

Wacław Królikowski

# Polimerowe kompozyty konstrukcyjne

 PWN

# Polimerowe kompozyty konstrukcyjne

*Książkę tę poświęcam mojej żonie Ewie*

Wacław Królikowski  
Autor

Wacław Królikowski

Polimerowe kompozyty  
konstrukcyjne

Projekt okładki i stron tytułowych **Małgorzata Penczonek**

Ilustracja na okładce almagami / shutterstock

Redaktor inicjujący **Izabela Mika**  
**Kinga Tomaszewska**

Redaktor **Anna Dudek**

Koordynator produkcji **Mariola Grzywacka**

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując jej część, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo  
Więcej na [www.legalnakultura.pl](http://www.legalnakultura.pl)  
*Polska Izba Książki*

Copyright © by Wydawnictwo Naukowe PWN SA  
Warszawa 2012

ISBN 978-83- 01-16881-0

Wydanie I - 1 dodruk  
Warszawa 2017

Wydawnictwo Naukowe PWN SA  
02-460 Warszawa, ul. Gottlieba Daimlera 2  
tel. 22 69 54 321, faks 22 69 54 288  
infolinia 801 33 33 88  
e-mail: [pwn@pwn.com.pl](mailto:pwn@pwn.com.pl), [www.pwn.pl](http://www.pwn.pl)  
Druk i oprawa OSDW Azymut Sp z o.o.

# Spis treści

<b>Przedmowa</b> . . . . .	9
<b>Wykaz stosowanych symboli i skrótów</b> . . . . .	11
<b>Rozdział 1. Wiadomości wstępne o kompozytach</b> . . . . .	15
1.1. Rodzaje kompozytów ze względu na typ fazy rozproszonej . . . . .	16
1.2. Powierzchnie rozdziału (graniczne) . . . . .	16
1.3. Współczynnik kształtu . . . . .	17
1.4. Rodzaje kompozytów ze względu na typ matrycy . . . . .	17
1.5. Kompozyty polimerowe . . . . .	17
1.6. Składniki polimerowych kompozytów konstrukcyjnych. . . . .	20
Literatura . . . . .	20
<b>Rozdział 2. Polimery</b> . . . . .	21
2.1. Właściwości fizyczne polimerów . . . . .	24
2.2. Ważniejsze polimery stosowane do wytwarzania wyrobów kompozytowych. . . . .	29
2.2.1. Żywice termoutwardzalne (duroplasty) . . . . .	30
2.2.1.1. Nienasycone żywice poliestrowe (NŻPE) i winyloestrowe (VE) . . . . .	30
2.2.1.2. Żywice epoksydowe . . . . .	34
2.2.1.3. Porównanie żywic poliestrowych, winyloestrowych i epoksydowych . . . . .	36
2.2.1.4. Żywice fenolowo-formaldehydowe. . . . .	38
2.2.2. Termoplasty jako matryce kompozytów . . . . .	41
2.2.2.1. Poliolefiny (polietylen, polipropylen) . . . . .	41
2.2.2.2. Poliamidy . . . . .	44
2.2.2.3. Poliestry termoplastyczne – PET, PBT, PC . . . . .	45
2.2.2.4. Porównanie właściwości kompozytów termoplastycznych. . . . .	47
Literatura . . . . .	49
<b>Rozdział 3. Napełniacze i wzmocnienia</b> . . . . .	50
3.1. Napełniacze ziarniste . . . . .	50
3.2. Włókna wzmacniające . . . . .	52
3.2.1. Włókna szklane tekstylne . . . . .	52
3.2.2. Preparacje powierzchniowe włókien szklanych . . . . .	56
3.2.3. Roving szklany – podstawowy rodzaj wzmocnienia kompozytów . . . . .	59
3.2.4. Inne formy wzmocnień włóknistych . . . . .	62
3.2.4.1. Włókniny, maty, preformy . . . . .	64
3.2.4.2. Tkaniny. . . . .	66
3.2.4.3. Dzianiny i wzmocnienia splatane. . . . .	71

3.2.5. Włókna węglowe . . . . .	72
3.2.5.1. Właściwości włókien węglowych . . . . .	73
3.2.5.2. Struktura włókien węglowych . . . . .	76
3.2.5.3. Powierzchnia włókien węglowych . . . . .	77
3.2.5.4. Wytwarzane rodzaje przędz z włókien węglowych . . . . .	78
3.2.5.5. Rynek i zastosowanie włókien węglowych . . . . .	78
3.2.6. Włókna aramidowe . . . . .	83
3.2.7. Włókna polietylenowe o dużej wytrzymałości . . . . .	88
3.2.8. Inne włókna nieorganiczne. . . . .	90
3.2.8.1. Włókna borowe . . . . .	90
3.2.8.2. Włókna z węgla krzemu (SiC) . . . . .	93
3.2.8.3. Włókna metaliczne . . . . .	96
3.2.8.4. Włókna monokrystaliczne (ang. <i>whiskers</i> ) . . . . .	97
3.2.8.5. Mikrowłókna. . . . .	101
3.2.8.6. Krótkie włókna mineralne z materiałów naturalnych . . . . .	103
3.2.8.7. Różne włókna cięte i mielone. . . . .	104
3.2.9. Włókna roślinne . . . . .	105
3.2.9.1. Budowa włókien roślinnych. . . . .	106
3.2.9.2. Produkty i włókna z drewna. . . . .	109
3.2.9.3. Mączka drzewna . . . . .	111
3.2.9.4. Włókna drzewna . . . . .	111
3.2.9.5. Celuloza . . . . .	112
Literatura . . . . .	113
<b>Rozdział 4. Materiały lekkie do kompozytowych konstrukcji przekładkowych (sandwicz).</b>	116
4.1. Polimerowe rdzenie porowate . . . . .	117
4.1.1. Pianki poliuretanowe . . . . .	117
4.1.2. Polistyren ekspandowany (styropian) . . . . .	117
4.1.3. Pianki z poli(chloru winyłu) . . . . .	118
4.1.4. Rdzenie z pianek poliimidowych . . . . .	119
4.1.5. Pianki fenolowo-formaldehydowe . . . . .	121
4.1.6. Porowate materiały poliolefinowe z PP i PE . . . . .	121
4.2. Rdzenie lekkie z drewna . . . . .	121
4.3. Rdzenie komórkowe typu plaster miodu. . . . .	121
4.4. Lekkie rdzenie kompozycyjne . . . . .	124
Literatura . . . . .	127
<b>Rozdział 5. Struktura i właściwości kompozytów polimerowych</b>	128
5.1. Wprowadzenie do teorii wzmocnienia . . . . .	128
5.1.1. Kompozyty wzmocnione włóknami długimi . . . . .	129
5.1.2. Kompozyty wzmocnione włóknami krótkimi . . . . .	137
5.1.3. Odporność uderzeniowa kompozytów . . . . .	145
5.2. Kompozyty o wzmocnieniu różnokierunkowym . . . . .	151
5.2.1. Kompozyty o wzmocnieniu ortotropowym . . . . .	156
5.3. Podstawowe typy kompozytów o różnym układzie włókien. . . . .	158
5.4. Kompozyty o wzmocnieniu hybrydowym . . . . .	159
5.5. Wpływ naprężeń skurczowych w kompozycie . . . . .	160
5.6. Krzywe odkształceń kompozytów. . . . .	162
5.6.1. Przestrzenne odkształcenia kompozytów pod obciążeniem . . . . .	164
5.7. Pełzanie, wytrzymałość trwała i zmęczenia kompozytów . . . . .	168
5.7.1. Pełzanie . . . . .	168

5.7.2. Wytrzymałość trwała . . . . .	169
5.7.3. Wytrzymałość zmęczeniowa przy obciążeniach zmiennych . . . . .	170
5.8. Zespoleńie składników kompozytów . . . . .	172
5.8.1. Adhezja polimerów do włókien wzmacniających i środki proadhezyjne . . . . .	173
5.8.1.1. Związki krzemoorganiczne . . . . .	174
5.8.1.2. Oddziaływanie wzajemne silanów z polimerami w kompozytach . . . . .	177
5.8.1.3. Organiczne związki tytanowe . . . . .	182
5.8.2. Zwilżalność i adhezja . . . . .	185
5.8.2.1. Zwilżalność powierzchni stałych . . . . .	185
5.8.3. Rola rozwinięcia powierzchni granicznych . . . . .	190
5.8.4. Teorie wpływu warstwy granicznej na właściwości kompozytów . . . . .	192
Literatura . . . . .	193
<b>Rozdział 6. Metody technologiczne wytwarzania wyrobów kompozytowych . . . . .</b>	<b>194</b>
A. Kompozyty z użyciem polimerów termoutwardzalnych . . . . .	194
A6.1. Laminowanie ręczne (kontaktowe) . . . . .	194
A6.2. Laminowanie natryskowe . . . . .	197
A6.3. Laminowanie z zastosowaniem elastycznego worka . . . . .	198
A6.4. Technologie formowania infuzyjnego . . . . .	200
A6.4.1. Formowanie infuzyjne pod próżnią . . . . .	201
A6.4.2. Metody RTM . . . . .	202
A6.5. Formowanie z zastosowaniem autoklawu . . . . .	205
A6.6. Formowanie metodą RIM . . . . .	207
A6.7. Formowanie ciśnieniowe z użyciem pras . . . . .	208
A6.7.1. Ciśnieniowe formowanie kompozytów warstwowych na podstawie żywic polikondensacyjnych . . . . .	209
A6.7.2. Kompozyty warstwowe z preimpregnatów z żywic polimeryzacyjnych . . . . .	211
A6.7.3. Formowanie tłoczne niskociśnieniowe laminatów na zimno . . . . .	212
A6.7.4. Formowanie wysokociśnieniowe laminatów na gorąco z użyciem żywic ciekłych . . . . .	213
A6.8. Tłoczywa termoutwardzalne . . . . .	215
A6.8.1. Tłoczywa termoutwardzalne z żywic polikondensacyjnych . . . . .	216
A6.8.2. Tłoczywa termoutwardzalne z żywic polimeryzacyjnych . . . . .	218
A6.8.2.1. Wzmocnione tłoczywa poliestrowe . . . . .	219
A6.8.2.2. Tłoczywa epoksydowe . . . . .	232
A6.8.2.3. Tłoczywa silikonowe . . . . .	234
A6.9. Formowanie metodą nawijania . . . . .	235
A6.10. Formowanie rur i walczków metodą odlewania odśrodkowego . . . . .	241
A6.11. Formowanie metodą programowanego układania rovingu lub taśm – AFP . . . . .	242
A6.12. Formowanie profili metodą przeciągania – pultruzji . . . . .	243
A6.13. Produkcja płyt płaskich i falistych . . . . .	246
A6.14. Wysokonapełnione kompozycje utwardzalne . . . . .	248
A6.14.1. Betony żywiczne . . . . .	249
A6.14.2. Zaprawy budowlane . . . . .	252
A6.14.3. Kity i szpachłówki . . . . .	253
A6.14.4. Sztuczne kamienie . . . . .	253
A6.14.5. Zamienniki ceramiki technicznej . . . . .	253
A6.14.6. Okładziny i tarcze cierne . . . . .	254
B. Kompozyty z użyciem polimerów termoplastycznych . . . . .	254
B6.1. Wytwarzanie wyrobów kompozytowych metodą wtrysku . . . . .	255



B6.1.1. Termoplasty wzmocnione włóknami krótkimi . . . . .	255
B6.1.2. Termoplasty wtryskowe wzmocnione włóknami długimi – LFT . . . . .	257
B6.2. Termoplasty wzmocnione matami – TWM . . . . .	263
B6.2.1. Technologia wytłaczania . . . . .	264
B6.2.2. Technologia impregnacji proszkowej . . . . .	264
B6.2.3. Technologie papiernicze . . . . .	265
B6.2.4. Przetwórstwo TWM. . . . .	265
B6.3. Wytwarzanie płyt kompozytowych z termoplastów innych niż TWM. . . . .	267
B6.4. Wytwarzanie metodą RIM. . . . .	268
B6.5. Profile kompozytowe z termoplastów . . . . .	270
B6.6. Formowanie metodą nawijania i układania wzmocnienia – AFP . . . . .	271
B6.7. Technologie z użyciem półproduktów w postaci przędz hybrydowych (Twintex®)	272
Literatura . . . . .	273
<b>Rozdział 7. Nanokompozyty polimerowe . . . . .</b>	<b>275</b>
7.1. Interakcja polimer–nanonapełniacz. . . . .	276
7.2. Nanokompozyty z nanocząstkami sferycznymi – „proszkowymi” 3D. . . . .	277
7.3. Nanokompozyty z udziałem krzemianów warstwowych – 2D. . . . .	278
7.3.1. Krzemiany warstwowe . . . . .	278
7.3.2. Modyfikacja montmorylonitu . . . . .	280
7.3.3. Struktura nanokompozytów . . . . .	281
7.3.4. Wytwarzanie nanokompozytów z krzemianami warstwowymi. . . . .	282
7.3.4.1. Dyspergowanie i adsorpcja . . . . .	282
7.3.4.2. Polimeryzacja interkalacyjna <i>in situ</i> . . . . .	283
7.3.4.3. Interkalacja w stopie . . . . .	284
7.3.4.4. Właściwości i zastosowanie . . . . .	284
7.4. Nanokompozyty z cząstkami 1D . . . . .	290
7.4.1. Nanowłókna i nanorurki węglowe – CNT ( <i>Carbon Nanotubes</i> ) i CNF ( <i>Carbon Nanofibers</i> ). . . . .	290
7.4.1.1. Wytwarzanie nanorurek węglowych . . . . .	293
7.4.1.2. Modyfikacja powierzchni nanorurek węglowych. . . . .	294
7.4.1.3. Wytwarzanie nanokompozytów z CNT. . . . .	296
7.4.1.4. Właściwości nanokompozytów z CNT . . . . .	296
Literatura . . . . .	298
<b>Rozdział 8. Polimery samowzmocnione. . . . .</b>	<b>300</b>
8.1. Wytwarzanie fibrylarnej struktury szaszykowej . . . . .	300
8.2. Wyroby płytowe. . . . .	303
8.3. Polimery ciekłokrystaliczne – LCP . . . . .	304
Literatura . . . . .	309
<b>Rozdział 9. Podstawy obliczeń i projektowania konstrukcji kompozytowych</b>	
<i>Witold Biedunkiewicz . . . . .</i>	<i>310</i>
9.1. Aspekty wytrzymałościowe kompozytowych elementów konstrukcyjnych . . . . .	312
9.2. Hipotezy wytrzymałościowe . . . . .	319
9.3. Analiza struktur kompozytowych metodą elementów skończonych . . . . .	324
Literatura . . . . .	326
<b>Skorowidz . . . . .</b>	<b>327</b>

---

# Przedmowa

Niniejsza książka zawiera poszerzony materiał przedmiotu „Polimerowe kompozyty konstrukcyjne” powołanego w latach akademickich 2008/2009 do 2010/2011 na wszystkich wydziałach Politechniki Szczecińskiej (obecnie: Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie) przez rektora prof. dr. hab. inż. Włodzimierza Kiernożyckiego. Jego decyzją wydanie tego opracowania przez PWN zostało dofinansowane przez uczelnię, za co składam Mu, jako autor, gorące podziękowanie.

Jest to więc książka o charakterze dydaktyczno-informacyjnym, a nie monografia. Przeznaczona jest dla różnych specjalistów, o różnym poziomie wykształcenia i znajomości zagadnień chemii i polimerów. Mogą z niej korzystać studenci, a także pracownicy przemysłu i rzemiosła. Z tego względu konieczne było zawarcie w niej także podstawowych wiadomości o polimerach stanowiących, zgodnie z tytułem, istotny składnik omawianych kompozytów. Dlatego znaczna część zamieszczonej literatury to publikacje książkowe stanowiące materiał uzupełniający, pomocny do poszerzenia wiedzy z poszczególnych dziedzin. Literatura źródłowa została zamieszczona w przypadkach, w których wydawało się to celowe.

Wyrażam przekonanie, że książka ta przyczyni się do wzrostu prawidłowego stosowania kompozytów polimerowych w różnych dziedzinach gospodarki.

*Wacław Królikowski*



# Wykaz stosowanych symboli i skrótów

## Symbole

$T_g$	– temperatura zeszklenia
$T_i$	– temperatura topnienia
$T_p$	– temperatura płynięcia
$T_{kr}$	– temperatura kruchości
$E$	– moduł sprężystości
$E_m$	– moduł sprężystości przy rozciąganiu
$E_g$	– moduł sprężystości przy zginaniu
$E_\tau$	– moduł sprężystości przy ścinaniu
$G$	– moduł sztywności postaciowej
$R_m$	– wytrzymałość na rozciąganie
$R_g$	– wytrzymałość na zginanie
$R_\tau$	– wytrzymałość na ścinanie
$R_c$	– wytrzymałość na ściskanie
$R_p$	– granica proporcjonalności
$\epsilon_m$	– odkształcenie/wydłużenie przy zerwaniu
$P$	– siła
$\sigma$	– naprężenie przy rozciąganiu
$\tau$	– naprężenie przy ścinaniu
$d$	– średnica, grubość lub odstęp
$D$	– średnica
$r$	– promień
$\bar{X}$	– wartość średnia
$l_w$	– długość włókna
$l_c$	– krytyczna długość włókna
$\Delta l$	– przyrost długości
$V$	– objętość
$W$	– praca
$W_{adh}$	– praca adhezji
$\gamma$	– napięcie powierzchniowe
$\eta$	– lepkość
$\nu$	– współczynnik Poissona
$R_{m1}, R_{c1}, R_{m2}, R_{c2}, R_{m3}, R_{c3}$	– wytrzymałości na rozciąganie (m) i ściskanie (c) w trzech osiach (1, 2, 3)
$R_{\perp 1}, R_{\perp 2}, R_{\perp 3}$	– wytrzymałości na ścinanie w płaszczyźnie prostopadłej odpowiednio do osi 1, 2, 3
$X_r, X_c, Y_r, Y_c$	– wytrzymałości na rozciąganie (r) i ściskanie (c) w kierunkach osi 1, 2
$S$	– wytrzymałość na ścinanie w płaszczyźnie prostopadłej do osi 3, skurcz

$\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$	- naprężenia odpowiednio: normalne w kierunkach 1 i 2 oraz ścinające w płaszczyźnie 1-2
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_{12}$	- odkształcenia odpowiednio: liniowe w kierunkach 1 i 2 oraz postaciowe w płaszczyźnie 1-2
$\varepsilon_{Xkr}, \varepsilon_{Ykr}, \varepsilon_{Xkc}, \varepsilon_{Ykc}$	- odkształcenia krytyczne przy rozciąganiu (r) i ściskaniu (c) w kierunkach osi 1, 2
$\gamma_s$	- postaciowe odkształcenie krytyczne w płaszczyźnie prostopadłej do osi 3 (płaszczyzna 1-2)
$\sigma_x$	- naprężenie określone w układzie xyz obróconym o kąt $\alpha$ względem układu 123 (wokół osi 3)

## Skróty nazw materiałów i technologii

AFP	- formowanie kompozytów metodą sterowanego numerycznie układania pasm włókien
CHM	- włókna węglowe o dużym module
CNF	- nanowłókna węglowe
CNT	- nanorurki węglowe
DMC/BMC	- poliestrowe tłoczywa wzmocnione, miękkie
ECPF	- włókna polietylenowe o dużej wytrzymałości o strukturze rozciągniętych makrocząsteczek
HDT	- temperatura ugięcia wg ASTM
HET	- kwas heksachloroendometylenotetrawodoroftalowy
LFT	- termoplasty wzmocnione włóknami długimi
LP	- tłoczywa o małym skurczu
MAO	- metyloaluminoksan
MDI	- 4,4'-diizocyjaniandifenylometanu
MEK	- wodoronadtlenek metyloetyloketonu
MMT	- montmorylonit
MWCNT	- nanorurki węglowe wielościennie
NB	- nadtlenek benzoilu
NŻPE	- nienasycone żywice poliestrowe
PMI	- pianka polimetakryloimidowa
PO	- poliolefiny
PU	- poliuretan
PUR	- pianka poliuretanowa
RIM	- formowanie polimerowych wyrobów metodą wtrysku reaktywnego
RTM	- formowanie wyrobów kompozytowych metodą tłoczenia/zasysania żywicy
SMC	- poliestrowe tłoczywa wzmocnione, warstwowe
SWCNT	- nanorurki węglowe jednościenne
TECZA	- trietylenotetraamina
TP	- termoplasty
TU	- duroplasty
TWM	- termoplasty wzmocnione matami rovingowymi
UD	- wzmocnienie z włókien ułożonych kierunkowo
VE	- żywice winyloestrowe
WA	- włókna aramidowe
WB	- włókna bazaltowe
WC	- włókna węglowe
WS	- włókno szklane
ZE	- żywice epoksydowe

## Akronimy omawianych polimerów

ABS	– terpolimer akrylonitryl-butadien-styren
HDPE	– polietylen o dużej gęstości
HIPS	– polistyren wysokoudarowy
LCP	– polimery ciekłokrystaliczne
LDPE	– polietylen o małej gęstości
L-LDPE	– polietylen liniowy o małej gęstości
PA	– poliamid
PAN	– poliakrylonitryl
PAR	– poliarylan
PAS	– poliarylosulfon
PBT	– poli(tereftalan butylenu)
PC	– poliwęglan
PE	– polietylen
PEEK	– polieteroeteroketon
PEI	– polieteroimid
PES	– polieterosulfon
PET	– poli(tereftalan etylenu)
PI	– poliimid
PMMA	– poli(metakrylan metylu) (Pleksi)
PMI	– polimetakryloimid
POM	– polioksymetylen
POV	– poli(tlenek winylidenu)
PP	– polipropylen
PPE/PPO	– poli(tlenek fenylenu)
PPS	– poli(siarczek fenylenu)
PS	– polistyren
PSU	– polisulfon
PTFE	– politetrafluoroetylen (Teflon)
PVC	– poli(chlorek winylu)
SAN	– kopolimer styren–akrylonitryl
UHMWPE	– polietylen o szczególnie dużym ciężarze cząsteczkowym



# Wiadomości wstępne o kompozytach

Czym są kompozyty, inaczej zwane materiałami kompozytowymi (ang. *composites*, niem. *Verbundwerkstoffe*)?

Encyklopedia Powszechna PWN (1988, tom 5, s. 187) podaje następującą definicję tych materiałów:

„Kompozyt jest to materiał utworzony z co najmniej 2 komponentów (faz) o różnych właściwościach w taki sposób, że ma właściwości lepsze i (lub) właściwości nowe (dodatkowe) w stosunku do komponentów użytych osobno lub wynikających z prostego sumowania tych właściwości – kompozyt jest materiałem zewnętrze monolitycznym, jednakże z widocznymi granicami między komponentami”.

Definicja ta dobrze charakteryzuje te złożone materiały.

Kompozyty są bardzo rozpowszechnione w przyrodzie – są nimi np. drewno i kości. Człowiek od bardzo dawna wytwarza materiały kompozytowe. Już w czasach prehistorycznych wytwarzano cegły gliniane wzmocnione słomą i budowano lepianki z gliny z trzcina jako wzmocnieniem.

Kompozyty składają się, zgodnie z przytoczoną definicją, z dwóch rozdzielnych faz, od których właściwości oraz ich stosunków ilościowych zależą właściwości i zakres użytkowania kompozytu. Jedna jest fazą ciągłą nadającą kształt i wygląd wyrobu oraz jego zewnętrze monolityczny charakter. Druga jest fazą rozproszoną wnoszącą określone właściwości kompozytu. Faza ciągła – łącząca, w terminologii anglojęzycznej określana terminem „matrix”, łączy cząstki fazy rozproszonej. W terminologii polskiej terminowi matrix odpowiadają terminy „matryca” lub „osnowa”. Jedną z podstawowych zalet wytwarzanych kompozytów jest, że przez dobór składników, ich stosunków ilościowych oraz struktury można ich właściwości zaplanować także pod kątem ich kierunkowości.

O dużym znaczeniu materiałów kompozytowych we współczesnej technice i gospodarce może świadczyć ok. trzydzieści tytułów czasopism naukowo-technicznych poświęconych specjalnie tym materiałom (obok tytułów podano współczynniki listy filadelfijskiej, Impact Factor, IF w 2009 roku): 1. *Advanced Composite Materials* 0,500, 2. *Advanced Composites Bulletin*, 3. *Advanced Composites Letters* 0,311, 4. *Applied Composite Materials* 0,723, 5. *Composite Interfaces* 0,670, 6. *Composites Structures*



2,006, 7. Composites Part A Applied Science and Manufacturing 2,410, 8. Composites Part B Engineering 1,704, 9. Composites Science and Technology 2,901, 10. Journal of Composite Materials 0,806, 11. Journal of Composites for Constructions 1,015, 12. Journal of Composites Technology and Research 1,067, 13. Journal of Reinforced Plastics and Composites 0,763, 14. Journal of Thermoplastic Composite Materials 0,781, 15. Mechanics of Composite Materials 0,342, 16. Plastics, Rubber and Composites 0,257, 17. Polymer Composites 1,194, 18. Polymers and Polymer Composites 0,470, 19. Science and Engineering of Composite Materials 0,125, 20. Steel and Composite Structures 0,763, 21. JEC Composites, 22. Reinforced Plastics, 23. Mechanika kompozytowych materiałów, 24. Composite Solutions, 25. Composites Manufacturing (USA), 26. Composites Technology, 27. High-Performance Composites. Ponadto tematyka ta znajduje się także w wielu miesięcznikach dotyczących inżynierii materiałowej, technologii chemicznej, chemii i technologii polimerów oraz innych dziedzin<sup>1</sup>.

## 1.1. Rodzaje kompozytów ze względu na typ fazy rozproszonej

Ze względu na strukturę fazy rozproszonej rozróżnia się dwa podstawowe rodzaje kompozytów:

- kompozyty włókniste – fazę rozproszoną stanowią włókna, gdy wymiar długości cząstek jest znacznie większy od ich wymiarów poprzecznych,
- kompozyty cząstkowe, ziarniste, proszkowe – fazę rozproszoną stanowią rozproszone cząstki sferyczne, których trzy wymiary przestrzenne są zbliżonej wielkości.

Jest dyskusyjne, czy materiały typowo warstwowe, np. sklejka, w której cienkie warstwy drewna łączone są warstewkami kleju, mogą być zaliczane do kompozytów. W takich materiałach obie warstwy drewna i kleju nie mogą być charakteryzowane jako faza ciągła lub rozproszona. Do kompozytów nie zalicza się materiałów platerowanych i sklejanych z różnych grubych elementów. Kompozytem nie są np. buty produkowane obecnie z wielu różnych zespolonych materiałów. Ze względu na bardzo małe rozmiary cząstek fazy rozproszonej wyróżnia się, jako odrębną grupę, nanokompozyty. Do tej kategorii należą kompozyty, w których przynajmniej jeden wymiar cząstek fazy rozproszonej ma mniej niż 100 nm (1 nm to jest  $10^{-9}$  m).

## 1.2. Powierzchnie rozdziału (graniczne)

W kompozytach, a szczególnie w nanokompozytach, istotną rolę odgrywa wielkość powierzchni granicznych, na których działają różnego rodzaju siły między obiema fazami materiału złożonego. Ze względu na wielkość tej powierzchni sumaryczna wielkość tych sił jest bardzo duża i wpływa w znacznym stopniu na właściwości kompozytu. W większości przypadków między obiema fazami występuje warstwa graniczna o różnej grubości.

---

<sup>1</sup> Ostatnio ukazał się „zerowy” numer polskiego czasopisma specjalistycznego *Materiały kompozytowe* (nr 0, październik–listopad–grudzień 2011 r.); ma ono charakter techniczno-informacyjny.

### 1.3. Współczynnik kształtu

Istotnym czynnikiem wpływającym szczególnie na właściwości wytrzymałościowe kompozytów jest kształt cząstek fazy rozproszonej, a w przypadku cząstek włóknistych – stosunek ich długości do średnicy  $l/d$  – **współczynnik kształtu** (ang. *aspect ratio*). Im jest on większy, tym lepsze są właściwości mechaniczne kompozytu, gdyż większe jest wówczas wykorzystanie dużej wytrzymałości włókien wzmacniających poprzez lepsze przenoszenie naprężeń z fazy wiążącej (matrycy) na włókna.

### 1.4. Rodzaje kompozytów ze względu na typ matrycy

Ze względu na rodzaj matrycy (fazy ciągłej) rozróżnia się trzy rodzaje kompozytów:

- metalowe,
- ceramiczne,
- polimerowe.

Obszerne przeglądy powyższych typów kompozytów w języku polskim znajdują się w czasopiśmie *Kompozyty (Composites)* (2002, tom II, nr 3):

- Roman Pampuch: „Kompozyty ceramiczne”, s. 3–15;
- Wacław Królikowski: „Nowoczesne konstrukcyjne polimerowe materiały kompozytowe”, s. 16–23,
- Jerzy Sobczak, Stefan Wojciechowski: „Współczesne tendencje praktycznego stosowania kompozytów metalowych”, s. 24–37.

### 1.5. Kompozyty polimerowe

Spośród kompozytów polimerowych można wyróżnić, z punktu widzenia właściwości i obszaru zastosowań, dwa typy:

- kompozyty funkcjonalne,
- kompozyty konstrukcyjne.

Kompozyty funkcjonalne cechują bardzo specyficzne właściwości, np. elektryczne, magnetyczne, optyczne, ślizgowe, przeciwogniowe, barierowe, antybakteryjne itp. Te specjalne właściwości powodują, że materiały te mają bardzo określone, wąskie zastosowania, często wręcz niszowe.

Natomiast kompozyty konstrukcyjne, będące tematem tej książki, są materiałami o bardzo dobrych właściwościach wytrzymałościowych. Służą one do wytwarzania bardzo różnych elementów konstrukcyjnych poczynając od części i obudów maszyn, przedmiotów codziennego użytku, elementów i konstrukcji budowlanych, karoserii samochodowych i wagonów kolejowych, samolotów, szybowców, wirników śmigłowców i elektrowni wiatrowych, wież latarni morskich, łodzi, motorówek, jachtów, kutrów, okrętów wojennych, sprzętu sportowego i wojskowego, konstrukcji mostowych, rur, obudów kanałów, zbiorników i cystern, aparatury chemicznej, a kończąc

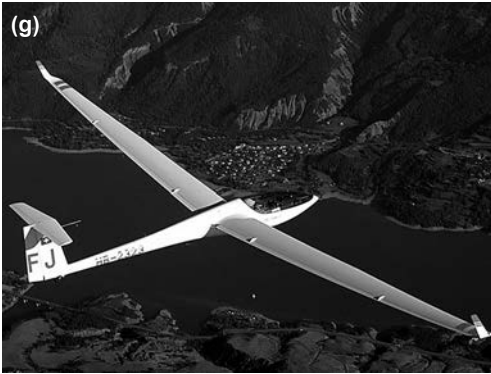
na raketach i urządzeniach kosmicznych. Wymiary tych wyrobów kompozytowych mogą być bardzo małe, milimetrowe, jak elementy hermetyzacji układów scalonych (tłoczywa epoksydowe) o masie kilku gramów, albo aż tak duże, jak 60-metrowe skrzydła elektrowni wiatrowych i wielotonowe trałowce marynarki wojennej (także polskie o długości ok. 40 m). Niektóre z tych zastosowań przedstawiono na fotografiach (rys. 1.1).

Wśród rodziny kompozytów, polimerowe kompozyty konstrukcyjne stanowią nieporównywalnie największą dziedzinę wytwórczości światowej, tak pod względem różnorodności zastosowań, tonażu produkcji, jak i wartości finansowej. Ich zastosowanie stale się zwiększa i rośnie kilka, a nawet kilkanaście procent rocznie. Globalna produkcja kompozytów polimerowych w 2010 r. osiągnęła 12,1 mln t przy 17% wzroście w stosunku do 2009 r. Obecnie rozwój produkcji i zastosowań kompozytów polimerowych jest najszybszy w krajach azjatyckich.

Podział kompozytów na dwa typy – funkcjonalne i konstrukcyjne – nie jest ostry, gdyż np. wiele wyrobów konstrukcyjnych może dysponować dodatkowo właściwościami specyficznymi, takimi jak: antyelektrostatyczność, przewodnictwo elektryczne, zmniejszony współczynnik tarcia, obniżona palność, barierowość.



**Rys. 1.1.** Różne konstrukcje z kompozytów polimerowych: (a) trałowiec Marynarki Wojennej RP, (b) trimaran z kompozytów z włóknem węglowym, (c) Pontiac Fierro z różnego typu kompozytów polimerowych, (d) kabina ciężarówki, (e) wagon kolei ultraszybkiej, (f) lekki samolot, (g) szybowiec, (h) Boeing 787 „Dreamliner”, w którym kompozyty stanowią 50% masy konstrukcji, (i) rakietka tenisowa, (j) rotory elektrowni wiatrowych, (k) kopuła radarowa z laminatów trójkątów sferycznych, (l) zbiorniki nawijane



Rys. 1.1. c.d.