **R**einforced **P**olymeric **m**atrix tzn. laminat o żywicy polimerowej zbrojonej włóknami węglowymi).



- Sposób ułożenia warstw (orientację włókien) w laminacie określa się za pomocą **koðu** podającego kąty pod jakimi przebiegają włókna w każdej warstwie w przyjętym układzie odniesienia oraz ilość warstw o danej orientacji. 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. 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. 2. Budowa laminatu warstwowego.



Rys. 3. Orientacja kątowa warstw laminatu

- Idąc od góry (tzn. od warstwy 1 do warstwy 5) napotykamy kolejno warstwy o orientacji 0° , $-\theta$, 90° , $+\theta$, 0° . Kod laminatu ma zatem postać $[0/-\theta/90/+\theta/0]$. 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.

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).

- **Metoda kontaktowa.** 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. Stosuje się wykonane z włókien maty i tkaniny, które

przycina się tak, aby odwzorowywały 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.

- **Metoda natryskowa.** Jest to 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.

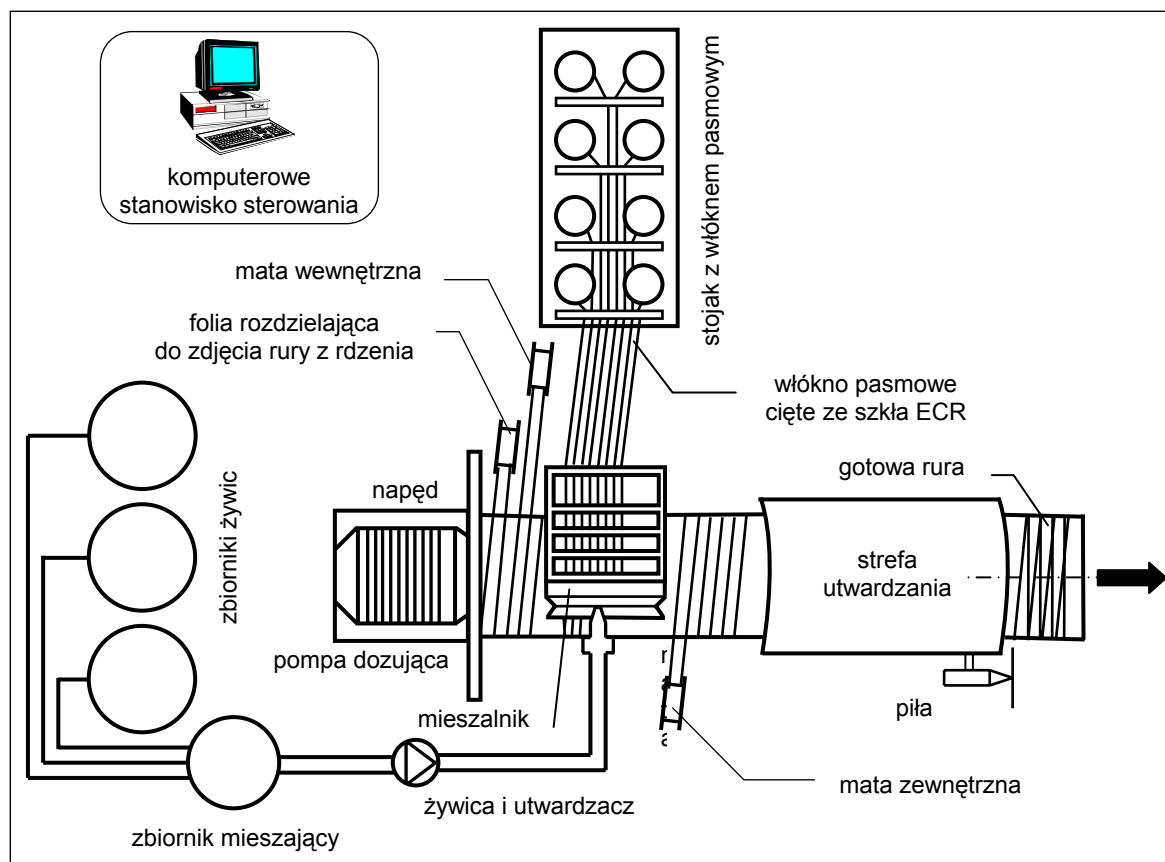
- **Metoda ciągła wytwarzania prętów, rur i kształtowników (ang. *pultrusion*).**

Metody ciągłe 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 tłocznic, 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 tak "półprodukt" przeciągany jest przez kolejny, bardzo precyzyjny tłocznic, 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.

- **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 włóknem można przeprowadzać nawijanie obwodowe, śrubowe i planetarne. 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 pomocznice 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 przeciągnięciu włókien przed ich nawinięciem na rdzeń przez wannę z płynną żywicą.



Rys.4. Schemat produkcji rur GRP (schemat urządzenia firmy Drostholm Products, 1967)

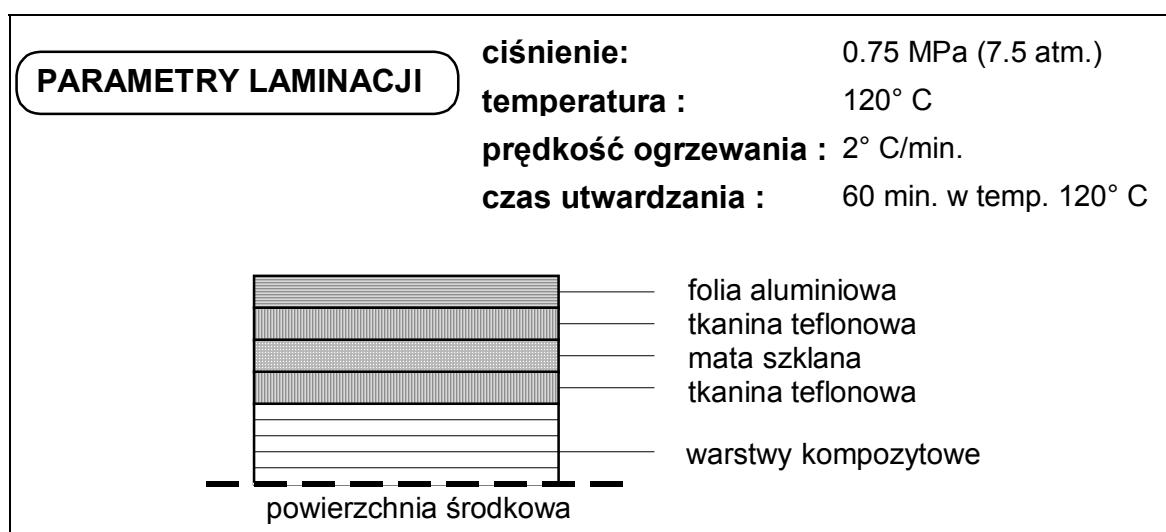
• Wytwarzanie kompozytów z taśm prepreg

Kompozyty wykonane z taśm prepreg są najczęściej stosowane w produkcji elementów konstrukcyjnych, 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). 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 produkcji 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".



Rys. 5. Parametry laminacji kompozytu z taśmy "prepreg" NCHR 174B/37/132.