

**Inżynieria powierzchni / Marek Blicharski. – Wydanie II
(zaktualizowane i rozszerzone). – Warszawa, 2021**

Spis treści

Od autora	13
Wykaz skrótów	17
1. Obróbka warstwy wierzchniej	19
1.1. Klasyfikacja obróbki powierzchniowej	21
1.2. Koncepcja inżynierii powierzchni	24
1.3. Kryteria doboru procesów wytwarzania warstwy wierzchniej	27
1.4. Naprężenia własne	29
1.5. Przyczyny zniekształcenia wyrobów	30
1.6. Zmiana kształtu i wymiarów wyrobów hartowanych	31
1.7. Podstawowe obróbki warstwy wierzchniej wyrobów stalowych	31
1.8. Ograniczenia projektowe	32
1.9. Przygotowanie powierzchni podłoża	33
1.10. Plazma w inżynierii powierzchni	34
1.10.1. Plazma	34
1.10.2. Właściwości plazmy	34
1.10.3. Plazma niskotemperaturowa w obróbce warstwy wierzchniej	36
1.11. Magnetronowe źródło rozpylania	38
1.12. Przewodnictwo elektryczne	38
2. Materiały i ich właściwości	39
2.1. Rodzaje materiałów	39
2.1.1. Metale i ich stopy	40
2.1.2. Ceramika i szkło	41
2.1.3. Polimery	42
2.1.4. Kompozyty	44
2.1.5. Nanomateriały	45
2.2. Właściwości materiałów	45
2.2.1. Właściwości mechaniczne	47
2.2.2. Umocnienie dyslokacyjne	47
2.2.3. Umocnienie roztworowe	48
2.2.4. Umocnienie cząstkami innej fazy	48
2.2.5. Umocnienie przez rozdrobnienie ziarna	49
2.2.6. Pełzanie	49
2.2.7. Moduł Younga	51
2.2.8. Właściwości mechaniczne wyznaczone z próby rozciągania	52
2.2.9. Wytrzymałość ceramiki	55
2.2.10. Twardość	55

2.2.11. Odporność na pękanie	57
2.2.12. Wytrzymałość zmęczeniowa	58
2.2.13. Gęstość	60
3. Struktura atomu, wiązania chemiczne i struktura krystaliczna	61
3.1. Struktura atomu	61
3.2. Układ okresowy	63
3.3. Wiązania chemiczne	67
3.3.1. Wiązania jonowe	68
3.3.2. Wiązania kowalencyjne	70
3.3.3. Ciała stałe z wiązaniami jonowymi i kowalencyjnymi	72
3.3.4. Wiązania metaliczne	74
3.3.5. Wiązania wtórne (van der Waalsa)	74
3.3.6. Energia wiązań między atomami	77
3.4. Klasyfikacja ciał stałych ze względu na wiązania	77
3.5. Wiązania w poszczególnych kategoriach materiałów	78
3.6. Struktura krystaliczna	80
3.6.1. Układy krystalograficzne i typy sieci	81
3.6.2. Położenia sieci	84
3.6.3. Kierunki sieci	85
3.6.4. Płaszczyzny sieci	86
3.6.5. Oznaczanie struktur krystalicznych	87
3.7. Struktura krystaliczna metali	88
3.8. Struktury o najgęstszym ułożeniu atomów	90
3.9. Struktury krystaliczne ceramiki	92
3.9.1. Wymiary i rozmieszczenie luk	92
3.9.2. Ceramiki jonowe i kowalencyjne	94
3.9.3. Proste ceramiki jonowe	95
3.9.4. Proste ceramiki kowalencyjne	97
3.10. Polimorfizm	98
3.11. Szkła krzemianowe	100
4. Tarcie, zużycie i smarowanie	101
4.1. Tribologia	101
4.2. Warstwa wierzchnia	104
4.3. Tarcie	105
4.4. Zużycie	111
4.4.1. Zużycie ściernie	114
4.4.2. Zużycie adhezyjne	118
4.4.3. Zużycie-korozja	119
4.4.4. Zużycie utleniające	121
4.4.5. Zużycie zmęczeniowe	122
4.4.6. Erozja	125
4.4.7. Korozjo-erozja	128
4.4.8. Kawitacja	128
4.4.9. Fretting	129

4.4.10. Korozja frettingowa	129
4.4.11. Zużycie wodorowe	130
4.5. Smarowanie	131
4.5.1. Środki smarne	133
4.5.2. Oleje smarne	133
4.5.3. Dodatki uszlachetniające	133
4.5.4. Emulsje	134
4.5.5. Smary plastyczne	134
4.5.6. Smary stałe	135

5. Korozja 137

5.1. Korozja chemiczna	138
5.1.1. Mechanizm wzrostu warstwy tlenku	139
5.1.2. Szybkość utleniania	140
5.1.3. Warstwy ochronne - tlenki ochronne	141
5.2. Korozja elektrochemiczna	144
5.2.1. Elementy ogniwa elektrochemicznego	144
5.2.2. Reakcje na anodzie	145
5.2.3. Reakcje na katodzie	146
5.2.4. Siła pędna korozji elektrochemicznej	148
5.2.5. Szereg galwaniczny	149
5.2.6. Pasywność metali	151
5.2.7. Polaryzacja	151
5.3. Rodzaje korozji elektrochemicznej (ogniwa korozyjne)	152
5.3.1. Korozyjne ogniwo galwaniczne	152
5.3.2. Korozja międzykrystaliczna	153
5.3.3. Korozyjne ogniwo stężeniowe	154
5.3.4. Korozja wżerowa (pittingowa)	155
5.3.5. Korozja szczelinowa	156
5.3.6. Korozyjne ogniwo naprężeniowe	157
5.3.7. Korozja naprężeniowa	157
5.3.8. Korozja zmęczeniowa	159
5.3.9. Korozjo-erozja	160
5.3.10. Oddziaływanie powłoki	160
5.4. Metody zapobiegania korozji elektrochemicznej	161
5.4.1. Projektowanie	162
5.4.2. Dobór materiału i obróbki	163
5.4.3. Powłoki ochronne	165
5.4.4. Inhibitory	170
5.4.5. Ochrona katodowa	171
5.4.6. Pasywacja lub ochrona anodowa	172

6. Obróbka warstwy wierzchniej bez zmiany jej składu chemicznego 173

6.1. Utwardzanie odkształceniowe (mechaniczne)	173
6.1.1. Dogniatanie rolkami	174

6.1.2. Kulowanie	175
6.1.3. Utwardzanie laserowe	175
6.2. Hartowanie powierzchniowe	177
6.2.1. Stale do hartowania powierzchniowego	179
6.2.2. Mikrostruktura	180
6.2.3. Grubość warstwy zahartowanej	182
6.2.4. Zmiana wymiarów	182
6.2.5. Zalety hartowania powierzchniowego	182
6.2.6. Hartowanie indukcyjne	183
6.2.7. Hartowanie płomieniowe	184
6.3. Obróbka powierzchniowa laserem	186
6.4. Hartowanie wiązką elektronów	188
6.5. Przetopienie warstwy wierzchniej	188
7. Obróbka cieplno-chemiczna	190
7.1. Podstawy obróbki cieplno-chemicznej	191
7.1.1. Potencjał węglowy	192
7.1.2. Dyfuzja - podstawy	193
7.1.3. Gęstość mocy plazmy w dyfuzyjnej obróbce plazmowej	196
7.2. Nawęglanie	198
7.2.1. Temperatura	202
7.2.2. Czas	204
7.2.3. Stale do nawęglania	205
7.2.4. Nawęglanie w ośrodku stałym (w proszkach)	207
7.2.5. Nawęglanie w cieczy	209
7.2.6. Nawęglanie gazowe	210
7.2.7. Nawęglanie próżniowe	214
7.3. Plazmowe procesy dyfuzyjne obróbki warstwy wierzchniej	216
7.4. Nawęglanie w złożu fluidalnym	221
7.5. Obróbka cieplna po nawęglaniu	222
7.5.1. Mikrostruktura stali nawęglonej	223
7.5.2. Węglik	225
7.6. Azotonawęglanie	226
7.6.1. Azotonawęglanie w cieczy	229
7.6.2. Azotonawęglanie gazowe	230
7.7. Azotowanie	230
7.7.1. Warstwa wierzchnia i jej mikrostruktura	231
7.7.2. Charakterystyka procesów azotowania i nawęglania	234
7.7.3. Stale do azotowania	234
7.7.4. Azotowanie w cieczach	237
7.7.5. Azotowanie gazowe	238
7.7.6. Azotowanie plazmowe	240
7.8. Węgloazotowanie	242
7.8.1. Węgloazotowanie w kąpieli solnej	242
7.8.2. Węgloazotowanie gazowe	243
7.8.3. Węgloazotowanie plazmowe	244

7.9. Borowanie	245
7.9.1. Borowanie w proszkach	248
7.9.2. Borowanie z zastosowaniem pasty	249
7.9.3. Borowanie wielopierwiastkowe	249
7.10. Warstwy wierzchnie wzbogacone dyfuzyjnie pierwiastkami substytucyjnymi	250
7.10.1. Aluminowanie	250
7.10.2. Wanadowanie	254
7.10.3. Chromowanie	255
8. Osadzanie z fazy gazowej chemiczne (CVD) i fizyczne (PVD)	258
8.1. Osadzanie chemiczne z fazy gazowej (CVD)	258
8.1.1. Wytwarzanie powłok TiC procesem CVD	263
8.1.2. Osadzanie TiN procesem CVD	263
8.1.3. Osadzanie Al ₂ O ₃ procesem CVD	264
8.1.4. Średnotemperaturowe procesy CVD (MTCVD) nanoszenia warstw Ti(C, N) i Al ₂ O ₃	265
8.1.5. Niskotemperaturowy proces CVD (bez wspomagania plazmą)	265
8.1.6. Wspomagane plazmą CVD(PACVD)	266
8.1.7. Mikrostruktura powłok CVD	266
8.2. Osadzanie fizyczne z fazy gazowej (PVD)	267
8.2.1. Osadzanie reaktywne	269
8.2.2. Naparowanie	271
8.2.3. Wytwarzanie materiałów w postaci pary w procesach PVD	272
8.2.4. Rozpylanie	273
8.2.5. Rodzaje rozpylania	275
8.2.6. Napyłanie jonowe	276
8.2.7. Triodowe napyłanie jonowe	277
8.2.8. Procesy PVD stosujące plazmę o częstotliwości radiowej i wyższej	278
8.2.9. Czynniki kształtujące mikrostrukturę powłok PVD	278
8.3. Powłoki wytwarzane procesami CVD i PVD	279
8.4. Powłoki diamentopodobne (DLC)	281
8.5. Implantacja jonów	282
9. Powłoki ogniowe	284
9.1. Wytwarzanie powłok ogniowych	286
9.2. Proces okresowy	287
9.3. Proces ciągły	
9.3.1. Powlekanie Zn	289
9.3.2. Powłoki Zn-Fe	291
9.3.3. Powłoki Al	292
9.3.4. Powłoki cynk-aluminium	293
9.4. Powlekanie ogniowe cyną	293
9.5. Powłoki Pb-Sn	295

10. Powłoki galwaniczne	297
10.1. Powłoki elektrolityczne	297
10.1.1. Przygotowanie podłoża do powlekania	300
10.1.2. Powłoki Cr	301
10.1.3. Powłoki Ni	302
10.1.4. Powłoki dwuwarstwowe Ni i Cr	303
10.1.5. Powłoki Sn	303
10.1.6. Powłoki Sn-Ni	306
10.1.7. Powłoki Sn-Zn	306
10.1.8. Powłoki Zn	306
10.1.9. Powłoki Zn-Ni	307
10.1.10. Powłoki Zn-Fe	307
10.1.11. Powłoki metali szlachetnych (Au, Ag, Pt)	307
10.1.12. Powłoki elektroforetyczne	307
10.1.13. Powłoki kompozytowe elektrolityczno-elektroforetyczne	308
10.2. Powłoki chemiczne	308
10.2.1. Powłoki Ni	309
10.2.2. Powłoki Ni-P	310
10.2.3. Powłoki Ni-B	311
10.2.4. Powłoki stopów trójskładnikowych Ni	311
10.2.5. Powłoki kompozytowe	311
10.3. Powłoki konwersyjne	312
10.3.1. Anodowanie	312
10.3.2. Anodowanie konwencjonalne aluminium	313
10.3.3. Anodowanie twarde aluminium	314
10.3.4. Anodowanie mikrołukowe stopów aluminium	315
10.3.5. Utlenianie	315
10.3.6. Fosforanowanie	316
10.3.7. Chromianowanie	318
11. Natryskiwanie cieplne	320
11.1. Procesy natryskiwania cieplnego	323
11.1.1. Natryskiwanie płomieniowe	323
11.1.2. Natryskiwanie z dużą prędkością	324
11.1.3. Natryskiwanie naddźwiękowe HVOF	325
11.1.4. Natryskiwanie detonacyjne	328
11.1.5. Natryskiwanie łukowe	327
11.1.6. Natryskiwanie plazmowe	328
11.1.7. Natryskiwanie z zastosowaniem zimnego gazu	330
11.2. Charakterystyka powłok	331
11.3. Materiały natryskiwane	332
12. Napawanie	335
12.1. Rozcieńczenie	336
12.2. Podłoże	337
12.3. Procesy napawania	338

12.3.1. Napawanie gazowe	338
12.3.2. Napawanie łukowe elektrodą nietopliwą osłonie gazowej	340
12.3.3. Biegunowość połączenia	341
12.3.4. Napawanie łukowe elektrodą topliwą osłonie gazowej	342
12.3.5. Napawanie łukowe ręczne elektrodą otuloną	343
12.3.6. Napawanie plazmowe	344
12.3.7. Napawanie łukiem krytym (pod topnikiem)	345
12.3.8. Napawanie laserowe	346
12.4. Laserowe wzbogacanie warstwy wierzchniej w pierwiastki stopowe	346
12.5. Materiały do napawania	347
12.5.1. Stopy żelaza do napawania	348
12.5.2. Stopy austenityczne	350
12.5.3. Węgliki wolframu	352
13. Powłoki malarskie	353
13.1. Wyroby lakierowe	353
13.1.1. Rodzaje wyrobów lakierowych (farb)	355
13.1.2. Klasyfikacja farb ze względu na rodzaj substancji błonotwórczej	357
13.1.3. Malowanie	361
13.1.4. Powłoki organiczne nanoszone w sposób ciągły na wyroby stalowe	364
13.2. Powłoki z emalii porcelanowej	366
Pojęcia i ich definicje	369
Bibliografia	401
Skorowidz	403

oprac. BPK