

Spis treści

1. Wstęp	11
2. Ogólna charakterystyka kompozytów i ich składników	14
2.1. Rodzaje kompozytów konstrukcyjnych	14
2.2. Włókna i wzmocnienia	15
2.2.1. Rodzaje włókien	16
2.2.2. Postacie wzmocnienia	22
2.2.3. Badania włókien	25
2.3. Materiały na osnowy	37
2.3.1. Rodzaje materiałów na osnowy	38
2.3.2. Badania właściwości mechanicznych	38
2.4. Technologia wytwarzania	42
2.5. Właściwości anizotropowe	45
2.6. Zastosowania	48
2.7. Właściwości fizyczne	55
2.7.1. Określenie zawartości włókien w kompozycie	55
2.7.2. Pomiar masy właściwej	57
2.7.3. Zawartość pustek (luk)	57
2.7.4. Efekt skurczu	58
2.7.5. Wpływ temperatury	60
2.7.6. Wpływ wilgotności	62
2.8. Specyficzne właściwości kompozytów	63
2.8.1. Efekt brzegowy	63
2.8.2. Kąt między głównymi wektorami naprężenia i odkształcenia	65
2.8.3. Efekt skali	66
2.8.4. Wpływ liczby warstw	67

2.9.	Adhezja włókna do osnowy	67
2.9.1.	Rola adhezji	67
2.9.2.	Badania wytrzymałości adhezyjnej	68
2.9.3.	Wyniki badań wytrzymałości adhezyjnej	70
	Literatura	71

3. MECHANIKA STRUKTURY KOMPOZYTÓW 74

3.1.	Równania konstytutywne tworzyw anizotropowych	74
3.2.	Transformacja tensorów sztywności i podatności	78
3.3.	Rozszerzalność w równaniach konstytutywnych	81
3.4.	Równania konstytutywne kompozytu warstwowego	83
3.5.	Reguła mieszanin jako metoda określania właściwości	87
3.6.	Niszczenie kompozytu wzmocnionego włóknami prostymi	89
3.6.1.	Uwagi wstępne	89
3.6.2.	Kryteria wytrzymałościowe dla elementów strukturalnych	91
3.6.3.	Wytrzymałość na jednoosiowe rozciąganie	92
3.6.4.	Wytrzymałość na ścinanie wzdłużne	94
3.6.5.	Wytrzymałość na osiowe ściskanie	94
3.6.6.	Kryteria wytrzymałości jednokierunkowo wzmocnionego kompozytu w złożonym stanie naprężenia	97
3.7.	Niszczenie kompozytu wzmocnionego tkaninami	98
3.8.	Kompozyty o osnowie metalowej	104
	Literatura	107

4. OKREŚLENIE CHARAKTERYSTYK W QUASI-STATYCZNYCH JEDNOOSIOWYCH OBCIĄŻENIACH 109

4.1.	Maszyny wytrzymałościowe	109
4.2.	Tensometryczne pomiary odkształceń	112
4.3.	Próbki do badań	121
4.4.	Próba rozciągania	122
4.4.1.	Rodzaje próbek	122
4.4.2.	Metody badań	126
4.4.3.	Wyniki badań rozciągania	136
4.4.4.	Fizyczna granica plastyczności	136
4.5.	Próba ściskania	140
4.5.1.	Metody badań	143
4.5.2.	Wyniki badań ściskania różnych rodzajów kompozytów	149
4.6.	Próba ścinania	149
4.6.1.	Skręcanie rurki	150
4.6.2.	Skręcanie płyty kwadratowej	152
4.6.3.	Skręcanie pręta o przekroju kołowym i prostokątnym	153
4.6.4.	Rozciąganie kompozytu $[\pm 45^\circ]_{ms}$	156
4.6.5.	Próba Josipescu	157
4.6.6.	Ścinanie w sztywnych szynach	162
4.6.7.	Ścinanie w przegubowym czworoboku (ramie)	164
4.6.8.	Ścinanie w dwuosiowym obciążeniu próbki	165

4.6.9.	Skręcanie próbek pierścieniowych	165
4.6.10.	Zginanie krótkiej belki	166
4.6.11.	Ścinanie próbek z nacięciami	166
4.6.12.	Wyniki badań ścinania	168
4.7.	Próba zginania	169
4.7.1.	Zginanie belki prostokątnej	171
4.7.2.	Zginanie pierścieni	175
4.7.3.	Zginanie płyty rombowej	177
4.7.4.	Wyniki badań zginania	178
4.8.	Pomiar twardości	180
4.8.1.	Metoda wciskania kulki	180
4.8.2.	Metoda Rockwella	181
4.8.3.	Metoda Shore'a	182
4.8.4.	Metoda Barcala	183
	Literatura	183

5. BADANIA W ZŁOŻONYCH STANACH NAPRĘŻENIA 185

5.1.	Kryteria wytrzymałości	186
5.2.	Urządzenia do badań	189
5.3.	Metody badań	196
5.4.	Wyniki badań	198
	Literatura	206

6. BADANIA REOLOGICZNE 208

6.1.	Pojęcia podstawowe procesów reologicznych	208
6.1.1.	Klasyfikacja procesów reologicznych	209
6.1.2.	Kondycjonowanie próbek	209
6.1.3.	Charakterystyczne etapy procesów reologicznych	210
6.2.	Badania z obciążeniami quasi-statycznymi	212
6.2.1.	Próbki i aparatura do badań podstawowych	212
6.2.2.	Lepkosprężystość liniowa	216
6.2.3.	Programy badań	222
6.2.4.	Graficzna analiza wyników doświadczalnych	224
6.2.5.	Zasada superpozycji czasowo-temperaturowej	233
6.2.6.	Badania w złożonych stanach naprężenia	234
6.2.7.	Wytrzymałość długotrwała	235
6.2.8.	Wyniki badań	241
6.3.	Opis matematyczny efektów pełzania	246
6.3.1.	Wiadomości wstępne	246
6.3.2.	Opis liniowej lepkości	248
6.3.3.	Opis nieliniowej lepkości	248
6.4.	Badania ze zmiennymi obciążeniami	251
6.4.1.	Dynamiczne pełzanie i relaksacja naprężeń	251
6.4.2.	Wibroppełzanie	255
6.4.3.	Zespolone moduły i podatności dynamiczne.	
	Dyssypacja energii	256
6.4.4.	Metody badań w zakresie niskich częstotliwości	261

6.4.5.	Metody badań w zakresie częstości dźwiękowych i ultradźwiękowych	264
6.5.	Badania specjalne	268
6.5.1.	Pełzanie anizotermiczne	268
6.5.2.	Wpływ napromieniowania materiałów rozszczepialnych na właściwości reologiczne	269
	Literatura	269

7. ZMĘCZENIE KOMPOZYTÓW 273

7.1.	Pojęcia podstawowe	273
7.2.	Urządzenia do badań	275
7.3.	Temperatura samowzbudna	278
7.4.	Cykl jednostronny dodatni ($0 < R < 1$)	280
7.4.1.	Kompozyt wzmocniony jednokierunkowo	280
7.4.2.	Kompozyt wzmocniony wielokierunkowo	283
7.5.	Cykl dwustronny ($-1 < R < 0$)	286
7.6.	Zmęczenie podczas obciążeń nieosiowych	289
7.7.	Badania w złożonych stanach naprężeń	291
7.8.	Efekt częstości i poziomu naprężeń	293
7.9.	Wpływ orientacji włókien	295
7.10.	Wpływ spiętrzenia naprężeń	296
7.11.	Degradacja właściwości mechanicznych podczas zmęczenia	297
7.12.	Mechanizm niszczenia zmęczeniowego	302
7.12.1.	Mechanizm niszczenia kompozytu monotropowego	302
7.12.2.	Mechanizm niszczenia kompozytu o wzmocnieniu wielokierunkowym	304
7.12.3.	Mechanizm niszczenia kompozytu wzmocnionego tkaninami	307
7.13.	Kompozyty z osnową metalową	308
7.14.	Kompozyty z osnową ceramiczną	312
7.15.	Zachowanie się kompozytów z zakresie małej liczby cykli	313
7.15.1.	Mechanizm zmęczenia uszkodzeń	315
7.15.2.	Degradacja właściwości mechanicznych podczas zmęczenia niskocyklowego	316
7.15.3.	Akumulacja zmęczeniowych uszkodzeń	318
7.15.4.	Niskocyklowa trwałość zmęczeniowa w ujęciu energetycznym	319
	Literatura	320

8. BADANIA ODPORNOŚCI NA PĘKANIE 324

8.1.	Uwagi wstępne	324
8.2.	Definicje podstawowe	325
8.2.1.	Współczynnik uwolnienia energii materiału izotropowego	326
8.2.2.	Współczynnik intensywności naprężeń (WIN)	328
8.2.3.	Całka J	329
8.2.4.	Rozwarcie wierzchołka szczeliny	330
8.2.5.	Parametry odporności na pękanie materiałów anizotropowych	331
8.2.6.	Kryterium oparte na naprężeniach od rozciągania i ścinania	334

8.3.	Metody określania wartości krytycznych	336
8.3.1.	Urządzenia do badań	336
8.3.2.	Próbki do realizacji różnych sposobów obciążenia	338
8.3.3.	Metody pomiaru długości szczeliny (pęknięcia)	341
8.3.4.	Wyznaczenie współczynników uwalniania energii	344
8.3.5.	Wyznaczanie krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężeń (WIN)	361
8.3.6.	Wyznaczanie krytycznej wartości całki J	362
8.3.7.	Pomiar krytycznych wartości dynamicznych	362
8.4.	Modelowanie procesów niszczenia	375
8.5.	Wpływ różnych czynników na odporność pękania	377
8.5.1.	Wpływ właściwości anizotropowych	377
8.5.2.	Wpływ wzmocnienia trójkierunkowego	380
8.5.3.	Wpływ prędkości odkształceń	381
8.5.4.	Wpływ właściwości żywicy i sposobu obciążenia	383
8.5.5.	Wpływ wody morskiej	384
	Literatura.	386

9. ODPORNOŚĆ KOMPOZYTÓW NA OBCIĄŻENIE UDAROWE 389

9.1.	Uwagi wstępne	389
9.2.	Urządzenie do badań	390
9.3.	Metody badań	396
9.3.1.	Udarowe rozciąganie	396
9.3.2.	Udarowe zginanie belki	398
9.3.3.	Udarowe zginanie płyty obciążonej środkowo	401
9.3.4.	Udarowe ściskanie	404
9.3.5.	Niszczenie rur ciśnieniem wewnętrznym i bijakiem	405
9.3.6.	Nieniszczące badania udarowe	406
9.4.	Wpływ różnych czynników na odporność udarową	407
9.4.1.	Wpływ właściwości osnowy	407
9.4.2.	Wpływ obciążeń wstępnych	409
9.4.3.	Wpływ struktury kompozytu	410
9.5.	Mechanizm uszkodzeń	411
9.6.	Metody oceny uszkodzeń struktury	414
9.7.	Pozostała wytrzymałość po obciążeniu udarowym	416
9.8.	Modelowanie niszczenia	419
	Literatura.	421

10. BADANIA NIENISZCZĄCE 423

10.1.	Badania ultradźwiękowe	424
10.1.1.	Prędkość fal ultradźwiękowych	425
10.1.2.	Specyfika badań kompozytów	425
10.1.3.	Określenie defektów w kompozytach	427
10.1.4.	Wyznaczanie stałych sprężystości	430
10.2.	Badania termograficzne	433

10.3.	Metoda emisji akustycznej	437
10.4.	Metoda akustyczno-ultradźwiękowa	440
10.5.	Badania radiologiczne	442
10.5.1.	Metoda rentgenowska	442
10.5.2.	Tomografia komputerowa	444
10.6.	Metoda prądów wirowych	445
10.7.	Metoda spadku potencjału	447
10.8.	Metody defektoskopii penetracyjnej	447
10.9.	Badania optyczne	449
10.9.1.	Wprowadzenie	449
10.9.2.	Interferometria holograficzna (IH)	450
10.9.3.	Elektroniczna shearografia (ES)	452
10.9.4.	Interferometria siatkowa (IS)	455
10.9.5.	Metoda projekcji prążków	459
10.10.	Metoda elastooptyczna	460
10.11.	Wykrywanie i monitorowanie niszczenia	461
	Literatura.	463

11. STATYSTYCZNA ANALIZA WYNIKÓW DOŚWIADCZALNYCH 465

11.1.	Charakterystyki rozkładu statystycznego	465
11.1.1.	Wykreślne przedstawienie danych doświadczalnych	465
11.1.2.	Miary głównych wartości	467
11.1.3.	Miary rozrzutu	468
11.2.	Rodzaje rozkładu statystycznego	469
11.2.1.	Rozkład Gaussa	469
11.2.2.	Rozkład Weibulla	471
11.3.	Przedziały ufności	473
11.4.	Ocena rozbieżności dwóch średnich	475
11.5.	Współczynnik statystyczny bezpieczeństwa	476
11.6.	Statystyczna selekcja danych	478
11.7.	Analiza regresyjna	479
11.7.1.	Regresja liniowa	479
11.7.2.	Regresja funkcji o kilku zmiennych	481
11.7.3.	Zastosowanie metody najmniejszych kwadratów do analizy parametrów pola	482
11.8.	Kryterium χ^2	483
	Literatura.	485

Skorowidz 486