

Wacław Królikowski

Polimerowe kompozyty konstrukcyjne

Polimerowe kompozyty konstrukcyjne

Książkę tę poświęcam mojej żonie Ewie

Wacław Królikowski
Autor

[Kup książkę](#)

Wacław Królikowski

Polimerowe kompozyty konstrukcyjne



[Kup książkę](#)

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.

Szanujemy cudzą własność i prawo
Więcej na 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, www.pwn.pl
Druk i oprawa OSDW Azymut Sp z o.o.

[Kup książkę](#)

Spis treści

Przedmowa	9
Wykaz stosowanych symboli i skrótów	11
Rozdział 1. Wiadomości wstępne o kompozytach	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
Rozdział 2. Polimery	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 (NZPE) 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
Rozdział 3. Napelniacze i wzmocnienia	50
3.1. Napelniacze 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. Dziańliny 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
Rozdział 4. Materiały lekkie do kompozytowych konstrukcji przekładkowych (sandwicz).	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
Rozdział 5. Struktura i właściwości kompozytów polimerowych	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 krzemooorganiczne	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
Rozdział 6. Metody technologiczne wytwarzania wyrobów kompozytowych	194
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 szpachlówki	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
Rozdział 7. Nanokompozyty polimerowe	275
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
Rozdział 8. Polimery samowzmocnione.	300
8.1. Wytwarzanie fibrylarnej struktury szaszykowej	300
8.2. Wyroby płytowe.	303
8.3. Polimery ciekłokrystaliczne – LCP	304
Literatura	309
Rozdział 9. Podstawy obliczeń i projektowania konstrukcji kompozytowych	
<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
Skorowidz	327

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 przypiskach, 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_τ	– moduł sprężystości przy ścinaniu
G	– moduł sztywności postaciowej
R_m	– wytrzymałość na rozciąganie
R_g	– wytrzymałość na zginanie
R_τ	– wytrzymałość na ścinanie
R_c	– wytrzymałość na ściskanie
R_p	– granica proporcjonalności
ε_m	– odkształcenie/wydłużenie przy zerwaniu
P	– siła
σ	– naprężenie przy rozciąganiu
τ	– 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
Δl	– przyrost długości
V	– objętość
W	– praca
W_{adh}	– praca adhezji
γ	– napięcie powierzchniowe
η	– lepkość
ν	– 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_{14}, R_{15}, R_{16}	– 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
γ_s	– postaciowe odkształcenie krytyczne w płaszczyźnie prostopadłej do osi 3 (płaszczyzna 1–2)
σ_x	– naprężenie określone w układzie xyz obróconym o kąt α 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 dziedzin¹.

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.

¹ 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 rakietach 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 laminatowych trójkątów sferycznych, (l) zbiorniki nawijane



Rys. 1.1. c.d.