

# 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 (duropłasty) . . . . .	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. Napelniacze i wzmocnienia</b> . . . . .	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. 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 drewna . . . . .	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(chlorku winylu) . . . . .	118
4.1.4. Rdzenie z pianek polimidowych . . . . .	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 uderowa 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 zmęczeniowa kompozytów . . . . .	168
5.7.1. Pełzanie . . . . .	168

5.7.2. Wytrzymałość trwała . . . . .	169
5.7.3. Wytrzymałość zmęczeniowa przy obciążeniach zmiennych . . . . .	170
5.8. Zespolenie 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>