



# Spis treści

	Przedmowa .....	13
<b>1</b>	<b>Materiały inżynierskie .....</b>	<b>15</b>
	1.1. Rodzaje materiałów .....	16
	1.2. Struktura .....	21
	1.3. Własności materiałów .....	23
	1.4. Procesy wytwarzania .....	25
	1.5. Oddziaływanie między strukturą, własnościami i procesem wytwarzania .....	27
	1.6. Globalne zużycie materiałów .....	29
<b>2</b>	<b>Wiązania między atomami .....</b>	<b>30</b>
	2.1. Struktura atomu .....	30
	2.2. Wiązania jonowe .....	39
	2.3. Wiązania kowalencyjne .....	42
	2.4. Wiązania metaliczne .....	45
	2.5. Wiązania wtórne (van der Waalsa) .....	46
	2.6. Energia wiązań między atomami .....	47
	2.7. Wiązania w poszczególnych kategoriach materiałów .....	48
	Podsumowanie .....	50
	Zadania .....	51
<b>3</b>	<b>Struktura krystaliczna – krytalografia .....</b>	<b>53</b>
	3.1. Siedem układów krystalograficznych i czternaście typów sieci .....	53
	3.2. Położenia sieciowe .....	57
	3.3. Kierunki sieciowe .....	58
	3.4. Płaszczyzny sieciowe .....	59
	3.5. Oznaczanie struktur krystalicznych .....	62
	3.6. Struktura krystaliczna metali .....	63

## SPIS TREŚCI

3.7.	Struktury o najgęstszym ułożeniu atomów .....	66
3.8.	Struktury krystaliczne ceramik .....	70
3.9.	Szklą krzemianowe .....	82
	Podsumowanie .....	83
	Zadania .....	84
<b>4</b>	<b>Własności mechaniczne .....</b>	<b>89</b>
4.1.	Naprężenie i odkształcenie .....	89
4.2.	Moduły sprężystości .....	93
4.3.	Odształcenie sprężyste .....	96
4.4.	Statyczna próba rozciągania .....	98
4.5.	Twardość .....	106
4.6.	Odporność na pękanie .....	108
4.6.1.	Mechanika pękania.....	108
4.6.2.	Strefa odkształcenia plastycznego wokół wierzchołka pęknięcia .....	111
4.6.3.	Zakresy wartości $K_{Ic}$ .....	112
4.6.4.	Zależność między wytrzymałością i odpornością na pękanie.....	113
4.6.5.	Zastosowanie $K_{Ic}$ .....	115
4.6.6.	Pękanie ciągliwe .....	115
4.6.7.	Różnice między pękaniem ciągliwym i kruchym .....	117
4.7.	Udarność .....	117
4.7.1.	Próba udarności .....	117
4.7.2.	Udarność metali .....	119
4.8.	Zmęczenie .....	121
4.8.1.	Krzywa $S-N$ .....	122
4.8.2.	Rodzaje zniszczeń zmęczeniowych .....	123
4.8.3.	Mechanika pękania zmęczeniowego .....	124
4.8.4.	Rozwój pęknięć zmęczeniowych .....	127
4.8.5.	Zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej .....	129
	Podsumowanie .....	129
	Zadania .....	130
<b>5</b>	<b>Defekty struktury krystalicznej .....</b>	<b>133</b>
5.1.	Roztwory stałe. Niedoskonałości chemiczne .....	133
5.2.	Defekty punktowe .....	137
5.2.1.	Stężenie defektów punktowych .....	139
5.2.2.	Dyfuzja .....	142
5.3.	Dyslokacje – defekty liniowe .....	153
5.3.1.	Teoretyczna wytrzymałość na naprężenia styczne .....	153
5.3.2.	Dyslokacje .....	154
5.3.3.	Odształcenie plastyczne .....	157
5.3.4.	Niektóre własności dyslokacji .....	160
5.3.5.	Zależność $\tau$ od siły rozciągającej .....	163
5.4.	Defekty powierzchniowe – granice ziarn .....	165

5.5.	Granice międzyfazowe .....	174
5.6.	Umocnienie .....	175
5.7.	Pełzanie .....	185
5.7.1.	Mechanizmy pełzania .....	187
5.7.2.	Wytrzymałość na pełzanie .....	190
5.7.3.	Materiały do zastosowań wysokotemperaturowych .....	191
	Podsumowanie .....	192
	Zadania .....	193
<b>6</b>	<b>Wykresy fazowe .....</b>	<b>198</b>
6.1.	Reguła faz .....	198
6.2.	Ogólne uwagi o wykresach fazowych .....	199
6.3.	Dwuskładnikowe wykresy fazowe .....	202
6.4.	Wykres fazowy dla składników o nieograniczonej rozpuszczalności w stanie stałym .....	202
6.5.	Reguła dźwigni .....	205
6.6.	Tworzenie mikrostruktury w stopach układu o nieograniczonej rozpuszczalności składników w stanie stałym .....	207
6.7.	Wykres fazowy dla składników nierozpuszczających się wzajemnie w stanie stałym .....	208
6.8.	Wykres fazowy z przemianą eutektyczną, gdy składniki rozpuszczają się w stanie stałym .....	211
6.9.	Wykres fazowy z przemianą perytektyczną .....	215
6.10.	Wykres fazowy z przemianą eutektoidalną .....	216
6.11.	Złożone wykresy fazowe .....	217
6.12.	Składniki mikrostrukturalne w układzie Fe-Fe <sub>3</sub> C .....	219
6.13.	Wykres fazowy Fe-C .....	225
	Podsumowanie .....	228
	Zadania .....	229
<b>7</b>	<b>Zmiany strukturalne .....</b>	<b>235</b>
7.1.	Siły pędne zmian strukturalnych .....	236
7.1.1.	Siła pędna krystalizacji .....	237
7.1.2.	Zmiany struktury w stanie stałym .....	240
7.2.	Zarodkowanie aktywowane cieplnie (dyfuzyjne) .....	240
7.2.1.	Zarodkowanie jednorodne .....	241
7.2.2.	Zarodkowanie niejednorodne .....	243
7.2.3.	Kinetyka zarodkowania .....	243
7.3.	Szybkość przemiany dyfuzyjnej .....	244
7.4.	Krystalizacja .....	246
7.4.1.	Krystalizacja równowagowa .....	246
7.4.2.	Krystalizacja nierównowagowa .....	248
7.4.3.	Wzrost kryształów podczas krzepnięcia .....	248
7.4.4.	Segregacja .....	252
7.4.5.	Struktura odlewu .....	252

7.5.	Wykresy <i>CTP</i> .....	254
7.5.1.	Przemiany dyfuzyjne .....	256
7.5.2.	Przemiana bainityczna .....	258
7.5.3.	Przemiana martenzytyczna .....	259
7.6.	Obróbka cieplna stali .....	266
7.6.1.	Hartowanie .....	267
7.6.2.	Odpuszczanie .....	269
7.6.3.	Kruchość odpuszczania .....	272
7.6.4.	Hartowność .....	274
7.6.5.	Wyzarzanie .....	276
7.6.6.	Obróbka powierzchniowa .....	277
7.7.	Umocnienie wydzieleniowe (umocnienie przez starzenie) .....	278
7.8.	Struktura materiału odkształconego, zdrowienie i rekrytalizacja .....	284
7.8.1.	Struktura materiału odkształconego .....	285
7.8.2.	Zdrowienie .....	286
7.8.3.	Rekrytalizacja .....	288
7.9.	Kształt ziarn .....	293
7.10.	Rozrost ziarn .....	293
7.10.1.	Kinetyka rozrostu ziarn .....	296
7.10.2.	Rozrost ziarn w obecności cząstek .....	297
	Podsumowanie .....	300
	Zadania .....	302
<b>8</b>	<b>Metale i ich stopy .....</b>	<b>305</b>
8.1.	Stale .....	306
8.1.1.	Składniki zwykłe .....	307
8.1.2.	Zanieczyszczenia .....	307
8.1.3.	Pierwiastki stopowe w stali .....	309
8.1.4.	Wpływ pierwiastków stopowych na własności stali .....	311
8.1.5.	Podział stali .....	312
8.1.6.	Oznaczanie stali wg PN-EN 10027-1:2007 .....	312
8.1.7.	Węgiel w stali .....	315
8.1.8.	Stale konstrukcyjne .....	316
8.1.9.	Stale narzędziowe .....	321
8.1.10.	Stale odporne na korozję .....	324
8.2.	Żeliwa .....	328
8.3.	Stopy metali nieżelaznych .....	331
8.3.1.	Stopy Al .....	332
8.3.2.	Stopy Cu .....	335
8.3.3.	Stopy Ni i Co .....	339
8.3.4.	Stopy Ti .....	341
	Podsumowanie .....	344
	Zadania .....	345
<b>9</b>	<b>Ceramiki i szkła .....</b>	<b>348</b>
9.1.	Wyroby z gliny (ceramika tradycyjna) .....	349
9.2.	Nowoczesne (zaawansowane) ceramiki .....	352
9.3.	Materiały ogniotrwale .....	354

9.4.	Ceramiki ściernie .....	357
9.5.	Szkła – ceramiki niekryształiczne .....	357
9.6.	Tworzywa szklano-ceramiczne .....	361
9.7.	Własności ceramik i szkieł .....	363
9.7.1.	Wytrzymałość ceramik .....	365
9.7.2.	Odporność ceramik na pękanie .....	366
9.7.3.	Wpływ czasu na wytrzymałość ceramik .....	368
9.7.4.	Pełzanie .....	369
	Podsumowanie .....	370
	Zadania .....	371
<b>10</b>	<b>Polimery .....</b>	<b>374</b>
10.1.	Polimeryzacja .....	375
10.2.	Struktura polimerów .....	380
10.3.	Polimery termoplastyczne (termoplasty) .....	387
10.4.	Polimery termoutwardzalne (duroplasty) .....	388
10.5.	Elastomery (gumy) .....	389
10.6.	Dodatki .....	392
10.7.	Zachowanie polimerów pod wpływem obciążenia .....	393
10.8.	Własności polimerów .....	396
	Podsumowanie .....	400
	Zadania .....	401
<b>11</b>	<b>Kompozyty .....</b>	<b>403</b>
11.1.	Kompozyty włókniste .....	404
11.2.	Drewno – naturalny kompozyt włóknisty .....	411
11.3.	Kompozyty agregatowe .....	415
11.3.1.	Beton .....	415
11.3.2.	Cermetale .....	418
11.4.	Parametry wpływające na własności mechaniczne kompozytu .....	420
11.5.	Wytrzymałość na rozciąganie .....	423
11.6.	Porównanie własności mechanicznych kompozytów i stopów metali .....	425
	Podsumowanie .....	426
	Zadania .....	427
<b>12</b>	<b>Kształtowanie wyrobów .....</b>	<b>431</b>
12.1.	Wytwarzanie wyrobów metalowych .....	433
12.1.1.	Odewanie .....	435
12.1.2.	Kształtowanie odkształceniowe .....	438
12.1.3.	Metallurgia proszków .....	443
12.1.4.	Obróbka skrawaniem .....	445
12.1.5.	Procesy łączenia .....	446
12.1.6.	Inżynieria powierzchni .....	446
12.2.	Kształtowanie ceramik .....	447
12.2.1.	Kształtowanie przez prasowanie i spiekanie .....	448
12.2.2.	Odewanie z gęstwy .....	448

12.2.3.	Spiekanie reaktywne .....	449
12.3.	Kształtowanie szkła .....	449
12.4.	Kształtowanie polimerów .....	451
12.4.1.	Kształtowanie przez wtrysk .....	452
12.4.2.	Kształtowanie przez wytłaczanie (wyciskanie) .....	452
12.4.3.	Kształtowanie przez rozdmuchiwanie .....	453
12.4.4.	Kształtowanie przez prasowanie .....	454
12.4.5.	Kształtowanie przez odlewanie .....	455
12.5.	Wytwarzanie wyrobów kompozytowych .....	455
12.5.1.	Wytwarzanie włókien .....	456
12.5.2.	Układanie włókien .....	457
12.5.3.	Kształtowanie wyrobów .....	458
12.5.4.	Odlewanie kompozytu agregatowego o osnowie metalowej .....	459
	Podsumowanie .....	460
<b>13</b>	<b>Własności elektryczne materiałów .....</b>	<b>462</b>
13.1.	Przewodnictwo elektryczne .....	462
13.2.	Struktura pasmowa .....	466
13.3.	Ruchliwość elektronów .....	469
13.3.1.	Opór elektryczny metali .....	469
13.3.2.	Przewodność innych materiałów .....	473
13.4.	Przewody elektryczne .....	474
13.5.	Półprzewodniki samoistne .....	474
13.5.1.	Dziury elektronowe .....	475
13.5.2.	Przewodnictwo pierwiastkowych półprzewodników samoistnych ....	477
13.6.	Półprzewodniki domieszkowe .....	480
13.6.1.	Półprzewodnik domieszkowy typu $n$ .....	481
13.6.2.	Półprzewodnik domieszkowy typu $p$ .....	484
13.7.	Urządzenia półprzewodnikowe .....	486
13.7.1.	Złącze $p-n$ .....	487
13.7.2.	Tranzystor .....	490
13.7.3.	Obwody scalone .....	491
13.7.4.	Wytwarzanie obwodów scalonych .....	492
13.8.	Dipole i polaryzacja .....	494
13.9.	Własności dielektryczne .....	496
13.10.	Materiały piezoelektryczne .....	497
13.11.	Materiały ferroelektryczne .....	498
	Podsumowanie .....	499
	Zadania .....	501
<b>14</b>	<b>Własności magnetyczne materiałów .....</b>	<b>504</b>
14.1.	Pochodzenie momentów magnetycznych .....	504
14.2.	Wielkości magnetyczne .....	508
14.3.	Zachowanie magnetyczne materiałów .....	510
14.3.1.	Diamagnetyzm .....	510
14.3.2.	Paramagnetyzm .....	511
14.3.3.	Ferromagnetyzm .....	512

14.3.4.	Antyferromagnetyzm .....	513
14.3.5.	Ferrimagnetyzm .....	514
14.4.	Wpływ temperatury na zachowanie magnetyczne .....	515
14.5.	Struktura domenowa .....	516
14.6.	Pętla histerezy .....	518
14.7.	Magnetostrykcja .....	521
14.8.	Materiały magnetyczne .....	521
14.8.1.	Straty energii .....	523
14.8.2.	Materiały magnetyczne miękkie .....	524
14.8.3.	Materiały magnetyczne twarde .....	529
	Podsumowanie .....	530
	Zadania .....	531
<b>15</b>	<b>Własności optyczne materiałów .....</b>	<b>533</b>
15.1.	Stałe optyczne .....	535
15.2.	Absorpcja światła .....	540
15.3.	Selektywna absorpcja, transmisja i odbicie .....	542
15.4.	Zastosowanie promieniowania elektromagnetycznego .....	543
15.5.	Włókna optyczne .....	554
	Podsumowanie .....	554
	Zadania .....	555
<b>16</b>	<b>Własności cieplne materiałów .....</b>	<b>557</b>
16.1.	Podstawy .....	558
16.2.	Ciepło właściwe .....	559
16.3.	Przewodnictwo cieplne .....	561
16.4.	Rozszerzalność cieplna .....	565
16.5.	Naprężenia cieplne .....	569
16.6.	Zakresy temperatury stosowania materiałów .....	572
	Podsumowanie .....	573
	Zadania .....	574
<b>17</b>	<b>Korozja .....</b>	<b>575</b>
17.1.	Korozja chemiczna .....	576
17.1.1.	Mechanizm wzrostu warstwy tlenku .....	577
17.1.2.	Szybkość utleniania .....	578
17.1.3.	Warstwy ochronne – tlenki ochronne .....	580
17.2.	Korozja elektrochemiczna .....	582
17.2.1.	Elementy ogniwa elektrochemicznego .....	583
17.2.2.	Reakcje na anodzie .....	584
17.2.3.	Reakcje na katodzie .....	584
17.2.4.	Siła pędna korozji elektrochemicznej .....	587
17.2.5.	Szereg galwaniczny .....	588
17.2.6.	Pasywność metali .....	588
17.2.7.	Polaryzacja .....	589

17.3.	Rodzaje korozji elektrochemicznej (ogniwa korozyjne) .....	589
17.3.1.	Korozyjne ogniwo galwaniczne .....	590
17.3.2.	Korozja międzykrystaliczna .....	591
17.3.3.	Korozyjne ogniwo stężeniowe .....	592
17.3.4.	Korozja wżerowa (pittingowa) .....	593
17.3.5.	Korozja szczelinowa .....	594
17.3.6.	Korozyjne ogniwo naprężeniowe .....	595
17.3.7.	Korozja naprężeniowa .....	596
17.3.8.	Korozjo-erozja .....	596
17.4.	Metody zapobiegania korozji elektrochemicznej .....	597
17.4.1.	Projektowanie .....	597
17.4.2.	Dobór materiału i obróbki .....	599
17.4.3.	Powłoki ochronne .....	601
17.4.4.	Inhibitory .....	604
17.4.5.	Ochrona katodowa .....	604
17.4.6.	Pasywacja lub ochrona anodowa .....	605
	Podsumowanie .....	606
	Zadania .....	608

## **18** Charakterystyka materiałów ..... 610

18.1.	Określanie składu chemicznego – spektroskopia elektronów powłok wewnętrznych atomów .....	611
18.1.1.	Spektroskopia energii rozpraszanej promieniowania rentgenowskiego w mikroskopach elektronowych .....	615
18.1.2.	Fluorescencyjna analiza rentgenowska .....	617
18.1.3.	Spektroskopia strat energii elektronów .....	617
18.2.	Metody dyfrakcyjne .....	617
18.2.1.	Dyfrakcja .....	618
18.2.2.	Dyfrakcja promieni rentgenowskich .....	619
18.2.3.	Dyfrakcja elektronowa .....	622
18.3.	Mikroskopia .....	622
18.3.1.	Mikroskopia świetlna .....	624
18.3.2.	Mikroskopia elektronowa skaningowa .....	625
18.3.3.	Mikroskopia elektronowa transmisyjna .....	628
18.3.4.	Mikroskop elektronowy skaningowo-transmisyjny .....	632
18.3.5.	Mikroskop jonowy .....	633
18.3.6.	Mikroskopy ze skanującą sondą .....	633
	Podsumowanie .....	637

Literatura ..... 639

Pojęcia i ich definicje ..... 642

Tablice uzupełniające ..... 669