

SPIS TREŚCI

Od autorów	5
Rozdział 1. Wprowadzenie	7
1.1. Charakterystyka, cel i zadania wytrzymałości materiałów	7
1.2. Podstawowe założenia wytrzymałości materiałów	9
1.3. Naprężenie i odkształcenie	14
Rozdział 2. Stan naprężenia i odkształcenia	17
2.1. Przestrzenny stan naprężenia i odkształcenia	17
2.2. Płaski stan naprężenia	20
Przykład 2.1 – naprężenia główne i ich kierunki	26
2.3. Płaski stan odkształcenia	29
2.4. Związki fizyczne	34
Przykład 2.2 – eksperyment Hooke’a	37
2.5. Pręt, klasyfikacja zagadnień wytrzymałości materiałów	40
Rozdział 3. Rozciąganie i ściskanie osiowe	43
3.1. Jednoosiowy stan naprężenia	43
Przykład 3.1 – bryła naprężenia w pręcie rozciągany osiowo	49
Przykład 3.2 – zmiana wymiarów próbki rozciąganej osiowo	50
3.2. Badania właściwości mechanicznych materiałów	51
3.2.1. Próba statyczna rozciągania	51
Przykład 3.3 – próba zwykła rozciągania stali miękkiej i twardej	59
Przykład 3.4 – próba ścisła rozciągania płaskownika aluminiowego	61
3.2.2. Próba statyczna ściskania	63
Przykład 3.5 – ściskanie próbek wykonanych z metalu	66
Przykład 3.6 – ściskanie próbek z kompozytów cementowych	67
3.3. Koncentracja naprężeń	69
Przykład 3.7 – koncentracja naprężeń w płaskowniku z otworem	71
Przykład 3.8 – pomiar koncentracji odkształceń w płaskowniku z otworem	72
3.4. Układy statycznie niewyznaczalne	74
Przykład 3.9 – wyznaczanie sił wewnętrznych w pręcie obustronnie utwierdzonym	75
Przykład 3.10 – wyznaczanie naprężeń w pręcie zespolonym	76
Rozdział 4. Zginanie czyste proste i ukośne	79
4.1. Wprowadzenie	79
4.2. Podstawowe założenia zginania czystego	80
4.3. Zginanie ukośne i proste	82
4.4. Deformacja osi belki w czystym zginaniu prostym	86
Przykład 4.1 – bryła naprężenia w belce zginanej	88
Przykład 4.2 – zginanie ukośne w osiach centralnych	92
Przykład 4.3 – zginanie ukośne w głównych centralnych osiach bezwładności	93

Przykład 4.4 – wyznaczanie odkształceń w zginaniu prostym.....	95
Przykład 4.5 – deformacja osi belki w zginaniu.....	97
Rozdział 5. Rozciąganie i ściskanie mimośrodowe.....	99
5.1. Rozciąganie mimośrodowe.....	99
Przykład 5.1 – bryła naprężenia w belce rozciąganej mimośrodowo.....	104
5.2. Rdzeń przekroju.....	107
Przykład 5.2 – rdzeń przekroju ceowego.....	110
5.3. Mimośrodowe ściskanie przy wyłączeniu strefy rozciąganej.....	111
Przykład 5.3 – wyznaczenie rozkładu naprężeń pod stopą fundamentową.....	113
Rozdział 6. Skręcanie swobodne.....	115
6.1. Wprowadzenie	115
6.2. Skręcanie prętów o przekroju kołowym	116
Przykład 6.1 – skręcanie próbki o przekroju kołowym	121
6.3. Skręcanie prętów o przekroju prostokątnym	121
6.4. Skręcanie prętów o przekroju cienkościennym otwartym.....	124
6.5. Skręcanie prętów o przekroju cienkościennym zamkniętym	125
Przykład 6.2 – wyprowadzenie wzoru Bredta kąta skręcenia	127
Przykład 6.3 – skręcanie pręta o przekroju kołowym zamkniętym i otwartym	128
Przykład 6.4 – skręcanie pręta o przekroju teowym.....	129
Rozdział 7. Zginanie ze ścinaniem	131
7.1. Wprowadzenie	131
7.2. Zginanie ze ścinaniem prętów o przekroju pryzmatycznym	132
Przykład 7.1 – wyznaczenie naprężeń stycznych w przekroju prostokątnym.....	133
Przykład 7.2 – wyznaczenie naprężeń stycznych w przekroju kołowym.....	135
Przykład 7.3 – bryła naprężeń stycznych w belce o przekroju teowym.....	136
7.3. Zginanie ze ścinaniem prętów o przekroju cienkościennym	138
Przykład 7.4 – rozkład naprężeń stycznych w dwuteowym przekroju cienkościennym.....	139
Przykład 7.5 – rozkład naprężeń stycznych w przekroju cienkościennym o formie połowy okręgu.....	142
7.4. Środek ścinania	144
Przykład 7.6 – środek ścinania przekroju w kształcie półokręgu	146
Przykład 7.7 – środek ścinania przekroju ceowego.....	147
7.5. Naprężenia prostopadłe do osi belki w zginaniu prostym	149
Przykład 7.8 – rozkład naprężeń normalnych wzdłuż wysokości przekroju prostokątnego	150
7.6. Rozkład naprężeń w przekrojach podłużnych	151
Przykład 7.9 – pomiar trajektorii naprężeń głównych.....	156
Przykład 7.10 – wyznaczanie naprężeń głównych i ich kierunków	158
Rozdział 8. Połączenia elementów konstrukcji	160
8.1. Wprowadzenie	160
8.2. Połączenia konstrukcyjne.....	162
8.2.1. Połączenia spawane	162
8.2.2. Połączenia na łączniki punktowe.....	163
8.2.3. Połączenia ciesielskie	165
Przykład 8.1 – połączenie drewniane na zacios.....	166
8.3. Belki wielokrotne i złożone	167
Przykład 8.2 – belka złożona, dobór dopuszczalnego naprężenia ścinającego kołków	170
Przykład 8.3 – belka złożona, dobór rozstawu gwoździ.....	172
Przykład 8.4 – zginanie 3-punktowe belek wielokrotnych i złożonych	173

8.4. Belki zespolone.....	175
Przykład 8.5 – wyznaczenie naprężeń w belce zespolonej.....	180
Rozdział 9. Linia ugięcia.....	182
9.1. Wprowadzenie	182
9.2. Metoda Eulera.....	184
9.3. Metoda Mohra.....	186
Przykład 9.1 – obserwacja zależności ugięcia od momentu bezwładności przekroju.....	188
Przykład 9.2 – obserwacja zależności ugięcia od sztywności materiału	189
Przykład 9.3 – pomiar ugięcia wiaduktu	189
Przykład 9.4 – pomiar linii ugięcia w zginaniu 3-punktowym.....	191
Przykład 9.5 – wyznaczenie ugięcia belki wspornikowej metodą Eulera	193
Przykład 9.6 – wyznaczenie ugięcia belki statycznie niewyznaczalnej metodą Eulera	195
Przykład 9.7 – wyznaczenie ugięcia belki wspornikowej metodą Mohra.....	196
Przykład 9.8 – wyznaczenie ugięcia ciągłej belki przegubowej metodą Mohra	197
Przykład 9.9 – wyznaczenie ugięcia belki o zmiennym momencie bezwładności metodą Mohra	199
Rozdział 10. Ciężna.....	201
10.1. Wprowadzenie	201
10.2. Linia zwisu ciężna pod ciężarem własnym	203
10.3. Linia zwisu ciężna o małej strzałce zwisu pod ciężarem własnym	205
10.4. Linia zwisu ciężna o małej strzałce zwisu pod dowolnym obciążeniem.....	206
Przykład 10.1 – obserwacja kształtu ciężna łańcuchowego pod obciążeniem pionowym.....	208
Przykład 10.2 – ciężno o małym zwisie, o znanej długości	209
Przykład 10.3 – ciężno o małym zwisie, o znanej sile poziomej	210
Przykład 10.4 – ciężno o małym zwisie, dobór pola przekroju.....	211
10.5. Linia zwisu ciężna zawieszonego na różnych poziomach.....	212
Przykład 10.5 – ciężno o punktach zawieszenia na różnych wysokościach	215
10.6. Iteracyjne rozwiązanie równania ciężna o dużym zwisie	216
Rozdział 11. Podejście energetyczne.....	219
11.1. Wprowadzenie.....	219
11.2. Pojęcie pracy i energii sprężystej.....	219
11.3. Przemieszczenia wirtualne, praca wirtualna i zasada prac wirtualnych	224
11.4. Zasada stacjonarności potencjalnej energii i twierdzenie o minimum całkowitej potencjalnej energii układu sprężystego	228
11.5. Wyznaczanie przemieszczeń w układach sprężystych, twierdzenia Castigliano.....	230
11.6. Układy Clapeyrona, twierdzenie Clapeyrona, twierdzenie Bettiego, twierdzenie Maxwella, uogólnione parametry	235
11.7. Energia właściwa odkształcenia sprężystego.....	240
11.8. Rozkład energii właściwej odkształcenia sprężystego.....	243
11.9. Energia potencjalna odkształcenia sprężystego, różne stany wyężenia pręta.....	247
11.9.1. Rozciąganie, ściskanie	248
11.9.2. Zginanie proste.....	250
11.9.3. Skręcanie.....	251
Przykład 11.1 – energia potencjalna skręcania, wyprowadzenie wzoru Bredta kąta skręcania	253
11.9.4. Ścinanie ze zginaniem pręta.....	254
Przykład 11.2 – energia potencjalna zginania i ścinania	258
11.9.5. Rozciąganie / ściskanie mimośrodowe, złożone stany wytrzymałości prętów prostych.....	259

11.10. Obliczanie przemieszczeń metodą Maxwella–Mohra	260
Przykład 11.3 – obliczenie przemieszczenia węzła kratownicy metodą Maxwella–Mohra	263
Przykład 11.4 – obliczenie ugięcia belki metodą Maxwella–Mohra	263
Przykład 11.5 – obliczenie ugięcia belki metodą Maxwella–Mohra i całkowania graficznego	264
11.11. Zasada pracy wirtualnej dla układów prętowych	265
Rozdział 12. Stateczność prętów ściskanych osiowo	269
12.1. Wprowadzenie	269
12.2. Układy o jednym stopniu swobody	271
Przykład 12.1 – równowaga kulki na torze	273
12.3. Swobodnie podparty pręt sprężysty ściskany osiowo	276
12.4. Wspornik (słup) sprężysty ściskany siłą osiową	280
12.5. Pręt jednostronnie utwierdzony, z drugiej strony przegubowo podparty	281
12.6. Długość wyboczeniowa, ujednolicenie wzoru na siłę krytyczną	283
12.7. Wyboczenie pręta jako zagadnienie przestrzenne	284
12.8. Naprężenia krytyczne, smukłość graniczna zakresu sprężystego	285
Przykład 12.2 – wyznaczenie siły krytycznej słupa utwierdzonego	287
12.9. Pręty krępe	288
Przykład 12.3 – wyznaczenie sprowadzonego modułu wyboczenia	292
12.10. Wpływ siły tnącej na wielkość siły krytycznej	295
Przykład 12.4 – pręt wielogłęziowy, wpływ siły tnącej na wielkość siły krytycznej	297
12.11. Wpływ niedoskonałości, wyboczenie w sensie fizycznym	299
12.12. Wymiarowanie prętów ściskanych	305
Przykład 12.5 – sprawdzenie nośności pręta ściskanego osiowo ze względu na stateczność	310
12.13. Inne formy utraty stateczności	311
Rozdział 13. Hipotezy wytrzymałościowe	313
13.1. Wprowadzenie	313
13.2. Zniszczenie materiału	315
Przykład 13.1 – zniszczenie materiału	315
13.3. Wytężenie i miary wytężenia	317
13.4. Hipotezy wytrzymałościowe dla materiałów ciągliwych	320
13.4.1. Hipoteza maksymalnego naprężenia stycznego (Coulomba–Treski–Guesta)	320
13.4.2. Hipoteza krańcowej energii całkowitej odkształcenia (Beltramiiego)	324
13.4.3. Hipoteza energii właściwej odkształcenia postaciowego (Hubera–Misesa–Hencky’ego)	325
13.4.4. Hipoteza zmiennej energii odkształcenia objętościowo-postaciowego (Burzyńskiego)	327
Przykład 13.2 – sprawdzenie stanu naprężenia według hipotezy H-M-H	329
Przykład 13.3 – sprawdzenie stanu naprężenia według hipotez C-T-G oraz H-M-H	329
13.5. Hipotezy wytrzymałościowe dla materiałów plastyczno-kruchych	330
13.5.1. Hipoteza największego naprężenia normalnego	330
13.5.2. Hipoteza największego krańcowego odkształcenia podłużnego	333
13.5.3. Hipoteza Mohra	336
13.6. Wytrzymałość złożona belek	339
Przykład 13.4 – naprężenie zastępcze według hipotezy H-M-H	340
Rozdział 14. Elementy teorii plastyczności	341
14.1. Wprowadzenie	341
14.2. Modele materiału sprężysto-plastycznego	343
14.2.1. Model ciała liniowo-sprężystego	343
14.2.2. Model ciała sztywno-plastycznego	343

14.2.3. Model ciała idealnie sprężysto-plastycznego	344
14.2.4. Model ciała idealnie sprężysto-plastycznego ze wzmocnieniem	345
14.3. Nośność graniczna przekroju i konstrukcji	345
14.3.1. Przekrój w stanie rozciągania / ściskania osiowego	347
14.3.2. Przekrój zginany z materiału o jednakowych wytrzymałościach na ściskanie / rozciąganie	348
Przykład 14.1 – sprężysty i plastyczny wskaźnik wytrzymałości przekroju prostokątnego i kołowego	351
Przykład 14.2 – sprężysty i plastyczny wskaźnik wytrzymałości przekroju skrzynkowego	352
Przykład 14.3 – uplastycznienie w zginaniu 3-punktowym	352
Przykład 14.4 – obszar uplastycznienia belki	356
Przykład 14.5 – próba zginania 3-punktowego belki o przekroju ceowym	357
14.3.3. Przekrój zginany z materiału o różnych wytrzymałościach na ściskanie / rozciąganie	360
14.3.4. Przekrój zginany zespolony, symetria materiałowa	360
14.3.5. Przekrój zginany zespolony, brak symetrii materiałowej	361
14.3.6. Przekrój zginany zespolony z materiałów o silnie zróżnicowanych granicach plastyczności i ograniczonych odkształceniach	362
14.3.7. Przekrój w stanie złożonym mimośrodowego rozciągania / ściskania	364
Przykład 14.6 – przekrój prostokątny w stanie złożonym mimośrodowego rozciągania / ściskania	365
Przykład 14.7 – przekrój dwuteowy idealny w stanie złożonym mimośrodowego rozciągania / ściskania	366
Przykład 14.8 – przekrój teowy w stanie złożonym mimośrodowego rozciągania / ściskania	367
Przykład 14.9 – badanie stanu granicznego nośności przekroju prostokątnego w stanie złożonym mimośrodowego rozciągania / ściskania	370
14.3.8. Przekrój kołowy w stanie skręcania swobodnego	371
14.3.9. Przekrój prostokątny w stanie skręcania swobodnego	372
14.3.10. Nośność graniczna w stanie złożonym zginania i ścinania	374
Rozdział 15. Wpływ czasu na własności materiałów	377
15.1. Wprowadzenie	377
15.2. Wpływ temperatury i prędkości odkształceń na własności mechaniczne materiałów	377
15.3. Wpływ upływu czasu, pełzanie i relaksacja materiału	379
15.3.1. Model ciała lepko-sprężystego	384
15.3.2. Model Maxwella	385
15.3.3. Model Kelvina–Voigta	387
15.3.4. Modele standardowe pierwszego rodzaju	390
15.3.5. Model Burgersa	394
15.3.6. Zagadnienia szczegółowe: pełzanie belki statycznie wyznaczalnej, pełzanie betonu w ujęciu normowym EC2	397
Przykład 15.1 – procedura uproszczona odczytu współczynnika pełzania betonu	401
Przykład 15.2 – ocena wpływu pełzania w słupie betonowym	401
Przykład 15.3 – analiza odkształceń i redystrybucji sił wewnętrznych wywołanych pełzaniem w słupie betonowym	403
15.4. Powtórne obciążenie, pękanie, zniszczenie zmęczeniowe	404
15.4.1. Cykliczna próba rozciągania i ściskania	404
15.4.2. Nagłe pękanie i udarność	405
Przykład 15.4 – test zginania linijki, ocena mechanizmu zniszczenia	410
15.4.3. Zniszczenie zmęczeniowe	412
Przykład 15.5 – wyznaczenie trwałości zmęczeniowej	416
Przykład 15.6 – wyznaczenie trwałości zmęczeniowej	417
Przykład 15.7 – wyznaczenie trwałości zmęczeniowej	419

Przykład 15.8 – test zginania linijki, ocena trwałości zmęczeniowej.....	421
Przykład 15.9 – wyznaczenie trwałości zmęczeniowej detalu konstrukcyjnego	425
Załącznik A. Charakterystyki geometryczne	427
Załącznik B. Metody analizy wyników doświadczalnych	435
B.1. Błędy pomiarów	435
B.2. Analiza statystyczna danych pomiarowych.....	435
B.3. Aproksymacja metodą najmniejszych kwadratów	437
Załącznik C. Elementy rachunku wektorowego	441
C.1. Wielkości wektorowe	441
C.2. Iloczyn skalarny wektorów i macierzy (tensorów), norma wektora	441
Załącznik D. Całkowanie graficzne	444
Zalecana literatura.....	447
Podziękowania.....	449