

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. | Szklą 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 międzykryształiczna | 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. | Węglazotowanie | 242 |
| 7.8.1. | Węglazotowanie w kąpeli solnej | 242 |
| 7.8.2. | Węglazotowanie gazowe | 243 |
| 7.8.3. | Węglazotowanie 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. | Aluminiowanie | 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 wspomaganie 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 | 288 |
| 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 | 295 |
| 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 | 326 |
| 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 w osłonie gazowej | 340 |
| 12.3.3. Biegunowość połączenia | 341 |
| 12.3.4. Napawanie łukowe elektrodą topliwą w 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. Węglik 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 |

